

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 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 зі залученням сучасних числових методів для розв'язання рівнянь механіки суцільних середовищ, що описують динаміку конструкційних елементів. Вивчення таких динамічних процесів експериментальними методами призводить до значних матеріальних витрат, і не дозволяє отримати детальну картину розподілу полів напружень, деформацій, швидкостей, переміщень. Проведення натурального експерименту є коштовною і не завжди безпечною процедурою. Тому комп'ютерне моделювання стає альтернативним перспективним напрямком, який активно розвивається в останні десятиліття. Специфіка сучасного розвитку комп'ютерного моделювання полягає в переході від найбільш простих моделей до все більш удосконалених, які характеризуються універсальністю, адекватністю опису реальних процесів навантаження та деформування і високою точністю розрахунків. В зв'язку з цим актуальною науково-практичною задачею є розроблення нових ефективних методів і удосконалених математичних моделей для дослідження оболонок та оболонкових конструкцій ракетної техніки з урахуванням явищ пластичності, гідропружності для оцінки міцносних та динамічних характеристик обладнання шляхом віртуального експерименту.

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. Дискретизація розв'язувальних співвідношень для аналізу деформування досліджуваних елементів конструкцій здійснювалась на основі методів скінченних та граничних елементів. Числові дослідження методом скінченних елементів виконані автором із використанням програмного комплексу ANSYS, у якому створювались тривимірні комп'ютерні моделі елементів конструкцій. Також був розроблений оригінальний програмний код, що реалізує метод граничних елементів. Ліцензійне забезпечення програмного комплексу ANSYS підтримується Інститутом проблем машинобудування ім. А. Підгорного НАН України.

Задовільне узгодження результатів числового моделювання автора з даними інших дослідників і 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. Розроблено нові розрахункові моделі, засновані на методах скінченних та граничних елементів, для розрахунку напружено-деформованого стану елементів оболонкових конструкцій ракетної техніки та руйнівних навантажень з урахуванням реальних діаграм навантаження, ефектів пластичності, гідропружної взаємодії з урахуванням явища плескань.

Треба відзначити, що задачі гідропружності та теорії пластичної течії зведені до подібних диференціальних рівнянь, що дозволило використати універсальні методи для їх числового розв'язання. Запропоновані автором моделі не потребують проведення натурального експерименту для визначення руйнівних навантажень, що спрощує та прискорює процес проектування конструктивних елементів й знижує матеріальні витрати.

2. Надано обґрунтовану оцінку напружено-деформованого стану циліндричної оболонки з періодичною системою отворів, отримано руйнівні навантаження та визначений момент появи тріщин. За допомогою комп'ютерного моделювання здійснено вибір конструкції найменшої товщини, яка витримує задані інтенсивні короткочасні навантаження.

3. Досліджено міцність баків при одночасній дії внутрішнього тиску і стискаючої сили на кришку бака. Розроблено методику визначення руйнівного навантаження, при цьому комп'ютерне віртуальне випробування відтворювало схему та методологію натурального експерименту. Результати розрахунку за уточненою тривимірною моделлю практично збігаються з результатами для спрощених моделей. Тим самим доведено можливість використання спрощених моделей не лише при віртуальних, а й при натурних випробуваннях баків.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи.

Одержані в дисертації результати можуть бути використані під час проектування та при експлуатації аерокосмічних та машинобудівних конструкцій. Створені в роботі математичні моделі, методи та числові алгоритми становлять розрахункову базу для аналізу напружено-деформованого стану, гідропружних коливань та визначення руйнівних навантажень на елементи конструкцій під впливом інтенсивних силових навантажень. Ряд результатів та рекомендацій прикладних досліджень дисертаційній роботі надіслано до 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, а також містить 69 рисунків та 22 таблиці. Загальний обсяг роботи складає 135 сторінок, включаючи 110 сторінок основного тексту.

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 надані огляд літературних джерел та аналіз сучасного стану теоретичних, числових та експериментальних досліджень напружено-деформованого стану елементів конструкцій під впливом інтенсивних силових механічних навантажень, а також досліджень стосовно гідропружної взаємодії. Вказано, що отримані останнім часом теоретичні результати та побудовані на їх основі програмні комплекси дозволили формулювати та розв'язувати задачі граничної рівноваги, визначати руйнівні навантаження на елементи конструкцій, але залишається ще низка питань, що потребують додаткових досліджень. На основі проведеного аналізу літературних джерел обґрунтовано мету дослідження дисертації і шляхи розв'язання сформульованих задач.

В другому розділі надано загальне формулювання задачі про гідропружні коливання оболонкової конструкції з відсіками, частково заповненими стисливою та в'язкою рідиною. Відзначається, що рідина в обох відсіках може мати різні властивості; рівень заповнення відсіків також може бути різним і змінюватися за часі. Математична модель складається з рівнянь нерозривності, збереження кількості руху та рівняння стану. Для отримання єдиного розв'язку система рівнянь доповнена граничними, контактними та початковими умовами.

Для побудови визначальних співвідношень використаний метод зважених неув'язок. На його основі отримані скінченно-елементні та гранично-елементні реалізації.

Проведені тестові розрахунки для сферичної та конічної оболонки, надано співставлення з числовими та аналітичними результатами інших авторів. Виявлено, що врахування стисливості та в'язкості рідини при заданих фізичних та геометричних параметрах не є суттєвим. Ці дослідження дозволили проаналізувати найбільш прийнятні типи скінченних 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. У всіх розрахунках також здійснювалось подрібнення сітки, що довело збіжність запропонованих методів.

