

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Янсонс Марини Оскарівни
“Модифікований метод прямих в задачах вісесиметричних тіл при
термосиловому навантаженні»,
представленої до спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка

На експертизу представлено дисертаційну роботу загальним обсягом 180 стор., автореферат і копії 17 наукових праць, в яких опубліковано основні результати дисертації, а також 4 довідки про впровадження.

Актуальність теми. Конструкції або їх частини, що мають вісесиметричну геометрію, широко застосовуються в авіаційній та космічній галузях, а також в машинобудуванні та будівництві. Визначення параметрів деформування вісесиметричних тіл на основі поширених двовимірних моделей, не завжди відповідають вимогам точності. Тому актуальним є створення підходів, які дозволять визначати компоненти напружено-деформованого стану на основі співвідношень просторової теорії пружності при дії силових та температурних зовнішніх впливів. Це дає можливість отримати найточніші результати, які урахують всі компоненти напруженого стану. З урахуванням складності розв'язку поставленої проблеми важливим аспектом при розробці підходів дослідження напружено-деформованого стану вісесиметричних тіл в просторовій постановці є потреба паралельного використання чисельних та аналітичних методів, для економії розрахункового часу та збільшення точності отримуваних результатів. В представленій роботі, розв'язок задач на основі співвідношень просторової теорії пружності базується на аналітичному методі Бубнова-Гальоркіна, де розв'язувальні функції задано у вигляді рядів Фур'є, та чисельному - дискретної ортогоналізації.

Згідно проведеного в роботі огляду літератури стосовно дослідження напружено-деформованого стану вісесиметричних тіл можливо зробити висновок, що проблеми тривимірного розрахунку НДС тонких пластин та оболонок циліндричної форми та товстих оболонок при температурних впливах вивчені недостатньо. Водночас, на встановленні параметрів напружено-деформованого стану при температурних впливах, базується прогноз надійного функціонування такого типу конструкцій. Тобто ці питання представляють собою нагальну та особливо важливу проблему, що має як наукове так і прикладне значення.

Основний зміст роботи. Робота присвячена розробці комплексного підходу до вирішення такого типу задач деформування вісесиметричних тіл під впливом статичних та температурних навантажень з використанням модифікованого

методу прямих. Для розв'язання таких задач використовуються комбіновані аналітично-чисельні методи (МСЕ, варіаційні, різницеві, проєкційні методи та ін.). Дані методи в певних модифікаціях використовують для зниження вимірності вихідних диференціальних рівнянь алгоритми, побудовані на проєкційних співвідношеннях.

У вступі міститься загальна характеристика роботи - обґрунтування актуальності, формулювання мети і задач дослідження, наукової новизни, визначення практичної цінності, дані про особистий внесок здобувача та апробацію роботи (публікації) та ін.

В першому розділі детально розглянуто розвиток досліджень напружено-деформованого стану віссиметричних тіл обертання. Здійснений аналіз переваг та недоліків використовуваних аналітичних, наближених чисельних методів та комбінованих методів, та, зокрема також методу прямих, який становить основу для вирішення поставлених в дисертації задач. Приведено основні ідеї та можливості модифікованого методу прямих для розв'язання задач теорії пружності та термопружності та доведено можливості і перспективи його використання.

Обґрунтовано використання комбінованих методів для розв'язання практичних задач, як один з найпоширеніших та ефективних наукових підходів будівельної механіки. Основою таких підходів є зниження вимірності вихідної задачі по одній з двох просторових змінних, що значно спрощує отримання результатів розрахунків. Для зниження вимірності використовувались певні припущення та гіпотези. Зростаюче використання чисельних методів в сучасних програмних комплексах дало поштовх розвитку комбінованих методів для розв'язання редукованих задач, та стало невід'ємною їх частиною.

Проведений аналіз методу прямих, його історичний розвиток та модифікація до сучасного стану. Наведені переваги методу, та способи позбавлення недоліків для можливості розповсюдження методу на обраний клас задач будівельної механіки.

