

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Дегтяренко Павла Глібовича
«Напружено-деформований стан та чисельне моделювання силових
конструкцій аерокосмічного машинобудування», що представлена
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 01.02.04 «Механіка деформівного твердого тіла»

Дисертаційна робота присвячена створенню нових і розвитку існуючих чисельних, аналітичних та аналітико-чисельних підходів до аналізу напружено-деформованого стану конструкцій сучасного машинобудування з прогнозуванням зон руйнування і відповідних руйнівних навантажень, а також локальної та загальної стійкості підкріплених оболонкових конструкцій складної конфігурації, зокрема ракетно-космічної техніки (РКТ), при комбінованому статичному зовнішньому навантаженні.

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

Конкурентно здатні вироби сучасного машинобудування, авіаційної, ракетно-космічної техніки та інших галузей у зв'язку з новими представленнями їх розвитку і вирішуваних завдань вимагають постійного вдосконалення процесу проектування конструкцій на базі сучасного математичного забезпечення із застосуванням аналітичних і прямих чисельних методів дослідження з врахуванням досвіду автоматизації інженерних розрахунків, які дозволяють моделювати процеси деформації і руйнування конструкцій складної конфігурації з урахуванням реальної діаграми механічних характеристик матеріалу і наявності тріщини у максимально напруженій зоні досліджуваної механічної системи. При створенні конструкцій нової техніки надійне математичне забезпечення, особливо перед випробувальне моделювання міцності оболонкових конструкцій складної конфігурації, є досить актуальним у зв'язку з необхідністю значного полегшення корпусних силових елементів, зокрема літальних апаратів, а також зниженням, у ряді випадків, натурних випробувань за умови забезпечення поглибленого аналізу на міцність, локальну і загальну стійкість. Останнім часом вказані задачі вирішуються за допомогою комп'ютерних технологій на базі застосування скінченно-елементних моделей з врахуванням реальних діаграм нелінійної деформації та характеру розташування підкріплюючих силових елементів. Принциповим питанням при створенні конструкцій і систем нової техніки є необхідність у ефективних методах та алгоритмах розрахунків, які можуть прогнозувати граничні стани конструкцій на базі аналітико-чисельних методів без

16.04.2021.

проведення дорогого та довготривалого експериментального відпрацювання. Теоретичні, зокрема аналітичні дослідження напружено-деформованого стану і стійкості оболонкових конструкцій складної конфігурації пов'язані із необхідністю застосування різних за характером механічних теорій (наприклад, теорії тонких оболонок і теорії руйнування), що приводить до необхідності застосування методу скінченних елементів. Практичне використання методу скінченних елементів з обчислювальної точки зору вимагає значних обсягів пам'яті і процесорного часу. Отже, цілком можна погодитися з автором даної роботи, що суттєвою проблемою, що визначається тенденціями розвитку механіки деформівного твердого тіла і практичними викликами галузі, є розробка математичних моделей і комп'ютерних технологій для проведення віртуальних руйнівних випробувань оболонкових конструкцій аерокосмічного машинобудування, зокрема для чисельного аналізу руйнівних навантажень ребристих паливних баків ракетноносіїв (РН), у тому числі при наявності тріщини, дослідження стійкості конструкцій при комбінованому зовнішньому навантаженні, зокрема складних підкріплених шпангоутами оболонкових систем типу «циліндр-конус» і «бочка-оживало» при комбінованому зовнішньому навантаженні, кожне з яких здатне викликати втрату стійкості конструкції з аналізом механічних ефектів деформування по відношенню до локальних і загальних форм випинання із застосуванням сучасних асимптотичних підходів і чисельних алгоритмів.