Знайдені значення частот і форми плескань 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 при врахуванні пружності стінок може досягатися на 7-10 гармоніках.

Третій розділ присвячений дослідженню міцності резервуарів при одночасній дії внутрішнього тиску і стискаючої сили на кришку бака з врахуванням пластичних деформацій. Використана теорія малих пружно-пластичних деформацій. Конструкція є оболонкою обертання, що складається з циліндричної, тороїдальної і сферичної частин. Визначено руйнівне навантаження на паливний бак з використанням різних скінченно-елементних схем. При цьому комп'ютерне віртуальне випробування відтворювало схему та методологію натурального експерименту. Запропоновані різні скінченно-елементні розрахункові схеми з метою необхідності врахування конструктивних особливостей та можливості спрощення як віртуального, так і натурального бака. Було проведено розрахунок оболонкової конструкції з використанням оболонкових і тривимірних скінченних елементів у тривимірній осесиметричній постановці з урахуванням пластичних деформацій. Результати розрахунків узгоджуються з експериментальними даними ДКБ «Південне» (різниця становить 10 %). Задовільне узгодження результатів числового моделювання з даними натурального експерименту свідчить про достовірність отриманих результатів і адекватність розробленої моделі.

Встановлено, що результати розрахунку за уточненою тривимірною моделлю практично збігаються з даними, отриманими для спрощених моделей, несуттєво порушується лише їх симетричність з огляду на появу кронштейна. Тим самим доведена можливість використання спрощених моделей не лише при віртуальних, а й при натурних експериментах.

У четвертому розділі здійснено числове моделювання напружено-деформованого стану перфорованої циліндричної оболонки з періодичною системою отворів. Вважається, що рух оболонки здійснюється під впливом короткочасного інтенсивного силового навантаження. Запропоновано метод дослідження руйнівних навантажень при короткочасних силових впливах на перфоровану циліндричну оболонку. Передбачається, що в процесі навантаження виникають пластичні деформації. Теорію малих пружно-пластичних деформацій застосовано доти пластична частина деформацій є малою в порівнянні з пружною. При значному рівні пластичних деформацій використано теорію пластичної течії з врахуванням моделі Купера – Саймондса. За допомогою комп'ютерного моделювання здійснено вибір перфорованої конструкції найменшої товщини, яка витримує задані інтенсивні короткочасні навантаження. За цими результатами сформульовано практичні рекомендації щодо проектування вказаних елементів конструкцій підвищеної міцності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні задачі були 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 діагностування енергетичних машин та підвищення їх міцності та працездатності», 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 імпульсному 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.)

Публікації та апробація 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 Міжнародній науково-технічній 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 работ. 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. 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. Другий розділ присвячений дослідженню коливань оболонок, заповнених рідиною. Ця проблема є істотно нелінійною. Для розрахунку власних форм і частот коливань виконана лінеаризація задачі, яка вимагає прийняття ряду припущень і обмежень. Ці припущення доцільно було б викласти в постановочній частині, а не згадувати про них в різних місцях розділу. Є і термінологічні неточності. Паралельно з власними частотами і формами коливань згадуються вільні коливання, але немає інформації про початкові умови.
2. Другий розділ є дещо перевантаженим. Було б доцільно частину формулювань та результатів, що стосуються використання методу граничних елементів, виділити в окремий розділ.
3. В третьому розділі представлені результати розрахунку оболонкової конструкції під дією внутрішнього тиску 27,34 МПа. Судячи з графіків на рис. 3.8 та 3.9 в центральній частині циліндричної оболонки реалізується безмоментний напружений стан. Було б корисно зіставити чисельні результати з оцінками по безмоментній теорії. Однак, в наведених вхідних даних відсутня інформація про товщину циліндричної частини конструкції.
4. У розділі 3.1 досить детально викладено відому процедуру лінеаризації пружно-пластичних задач за методом додаткових навантажень. Зважаючи на те, що розрахунки виконано у програмному комплексі ANSYS, доцільніше було привести данні про вибір моделі матеріалу, типу зміцнення, апроксимації діаграми деформування та деталі налаштування нелінійного аналізу.
5. Робота загалом добре оформлена, але зустрічаються деякі технічні помилки, наприклад, у формулах (2.2), (2.10), (2.11), (3.2). На рис. 3.19 помилково вказана розмірність напружень.

Загальний висновок. Незважаючи на вказані недоліки, слід відзначити, що робота викликає позитивне враження. Роботу виконано на високому науковому рівні, а її результати мають як теоретичне так і практичне значення.

Дисертаційна робота «*Статичні та динамічні характеристики елементів конструкцій ракетної техніки з урахуванням явищ гідропружності та пластичності*» містить нові наукові результати, які розв'язують важливе 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 гідро-пружності.

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 заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – «Динаміка та міцність машин».

Офіційний опонент,
професор кафедри динаміки і міцності машин
Національного технічного університету «Харківський
політехнічний інститут»,
доктор технічних наук, професор



Геннадій ЛЬВОВ

15 квітня 2021 р.

Підпис д.т.н., проф. Львова Г.І. засвідчую,
Вчений секретар НТУ "ХПІ"



Олександр ЗАКОВОРТНИЙ