

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Світличного Сергія Петровича**  
**«Моделі взаємодії м'якого тіла з перешкодою і результати їх дослідження»**,  
що подана на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук за спеціальністю  
01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

### *Актуальність теми дисертації.*

Дослідження фізико-механічних процесів, що протікають в елементах конструкцій авіаційної та космічної техніки при інтенсивному динамічному навантаженні, проводять як з використанням експериментальних і інженерних методик, так і з залученням сучасних числових методів для розв'язання рівнянь механіки суцільних середовищ, що описують динаміку елементів конструкцій. Вивчення таких динамічних процесів експериментальними методами призводить до значних матеріальних витрат і не дозволяє отримати детальну картину розподілу полів напружень, деформацій, швидкостей, переміщень. Математичне моделювання є перспективним напрямком, який активно розвивається в останні десятиліття. Специфіка сучасного розвитку математичного моделювання полягає в переході від найбільш простих моделей до все більш ускладнених, які характеризуються універсальністю, адекватністю опису реальних процесів і високою точністю. Тому актуальною науково-технічною задачею моделювання є розробка числової моделі контактної взаємодії м'якого тіла з лопаткою авіаційного двигуна з метою її подальшого впровадження у практику проектування надійних і безпечно ушкоджуваних конструкцій лопаток, які відповідають сучасним авіаційним правилам.

### *Висновки про обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, достовірність основних результатів.*

При виконанні роботи використовувались фундаментальні положення механіки суцільних середовищ, теорії пружності та пластичності, гідродинаміки, а також сучасні числові методи моделювання, а саме методи скінчених елементів та скінчених різниць і безсітковий метод згладжених частинок для розв'язування системи диференціальних рівнянь. Для проведення наукових досліджень автором використано систему явного динамічного аналізу LS-DYNA. Задовільне узгодження результатів числового моделювання й натурних експериментів свідчить про достовірність основних результатів, отриманих в ході дослідження.

### *Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі.*

Основні наукові результати, що отримані в ході досліджень, є такими:

1. Вперше розроблено гібридну модель для числового аналізу реакції лопатки з титанового сплаву на удар м'якого тіла. Новизна визначається тим, що у моделі сільно використано сітковий та безсітковий методи, за допомогою яких розв'язано контактну задачу ударної взаємодії м'якого тіла з лопаткою. На відміну від існуючих, запропонована автором роботи модель не потребує проведення натурального експерименту для визначення діючих на лопатку

навантажень, що спрощує та прискорює процес дослідження й знижує витрати на їх проведення.

2. Подальшого розвитку набув метод моделювання контактної взаємодії м'якого тіла з лопаткою авіаційного двигуна, який відрізняється від існуючих застосуванням безсіткового методу згладжених частинок для дискретизації м'якого тіла, що дозволило усунути проблеми числової нестійкості розв'язку та розширило область моделювання і дослідження механічних процесів при ударі.

3. Вдосконалено метод ідентифікації параметрів числової моделі та розроблено практичні рекомендації щодо вибору значень вхідних параметрів, виходячи із необхідного співвідношення критеріїв обчислювальної ефективності та точності.

*Практичне значення одержаних результатів* полягає в тому, що розроблену автором комп'ютерну модель контактної взаємодії м'якого тіла з лопаткою авіаційного двигуна може бути використано при проектуванні нових птахостійких лопаток, а також для моделювання аварійних ситуацій, які виникають при експлуатації повітряних суден. Результати дисертаційної роботи використано на Державному підприємстві «АНГОНОВ» (м. Київ), а також впроваджено у навчальний процес Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

*Оцінка структури, обсягу та змісту роботи.* Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 168 сторінок, з них основного тексту 118 сторінок, 89 рисунків по тексту, 5 таблиць по тексту. Список використаних джерел включає 110 найменувань на 12 сторінках. Автореферат і публікації автора повністю розкривають основний зміст дисертації.

У вступі автор обґрунтовує актуальність обраної теми, формулює мету і завдання дослідження, визначає предмет і об'єкт дослідження, зазначає наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, приводить дані щодо публікацій та апробації результатів дослідження.