Проаналізовані сучасні методики розрахунку будівельних конструкцій нетонких пластин та оболонок віссиметричної форми і програмні розрахункові комплекси, які мають змогу розраховувати такі об'єкти з врахуванням статичних і температурних впливів. Відмічена постійно зростаюча необхідність більшої точності розрахунку будівельних конструкцій та способи її досягнення.

У другому розділі розглянуто побудову розрахункових моделей для об'єктів, що мають віссиметричну геометрію, в циліндричній системі координат: сформовані вихідні рівняння теорії пружності та початкові і граничні умови для них. Проведено перетворення рівнянь віссиметричної задачі до рівнянь плоскої задачі Коші, проведено зниження її вимірності по осьовій та окружній

координатах. Для зниження вимірності просторової задачі використані співвідношення Коші, що описують співвідношення між взаємодією напружень та деформацій.

Сформовано системне уявлення про розробку комплексного підходу до вирішення задач зниження вимірності диференціальних рівнянь теорії пружності з використанням модифікованого методу прямих та застосування програмного забезпечення для чисельної реалізації підходу.

Запропоновано і розроблено модифікований варіант методу прямих, структура якого відповідає сучасним вимогам до комбінованих методів: на першому етапі виконується зниження вимірності вихідних рівнянь на основі проєкційного методу, а на другому етапі знаходяться компоненти двічі коваріантного метричного тензора в евклідовому просторі з вибраним основним базисом.

У *третьому розділі* проаналізовані основні ідеї та підхід до зниження вимірності вихідних рівнянь теорії пружності в модифікованому методі прямих та задоволення природніх граничних умов по методу Бубнова-Гальоркіна-Петрова, де в якості базисних функцій використовуються локально зосереджені функції – «функції кришки». Зниження вимірності рівнянь модифікованим методом прямих по радіальній координаті приведено на прикладі циліндричного тунелю на пружній основі, по коловій координаті – на прикладі кільцевої пластини. Зниження вимірності по осьовій координаті розглянуто з використанням методу Бубнова-Гальоркіна-Петрова на основі локально зосереджених функцій. В усіх перелічених випадках сформовані вирази для граничних і початкових умов з урахуванням подальшої можливості редукованих задачі сучасними чисельними методами.

У *четвертому розділі* висвітлений алгоритм роботи програмного забезпечення для чисельного дослідження напружено-деформованого стану вісесиметричних задач з використанням модифікованого методу прямих в поєднанні з програмним комплексом LIRA SAPR. Для тестування методики проведено чисельне моделювання задачі про теплопровідність товстостінного циліндру. Проведено чисельне реальних задач про дослідження напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів в місцях переходів через перешкоди та компенсатори від комплексного навантаження, та чисельне моделювання напружено-деформованого стану тунелю метрополітену з урахуванням всіх типів навантажень в екстремальних умовах.

У *висновках* сформульовано основні результати отримані при вирішенні наукових задач даної дисертації.

Обґрунтованість та достовірність основних положень та здобутих результатів забезпечується математичною коректністю постановки задач;

застосуванням надійних методів чисельного та аналітичного інтегрування при розв'язанні лінійних однорідних і неоднорідних систем диференціальних рівнянь; збіжністю отриманих результатів при використанні чисельних методів та контролем їх точності, а також узгодженням здобутих результатів розв'язків задач з приведеними в науковій літературі.

Наукова новизна одержаних результатів:

- *вперше модифіковано* варіаційний принцип стосовно виведення тривимірних диференціальних рівнянь в частинних похідних, що в рамках лінійної теорії пружності тіла описують деформування товстостінних і нетонких пластин та циліндричних оболонок, в тому числі товстостінних;

- *вперше виконано* приведення тривимірних систем диференціальних рівнянь до одновимірних при використанні процедури методу Бубнова-Гальоркіна, за яким всі функції напружень й переміщень розкладаються у подвійні тригонометричні ряди за коловим напрямком і вздовж твірної циліндра так, щоб вони задовольняли крайовим умовам;

- *удосконалено та розроблено* нову методику чисельного розрахунку напружено-деформованого стану для нетонких пластин та циліндричних оболонок, в тому числі товстостінних, яка дозволяє отримувати результати, які не викликають ніяких сумнівів стосовно їх достовірності.

