

ВІДГУК
офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Дегтярьова Кирила Георгійовича**

**СТАТИЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ
КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТНОЇ ТЕХНІКИ З УРАХУВАННЯМ ЯВИЩ
ГІДРОПРУЖНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ**

що подана на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

за спеціальністю 05.02.09 – «Динаміка та міцність машин»

Актуальність теми дисертаций

У різних інженерних галузях, таких, як авіабудування, ракетно-космічна техніка, енергетика повітряних установок, транспорт, енергетичне машинобудування, хімічна промисловість та ін. широко застосовуються елементи тонкостінних конструкцій, які працюють в умовах підвищених технологічних навантажень. Це резервуари, баки, цистерни для збереження нафти, ракетного палива, легкозаймистих або отруйних речовин. В останні роки відчутно зростання вимог до ефективності та надійності вказаного обладнання в зв'язку з модернізацією нафтохімічного обладнання та проектуванням нових потужних ракет-носіїв. Нові вимоги потребують ретельного аналізу динамічних процесів, що відбуваються в елементах конструкцій при інтенсивному динамічному навантаженні. Хоча найбільш обґрунтовані дані, які характеризують міцність та надійність конструкцій, можуть бути отримані шляхом натурного експерименту на реальних зразках, такі випробування потребують значних матеріальних витрат і часто є небезпечними. Тому все більш поширюються методи, засновані на комп'ютерному математичному моделюванні вказаних процесів та явищ. Але існує низка проблем при побудові програмних засобів для проведення віртуальних випробувань на міцність елементів конструкцій. Так, при дослідженні руйнівних навантажень з'ясовано необхідність врахування не лише пружних та міцнісних характеристик матеріалу, а й діаграми його розтягу та стиснення за умови появи пластичних деформацій. Важливим є наявність детальної схеми навантаження елементу, що розглядається. При вивчені коливань елементів конструкцій, частково заповнених рідиною, не враховуються пружність стінок, змінні рівні заповнювача та перевантажень. Врахування таких факторів може привести до суттєвої зміни розрахункових параметрів досліджуваних конструкцій і потребує побудови нових комп'ютерних моделей та обчислювальних методів.

В зв'язку з цим актуальною проблемою стає розроблення нових ефективних методів комп'ютерного аналізу міцнісних та динамічних характеристик оболонкових конструкцій ракетної техніки на основі

вдосконалених математичних моделей з урахуванням явищ пластиності, гідропружності, що й обумовило тему даного дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Основні задачі дисертаційної роботи розв'язані здобувачем як виконавцем комплексних тем науково-технічних досліджень Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, а саме:

- за держбюджетними науково-дослідними темами:

№ 0111U001758 (III-67-16) «Аналіз та поліпшення динамічних міцнісних властивостей елементів перспективних енергетичних машин та ракетно-космічної техніки під дією навантажень різної фізичної природи»,

№ ДР 0112U002490 «Розробка нових методів та засобів діагностиування енергетичних машин та підвищення їх міцності та працездатності»,

№ ДР ДЗ-71-2019 «Розроблення програмного забезпечення для аналізу динаміки та міцності корпусних композитних елементів з наноармуванням»,

№ ДР 0111U001758 «Розробка наукових основ аналізу нестационарного динамічного напруженого стану елементів енергетичного та іншого обладнання з урахуванням пошкоджень»,

- за договором про міжнародне співробітництво між Інститутом проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України та Вессекським технологічним інститутом, Велика Британія (2014-2021 рр.),

- за господарськими договорами з ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля» «Розробка методів і програм розрахунку динамічного напруженого і граничного стану оболонкових конструкцій при високошвидкісних діях» (2015 р., № SCM YZH SP 03900), «Розробка методів і програм розрахунку тривалості руйнування елементів кріплення БЕ при імпульльному навантаженні (2016 р., № GR2 YZH SPS 25900), «Перевірка працездатності і механічного стану систем кріплення БЕ при транспортуванні на основі комп'ютерного моделювання технологічних і експлуатаційних впливів» (2017 р., № ДР 0117U003630), № ДР 0114U003588 «Розрахункова оцінка вібрацій елементів аерокосмічних систем при силових та аеродинамічних навантаженнях», № ДР 0120U101241 «Підвищення ефективності елементів конструкцій ракетно-космічної техніки шляхом їх чисельного моделювання та оптимізації», № ДР 0117U000880 «Динамічна міцність елементів аерокосмічної та бронетанкової техніки під дією механічних навантажень»,

- за грантом МОН України «Сучасні обчислювальні методи для аналізу плескань в паливних баках з перегородками» в рамках спільних українсько-індійських проектів (2019-2021 рр.)

