

## ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора **Зеленцова Дмитра Гегемоновича**  
на дисертаційну роботу **Бессмертного Ярослава Олеговича**  
**«Деформування та стійкість пологих тонкостінних конічних**  
**оболонок при зовнішньому тиску та неоднорідному напружено-**  
**деформованому стані»**

представленої на здобуття наукового ступеня кандидат технічних наук  
за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка

Роботу виконано в Придніпровській державній академії будівництва та архітектури. Науковий керівник – Красовський Василь Леонідович, професор кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів.

Повний об'єм дисертації становить 175 сторінок і включає 6,272 авт. арк. основного тексту, 42 рисунки, 25 таблиць, список використаних джерел зі 162 найменувань на 16 сторінках. Автореферат дисертації містить 24 сторінки.

**Актуальність теми.** Характерні особливості пологих тонкостінних конічних оболонок (легкість і економічність) зумовили їх розповсюдження в сучасному будівництві, головним чином у покрівлях будівель з великими прогонами, у спорудах для зберігання рідин та сипких матеріалів (резервуари, бункери, силоси тощо), у якості елементів корпусів машин та механізмів в аерокосмічній галузі. У зв'язку з тим, що умови експлуатації вказаних конструкцій є різноманітними, при проектуванні пологих конічних оболонок необхідно враховувати не тільки однорідний, а також неоднорідний напружено-деформований стан конструкції. Цей факт призводить до ускладнення та збільшення кількості розрахунків і, як наслідок, до збільшення людино-годин, необхідних для проектування.

Дисертаційна робота Бессмертного Я. О. присвячена розв'язанню складної та актуальної задачі будівельної механіки – моделюванню процесу деформування та втрати стійкості пологих оболонок в умовах неоднорідного НДС. Неоднорідність НДС обумовлена наявністю періодичного дискретного закріплення краю оболонки, комбінацією зовнішнього рівномірного тиску та прикладеної у точці силою та впливом вітрового навантаження.

Все це обґрунтовує актуальність і своєчасність досліджень автора. Вони виконані в складі науково-дослідницьких робіт Придніпровської державної академії будівництва та архітектури «Міцність, жорсткість, стійкість і коливання однорідних і неоднорідних стержнів, пластин, оболонок та композитних конструкцій, включаючи об'єкти біологічного походження» (номер державної реєстрації 0116U006049).

*Вас. Н. 97 - 15/135*  
*26.11.2021*

**Ступінь обґрунтування наукових положень, висновків і рекомендацій.** Обґрунтування наукових положень дисертації витікає з проведеного аналізу сучасного стану науково-технічної та нормативної літератури, чіткого формулювання задач досліджень, постановки лабораторних і чисельних дослідів зі статистичною обробкою їх результатів, використання апробованих апаратів теорії пологих оболонок, сучасних методів розв'язання задач деформування та втрати стійкості методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням сучасних програм для проектування та розрахунку вказаних задач (ANSYS, Lira), а також порівняння результатів чисельних і лабораторних досліджень, що дозволило дисертанту:

- провести експериментальні дослідження процесу деформування та втрати стійкості пологих тонкостінних конічних оболонок при зовнішньому тиску та періодичному дискретному закріпленню краю оболонки;

- визначити залежність для прогнозування появи ефекту статичного резонансу для пологих тонкостінних конічних оболонок при зовнішньому тиску та періодичному дискретному закріпленню краю, на підставі розв'язків задачі стійкості (біфуркації) та задачі на власні коливання;

- розробити вдосконалену модель вітрового навантаження пологої тонкостінної конічної оболонки для аналізу неоднорідного НДС вже існуючих конструкцій або тих, що проектуються;

- виконати чисельне моделювання процесу деформування та втрати стійкості пологих тонкостінних конічних оболонок у середовищі програмного комплексу ANSYS для трьох випадків неоднорідного НДС: періодичного дискретного закріплення краю оболонки, комбінації рівномірного зовнішнього тиску та прикладеної у точці сили та вітрового тиску на поверхню оболонки;

- розробити методичні рекомендації з проектування пологих тонкостінних конічних оболонок при зовнішньому тиску та неоднорідному НДС, а також для аналізу НДС вже існуючих конструкцій.

Наукові висновки ґрунтуються на проведених лабораторних експериментальних і теоретичних дослідженнях та їх порівняння, що підтвердило достатню відповідність дослідних даних їх розрахунковим величинам. Це дозволило здобувачу вдосконалити розрахунково-теоретичний апарат проектування пологих тонкостінних конічних оболонок при зовнішньому тиску та неоднорідному НДС.

