

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Акімова Дмитра Васильовича «Напружено-деформований стан оболонкових конструкцій складної конфігурації у екстремальних умовах експлуатації», 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 і експериментальних підходів до аналізу напружено-деформованого стану (НДС) з прогнозуванням зон руйнування і відповідних руйнівних навантажень оболонкових конструкцій складної конфігурації, зокрема ракетно-космічної техніки (РКТ), при комбінованому зовнішньому навантаженні у екстремальних умовах експлуатації.

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

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 з врахуванням досвіду використання систем автоматизованого проектування і автоматизації інженерних розрахунків, які дозволяють моделювати процеси деформації і руйнування конструкцій складної конфігурації у екстремальних умовах експлуатації. 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 для РКТ міжступеневих відсіків ракети-носія, головного обтічника і розгінного блоку, а також зниженням, у ряді випадків, натурних випробувань за умови забезпечення поглибленого чисельного аналізу на міцність. Останнім часом задачі міцності реальних конструкцій з високоміцних алюмінієвих сплавів і композиційного матеріалу вирішуються за допомогою комп'ютерних технологій на базі застосування скінченно-елементних моделей з врахуванням реальних діаграм деформування та характеру анізотропії матеріалу. Важливим при

створенні конструкцій і систем нової техніки є необхідність у ефективних методах та алгоритмах розрахунків, які можуть прогнозувати граничні стани конструкцій на базі чисельних методів без проведення дорогого та довготривалого експериментального відпрацювання. Аналітичні дослідження НДС оболонкових конструкцій складної конфігурації пов'язані із значними труднощами при використанні систем диференціальних рівнянь в частинних похідних із змінними коефіцієнтами, при розв'язанні яких може спостерігатися нестійкість чисельного процесу. Практичне використання методу скінченних елементів з обчислювальної точки зору вимагає значних обсягів пам'яті і процесорного часу. Отже, можна погодитися з автором даної роботи, що одним з найбільш актуальних напрямків дослідження є розробка і реалізація паралельних версій відповідних обчислювальних методів. При цьому важливим є розробка способів введення вихідної інформації (задання параметрів моделі) і представлення результатів розрахунків з урахуванням наочності інтерфейсу користувача. Розробка методів геометричного моделювання є самостійною проблемою з точки зору практичного застосування методу скінченних елементів (МСЕ), зокрема у практиці розрахунків елементів РКТ.

При оцінюванні актуальності наукового напряму дисертаційного дослідження можливо послатися, зокрема, на «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2014-2018 роки» (лист № 172.06-15 від 27.05.2014, який рекомендовано науковим установам, вищим навчальним закладам при здійсненні заходів з координації, планування і експертизи тематики і проектів фундаментальних досліджень в галузі природничих, технічних і гуманітарних наук), в яких зазначаються такі пріоритетні напрями, як «розробка чисельних, чисельно-аналітичних методів та алгоритмів обчислювальної математики, розв'язування науково-технічних, фундаментальних і прикладних проблем», «механіка ракетно-космічної та авіаційної техніки і наземних транспортних систем», а також «математичне моделювання та дослідження процесів в космічному просторі». 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.

Враховуючи необхідність на етапі проектування сучасних машин і апаратів надійного прогнозування НДС оболонкових конструкцій складної геометрії при комбінованому навантаженні в умовах, наближених до експлуатаційних, що визначається тенденціями розвитку механіки деформівного твердого тіла і запитами створення нової техніки, можна зробити висновок про актуальність теми дисертаційної роботи, реалізація якої базується на застосуванні чисельного підходу на базі МСЕ з аналізом результатів експериментального дослідження конструкцій.