Що стосується актуальності наукового напрямку і теми дисертаційного дослідження, то необхідно послатися, зокрема, на «Стратегію космічної діяльності України на період до 2022 року», затвердженої Наказом Державного космічного агентства України № 100 від 21.05.2015 р., «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019-2023 роки» (Постанова № 30 від 30.01.2019), в яких зазначаються такі пріоритетні напрями, як «1.3.1.1. Методи розрахунку та дослідження напружено-деформованого стану, у тому числі при наявності дефектів різного походження», «1.3.3.1. Динаміка, стійкість, керування і оптимізація взаємодіючих дискретно-континуальних механічних систем», «1.3.5. Механіка ракетно-космічної та авіаційної техніки і наземних транспортних систем». Проведені у дисертаційній роботі дослідження виконані в межах науково-дослідних робіт кафедри прикладної математики і механіки Запорізького національного університету і Державного підприємства «КБ Південне».

Враховуючи необхідність на етапі проектування сучасних машин і апаратів надійного прогнозування напружено-деформованого стану з урахуванням

пластичних деформацій за різними критеріями міцності, а також стійкості складених підкріплених оболонкових конструкцій при комбінованому зовнішньому навантаженні з метою зниження матеріалоемності конструкції в цілому, що визначається тенденціями розвитку механіки деформівного твердого тіла і запитами створення нової техніки, **можна зробити висновок про безумовну актуальність теми дисертаційної роботи**, реалізація якої базується на застосуванні чисельного підходу на базі методу скінченних елементів і аналітичного, зокрема асимптотичного, підходу на базі методу начальних параметрів у матричній формі.

Зміст роботи. Робота складається з двох анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, п'яти додатків, включаючи акт впровадження результатів дисертаційного дослідження.

У першому розділі на основі аналітичного огляду літературних джерел, опублікованих як у вітчизняних так і закордонних журналах, надано аналітичний огляд сучасного стану і висвітлено передумови виникнення проблем дослідження за темою дисертації, обґрунтовано необхідність їх подальшого вивчення та розв'язку, актуальність теми дисертаційної роботи, включаючи аналіз методів і програмного забезпечення дослідження напружено-деформованого стану силових оболонкових конструкцій аерокосмічної техніки та сучасні підходи і методи розрахунку на стійкість неоднорідних оболонкових систем при простому і комбінованому навантаженні, викладаються основні ідеї роботи. Відзначено, що суттєвий вклад у розробку теорій та підходів дослідження міцності і стійкості оболонкових конструкцій і застосування чисельних, зокрема методу скінченних елементів (МСЕ), і аналітичних методів був зроблений вітчизняними вченими.

Основна ідея роботи полягає в розробці і реалізації чисельного МСЕ-підходу до моделювання напружено-деформованого стану при наявності пластичних деформацій за різними критеріями руйнування і тріщини у найбільш напруженій зоні силової оболонкової конструкції, а також аналітико-чисельного методу дослідження критичних навантажень до локальних і загальних форм випинання оболонкових конструкцій аерокосмічної техніки при комбінованому силовому навантаженні з метою зменшення матеріалоемності досліджуваних систем.

Наведений огляд сучасного стану проблеми свідчить про те, що з точки зору застосування чисельних методів потребують розвиток підходи на базі МСЕ для аналізу напружено-деформованого стану оболонок складної геометричної форми і змінної товщини з урахуванням пластичних деформацій матеріалу і наявності тріщини у найбільш напруженій зоні оболонкового відсіку, а також аналітико-чисельні методи розв'язання задач стійкості складених оболонкових конструкцій

при комбінованому зовнішньому навантаженні з аналізом раціональної жорсткості підкріплюючих шпангоутів по відношенню до локальних і загальних форм випинання.

Тому дисертаційне дослідження спрямоване на удосконалення методів чисельного аналізу напружено-деформованого стану у оболонкових системах складної геометричної конфігурації, у тому числі при наявності тріщини, і розширення області їх застосування, а також створення аналітико-чисельного підходу до розв'язання задач стійкості підкріплених оболонкових складених конструкцій типу «циліндр-конус», та «бочка-оживало».