**Достовірність і наукова новизна проведених досліджень.** Достовірність досліджень базується на науково обґрунтованій методиці планування лабораторного й чисельного дослідів, ретельному проведенні експериментів з обробкою даних і їх порівнянням, ретельному проведенні



експериментальної частини в лабораторних умовах методом фізичного моделювання з виготовленням малогабаритних зразків пологих тонкостінних конічних оболонок, перевірці адекватності експерименту розрахунковим положенням, тощо.

Наукове значення і новизна досліджень полягає у тому, що дисертантом:

- експериментально обґрунтовано зменшення несучої здатності пологих тонкостінних конічних оболонок та зміну механізму втрати стійкості внаслідок прояви ефекту статичного резонансу при неоднорідному НДС (випадок періодичного дискретного закріплення краю оболонки);

- описано чітку залежність для прогнозування прояви ефекту статичного резонансу при періодичному неоднорідному НДС пологих конічних оболонок, яка базується на розв'язках двох лінійних задач – втрати стійкості (біфуркації) та власних коливань для конічних оболонок з однорідним НДС;

- описано неоднорідний напружено-деформований стан пологих тонкостінних конічних оболонок при комбінованому навантаженні зовнішнім однорідним тиском та силою, що прикладена у точці, та виявлено оптимальні області розташування сили при комбінованому навантаженні, коли несуча здатність пологих конічних оболонок забезпечується у необхідній мірі;

- дістало подальшого розвитку дослідження процесу деформування та втрати стійкості пологих тонкостінних конічних оболонок під впливом вітрового навантаження з застосуванням вдосконаленої розрахункової моделі, яка базується на нелінійному розподіленні інтенсивності зовнішнього тиску на поверхні оболонки.

Такі дослідження виконані вперше.

**Практичне значення роботи** полягає в тому, що автором описана залежність для прогнозування виникнення ефекту статичного резонансу для пологої тонкостінної конічної оболонки при неоднорідному НДС, розроблена модель вітрового навантаження та комбінації зовнішнього рівномірного тиску та сили. Це дозволяє виконувати детальний аналіз НДС конструкцій, що проектуються, або вже існуючих споруд. Основні результати досліджень застосовані при виконанні науково-дослідницьких робіт Придніпровської державної академії будівництва та архітектури «Міцність, жорсткість, стійкість і коливання однорідних і неоднорідних стержнів, пластин, оболонок та композитних конструкцій, включаючи об'єкти біологічного походження» (номер державної реєстрації 0116U006049), а також впроваджені у навчальний процес ДВНЗ «ПДАБА», що підтверджено відповідними актами і довідками.

**Повнота відображень основних положень дисертації у виданих роботах.** За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць, у тому числі

3 статті у наукових фахових виданнях України (2 статті з цитуванням у наукометричній базі SCOPUS), 3 тез за матеріалами конференцій та 2 статті у додаткових наукових виданнях. Видані матеріали достатньо повно висвітлюють основні положення роботи.

**Ідентичність автореферату основним положенням дисертації.** Автореферат складено на державній мові. В методичному плані він написаний логічно та послідовно, добре проілюстрований. Він містить необхідний матеріал для достатнього сприйняття результатів досліджень і віддзеркалює сутність досліджень. Автореферат відповідає змісту дисертації.

**Аналіз змісту дисертації.** Дисертація містить вступ, 5 розділів і висновки.

**Розділ 1** (*короткий огляд літератури і сучасний стан питання дослідження*) присвячено аналізу історії дослідження та стійкості кругових конічних оболонок, яким присвячена велика кількість робіт, як радянських і пострадянських, так і зарубіжних вчених. Автором описано як класичні дослідження, у тому числі – експериментальні, в лінійній постановці, так і геометрично нелінійні теорії деформування і стійкості лінійно пружних конічних оболонок. Окрім цього досліджено низку робіт, в яких у середовищі ПК ANSYS і ЛПА чисельно досліджувалася стійкість пологих конічних оболонок при зовнішньому тиску, як в лінійній, так і в нелінійній постановках. Зроблено важливий висновок, що існує ряд невивчених питань, які вимагають детального дослідження (випадок періодично неоднорідного в окружному напрямку НДС пологої конічної оболонки за умови періодичного дискретного закріплення краю оболонки), а існуючі рішення проблеми вимагають уточнення. З огляду витікають мета, задачі, об'єкт і предмет, а також методи досліджень. Відзначу недостатню кількість іноземних сучасних праць за темою дисертації, які автор проаналізував.