Зміст роботи. Робота складається з двох анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, шести 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 питання дослідження напружено-деформованого стану оболонкових конструкцій, викладаються основні ідеї роботи. Відзначено, що суттєвий вклад у розробку теорій та підходів дослідження міцності оболонкових конструкцій і застосування чисельних методів, зокрема МСЕ, був зроблений вітчизняними вченими. Основна ідея роботи полягає у розробці і реалізації підходу, оснований на паралельних версіях обчислювальних методів, методі геометричного моделювання на базі МСЕ з урахуванням наочності інтерфейсу користувача, застосуванні теорії оболонок Тимошенко-Міндліна з аналізом візуалізації полів деформацій і напружень по

поверхні оболонок складної геометричної форми і відпрацьованого цільового експериментального дослідження на фрагментах-свідках, що дозволяє прогнозувати НДС і зони найбільш вірогідного руйнування оболонкових конструкцій складної конфігурації з композиційних матеріалів при екстремальних умовах експлуатації розрахунковими методами без проведення дорогого і тривалого натурального експериментального випробування. Обговорюються переваги даного підходу. Наведений огляд сучасного стану проблеми свідчить про те, що з точки зору чисельних методів не достатньо повно освітлені підходи на базі МСЕ для аналізу НДС оболонок складної геометричної форми. Дисертаційне дослідження спрямоване на удосконалення методів чисельного аналізу НДС у оболонкових системах складної конфігурації і розширення області застосування чисельних підходів на базі МСЕ із зниженням вимог до обчислювальних ресурсів.

На основі теорії оболонок Тимошенко-Міндіна у *другому розділі* пропонується чисельний підхід на базі МСЕ до розрахунку НДС елементів РКТ складної конфігурації. Створено програмне забезпечення розрахунку НДС оболонкових елементів, проведені розрахунки реальних конструкцій при навантаженнях, наближених до експлуатаційних. Надана оцінка НДС міжступеневого відсіку тришарової конструкції з вуглепластика. Наведено опис експериментального стенду, методики проведення випробувань при комбінованому зовнішньому навантаженні за програмою конструкторської документації і висвітлені результати експериментальних досліджень. Порівняння розрахункових даних НДС міжступеневого відсіку ракети-носія на основі запропонованого підходу на базі застосування МСЕ та комплексу MSC NASTRAN і експериментальних даних показало достатню якісну і кількісну збіжність розрахункових даних з результатами експерименту з представленням візуалізації полів напруги і деформацій та визначенням характеру руйнування.

Третій розділ включає результати експериментального дослідження міжступеневого відсіку з алюмінієвого сплаву при осьовому стисканні з описом експериментальної установки, чисельним аналізом НДС і порівнянням його із результатами проведених випробувань. На базі запропонованої скінченно-елементної моделі проведено чисельний аналіз НДС міжступеневого відсіку з алюмінієвого сплаву, надана візуалізація процесу деформування та руйнування.

Порівняння розрахунків з результатами проведених статичних випробувань підтверджують достовірність запропонованої математичної моделі дослідження та результатів чисельного аналізу.

У *четвертому розділі* спеціальна увага приділяється застосуванню запропонованого програмного забезпечення на базі МСЕ, комплексу MSC Nastran, та експериментального випробування на міцність паливного баку третьої ступені ракети-носія при дії внутрішнього залишкового тиску. Отримала розвиток і застосування до чисельного аналізу міцності оболонкових конструкцій складної конфігурації у екстремальних умовах експлуатації РКТ система САПР «qzcad». Для дослідження НДС РКТ використаний метод для побудови триангуляції двовимірних областей, представлених функціонально, з безпосередньою побудовою елементів при скануванні вихідної області, що дозволяє понизити вимоги до обчислювальних ресурсів. У САПР QFEM виконано дослідження міцності паливного бака третьої ступені ракето-носія «Циклон-4» на базі методу змінної жорсткості. Проведені розрахунки за допомогою комплексу MSC Nastran з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності. Демонструється кореляція картин руйнування паливного баку при статичних випробуваннях з результатами розрахунків.