На основі теорії оболонок обертання довільного меридіану зі змінною товщиною у *другому розділі* сформульовано крайову задачу для визначення НДС корпусу двигуна ракети-носія при навантаженні зростаючим внутрішнім тиском. Для визначення руйнівного тиску поетапно розв'язується вісесиметрична задача пластичності. При наявності масивних частин конструкції задача сформульована у просторовій постановці. Розроблена математична модель використана для проведення віртуальних випробувань корпусу двигуна в процесі його навантаження зростаючим внутрішнім тиском до руйнування за критерієм Сдобирєва. Порівняння результатів розрахунків, отриманих при розв'язанні задачі теорії тонких оболонок, і тієї ж задачі в просторовій постановці підтвердили правомірність і ефективність оболонкової моделі.

Третій розділ присвячено розробці підходу до розрахунку НДС та руйнівного навантаження паливних баків ракети-носія при наявності тріщини у найбільш напруженій ділянці конструкції. Особливістю запропонованого підходу є поєднання теорії тонких оболонок із застосуванням методу скінченних елементів з теорією механіки руйнування. Математична модель напружено-деформованого стану баків представляється у вигляді рядів Фур'є по окружній координаті циліндричної оболонки, у поздовжньому напрямку для отримання невідомих функцій застосовується дискретна модель на базі методу скінченних елементів. Для розрахунку НДС баків ракети-носія розроблений пакет програм в середовищі Borland Delphi 6. Визначені коефіцієнти інтенсивності напружень, які отримані з розв'язку системи сингулярних інтегральних рівнянь.

У *четвертому розділі* отримав розвиток і застосування аналітико-чисельний підхід на базі методу начальних параметрів у матричній формі і асимптотичного, зокрема ВКБ-Гальоркін, методу стосовно розв'язання задачі про стійкість підкріплених проміжними шпангоутами складеної оболонкової конструкції типу «циліндр-конус» при комбінованому статичному навантаженні. Спеціальна увага приділена дослідженню впливу дискретності розташування шпангоутів і

жорсткості їх з площини початкової кривизни на величину параметрів критичного зовнішнього навантаження по відношенню до локальних і загальних форм випинання з метою раціонального проектування відсіків конструкції різної геометричної конфігурації. Показано, що у граничних випадках чисельні результати знаходяться у достатній кореляції із даними за відомими публікаціями.

На основі запропонованої математичної моделі і одержаних основних диференціальних рівнянь *у п'ятому розділі* на базі аналітико-чисельний підходу із застосуванням методу скінченних різниць розв'язується задача стійкості перспективної з точки зору сприйняття зовнішнього тиску і осьових зусиль оболонкової конструкції типу «бочка-оживало». При цьому досліджено вплив відносного підйому меридіана відсіків і дискретно розташованих шпангоутів на стійкість «бочкоподібних», «оживальних» і складених оболонкових конструкцій з оцінкою рівної стійкості прольотів і відсіків з виявленням раціональних жорсткісних характеристик підкріплюючих елементів. Необхідно зауважити, що для складеної конструкції з параметром відносної кривизни меридіана, що перевищує 4%, з ростом осьової стискаючої сили виявлений ефект зростання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше запропоновані математична модель і методика чисельного дослідження напружено-деформованого стану та міцності двигуна ракети-носія в процесі навантаження зростаючим внутрішнім тиском з урахуванням процесів пружно-пластичного деформування матеріалу;
- запропонована нова методика визначення інтенсивності напружень у підкріпленому паливному баку ракетноносія при наявності тріщини у зоні максимальних напружень;
- вперше, з використанням методу початкових параметрів у матричній формі із застосуванням асимптотичних методів, запропоновано підхід до розв'язку задач стійкості складених оболонкових конструкцій, зокрема типу «циліндр-конус», з урахуванням дискретного розташування проміжних шпангоутів з площини початкової кривизни;
- вперше доведена ефективність підкріпленої конструкції типу «бочка-оживало» по відношенню до сприйняття комбінованого зовнішнього навантаження з точки зору стійкості до локальних і загальних форм випинання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в запропонованих методах та алгоритмах розрахунку напружено-деформованого стану, а також стійкості оболонкових конструкцій аерокосмічного машинобудування на основі прямих чисельних та аналітико-чисельних підходів і відповідного програмного забезпечення з урахуванням особливостей геометричної форми, жорсткості підкріплюючих елементів і характеру комбінованого зовнішнього навантаження.