**Розділ 2** (*методика чисельного дослідження деформування і стійкості пологих конічних оболонок у середовищі ПК ANSYS*) присвячено аналізу та описанню методики сучасного чисельного дослідження процесу деформування та втрати стійкості з застосуванням програмних комплексів, як іноземних (ANSYS), так і вітчизняних (ЛПА). Усі розрахунки проводилися методом скінченних елементів (МСЕ) в середовищі вищевказаних програмних комплексів. Автором зазначено, що при розв'язанні нелінійних задач процесу деформування пологих тонкостінних конічних оболонок використовувалися метод Ньютона-Рафсона і метод оптимальної дуги. При розв'язанні біфуркаційної задачі враховувалася лінійна моментність докритичного деформування. Автором виконано порівняння параметрів моделі пологих конічних оболонок, які мають вплив на точність та якість одержаних у ході виконання чисельного дослідження



результатів, а саме тип скінченного елемента, щільність та механізм створення скінченно-елементної сітки, а також стартові параметри методу оптимальної дуги. Внаслідок цього порівняння було одержано оптимальну комбінацію параметрів з точки зору мінімізації обчислювальних витрат для виконання розрахунків та отримання значень несучої здатності пологих конічних оболонок.

**Розділ 3** (*деформування та стійкість пологих конічних оболонок при зовнішньому тиску та періодично неоднорідному напружено-деформованому стані (чисельний та фізичний експеримент)*). У лабораторних умовах було проведено серію фізичних експериментів над пологими тонкостінними конічними оболонками при зовнішньому тиску та періодичному дискретному закріпленні краю оболонки з визначенням форми втрати стійкості та значення несучої здатності конічної оболонки. Автором було виконано чисельне дослідження декількох серій конічних оболонок у середовищі ПК ANSYS та порівняння одержаних результатів з результатами фізичного експерименту. Автором була виведена залежність, яка основана на одержаних чисельних та експериментальних даних і дозволяє точно прогнозувати прояв ефекту статичного резонансу. Слід відзначити достатній науково-методичний рівень планування і проведення експериментальних і чисельних досліджень, виконаних дисертантом.

**Розділ 4** (*деформування та стійкість пологих конічних оболонок та сферичних сегментів при дії комбінованого навантаження у середовищі ПК ANSYS*). Розділ присвячено чисельному дослідженню у середовищі ПК ANSYS процесу деформування пологих конічних оболонок під впливом комбінованого навантаження, представленого у вигляді поєднання зовнішнього однорідного тиску та сили, що прикладена у точці. Зовнішній однорідний тиск представляє дію снігового навантаження або вплив вакуумування внутрішнього простору резервуарів при зливі рідини. Прикладена у точці сила представляє дію ваги людини з оснасткою або будь-якої конструкції, що знаходиться на поверхні пологої конічної оболонки. Автором було проведено аналіз результатів, одержаних при виконанні чисельного дослідження у середовищі ПК ANSYS, на його підставі було визначено області, де вплив сили при комбінованому навантаженні несуттєвий, та області з різким падінням несучої здатності оболонки при зміні точки прикладання сили у просторі. На підставі одержаних результатів було створено ряд методичних рекомендацій по проектуванню пологих конічних оболонок при комбінованому навантаженні зовнішнім тиском та силою у точці.

**Розділ 5** (*деформування та стійкість пологих конічних оболонок та сферичних сегментів при дії вітру у середовищі ПК ANSYS*). Розділ

присвячено чисельному дослідженню у середовищі ПК ANSYS процесу деформування та втрати стійкості пологих тонкостінних конічних оболонок при дії вітрового навантаження. Автором зазначено, що у державних будівельних нормах України ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження та впливи» (зі зміною №1) бракує достатньої інформації стосовно характеру розподілення інтенсивності зовнішнього нерівномірного тиску від впливу вітрового навантаження на пологі конічні оболонки. В рамках дослідження було створено оригінальну розрахункову схему, яка базується на вже існуючих моделях розподілення вітрового тиску по поверхні оболонки, а саме для циліндричних та сферичних споруд. Окрім цього, було додатково проведено аеродинамічне моделювання пологої конічної оболонки у потоці повітря за допомогою вбудованих модулів ПК ANSYS. Автором проведено порівняльний аналіз якісних результатів чисельного моделювання з застосуванням розробленої моделі навантаження конічної оболонки з результатами, які були одержані з використанням вбудованих модулів аеродинамічних розрахунків.

