

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Лук'янченко Ольги Олексіївни

**«Чисельна реалізація методу скінченних елементів при ймовірнісній постановці задач надійності та безпеки тонких оболонок з недосконаlostями форми»,**  
поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.23.17 - будівельна механіка

**Актуальність теми дисертації.** Розробка точних і ефективних чисельних методів розрахунку нелінійного деформування та стійкості тонких оболонкових конструкцій є актуальною задачею будівельної механіки. Одним з поширених чисельних методів можна вважати метод скінченних елементів (МСЕ), який реалізований в багатьох сучасних програмних комплексах і застосовується для проектування будівельних об'єктів. Питання врахування в розрахунках різних видів дефектів, які можуть з'явитися в оболонках на протязі всього їх життєвого циклу, важливо для їх безпечної експлуатації та запобігання аварій. На теперішній час спостерігається тенденція до розробки нових і вдосконалення існуючих оболонкових скінченних елементів, уточнення методів розрахунку їх нелінійного деформування та стійкості з метою отримання результатів, які би дозволили покращити співпадіння чисельних і експериментальних даних.

На стадії проектування тонких оболонкових конструкцій важливо забезпечити їх надійну експлуатацію при можливій появі в них дефектів. Ця проблема є задачею будівельної механіки та теорії надійності. Вплив випадкових властивостей навантажень, механічних або геометричних властивостей конструкції на безпеку та надійність може бути встановлено методами математичної статистики та теорії ймовірності. Проблема забезпечення заданої надійності оболонкових конструкцій з можливістю урахування виникнення в них недосконалостей форми та інших дефектів може бути вирішена за допомогою чисельної реалізації ймовірнісних підходів з використанням процедур обчислювальних комплексів скінченноелементного аналізу. Все це визначає актуальність проблеми, вирішення якої представляє значний практичний інтерес.

**Аналіз змісту дисертації.** Дисертація містить вступ, сім розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 330 сторінок, на 280 сторінках з яких викладено основний текст роботи. В дисертації наведено 122 рисунки та 48 таблиць. Список використаних джерел

містить 210 назв. В додатках представлені довідки про провадження результатів дисертаційної роботи та програми моделювання недосконалостей, які створені авторкою.

В представленій роботі вирішується проблема розв'язання задач надійності та безпеки тонких оболонкових конструкцій з недосконалостями форми в ймовірнісній постановці методами обчислювальної механіки.

**У вступі** обґрунтована актуальність теми, визначені мета і задачі досліджень, представлена загальна характеристика роботи.

**В першому розділі** наведені існуючі методи і підходи до вирішення питання надійності та безпеки будівельних об'єктів, які застосовуються в будівельному проектуванні України і в світі. Представлені методи і засоби вирішення забезпечення надійної експлуатації конструкцій з виникненням в них дефектів за допомогою створення діагностичних комп'ютерних моделей.

**У другому розділі** виконано огляд методів і підходів до моделювання недосконалостей форми в задачах нелінійного деформування і стійкості тонких оболонок. Розглянуто питання розв'язання проблеми жорстких зміщень за допомогою створення криволінійних скінченних елементів. Наведена нова схема методу скінченних елементів до побудови геометрично нелінійних скінченноелементних моделей тонких оболонок з недосконалостями форми в криволінійній системі координат. Матриця жорсткості криволінійного скінченного елемента будується за допомогою векторної апроксимації функції переміщень, що представлена рядом Маклорена, коефіцієнтами якого є значення шуканої вектор-функції та її похідних в центрі елемента. Для зменшення розміру нелінійного оператора жорсткості на кожному кроці ітерації створюється лінеаризована матриця жорсткості елемента, вектори нев'язки і навантажень. Недосконалості форми оболонки при побудові скінченноелементних співвідношень враховані як початкове збурення розв'язку. Для розв'язання геометрично нелінійної задачі статички в такій постановці запропоновані: метод покрокового навантаження, в тому числі метод Ньютона-Рафсона та його модифікація з лінеаризацією системи рівнянь рівноваги в околі знайденого напружено-деформованого стану оболонки з врахуванням накопичених в ній зусиль.