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

Для побудови основних співвідношень, що визначають статичні та динамічні характеристики елементів конструкцій, використані основні співвідношення механіки суцільних середовищ, теорії пружності та

пластичності. У всіх випадках розглянуто рівняння рівноваги або руху в напруженнях. Використані також співвідношення між напруженнями та деформаціями, або між напруженнями та швидкостями деформацій. Для розв'язування отриманих диференціальних рівнянь застосовано метод зважених нев'язок. При цьому дискретизацію розв'язувальних співвідношень для аналізу деформування досліджуваних елементів конструкцій здійснено на основі методів скінчених та граничних елементів. Для числового аналізу методом скінчених елементів використано програмний комплекс ANSYS.

Також розроблений оригінальний програмний код, що реалізує метод граничних елементів.

Наявність двох методів дала змогу отримати додаткові свідчення щодо достовірності основних результатів дисертаційного дослідження.

Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі.

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

1. Для розрахунку напружено-деформованого стану елементів оболонкових конструкцій ракетної техніки та руйнівних навантажень розроблено нові розрахункові моделі, засновані на методах скінчених та граничних елементів, що дозволяє враховувати реальні діаграми навантаження, ефекти пластичності, гідропружної взаємодії з урахуванням явища плескань.

2. Розроблена методика аналізу міцності перфорованих оболонкових конструкцій при дії статичних та локальних інтенсивних імпульсних навантажень з врахуванням моделі Купера-Саймондса. За допомогою комп'ютерного моделювання здійснено вибір конструкції найменшої товщини, яка витримує задані інтенсивні короткочасні навантаження. Створені наукові основи для побудови практичної технології аналізу напружено-деформованого стану та міцності перфорованих оболонкових конструкцій при комплексній дії статичних та імпульсних динамічних навантажень.

3. Розроблено комп'ютерну методику визначення руйнівного навантаження, в якій віртуальне випробування відтворює схему та методологію натурного експерименту. Результати розрахунку за уточненою тривимірною моделлю довели можливість використання спрощених моделей не лише при віртуальних, а й при натурних випробуваннях баків. Запропонований підхід дає можливість поєднання експериментальних та інженерних методик з високоефективними методами комп'ютерного аналізу для розв'язання рівнянь механіки суцільного середовища, що описують рух елементів конструкцій.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи.

Одержані в дисертації результати можуть бути використані під час проектування нових та при експлуатації наявних аерокосмічних та машинобудівних конструкцій. Створено розрахункову базу для аналізу напружено-деформованого стану, гідропружинних коливань та визначення руйнівних навантажень на елементи конструкцій під впливом інтенсивних силових навантажень. Ряд результатів та рекомендацій прикладних досліджень дисертаційній роботі отримано в результаті виконання сумісних робіт з ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Оцінка структури, обсягу та змісту роботи.

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 121 найменування на 13 сторінках та 2 додатків на 9 сторінках, містить 69 рисунків та 22 таблиці. Загальний обсяг роботи складає 135 сторінок, включаючи 110 сторінок основного тексту.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено предмет і об'єкт дослідження, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, вказані дані щодо публікацій та апробації результатів дослідження.

У першому розділі надані огляд літературних джерел та аналіз існуючих розробок та комп'ютерних технологій, що відносяться до проблем статичного навантаження, коливань та динамічного деформування конструкцій під дією імпульсного навантаження. Проаналізовані теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій під впливом інтенсивних силових механічних навантажень, а також дослідження коливань елементів конструкцій, що мають відсіки, частково заповнені рідиною з урахуванням гідропружної взаємодії. На основі проведеного аналізу літературних джерел обґрунтовано мету дослідження дисертації і шляхи розв'язання сформульованих задач.

Другий розділ присвячений пошуку частот та форм вільних коливань бака ракети-носія, як оболонкової конструкції з відсіками, що мають змінний рівень заповнення рідиною. Досліджені частоти і форми коливань незаповненої конструкції, плескань вільної поверхні рідини, а також частоти коливань конструкції з урахуванням пружності стінок. Задля досягнення поставленої мети надано загальне формулювання задачі стосовно гідропружних коливань оболонкової конструкції, на основі методу зважених нев'язок. Застосовані рівняння нерозривності, збереження кількості руху та рівняння стану. Вважається, що рідина є стисливою та в'язкою. Використано акустичне наближення. Для отримання єдиного розв'язку система рівнянь доповнена граничними, початковими умовами та умовами на поверхні контакту. Отримані скінченно-елементні та гранично-елементні формулювання, окрім отримані гранично-елементні формулювання в термінах тиску та потенціалу швидкостей рідини.