У першому розділі автор аналізує та класифікує чинники, пов'язані з випадками попадання птахів у авіаційний двигун. Розглядається сучасний стан проблеми дослідження механічних процесів, які супроводжують удар, та виконується аналіз методів дослідження. На основі проведеного аналізу літературних джерел обґрунтовано мету дослідження і шляхи розв'язання сформульованих задач.

Другий розділ присвячено розробці математичної моделі, що описує рух і стан деформованих середовищ у випадку їх ударно-контактної взаємодії. Математична модель складається з рівнянь нерозривності, збереження кількості руху та балансу енергії, які записано в актуальній конфігурації. Система рівнянь доповнена кінематичними, геометричними та фізичними співвідношеннями. Для отримання єдиного розв'язку система рівнянь доповнена граничними, контактними та початковими умовами. Враховуючи складний характер контактної взаємодії м'якого тіла з перешкодою у випадку удару, автор використовує числові методи розв'язання загальної початково-

крайової задачі. В розділі описано гібридну числову модель контактної взаємодії м'якого тіла з перешкодою, в якій спільно використані метод скінченних елементів для дискретизації перешкоди та безсітковий метод згладжених частинок для опису деформування м'якого тіла. Для розв'язання рівнянь руху автор використовує явну скінченно-різницеву схему 2-го порядку.

У третьому розділі наведено результати числового моделювання контактної взаємодії м'якого тіла з жорсткою перешкодою. Розв'язано тестові задачі з метою дослідження впливу форми м'якого тіла й кроку дискретизації за просторовими змінними на розподіл тиску, впливу густини середовища, а також маси і швидкості зіткнення на розподіл тисків і зусиль при ударі. Виконано порівняння результатів, отриманих за допомогою розробленої комп'ютерної моделі з результатами, отриманими за допомогою аналітичних розв'язків та натурних експериментів. Якісне і кількісне узгодження отриманих результатів свідчить про працездатність розробленої моделі.

У четвертому розділі здійснено числове моделювання контактної взаємодії м'якого тіла з перешкодою у разі її пружної та пружно-пластичної поведінки. Автором досліджено реакцію сталевий плити-мішені у разі удару по ній м'якого тіла при різних швидкостях і кутах зіткнення. Визначено вплив граничних умов на форму імпульсу деформацій. Отримані результати числового моделювання порівняно з результатами натурального експерименту. Розділ містить результати дослідження реакції модельної лопатки з титанового сплаву у разі удару по ній м'якого тіла при різних масах м'якого тіла, швидкостях і кутах зіткнення. З використанням розробленої числової моделі досліджено вплив маси м'якого тіла, швидкості і кута зіткнення на зміну динамічного прогину в кінцевому перетині лопатки залежно від часу. Отримано новий результат, який полягає в тому, що зі зменшенням жорсткості лопатки і збільшенням швидкості удару відбуваються нелінійні затухаючі коливання відносно нового положення рівноваги. Причиною несиметричності коливань є пластичні деформації, які виникають у кореневому перерізі лопатки. Задовільне узгодження результатів числового моделювання з даними натурального експерименту свідчить про достовірність отриманих результатів і адекватність розробленої моделі.

**Публікації та апробація результатів.** За результатами проведених досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковано 9 наукових робіт, серед яких 5 статей – в наукових фахових виданнях України з технічних наук, 1 стаття у виданні України, що входить до міжнародної наукометричної бази **Index Copernicus**. Результати роботи апробовані на 3 міжнародних конференціях, матеріали яких опубліковано у 3 тезах доповідей. У повному обсязі робота розглядалась та обговорювалась на 3 наукових семінарах.

**Відповідність щодо дотримання вимог до дисертаційних робіт.** Дисертація Світличного Сергія Петровича є завершеною науковою працею. В ній отримані нові наукові результати, що в сукупності розв'язують актуальну науково-технічну задачу, яка пов'язана з розробкою комп'ютерної моделі контактної взаємодії м'якого тіла з лопаткою авіаційного двигуна. За змістом, метою і розв'язаними задачами дисертація цілком відповідає паспорту

спеціальності 01.05.02—математичне моделювання та обчислювальні методи та профілю спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09. В цілому дисертація відповідає пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016) щодо кандидатських дисертацій.

Викладене вище свідчить про достатньо високий науковий рівень роботи та її відповідність вимогам, що пред'являються до кандидатських дисертацій. Проте слід зазначити і ряд недоліків.

