

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

**Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара**

Олег МАРЕНКОВ



«18» червня 2025 р.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації на тему «Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з центральним тілом автофажної ракети», представленої на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика

ВИТЯГ

з протоколу № 2 від 13 червня 2025 року міжкафедрального семінару механіко-математичного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

ПРИСУТНІ: 9 з 9 членів наукового семінару.

ГОЛОВУЮЧИЙ: канд. фіз-мат. наук, проф. Хамініч О.В. (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми). декан механіко-математичного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

СЕКРЕТАР ЗАСІДАННЯ: канд. фіз-мат. наук, доц. Кравець О.В. (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Члени наукового семінару:

д-р техн. наук, проф. Дреус. А.Ю. (05.15.09 – геотехнічна і гірнична механіка), завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Давидов С.О. (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), професор кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р техн. наук, проф. М. М. Дронь (05.13.03 – системи і процеси керування); професор кафедри проектування та конструкцій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р техн. наук, проф. О.В. Голубек (05.13.03 – системи та процеси керування); професор кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Бразалук Ю.В. (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Губін О.І. (01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи), доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Геті К.В. (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

ЗАПРОШЕНІ ФАХІВЦІ (2 особи, з правом голосу):

канд. техн. наук, с.н.с. Перцевий В.О. (05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика), с.н.с. інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України;

д-р техн. наук, с.нс. Кваша Ю.О. (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), заввідділу динаміки гідромеханічних і віброзахисних систем Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України;

На засіданні присутній аспірант: Ємець М. В.

Аспірант участі в голосуванні не брав.

Порядок денний: розгляд і обговорення дисертаційної роботи Ємця Михайла Віталійовича на тему «Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з центральним тілом автофажної ракети», поданої на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 – Прикладна математика.

Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (протокол № 5 від 18 листопада 2021 року). Уточнена тема вченою радою механіко-математичного факультету, протокол № 4 від 7 грудня 2024 року. Науковим керівником призначено д-р техн. наук, проф. Дреуса А.Ю.

Підготовка здобувача третього рівня вищої освіти здійснюється за акредитованою освітньо-науковою програмою «Прикладна математика» зі спеціальності 113 – Прикладна математика (сертифікат про акредитацію освітньої програми 2068, дійсний до 01.07.2027 р.).

СЛУХАЛИ:

Обговорення дисертації аспіранта 4 року навчання Ємця Михайла Віталійовича на тему «Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з центральним тілом автофажної ракети» на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 — Прикладна математика.

Перевірку на плагіат здійснювала комісія у складі: канд. фіз-мат. наук, доцент, в.о. зав. кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Комаров О.В., канд. фіз-мат. наук, проф., декан Механіко-математичного факультету, Хамініч О.В., канд. техн. наук, доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Геті К.В.

За результатами перевірки дисертаційної роботи на плагіат програмою «Strikeplagiarism» зроблено висновок: дисертаційна робота Ємця М.В. має рівень унікальності (99.87 %) і може бути допущена до захисту.

Робота виконана на 123 сторінках і містить такі складові частини: анотація, зміст, вступ, 3 розділи, висновки, перелік джерел, додатки.

Слово надається аспіранту Ємцю М.В. Будь ласка, регламент виступу – 20 хвилин.

Аспірант Ємець М.В.

Шановний голово семінару, шановні члени міжкафедрального семінару, шановні присутні!

Тема моєї дисертації: «Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з центральним тілом автофажної ракети».

Обґрунтування вибору теми дослідження. Одним з перспективних напрямків розробки дешевших засобів виведення космічних вантажів є ракети з полімерними спалюваними паливними оболонками, які також називаються автофажними (від латинського *autophagous* — «той, що сам себе поїдає»). Основною особливістю цих ракет є використання паливних баків із полімерних матеріалів, які під час польоту спалюються в камері згоряння ракетного двигуна. В Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара вперше розроблено прототип двигуна для автофажної ракети, що пройшов успішні стендові випробування. Проте визначення раціональних параметрів роботи такого двигуна та оптимізація конструктивних параметрів потребує проведення досліджень плавлення та газифікації полімерного палива, що відбувається в

спеціальній газифікаційній камері, а також дослідження процесів газової динаміки та теплообміну в камері двигуна. Ефективним інструментом дослідження в даному випадку є методи числового та CFD моделювання таких процесів.

Слід зазначити, що конструкція камери двигуна, що розглядається, має особливість у вигляді центрального тіла – газифікаційної камери, що потребує створення нової математичної моделі та параметричних досліджень термогазодинамічних процесів.