Формулювання в термінах потенціалу швидкостей дає змогу використовувати дані попереднього розрахунку за методом скінчених елементів, тобто створити методику, яка поєднує розрахунки.

З метою тестування здійснені розрахунки частот та форм коливань для тонкостінних оболонок обертання, частково заповнених рідиною. Проведено співставлення з числовими та аналітичними результатами інших авторів, а також з даними власних досліджень при використанні методів скінчених та граничних елементів. Виявлено, що врахування стисливості та в'язкості рідини при заданих фізичних та геометричних параметрах не є суттєвим. Проведені попередні дослідження дозволили проаналізувати найбільш прийнятні типи скінчених і граничних елементів, встановити їх кількість, яка забезпечує

задану точність розрахунків та дати обґрунтований аналіз вільних коливань реального бака ракети-носія. Дані, отримані автором з використанням скінченно-елементного та гранично-елементного формулювань, порівнювались з результатами інших дослідників. Показано добре узгодження результатів. Здійснювалось подрібнення сітки при використанні як методу граничних, так і методу скінчених елементів, що довело збіжність запропонованих методів.

Отримані значення частот і форми пlesкань вільної поверхні рідини паливного баку ракети-носія, побудовані залежності цих значень від рівня гравітації в польоті першого ступеня ракети-носія і залежності від часу польоту в польоті другого ступеня. Встановлено, що нижча частота вільних коливань незаповненого бака може досягатися на вищих гармоніках, проте у випадку пlesкань та коливань конструкції з урахуванням пружності стінок найнижчі частоти досягаються на нижчих гармоніках.

В третьому розділі розглянуто задачу пошуку руйнівного навантаження на паливний бак ракети-носія. Навантаження розглядається як одночасна дія внутрішнього тиску та стискаючої сили на внутрішню поверхню та кришку баку відповідно. Вирішення задачі відбувається з врахуванням пластичних деформацій. Використана теорія малих пружно-пластичних деформацій. Конструкція є оболонкою обертання, що складається з циліндричної, торoidalної і сферичної частин. Визначено руйнівне навантаження на паливний бак з використанням різних скінченно-елементних схем, при цьому комп'ютерне віртуальне випробування відтворювало та використовувало дані натурного експерименту. Запропоновані різні скінченно-елементні розрахункові схеми з метою необхідності врахування конструктивних особливостей та можливості спрощення як віртуального, так і натурного бака. Було проведено розрахунок оболонкової конструкції з використанням оболонкових і тривимірних скінчених елементів у тривимірній осесиметричної постановці з урахуванням пластичних деформацій. Результати розрахунків узгоджуються з експериментальними даними ДКБ «Південне» (різниця становить 10 %). Задовільне узгодження результатів числового моделювання з даними натурного експерименту свідчить про достовірність отриманих результатів і адекватність розробленої моделі.

Зазначена можливість використання спрощених моделей конструкцій в натурних та віртуальних експериментах. Це підтверджується результатами розрахунку за різними варіантами розрахункових моделей та навантажень. Результати розрахунку за уточненою тривимірною моделлю практично збігаються з даними, отриманими для спрощених моделей, несуттєво порушується лише їх симетричність з огляду на появу кронштейна.

Четвертий розділ присвячено дослідженю напружено-деформованого стану перфорованої циліндричної оболонки з періодичною системою отворів. Вважається, що оболонка піддається впливу короткочасного інтенсивного силового навантаження. Розроблена методика аналізу міцності перфорованих оболонкових конструкцій при дії статичних та локальних інтенсивних імпульсних навантажень. Проведено аналіз конструктивних схем, умов кріплення, видів матеріалів та їх властивостей, умов реалізації статичних і

динамічних навантажень. При числовому моделюванні було використано математичні моделі, що описують властивості матеріалу в широкому діапазоні параметрів з високим степенем точності. Запропонований підхід дає можливість поєднання експериментальних та інженерних методик з високоефективними методами комп’ютерного аналізу для розв’язання рівнянь механіки суцільного середовища, що описують рух елементів конструкцій. За допомогою комп’ютерного моделювання здійснено вибір перфорованої конструкції найменшої товщини, яка витримує задані інтенсивні короткочасні навантаження. За результатами сформульовано практичні рекомендації щодо геометричного проектування та вибору оптимальних матеріалів для створення вказаних елементів конструкцій підвищеної міцності.

Публікації та оприлюднення результатів. Матеріали дисертації опубліковані в 21 науковій роботі, серед яких 6 індексуються у базі SCOPUS, 16 статей у наукових виданнях України та іноземних держав, та 5 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій і симпозіумів.

