

## ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Акімова Дмитра Васильовича **«Напружено-деформований стан оболонкових конструкцій складної конфігурації у екстремальних умовах експлуатації»**, представленою на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 «Механіка деформівного твердого тіла».

Дана дисертаційна робота присвячена аналізу напружено-деформованого стану оболонкових конструкцій складної конфігурації, зокрема ракетно-космічних систем (РКТ), при комбінованому навантаженні і експериментальному дослідженню здатності реальних конструкцій, виконаних із традиційних і композитних матеріалів, витримувати зовнішні силові навантаження у екстремальних експлуатаційних умовах.

**Актуальність теми роботи, її зв'язок з науково - дослідними програмами, планами, темами.**

Перед випробувальне математичне забезпечення аналізу напружено-деформованого стану є суттєвим моментом проектування нової техніки у зв'язку з можливістю значного полегшення силових елементів, зменшення довготривалої експериментальної відробітки, зокрема паливних баків, міжбакових відсіків, головного обтічника ракети-носія, а також зниженням, у ряді випадків, натурних повторних випробувань.

Тому при створенні конструкцій і систем нової техніки необхідні вдосконалені методи та алгоритми розрахунків, які можуть прогнозувати граничні стани конструкцій на базі чисельних підходів, зокрема на базі методу скінченних елементів, що є **безумовно актуальним з точки зору механіки деформівного твердого тіла.**

Проведені у дисертаційній роботі дослідження виконані в межах науково-дослідних робіт кафедри прикладної математики і механіки

Запорізького національного університету із застосуванням експериментальної бази Державного підприємства «КБ Південне» в рамках держбюджетної теми Міністерства освіти і науки України № 0115U00761 «Математичне моделювання конструкцій неоднорідної структури на базі сучасних комп'ютерних технологій», а також «Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми на 2013-2017 роки» та «Стратегії космічної діяльності України на період до 2022 року», затвердженої Наказом Державного космічного агентства України № 100 від 21.05.2015.

**Зміст роботи.** Дисертаційна робота складається із двох анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, шести додатків, включаючи акт впровадження результатів дисертаційного дослідження. Загальний обсяг роботи складає 159 сторінок, містить 70 рисунків, 27 таблиць, список використаних джерел з 141 найменування і 6 додатків на 21 сторінці.

*У першому* розділі роботи надано аналітичний огляд сучасного стану проблем дослідження за темою дисертації, обгрунтовано необхідність подальшого вивчення, доводиться актуальність теми дисертаційної роботи. Основна ідея роботи полягає у розробці і реалізації підходу, оснований на паралельних версіях обчислювальних методів, зокрема геометричного моделювання на базі методу скінченних елементів (МСЕ), застосуванні теорії оболонок Тимошенко-Міндліна і аналізу візуалізації полів деформацій і напружень по поверхні оболонок складної геометричної форми, а також проведенні цільового експериментального дослідження на фрагментах-свідках, що дозволяє прогнозувати напружено-деформований стан і зони найбільш вірогідного руйнування оболонкових конструкцій складної конфігурації. Дисертаційне дослідження спрямоване на удосконалення методів чисельного аналізу напружено-деформованого стану у оболонкових системах і розширення області застосування чисельних підходів на базі

методу скінченних елементів із зниженням вимог до обчислювальних ресурсів.

У *другому* розділі на основі теорії оболонок Тимошенко-Міндліна пропонується чисельний підхід на базі методу скінченних елементів до розрахунку напружено-деформованого стану оболонок складної конфігурації. За створеним програмним забезпеченням досліджено напружено-деформований стан міжступеневого відсіку тришарової конструкції ракети-носія з вуглепластика. Порівняння розрахункових даних на основі запропонованого підходу на базі застосування методу скінченних елементів та комплексу MSC NASTRAN, візуального представлення полів напруження і деформацій з визначенням характеру руйнування та експериментальними даними свідчить про досить високу якісну і кількісну збіжність результатів.

*Третій* розділ присвячено експериментальному дослідженню міжступеневого відсіку з алюмінієвого сплаву при осьовому стисканні і чисельному аналізу напружено-деформованого стану на базі запропонованої скінченно-елементної моделі. Приведені візуалізація процесу деформування та руйнування відсіку з порівнянням розрахунків і результатів проведених статичних випробувань.

Застосування запропонованого програмного забезпечення на базі методу скінченних елементів і програмного комплексу MSC Nastran з експериментальним випробуванням на міцність паливного баку третьої ступені ракети-носія при дії внутрішнього залишкового тиску обговорюються у *четвертому* розділі роботи. Отримала розвиток і застосування система САПР «qzcad» для чисельного аналізу міцності оболонкових конструкцій складної конфігурації у екстремальних умовах експлуатації. Необхідно відзначити, що вперше для дослідження напружено-деформованого стану РКТ використаний метод для побудови триангуляції двовимірних областей, представлених функціонально, що дозволяє знизити вимоги до обчислювальних ресурсів. Дослідження міцності паливного бака третьої

ступені ракетносія «Циклон-4» на базі методу змінної жорсткості реалізовано у системі САПР QFEM. Проведені розрахунки методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу MSC Nastran з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності.