**Основні зауваження по роботі.**

1. Висновки за розділом 1 є дуже стислими.

Щодо огляду літературних джерел, то було б бажано зупинитися більш детально на моделях деформування саме біологічних м'яких тіл, наприклад, на працях Василевського Ю. В., Martins P., Kim J., Bonet J., Wood R.D.

2. Незрозуміло, як отримано вираз для функції згладжування  $\theta\left(\frac{r}{h}\right)$ , (стор. 61) та чи задовольняє вона вказаним на стор. 60 умовам?

3. Як саме обчислюється параметр  $R^2$  – достовірність апроксимації? стор. 76.

4. Було б бажано навести порівняння з експериментальними даними роботи В. Г. Ярещенко. Экспериментальное исследование реакции жесткой плиты на удар птицей, Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 57 (1099), при виконанні якої застосовувалась апаратура АНТК ім. О.К. Антонова.

5. Чи достатньо для опису попадання птаха в двигун користатися задачею про зіткнення птаха з плитою або консольною пластиною? Існують наукові праці (Кузмин М.В., Кирсанов А. Р. Валидация модели заброса птицы на вход в авиационный газотурбинный двигатель, Научный вестник МГТУ МА, 2015, № 212, с.120-126), де на основі системи динамічного аналізу LS DYNA вивчається модель попадання птаха в авіаційний газотурбінний двигун, який розглядається як конструкція з набором лопаток. При цьому у якості моделі птаха як і в роботі, що рецензується, обрано модель, що була запропонована Вилбеком у праці (James S.W. Willbeck. Impact behavior of Low Strength Projectiles, Air Force National Laboratory, 1977).

6. Як отримані дані дозволяють вирішити питання вибору матеріалу для імітаторів?

7. Наявні деякі технічні похибки, некоректні терміни та друкарські похибки.

Стор. 35 - У формулі (2.4)  $r$  не є радіусом вектором, а модулем радіусу вектору. Стор 36 – Незрозуміло, з яких міркувань обрано формулу (2.5), треба було б навести посилання. Стор. 41 - В рівнянні (2.22) права та ліва частини мають різну вимірність ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $\text{кг}$ ). Стор. 42. - Чому не розглядаються нелінійні доданки в виразі (2.27) для швидкостей деформацій? Формула (2.29) відноситься до діагональних елементів, але це не вказано.

У другому розділі через  $\mu$  позначений коефіцієнт Пуассона, та водночас коефіцієнт конденсації. У розділі 3 коефіцієнт Пуассона позначено як  $\nu$ .

Є деякі некоректні терміни та друкарські помилки

Наприклад, замість чисельний треба вживати числовий, замість рішення - розв'язок, або розв'язання, замість щільність – густина, замість розрахувач – обчислювач. Замість рішень у простих функціях треба використати - розв'язків в елементарних функціях, і т. ін.

Друкарські помилки наявні на стор 4, 5, 15, 20, 37, 99 та ін.

**Загальний висновок.** Незважаючи на вказані недоліки, слід відзначити, що робота викликає позитивне враження. Вражає кількість нових числових результатів та їх ретельне обґрунтування. Роботу виконано на високому науковому рівні, а її результати мають як теоретичне так і практичне значення.

Дисертаційна робота «**Моделі взаємодії м'якого тіла з перешкодою і результати їх дослідження**» містить нові наукові результати, які розв'язують важливе науково-технічне завдання, що пов'язане з розробкою числової моделі контактної взаємодії м'якого тіла з лопаткою авіаційного двигуна. Дисертація повністю відповідає 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

На основі вищезазначеного вважаю, що дисертаційна робота **Світличного Сергія Петровича «Моделі взаємодії м'якого тіла з перешкодою і результати їх дослідження»** відповідає пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016) щодо кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02–математичне моделювання та обчислювальні методи.

Доктор технічних наук, професор,  
провідний науковий співробітник  
Інституту проблем машинобудування  
ім. А. М. Підгорного Національної  
академії наук України

О. О. Стрельнікова

Підпис Стрельнікової О.О. засвідчую

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
Учений секретар

Інституту проблем машинобудування  
ім. А. М. Підгорного Національної  
академії наук України



К. В. Максименко-Шейко