**В третьому розділі** наведено новий ймовірнісний підхід до визначення проектної надійності за стійкістю тонких оболонок зі змодельованими недосконалостями форми із застосуванням обчислювального комплексу

скінченноелементного аналізу NASTRAN та основних положень підходу В.В. Болотіна. Представлені алгоритми комп'ютерного моделювання реальних недосконалостей форми тонких оболонок та у вигляді як регулярних так і нерегулярних форм деформування. Застосовані процедури розв'язання задачі стійкості в лінійній постановці методом Ланцоша та геометрично нелінійної задачі статички методом Ньютона-Рафсона програмного комплексу NASTRAN та розроблені авторкою програми, які адаптовані до даного комплексу. Представлені результати дослідження проектної надійності за стійкістю тонких оболонок (зі змінною товщиною стінки та неоднорідної структури) при окремих та сумісній дії навантажень у вигляді кривих та поверхонь проектної надійності для різних видів розподілу недосконалостей.

**В четвертому розділі** оцінено ймовірність безвідмовної за стійкістю роботи довгої гнучкої циліндричної оболонки при чистому згині зі змодельованими недосконалостями у вигляді форми деформування по довгих півхвилях, півсфери та сферичного сегменту з різними товщинами стінки та граничними умовами з недосконалостями у вигляді нижчої форми втрати стійкості при дії поверхневого тиску, паливного резервуару з потоншенням стінки від корозії металу при дії поверхневого тиску від ваги палива в системі із захисною ємністю.

**В п'ятому розділі** представлено і реалізовано методом скінченних елементів ймовірнісний підхід до визначення експлуатаційної надійності за стійкістю тонких оболонок з реальними недосконалостями форми. Скінченноелементні моделі оболонок будуються за допомогою сплайн-кривих комплексу NASTRAN з використанням розробленої авторкою програми візуалізації недосконалостей в заданому масштабі. Експлуатаційна надійність недосконалих оболонок оцінюється за допомогою кривих (поверхонь) проектної надійності оболонок зі змодельованими недосконалостями та граничних значень навантаження, отриманих при розв'язанні геометрично нелінійної задачі статички методом Ньютона-Рафсона. Наведені приклади визначення експлуатаційної надійності резервуарів при дії поверхневого тиску та комбінованого навантаження. Оцінено вплив кілець жорсткості на збільшення області безвідмовної за стійкістю роботи резервуара з реальними недосконалостями форми.

**В шостому розділі** оцінено в ймовірнісній постановці ризик аварії тонкої недосконалої оболонки за рахунок втрати загальної стійкості на основі теорем

теорії ймовірності, підходів нечіткої логіки, методів прийняття рішень в умовах невизначеності як перевищення фактичною ймовірністю аварії теоретичної, закон розподілу якої відповідає однопараметричному розподілу Релея. Області прийнятних значень ризику аварії визначено за величиною інформаційної ентропії. Безпечний ресурс недосконалої оболонки визначено на основі його фактичного зносу з урахуванням експлуатаційної надійності оболонки.

**В сьомому розділі** представлено алгоритм скінченноелементного моделювання дефектів зварних швів оболонкових конструкцій з метою створення діагностичних моделей для структурного моніторингу їх технічного стану. Для багатокласового розпізнавання та прогнозування стану оболонок з дефектами зварних швів в місцях розташування датчиків визначаються нейромережеві класифікатори: деформації і напруження в оболонці за допомогою розв'язання геометрично нелінійної задачі статички методом Ньютона-Рафсона; частоти і форми власних коливань - методом Ланцоша з урахуванням дії експлуатаційного навантаження.