Основні результати дисертаційної роботи були представлені на наукових конференціях всеукраїнського та міжнародного рівнів, а саме:

XV Міжнародний науково-технічний конференції МКММ-2014, присвяченій 160-річчю з дня народження Анрі Пуанкаре (Херсон, 2014);

XXXVII, XXXVIII, XLI, XLII International Conference on Boundary Elements and other Mesh Reduction Methods (United Kingdom 2014, 2015, 2018, 2019);

XVII, XVIII Міжнародних симпозіумах «Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики» (МДОЗМФ – Харків, 2015, 2017);

V, VII Міжнародних конференціях «Космические технологии: настоящее и будущее» (Дніпро, 2015, 2019);

I, II Міжнародних науково-технічних конференціях «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» (Харків, 2018, 2020).

У повному обсязі дисертація доповідалася на засіданні науково-технічної проблемної ради «Математичне моделювання. Механіка деформівного твердого тіла. Динаміка та міцність машин» Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України під керівництвом члена-кореспондента НАН України Ю. Г. Стояна.

Відповідність щодо дотримання вимог до дисертаційних робот.

Дисертація Дегтярьова Кирила Георгійовича є завершеною науковою працею. В ній отримані нові наукові результати, що в сукупності розв’язують актуальну науково-технічну задачу, що полягає в створенні методів визначення руйнівних навантажень на оболонкові конструкції ракетної техніки з врахуванням пластичних деформацій матеріалу і розробці методів оцінки частот коливань баків з урахуванням ефектів гідро-пружності за різні умови експлуатації на основі методів комп’ютерного моделювання. За змістом, метою і розв’язаними задачами дисертація цілком відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – «Динаміка та міцність машин» та профілю спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09.

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. Було б доцільно частину формулювань та результатів, що стосуються використання методу граничних елементів, виділити в окремий підрозділ. Другий розділ є дещо перевантаженим.

2. При аналізі тестових задач, пункт 2.2 дисертації, не вказано, яке саме гранично-елементне формулювання використане: в термінах тиску, або потенціалу швидкостей рідини.

Не зрозуміло також, чи потребує гранично-елементне формулювання в термінах тиску припущення щодо безвихрового руху рідини.

3. Не наведено таблиць з порівняння результата, отриманих для стисливої та нестисливої рідини, що характеризували б незначний вплив стисливості на частоти та форми коливань рідини в баках. Це ж саме зауваження стосується врахування в'язкості рідини. Було б доцільно з'ясувати, коли стисливість та в'язкість починають впливати на частоти коливань суттєво.

4. Бажано було б провести окреме дослідження, що характеризувало б вплив товщини бака на частоти коливань. А саме, важливим моментом буде дослідження тих параметрів баку (наприклад, товщини, фізичних характеристик резервуара та заповнювача), при яких спектри частот коливань стінок резервуара та частоти плескань вільної поверхні рідини не є відокремленими, а перемежаються. Саме цей випадок є найбільш небезпечним з точки зору відстроювання від резонансних частот.

5. Не вказано, чому саме критерій максимальної деформації прийнятий як критерій руйнування (пункт 3.2.5) при дослідженні руйнівних навантажень.

6. Не вказано також, за якими теоріями оболонок здійснювались дослідження руйнівних навантажень.

Ці зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота «*Статичні та динамічні характеристики елементів конструкцій ракетної техніки з урахуванням явищ гідропружності та пластичності*» містить нові наукові результати, які розв'язують важливe науково-технічне завдання, що полягає в створенні методів визначення руйнівних навантажень на оболонкові конструкції ракетної техніки з врахуванням ефектів пластичності матеріалу і розробці методів оцінки частот коливань баків з урахуванням ефектів гідропружності.

На основі вищезазначеного вважаю, що дисертаційна робота Дегтярьова Кирила Георгійовича «*Статичні та динамічні характеристики елементів конструкцій ракетної техніки з урахуванням явищ гідропружності та пластичності*» 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, Дегтярьов Кирило Георгійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - «Динаміка та міцність машин».

Офіційний опонент,
начальник сектору відділу міцності, навантажень та
динамічних випробувань
Державного підприємства «Конструкторське бюро
«Південне» ім. М.К. Янгеля»,
кандидат технічних наук
21.04.2021 р.

Д.В. Акімов

Підпис Акімова Д.В. засвідчує:
Вчений секретар Державного
підприємства «Конструкторське бюро
«Південне» ім. М.К. Янгеля»,
кандидат технічних наук



Л.П. Потапович