

## 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

Дисертаційна робота Янсонс М.О. присвячена визначенню параметрів лінійного напружено-деформованого стану нетонких пластин та циліндричних оболонок, в тому числі товстостінних, від комплексної дії зовнішніх силових та температурних факторів, модифікованим методом прямих.

**Актуальність теми.** Питання зменшення матеріаломісткості конструктивних елементів будівель, споруд, машин та механізмів, що працюють в умовах значних силових, температурних впливів і водночас забезпечення умов їх надійної експлуатації залишаються особливо важливим в сучасних умовах. Конструкції або частини конструкцій, що мають вісесиметричну геометрію, застосовуються в авіаційній, ракетній, космічній галузях, а також в машинобудуванні та будівництві. Зауважимо, що розрахунки параметрів деформування вісесиметричних тіл, які здійснюються на основі поширених двовимірних моделей, не завжди відповідають вимогам стосовно їх точності. Це пов'язане з використанням допоміжних гіпотез, за якими повинні бути враховані деформації поперечного зсуву та обтиснення тіл. Слід мати на увазі, що врахування таких деформацій є важливою складовою дослідження вісесиметричних тіл. Виникає необхідність створення підходів, які дозволять визначати компоненти напружено-деформованого стану на основі співвідношень просторової теорії пружності, для їх використання у розрахунках конструкцій вісесиметричної геометрії під силовим та температурним зовнішнім впливом. При цьому в алгоритмах та підходах до розрахунку таких конструкцій використовуються математичні моделі, які б найповніше враховували особливості просторових задач напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій з вісесиметричною геометрією. Використання тривимірного підходу для розрахунку таких конструкцій, пов'язане із тим, що для оцінки міцності конструкцій, при силовому або температурному впливі, найточніший результат можна отримати лише з використанням всіх компонентів 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.

Як відомо несуча здатність конструкції може бути вичерпана за причини перевищення внутрішніми напруженнями деяких їх граничних значень, згідно проведеного аналізу огляду літератури стосовно дослідження напружено-деформованого стану вісесиметричних тіл можливо зробити висновок, що проблеми тривимірного розрахунку НДС нетонких 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.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, додатку і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 183 сторінки, в тому числі 140 сторінок основного тексту, 70 рисунків, 3 таблиці, додатки на 4 аркушах і список використаних джерел із 210 найменувань на 19 сторінках.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Робота присвячена дослідженням в галузі механіки твердих тіл та вирішенню задач будівельної механіки пов'язаних з напружено-деформованим станом конструкцій під впливом статичних та температурних навантажень, розробкою комплексного підходу до вирішення такого типу задач, з використанням модифікованого методу прямих і його поширення на об'єкти вісесиметричної форми.

Для розв'язання задач опору матеріалів, теорії пружності використовуються комбіновані аналітично-чисельні методи (МСЕ, варіаційні, різницеві, проекційні методи та ін.). Дані методи в певних модифікаціях використовують для зниження вимірності вихідних диференціальних рівнянь алгоритми, побудовані на проекційних співвідношеннях.

У вступі обговорено актуальність теми, окреслено зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформовано мету і задачі дослідження, показано наукову новизну, наукове та практичне значення отриманих результатів.

В першому розділі детально розглянуто розвиток дослідження НДС вісесиметричних тіл обертання. Основні підходи та типи задач, що вирішувались різними вченими. Проаналізовані переваги та недоліки аналітичних і наближених методів, чисельних методів та комбінованих методів, а також методу прямих та його розвиток. 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 підходи до розрахунку будівельних конструкцій нетонких пластин та оболонки вісесиметричної форми, актуальність використання таких форм у повсякденному будівництві в Україні та світі. Оглянуті методики і програмні розрахункові комплекси, які мають змогу розраховувати такі об'єкти будівництва з врахуванням статичних і температурних впливів на них. 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 вісесиметричну геометрію і їх розрахункові чисельні схеми побудовані в циліндричній системі координат. Сформовані вихідні рівняння теорії пружності в циліндричній системі координат та початкові і граничні умови для них. В задачі до плоскої деформації в якій вирішувальні рівняння перетворені до 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 проекційного 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 природних 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 циліндричній координаті зниження вимірності розглянуто на прикладі циліндричної платини, по осьовій координаті розглянуто зниження вимірності з використанням методу Бубнова-Гальоркіна-Петрова на основі локально зосереджених функцій.