На основі запропонованого чисельного аналізу НДС у *п'ятому розділі* надані результати дослідження оболонок тришарової стільникової конструкції головного обтічника під дією комбінації силових чинників. Досліджено вплив кута намотування волокна зовнішніх шарів тришарового композиту. При дослідженні передбачається, що несучі шари зроблені з одно направленого вугле- композита, в якості матриці використовується епоксидний заповнювач. Представлено розподіл максимальної інтенсивності напруження у оболонковій конструкції залежно від кута армування і товщини заповнювача.

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

– з використанням просторових скінченних елементів з урахуванням оболонкових ефектів, створено підхід визначення НДС оболонок складної форми,

зокрема паливних баків двох модифікацій – у вигляді комбінації циліндричної оболонки і двох півсфер і у вигляді комбінації півсфери і зворотного конуса 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;

- вперше запропоновано програмне забезпечення на основі МСЕ і проведено дослідження НДС тришарових оболонок з композиційних матеріалів по деформаційним критеріям;

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

- запропоновано чисельний підхід до аналізу впливу крайових ефектів, обумовлених наявністю в конструкції підкріплюючих шпангоутів.

Достовірність отриманих наукових результатів забезпечується

коректною постановкою задач, співставленням результатів чисельного аналізу із даними експериментального дослідження, відсутністю протиріч між здобутими чисельними результатами і фізичним змістом досліджуваних явищ.

Практичне значення отриманих результатів полягає в аналізі НДС оболонкових конструкцій РКТ з урахуванням особливостей геометричної форми і характеру зовнішнього навантаження. Відпрацьована методика експериментального визначення руйнівних деформацій елементів конструкцій РКТ на фрагментах-свідках, що дозволяє прогнозувати НДС оболонкових конструкцій складної конфігурації з композиційних матеріалів у екстремальних умовах експлуатації розрахунковими методами без проведення натурного експериментального випробування.

Впровадження роботи. Результати дисертаційної роботи впроваджені безпосередньо у держбюджетну тему і практику Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро (Акт про

впровадження від 15 травня 2018 року) , можуть бути застосовані у наукових установах і організаціях, які пов'язані із створенням конструкцій нової техніки.

Апробація результатів дослідження. За результатами виконаних досліджень опубліковано 13 робіт, в яких відображено основний зміст дисертаційної роботи та етапи її підготовки. 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).

Зауваження до роботи:

1. У розділі 1 бажано було б більше уваги приділити якісному аналізу НДС оболонкових конструкцій із композитних матеріалів.
2. Доцільним було б порівняння результатів дослідження із даними інших авторів.
3. Необхідно було б детальніше обговорити ефективність запропонованого підходу на базі методу скінченних елементів у порівнянні із іншими чисельними методами.
4. В тексті дисертації є ряд технічних помилок.

Зазначені зауваження не знижують наукову цінність дисертаційного дослідження.

Загальна оцінка дисертаційної роботи.

Структура, обсяг та оформлення роботи відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України. Заявлені висновки роботи відповідають меті та поставленим завданням. Автореферат в повній мірі відображає основний зміст дисертаційної роботи. Публікації повністю висвітлюють основні наукові результати дисертації.

Дисертація є закінченою науковою роботою, в якій отримано нові наукові результати, важливі до практичного застосування при створенні конструкцій нової техніки, вносить значний внесок у розвиток механіки деформівного твердого тіла.

Робота відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України до кандидатських дисертацій, а її автор Акімов Дмитро Васильович заслуговує присудження йому вченого ступеня кандидата технічних за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент
Член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор,
завідувач відділу міцності і надійності
механічних систем
Інституту технічної механіки НАН України
і Державного космічного агентства України



В. С. Гудрамович

Підпис професора Гудрамовича В. С. засвідчую.

Вчений секретар ІТМ НАНУ і ДКАУ,
ст. наук. співробітник, к.т.н.



О. М. Маркова

Вх N 31 від 31.01.2019р.