Темою дослідження цієї роботи є розробка математичної та чисельної моделі для розрахунку теплових та газодинамічних процесів із урахуванням наявності центрального тіла, що виконує функцію газифікаційної камери. Запропонована математична модель дозволяє розраховувати процеси газифікації та теплові потоки на поверхні газифікаційної камери, а також конструкцію цієї камери та процеси горіння в автофажному двигуні. Результати моделювання порівнюються з чисельним моделюванням та експериментальними даними, отриманими під час вогневих випробувань прототипу ракетного двигуна.

Актуальність дослідження обумовлюється розвитком технології створення автофажної ракети, що потребує розробки моделей та методики розрахунку газодинамічних і теплообмінних процесів в автофажному ракетному двигуні, що потрібно для визначення раціональних конструкційних параметрів та параметрів термогазодинамічних процесів в камері згорання.

Метою роботи є розробка математичної моделі та проведення числових досліджень для визначення раціональних параметрів теплових і газодинамічних процесів в ракетних двигунах нового типу що використовують полімерне паливо.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **наукові завдання**:

1. Виконати огляд інформації щодо дослідження автофажних ракет-носіїв і моделювання їх двигунів, оцінити економічні переваги та потенційні області застосування, у тому числі проаналізувати вартість запусків та альтернативні методи виведення вантажів на орбіту. Провести аналіз відмінностей існуючих моделей розрахунку двигунів від автофажних двигунів, зосередивши увагу на основних проблемах моделювання газодинаміки та теплообміну, які виникають при розробці цих перспективних двигунів.

2. Експериментально дослідити термодинамічні процеси під час газифікації полімерного палива. Обрунтувати вихідні дані для математичного моделювання теплофізичних властивостей полімерного пального та твердого ракетного окислювача в широкому температурному діапазоні, зокрема під час фазових переходів у газифікаційній камері. Здійснити термодинамічні

розрахунки для різних складів палива з метою встановлення раціональних параметрів для процесу горіння в автофажному двигуні.

3. Побудувати комп'ютерну модель газодинамічних і теплообмінних процесів в камері двигуна автофажної ракети, з урахуванням особливості конструкції та подачі палива в камеру. Виконати параметричні чисельні дослідження процесів газодинаміки і теплообміну в камері двигуна автофажної ракети з використанням розробленої моделі і CFD-моделювання.

4. На основі даних обчислювальних експериментів визначити особливості перебігу газодинамічних і теплообмінних процесів в камері та розробити рекомендації щодо раціональних параметрів таких процесів. Розробити рекомендації щодо конструктивних параметрів газифікаційної камери та камери згоряння двигуна автофажної ракети.

Об'єкт дослідження. Термодинамічні, газодинамічні і теплообмінні процеси в камері двигуна автофажної ракети.

Предмет дослідження. газодинамічні, температурні поля в камері автофажного двигуна.

Методи дослідження. математичне моделювання газодинамічних та теплообмінних процесів горіння та газифікації палива. Чисельне моделювання теплових потоків на поверхні центрального тіла. Експериментальні дослідження методом термічного аналізу теплофізичних та енергетичних характеристик матеріалів ракетного палива.

Наукова новизна.

1. Побудовану чисельну модель що описує газодинамічні і теплообмінні процеси в камері двигуна автофажної ракети, яка на відміну від відомих моделей враховує наявність полімерного палива, яке переходить із твердого стану в рідкий, здійснюючи тепловий обмін із конструкцією центрального тіла.

2. Вперше методами математичного моделювання досліджено процеси газодинаміки і теплообміну продуктів газифікації нового полімерного палива, що дозволило встановити закономірності розподілу теплових і газодинамічних полів в камері двигуна.

3. Вперше методами комп'ютерного моделювання підтверджено ефективність застосування газифікованого полімерного пального для автофажних двигунів. Встановлено, що поєднання полімерного пального з твердими окислювачами забезпечує питомий імпульс автофажного ракетного двигуна в діапазоні 240–280 с. Розраховано швидкість газифікації поліетилену в газифікаційній камері автофажного двигуна, яка становить 20 мм/с, що

забезпечує його ефективну роботу. Додатково враховано підвищення масової досконалості ракети завдяки відсутності металевих паливних баків.

Практична значимість полягає в тому, вперше розроблена математична та деталізована комп'ютерна модель для визначення термогазодинамічних процесів в камері згоряння двигуна нового типу, який використовує автофажний принцип. Це має велике практичне значення, оскільки дозволяє оцінити раціональні конструктивні параметри для внутрішнього тіла – газифікаційної камери, компонентів палив та конструкції сопла. Результати дисертаційного дослідження використані під час розробки автофажної ракети за проектами що реалізуються на базі ДНУ ім. Олеся Гончара.