Важливим питанням при застосуванні модифікованого методу прямих є запис вихідних розрахункових рівнянь, граничних та початкових умов, від цього залежить ефективність побудови редукованих рівнянь та відповідних граничних та початкових умов, необхідно також передбачити щоб в подальшому редуковані

задачі можна було б розв'язати сучасними чисельними методами. Досвід застосування модифікованого методу прямих свідчить про те, що найкраще для зниження вимірності підходить проєкційний метод, а вихідні рівняння мають вигляд системи диференціальних рівнянь в частинних похідних першого порядку по просторових координатах. В цьому випадку граничні умови мають вигляд алгебраїчних рівнянь, а редуковані розв'язувальні рівняння зводяться до форми Коші.

У четвертому *розділі* висвітлений алгоритм роботи програмного забезпечення для чисельного дослідження НДС вісесиметричних задач з використанням модифікованого методу прямих в комплексі з програмним комплексом ІЛКА 8АРК. Для тестування методики проведено чисельне моделювання задачі про теплопровідність циліндру та продемонстровані можливості роботи програмного комплексу. Проведено чисельне дослідження НДС магістральних трубопроводів в місцях переходів через перешкоди та компенсатори від комплексного навантаження, та чисельне моделювання НДС тунелю метрополітену з урахуванням всіх типів навантажень в екстремальних умовах. Результати отримані в дисертаційній роботі за допомогою ефективного комплексного використання напіваналітичного модифікованого методу прямих та чисельних методів і розробки програмного забезпечення дало можливість впровадити результати роботи в практичне проектування.

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

#### ЗАУВАЖЕННЯ ПО РОБОТІ:

1. Як проаналізувати переваги зниження вимірності по осьовій координаті чи коловій координаті.

2. Яким чином визначаються температурні навантаження.

3. Бажано було б дати більше аналізу результатів представлених на рисунках 4.4, 4.5, 4.17, 4.18.

4. На блок схемі рисунок 4.1 представлено вирішення ряду задач по визначенню навантажень (кінематичних, динамічних,...), але в роботі ці задачі не розглядались.

5. В роботі є ряд стилістичних неточностей (стор. 57 - кінцевих різниць, стор. 91 - в роботах Марчук та Агошков, стор. 94,95 - повторені співвідношення Коші і узагальненого закону Гука (2.1), (2.2), по стандарту підпис рисунків (рисунок, а не рис.).

Висловлені зауваження відносяться до окремих фрагментів досліджень і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи Янсонс М.О.

Обґрунтованість та достовірність основних положень та здобутих результатів забезпечується математичною коректністю постановки задач; узгодженням здобутих результатів розв'язку задач з приведеними в науковій літературі; 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 розв'язанням тестових задач та порівняння їх результатів з результатами інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- *вперше модифіковано* варіаційний принцип, який ґрунтується на використуваному в аналітичній механіці методі Г амільтона, 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 здійснено 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, що дозволяють проводити визначення параметрів напружено-деформованого стану нетонких пластин та циліндричних оболонок, в тому числі товстостінних, поряд з сучасними програмними комплексами, і в той же час, отримувати дані, які не викликають ніяких сумнівів стосовно їх достовірності.

- *вперше розроблено* програмне забезпечення з використанням алгоритмів, на основі напіваналітичного модифікованого методу прямих, що працює в поєднанні з сучасним розрахунковим програмним комплексом ІЛКА 8АРК та розв'язано нові задачі щодо встановлення параметрів НДС стану 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. Практичне значення роботи 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 на основі тривимірних співвідношень теорії пружності. Результати роботи суттєво розширюють можливості використання підходів будівельної механіки при впровадженні розробленого розрахункового підходу для розв'язку просторових задач 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 використанням ПК LIRA SAPR.

#### **Повнота відображення наукових положень в опублікованих роботах.**

Основні положення дисертації в достатньому обсязі викладені у 17 друкованих працях серед яких: 3 статті у фахових журналах, що входять до переліку, затвердженого ДАК України, категорії «А», 3 з них у періодичному виданні, що індексується в науково-метричній базі Web of Science; 12 статей у фахових журналах, що входять до переліку, затвердженого ДАК України, категорії «Б»; дві публікації у збірниках матеріалів та доповідей українських та міжнародних наукових конференцій.

**В авторефераті дисертації** достатньо повно викладені основні положення та результати роботи. Які є ідентичними змісту дисертації.

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

**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 достатньо 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 йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,  
професор кафедри інформаційних  
систем і технологій Національного  
транспортного університету



Підпис завіряю  
Головний начальник відділу кадрів НТУ

Олександр БЕЗВЕРХИЙ

*[Handwritten signature]*