**Наукова новизна.** Основні результати, що складають наукову новизну роботи полягають у чисельній реалізації методу скінченних елементів при ймовірнісній постановці задач надійності та безпеки тонких оболонок з недосконаlostями форми. Авторкою розроблена нова модифікована схема методу скінченних елементів до побудови геометрично нелінійних моделей тонких оболонок з недосконаlostями форми на основі векторної апроксимації функції переміщень у загальній криволінійній системі координат. Вперше представлена чисельна реалізація методом скінченних елементів нового ймовірнісного підходу до визначення проектної надійності за стійкістю тонких оболонок з недосконаlostями форми при окремій та сумісній дії статичних навантажень. Запропоновано новий ймовірнісний підхід до визначення експлуатаційної надійності за стійкістю тонких оболонок з реальними недосконаlostями, який чисельно реалізовано методом скінченних елементів. Наведено ефективний ймовірнісний підхід до оцінки ризику аварії тонких оболонок з реальними недосконаlostями форми та визначення безпечного ресурсу їх експлуатації. Вперше реалізовано ефективний алгоритм комп'ютерного моделювання недосконаlostей форми різної амплітуди тонких оболонок із застосуванням програмного комплексу NASTRAN і створених авторкою програм. Вперше представлено алгоритм комп'ютерного моделювання реальних недосконаlostей форми стінок оболонок за допомогою сплайн-кривих

програмного комплексу NASTRAN з можливістю їх візуалізації в заданому масштабі. Отримано нові розв'язки практичних задач дослідження впливу геометрії, граничних умов, корозії металу, кілець жорсткості на загальну стійкість, надійність та безпечну експлуатацію тонких оболонок з недосконаlostями форми. Наведено новий алгоритм комп'ютерного скінченноелементного моделювання тонких оболонок конструкцій з дефектами зварних швів у вигляді крізних тріщин з урахуванням їх розповсюдження і багатоосередкового розташування для оцінки та прогнозування технічного стану оболонок.

**Достовірність результатів** обґрунтовується строгістю математичних перетворень, узгодженням чисельних результатів з аналітичними результатами інших авторів, збіжністю результатів в залежності від числа невідомих скінченноелементної моделі та точності розв'язання системи рівнянь.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у чисельній реалізації методом скінченних елементів ймовірнісних підходів до розв'язання актуальної науково-технічної проблеми будівельної механіки з визначення надійності та безпеки тонких оболонкових конструкції з недосконаlostями форми як на стадії проектування, так і на стадії їх експлуатації. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при виконанні науково-дослідних робіт та застосовані при проектуванні тонких оболонкових конструкцій.

**Публікації за темою дисертації.** Зміст дисертаційної роботи відображено в 33 публікаціях автора, з яких 3 монографії та 23 статті у фахових наукових журналах і збірниках наукових праць. Робота пройшла апробацію на 7 міжнародних наукових та науково-практичних конференціях.

Зміст автореферату повно відображає основні положення дисертації, його оформлення відповідає всім вимогам.

По розглянутій дисертаційній роботі є наступні **зауваження**:

1. В другому розділі авторкою не вказано чи було досліджено вплив згущення сітки для перевірки збіжності отриманих результатів дослідження стійкості оболонки з недосконаlostями форми при дії комбінованого навантаження.

2. Вважаю, було би доцільно при розгляді безвідмовної за стійкістю роботи сферичних оболонок розглянути вплив недосконалостей форми не лише для оболонок однієї товщини.

2. З дисертації та автореферату не ясно, що є максимально допустимим значенням амплітуди недосконалості форми та як задається необхідне значення надійності оболонки.

3. На мою думку в дисертації треба було зазначити які переваги або недоліки має представлений авторкою підхід до скінченноелементного моделювання стінок зварних оболонок у вигляді сукупності окремих поверхонь над моделлю оболонок з суцільною стінкою.

Зроблені зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку виконаних досліджень. Підходи, що пропонуються, є відображенням сучасних тенденцій в теорії надійності будівельних конструкцій. Представлена дисертаційна робота Лук'янченко Ольги Олексіївни «Чисельна реалізація методу скінченних елементів при ймовірнісній постановці задач надійності та безпеки тонких оболонок з недосконалостями форми» виконана на високому науковому рівні, є завершеним дослідженням, в якому отримані нові наукові результати в галузі будівельної механіки. Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам п.10 і п.13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 року, які висуваються до дисертацій, поданих на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її авторка Лук'янченко Ольга Олексіївна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.17 - будівельна механіка.

Офіційний опонент  
завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка МОН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор

Я.О. Жук