Впровадження роботи. Результати дисертаційного дослідження використані у практику Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро (Акт про впровадження результатів наукових досліджень від 21.VI. 2020 року), можуть бути застосовані у наукових установах і організаціях, які пов'язані із створенням конструкцій нової техніки, зокрема аерокосмічного машинобудування.

Апробація результатів дослідження. Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на VII Міжнародній конференції «Space Technologies: Present and Future», (м. Дніпро, 22-24 травня 2019 р.), VII Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (м. Запоріжжя, 24-26 травня 2019 р.), Другій Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій» пам'яті академіка В. І. Моссаковського (м. Дніпро, 10-12 жовтня 2019 р.), науково-практичній конференції «Сучасні розрахунково-експериментальні методи визначення характеристик ракетно-космічної техніки» (м. Дніпро, 10-12 грудня 2019 р.). Дисертація в цілому розглядалася на науково-технічній раді Державного підприємства «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля» (м. Дніпро, 15 березня 2020 року) під керівництвом генерального конструктора академіка НАН України О. В. Дегтярьова, на розширеному засіданні кафедри прикладної математики і механіки за участю учасників наукового семінару «Актуальні проблеми прикладної математики і механіки» Запорізького національного університету під керівництвом д.т.н., професора Грищака В.З., а також на міжкафедральному спеціалізованому семінарі «Механіка деформівного твердого тіла» під керівництвом д.ф.-м.н., професора В. І. Пожуєва при Національному університеті «Запорізька політехніка».

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 8 робіт, в яких відображено основний зміст дисертаційної роботи та етапи її підготовки. З них: 6 робіт– у спеціалізованих виданнях згідно з Постановами МОН України, включаючи 2 роботи– у міжнародних періодичних виданнях, які входять до науково-метричних баз даних Web of Science і Scopus, 2 тези матеріалів міжнародних конференцій.

Зауваження до роботи:

1. У розділі 1 бажано було б більше уваги приділити якісному аналізу напружено-деформованого стану і стійкості анізотропних оболонкових конструкцій.

2. В розділі 3 доцільно обговорити конкретні рекомендації, які пов'язані із наявністю тріщини у найбільш напруженій зоні оболонкової конструкції бака при внутрішньому тиску.

3. По тексту дисертації можна зробити термінологічні зауваження. Наприклад, необхідно вказати на не вдалий вираз на стор. 58 «В основу цього підходу покладено поєднання методу скінченних елементів з елементами механіки руйнування». Доцільно було б сформулювати «В основу цього підходу покладено поєднання теорії тонких оболонок, із застосуванням методу скінченних елементів, з теорією механіки руйнування».

4. Необхідно було б детальніше обговорити межі застосування запропонованих підходів і алгоритмів та перспективи подальших напрямів дослідження.

Загальна оцінка дисертаційної роботи. Зазначені зауваження не знижують наукову цінність дисертаційного дослідження. Структура, обсяг та оформлення роботи відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України, а зміст і результати проведених в дисертації досліджень викладено логічно і аргументовано. Заявлені висновки роботи відповідають меті та поставленим завданням. Автореферат в повній мірі і правильно відображає основний зміст дисертаційної роботи, а наведені в авторефераті та дисертації публікації повністю висвітлюють основні наукові результати дисертаційного дослідження.

В цілому дослідження виконано на високому науковому рівні. Дисертація є закінченою науковою роботою, в якій отримано нові наукові результати, важливі до практичного застосування при створенні конструкцій аерокосмічного машинобудування, в якій зроблено суттєвий внесок у розвиток механіки деформівного твердого тіла.

Робота відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України до кандидатських дисертацій, а її автор **Дегтяренко Павло Глібович**, який є **відомим фахівцем в галузі механіки конструкцій аерокосмічного машинобудування**, заслуговує присудження йому вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю **01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла**.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри механіки
Національного університету
«Запорізька політехніка»



В.І. Пожуєв

вх.№6 від 26.04.2021р.

В.І. Пожуєв
ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"