- *вперше розроблено* програмне забезпечення з використанням алгоритмів, що ґрунтується на основі напіваналітичного модифікованого методу прямих, працює в поєднанні з сучасним розрахунковим програмним комплексом LIRA SAPR та з його використанням розв'язано нові задачі визначення параметрів напружено-деформованого відповідальних вісесиметричних елементів конструкцій - трубопроводів в місцях компенсаторів та переходів через перешкоди і тунелю метрополітену при екстремальних умовах експлуатації при різних комбінаціях дії зовнішніх силових та температурних факторів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці підходів та відповідних алгоритмів, що представлені в програмному забезпеченні і використовуються для чисельних розрахунків задач деформування нетонких пластин та циліндричних оболонок, в тому числі товстостінних при різних комбінаціях дії зовнішніх силових та температурних факторів, з врахуванням різних граничних умов. Результати роботи суттєво розширюють можливості використання підходів будівельної механіки при впровадженні розробленого розрахункового підходу для розв'язку просторових задач деформування вісесиметричних тіл.

В публікаціях, що підготовлені за участі співавторів, результати роботи здобувача вказані у списку опублікованих праць за темою дисертації.

Особистий внесок здобувача. Формулювання наведених в дисертації наукових положень, отримання результатів, висновків і пропозицій здійснене авторкою самостійно та є її науковим доробком. У наукових працях, опублікованих у співавторстві з В.К. Чибіряковим, А.М. Станкевичем, О.П. Кошевим, Д.В. Левківським, авторці належить: [1-6] - виведені редуковані рівняння модифікованого методу прямих, досліджено достовірність результатів, розроблено програмне забезпечення алгоритмічною мовою C++; [7-8] - здійснена числова обробка результатів, перевірена точність та збіжність методу для розв'язання прикладних задач; [9-10] - виведені редуковані рівняння та граничні умови, проведена чисельна реалізація модифікованого методу прямих для вісесиметричних тіл від силових і температурних впливів, перевірена його точність та збіжність; [11-13] - проведено чисельне моделювання прикладних задач, перевірена точність та збіжність методу; [14] - розроблений підхід та виведені рівняння для розв'язання задач нестационарної теплопровідності вісесиметричних тіл; [15-16] - проведено чисельне моделювання прикладних задач модифікованим методом прямих в поєднанні з програмним комплексом LIRA SAPR.

В авторефераті дисертації достатньо повно викладені основні положення та результати роботи, які є ідентичними до змісту дисертації.

Текст і графічні матеріали дисертації та автореферату оформлені відповідно вимог, що пред'являються до дисертацій Міністерством освіти і науки України.

Зауваження:

1. В п.2.2 доцільно було б пояснити перетворення, виконані при переході від рівнянь (2.3) до (2.4) і б навести пояснення величин $R_0, x, \bar{R}_l, \bar{\theta}_l, \bar{Z}_l$. Зауважимо, що в авторефераті пояснення цих величин, як складових навантаження, наявні.
2. П.2.3 «Початкові і граничні умови» на стор. 70-72 містить докладне формулювання граничних умов для тривимірної задачі в загальному вигляді в декартовій системі координат. Оскільки в роботі розглядаються вісесиметричні тіла, здається достатнім було навести формулювання граничних умов у циліндричній системі координат, як це зроблено у попередньому параграфі для співвідношень Коші і закона Гука.
3. П.4.2 носить назву «Тестування методики та програмного забезпечення на прикладі задачі про теплопровідність циліндру», але містить не лише результат розв'язання задачі, назва якої винесена в заголовок, а і результати моделювання напружено-деформованого стану циліндричного елемента конструкції від температурного та силового впливу (комплексного навантаження). В початковій частині параграфа зазначено, що ця друга задача «...вирішена для перевірки запропонованої методики при розрахунок»