*У п'ятому розділі на основі запропонованого чисельного підходу надані результати дослідження напружено-деформованого стану оболонок тришарової стільникової конструкції головного обтічника під дією комбінації силових факторів. У тому числі досліджено вплив кута намотування волокна зовнішніх шарів тришарового композиту. Надано аналіз розподілу і графічне представлення максимальної інтенсивності напруження у оболонковій конструкції залежно від кута армування і товщини заповнювача.*

*Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці чисельного методу аналізу напружено-деформованого стану і визначення руйнівних навантажень оболонкових конструкцій складної конфігурації при статичному комбінованому навантаженні в екстремальних умовах експлуатації:*

– з використанням просторових скінченних елементів і оболонкових ефектів, створено підхід визначення напружено-деформованого стану оболонок складної форми на основі теорії Тимошенко-Міндліна;

– запропонована математична модель деформування перехідного відсіку і паливних баків, що враховує зміну механічних характеристик матеріалу в результаті переходу в пластичний стан під дією силових і температурних навантажень, яка реалізована у вигляді ітераційного процесу, згідно з яким нелінійна задача зводиться до вирішення послідовності лінійних задач;

– на основі аналізу візуалізації полів деформацій і напружень по поверхні оболонок складної геометричної форми і цільового експериментального дослідження виявлені зони найбільш вірогідного руйнування конструкції в екстремальних умовах експлуатації;

– на основі запропонованого чисельного підходу надані результати дослідження напружено-деформованого стану оболонок тришарової стільникової конструкції головного обтічника при комбінованому зовнішньому навантаженні.

**Достовірність** одержаних результатів і основних наукових тверджень, отриманих у роботі, забезпечується математичною строгістю й коректністю постановок та розв'язування розглянутих задач, використанням відомих методів обчислювальної математики, фізичною інтерпретацією чисельних результатів та їх узгодженням із експериментальними даними.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в створенні вдосконаленого методу та програмного забезпечення розрахунків напружено-деформованого стану з метою прогнозування граничних станів оболонкових конструкцій ракетно-космічної техніки з урахуванням особливостей геометричної форми, властивостей матеріалу і характеру зовнішнього навантаження. Відпрацьована методика експериментального визначення руйнівних деформацій конструкцій РКТ на фрагментах-свідках, що дозволяє прогнозувати напружено-деформований стан оболонкових конструкцій складної конфігурації з традиційних і композиційних матеріалів у екстремальних умовах експлуатації розрахунковими методами.

**Впровадження роботи.** Результати дисертаційної роботи впроваджені у практику Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро (Акт про впровадження від 15 травня 2018 року), а також можуть бути застосовані у наукових установах і організаціях, які пов'язані із створенням оболонкових конструкцій нової техніки.

**Апробація результатів дослідження.** Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковані у 13 наукових працях. З них: 5 робіт – у спеціалізованих виданнях згідно з Постановами МОН України, 1 робота – у міжнародному періодичному виданні, яке входить до науково-метричних баз даних, 7 тез матеріалів міжнародних конференцій, зокрема на Six World Congress «Aviation in XXI-st Century. Safety in Aviation and Space

Technologies» (Kiev, 2014); V Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (м. Запоріжжя, 21-24 травня 2015 р.); на VI Міжнародній конференції «Space technologies: present and future», ( м. Дніпро, 23-26 травня 2017 р.); на Четвертій Міжнародній конференції студентів, магістрів та аспірантів «Інформатика, управління, штучний інтелект» ( м. Харків, 21-23 листопада 2017 р.); на I Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» ( м. Харків, 10-14 вересня 2018 р.).

#### ***Зауваження до дисертаційної роботи:***

*1. У розділі 1 бажано було б більше уваги приділити якісному аналізу існуючих підходів дослідження напружено-деформованого стану оболонкових конструкцій на базі методу скінченних елементів та ефективності застосування сучасних композитних матеріалів.*

*2. Межі застосування запропонованого програмного забезпечення для аналізу напружено-деформованого стану тришарової оболонкової конструкції з вуглепластика надали б можливість з більшою впевненістю застосовувати програмний продукт у практику РКТ.*

*3. Порівняння результатів дослідження не тільки з даними цільового експерименту, але і з даними інших авторів у конкретних випадках було б доцільним.*

**Загальна оцінка дисертаційної роботи.** Зазначені зауваження не знижують наукову цінність дисертаційного дослідження. Автореферат в повній мірі і правильно відображає основний зміст дисертаційної роботи. Наведені в авторефераті та дисертації публікації повністю висвітлюють основні наукові результати. Заявлені висновки роботи відповідають меті та поставленим завданням. Дисертація є закінченою науковою роботою, в якій отримано нові наукові результати, важливі до практичного застосування при

створенні конструкцій нової техніки, вносить суттєвий внесок у розвиток механіки деформівного твердого тіла.

Структура, обсяг та оформлення роботи відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України до кандидатських дисертацій, а її автор Акімов Дмитро Васильович заслуговує присудження вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,

завідувач відділом надійності і динамічної міцності

Інституту проблем машинобудування

ім. А.М. Підгорного НАН України



К.В. Аврамов

*Директор Аврамов К.В. засвідчує.*  
*Генеральний секретар*  
*К.В. Машинська-Шейко*



Вх №34 від 01.02.2019р.