Загальні висновки є логічними та в цілому відповідають пунктам наукової новизни.

Додатково відзначу, що дисертація і автореферат оформлені на достатньому рівні, проілюстровані, складові формул мають відповідні пояснення. Значний дослідний матеріал здобувач представив у вигляді розрахункових схем, графіків, компактних таблиць. Він достатньо чітко формулює висновки по розділах і роботи взагалі, але не вистачає узагальнень по пунктах. Дисертація виконана на високому науково-методичному рівні та має комплексний характер. Наявні як лабораторний, так і чисельний експерименти, які логічно пов'язані між собою.

Технічна новизна дисертації підтверджена актами впровадження у науково-дослідну роботу та учбовий процес.

Автор продемонстрував достатній рівень володіння апаратом лінійних та нелінійних задач теорії конічних оболонок, в тому числі за допомогою скінченно-елементного аналізу, здатність планувати, проводити лабораторні експерименти та обробляти їх результати, аналізувати та представляти їх тощо. Результати досліджень достатньо апробовані на міжнародних та державних конференціях за темою дисертації.

#### **Зауваження та запитання до дисертації:**

1. У першому розділі дисертаційної роботи наведено аналіз сучасних іноземних досліджень конічних тонкостінних оболонок, але слід зауважити наступне – у дисертації розглядаються пологі тонкостінні конічні оболонки, виконані зі сталі Х18Н9н, тоді як у більшості наведених іноземних



дослідженнях розглядаються непологі тонкостінні конічні оболонки, виконаних з композитних матеріалів.

2. У другому розділі доцільно було провести порівняльний аналіз розрахунків в лінійній та нелінійній постановці, які одержані з застосуванням ПК ANSYS та ЛПА, та зазначити обмеження та припущення, що виникають при використанні таких програмних комплексів.

3. У третьому розділі описано серію фізичних випробувань з малогабаритними зразками пологих тонкостінних конічних оболонок, що виготовлені з паперу для креслень. Необхідно вказати, як було враховано особливості матеріалу оболонок, а саме ортотропні властивості матеріалу пологих конічних оболонок.

4. У четвертому та п'ятому розділах проведено чисельне дослідження процесу деформування та втрати стійкості пологих тонкостінних конічних оболонок при комбінованому навантаженні зовнішнім тиском та силою, прикладеною у точці (розділ 4) та при дії вітрового навантаження (розділ 5). Варто зауважити те, що дані оболонки розглядалися як окремі конструкції; доцільно було б додатково розглянути процес деформування конічних оболонок разом з іншими типами оболонок, а саме циліндричні оболонки у якості стінок резервуарів та конічна оболонка у якості зовнішнього покриття.

#### **Загальна оцінка роботи**

1. Розглянута дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому одержані нові науково обґрунтовані результати. Вирішена конкретна наукова задача – досліджено процес деформування та втрати стійкості пологих тонкостінних конічних оболонок при зовнішньому тиску та неоднорідному НДС, що має суттєве значення для підвищення надійності та економічності при проектуванні майбутніх чи аналізі стану вже існуючих конструкцій.

2. Дисертація написана чітко та в стислій формі висвітлює всі частини виконаного дослідження. Поставлені мета і задачі виконані повністю, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів не викликає сумнівів. Структура, обсяг та оформлення дисертації відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

3. Автореферат і опубліковані здобувачем роботи достатньо висвітлюють основні результати проведених досліджень.

4. Дисертація має конкретне впровадження в складі науково-дослідницьких робіт Придніпровської державної академії будівництва та архітектури «Міцність, жорсткість, стійкість і коливання однорідних і неоднорідних стержнів, пластин, оболонок та композитних конструкцій,

включаючи об'єкти біологічного походження» (номер державної реєстрації 0116U006049), що підтверджено відповідними актами.

5. Наведені зауваження не впливають на позитивну оцінку дисертації в цілому. Вона відповідає спеціальності 05.23.17 – Будівельна механіка.

6. Дисертація відповідає діючим вимогам стосовно кандидатських дисертацій (п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів») і вимогам МОН України, а здобувач **Бессмертний Ярослав Олегович** заслуговує присудження йому наукового ступеню кандидата технічних наук.

**Офіційний опонент:**

Завідувач кафедри інформаційних систем  
ДВНЗ «Український державний хіміко-  
технологічний університет»,  
доктор технічних наук, професор

Д.Г. Зеленцов

Підпис завіряю:

Вчений секретар ДВНЗ УДХТУ,  
к.т.н, доцент



Л.Л. Руднева