на термосилові впливи». Разом з тим порівняння отриманих результатів для цієї задачі з відомими еталонними результатами не проведено. Результатів розв'язання саме такої задачі - при саме такій комбінації величин температур та розподілу зовнішніх навантажень - скоріше за все в літературі немає. Але, використовуючи відомі хрестоматійні розв'язки типових задач при окремій дії навантажень, можна було виконати перевірки результатів при дії складових силового навантаження: по напруженнях – на основі розв'язку задачі про деформування товстостінного циліндра (відома «Задача Ляме»), по переміщеннях від дії розподіленого вздовж вісі труби зовнішнього навантаження - по розв'язку задачі про згин стержня, жорстко затисненого з обидвох кінців. У поданому вигляді ця задачі являє собою не тестову задачу, а окрему прикладну задачу і подання її саме в такому вигляді дозволило б розширити представлення можливостей методики.

Щодо представлення результатів цієї задачі про деформування циліндричного елемента від комплексного навантаження (рис.4.4) зауважимо, що показані дотичні напруження мають порядок $10^{-8} \dots 10^{-11}$ – «технічні нулі», доцільність демонстрації яких у вигляді епюр не очевидна.

При отриманні розв'язувальних співвідношень в попередніх розділах роботи вісь z – вісь обертання тіла, а в представленні результатів – одна з вісей в площині поперечного перерізу циліндра.

4. В п.4.3 при збиранні навантажень для розрахункової схеми труби з теплоносієм проекція власної ваги на горизонтальну площину, так само як і ваги теплоносія, не є рівномірно розподіленою. В тексті після рис.4.14-4.16 при описі цих рисунків зазначено: «На Рис.4.14-4.16 показані результати розрахунку нормальних та дотичних напружень в перерізі», в той час як на рисунку показані лише нормальні напруження.
5. В п.4.4. при описі навантажень не обумовлена глибина залягання тунелю – це є важливим для визначення характеру розподілення навантажень, пов'язаних із боковим тиском ґрунту. Далі перелічуються навантаження - температурні, силові, кінематичні, електричні і т.д - але в даній залачі розглядаються лише силові і температурні навантаження.
6. В розділі 4 п.4.5 здається зайвим: результати впровадження висвітлюються в загальному описі роботи у вступі я підтверджені копіями документів в додатку, що є цілком достатнім.
7. В тексті дисертації не одоразово використовується термін «рішення задачі» або «вирішення задачі» замість «розв'язання задачі» як процедура або «розв'язок задачі» як результат (наприклад стр. 29 – два перших абзаци, стор. 30 – другий і третій абзаци; стор.31 – останній абзац; стор 51 – перший і другий абзац; стор 128 – перший абзац та інші).

Надані зауваження не зменшують загального позитивного враження від представленої дисертації, а їх урахування, зокрема, дозволило б більш чітко описати розроблені методики і отримані результати та висвітлити можливості методики. Разом з тим ці зауваження не ставлять під сумнів достовірність та наукову новизну і обґрунтованість отриманих здобувачем результатів, а також їх практичне значення. В цілому, викладення результатів роботи виконано логічно і послідовно, на високому науковому рівні.

Висновки про відповідність роботи вимогам Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота Янсонс Марини Оскарівни "Модифікований метод прямих в задачах вісесиметричних тіл при термосиловому навантаженні" є завершеною науковою працею, в ній отримані теоретично і практично обґрунтовані результати, вона відповідає вимогам пунктів 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року.

Авторка дисертації Янсонс Марина Оскарівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка.

Офіційний опонент

завідувач кафедри динаміки і міцності машин
та опору матеріалів

Національного технічного університету України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

доктор технічних наук, професор

 Сергій ПИСКУНОВ

«Підпис д.т.н., проф. Пискунова С.О. засвідчую»

Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



 Валерія ХОЛЯВКО