У **вступі та розділі 1** дисертаційної роботи проведено огляд літератури за тематикою малого ракетного носія та концепції автофажного двигуна. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку надлегких засобів виведення вантажів на орбіту і показано актуальність використання полімерних паливних оболонок для підвищення ефективності таких ракет. Розглянуто історичні передумови створення автофажних ракет та еволюцію відповідних ідей. Висвітлено конструкцію експериментального автофажного ракетного двигуна з центральним тілом (газифікаційною камерою) та його принцип роботи. На основі аналізу публікацій визначено основні відмінності між автофажними і традиційними ракетними двигунами, окреслено специфічні проблеми їх математичного моделювання (неперервна подача твердого полімерного палива, газифікація в камері, наявність центрального тіла тощо).

У **розділі 2** представлено розвиток аналітичної термодинамічної моделі згоряння полімерного палива в ракетному двигуні. В стаціонарному наближенні записано стехіометричні рівняння реакції горіння поліетилену з різними твердими окислювачами (зокрема перхлоратом літію, перхлоратом амонію, нітратом калію). За допомогою програмного комплексу ASTRA-4 (метод мінімізації вільної енергії Гіббса) визначено рівноважний хімічний склад продуктів згоряння і розраховано основні термодинамічні параметри газової суміші (температура продуктів, середня молекулярна маса, питомі теплоємності, характеристичні швидкості тощо). Наведено порівняльний аналіз одержаних параметрів для різних пар «пальне–окислювач», що дозволило оцінити перспективність кожної з комбінацій.

У **розділі 3** описано математичну модель стаціонарних процесів тепломасообміну та газової динаміки в камері автофажного ракетного двигуна з внутрішнім газифікатором (центральним корпусом). На основі цієї моделі створено детальну тривимірну комп'ютерну модель течії газу, реалізовану із застосуванням методів CFD в середовищі ANSYS Fluent. Описано конструкцію розрахункової області, що включає камеру згоряння з центральним тілом, конфузorno-дифузorno частину сопла Лавалю та ділянку поза соплом для

правильного задання граничних умов. Підібрано сіткову модель та параметри турбулентності, проведено верифікацію моделі. Виконано серію чисельних експериментів для різних режимів роботи двигуна. У результаті отримано поля параметрів потоку (тиску, температури, швидкості, густини) в камері та соплі, а також розподіл температури в стінках центрального газифікатора. Проаналізовано структуру течії поблизу центрального тіла та у соплі: встановлено, що наявність центрального газифікатора формує кільцевий потік, проте не перешкоджає досягненню надзвукової витрати газів і необхідного тиску в камері згоряння. Розраховано теплові потоки на поверхні газифікатора: максимальна густина потоку на передній частині газифікаційної камери сягає $\sim 10^6$ Вт/м², що вказує на необхідність теплозахисту цієї зони. За результатами моделювання визначено швидкість газифікації полімерного палива – близько 20 мм/с, чого достатньо для сталого горіння та роботи двигуна. Також показано, що використання композиції полімерного пального з твердим окислювачем здатне забезпечити питомий імпульс двигуна в межах 240–280 с, тобто рівень, співставний із традиційними твердопаливними РДТТ.

Після закінчення доповіді Ємцю М.В. присутніми були поставлені такі запитання.

ЗАПИТАННЯ ТА ВІДПОВІДІ

Кандидат техн. наук, доц. Губін О.І. (01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи), доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Можете іще раз підкреслити, у чому полягає новизна запропонованої вами математичної та чисельної моделі у контексті отриманих наукових результатів?.

Ємець М.В.:

Запропонована математична та чисельна модель є першою спробою комплексного опису теплових і внутрішньобалістичних процесів в автофажному ракетному двигуні з полімерним пальним. Раніше подібне моделювання для таких систем у повному обсязі не виконувалося. У роботі враховано детальну теплообмінну взаємодію між газифікаційною камерою та камерою згоряння, визначено характер теплових потоків і швидкість газифікації полімеру. Проведені CFD-розрахунки дозволили кількісно оцінити параметри, що забезпечують стабільну та ефективну роботу двигуна.

Кандидат техн. наук, доц. Губін О.І. (01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи), доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Як саме здійснюється подача пального та окислювача до камери згоряння? В якому стані ці компоненти надходять до зони горіння, і якою є температура при контакті твердих компонентів із теплообмінними поверхнями газифікаційної камери?

Ємець М.В.:

Подача реагуючих компонентів із газифікатора відбувається через спеціальну перфоровану перегородку з рядом отворів. Тверді компоненти пального, контактуючи з розігрітою поверхнею, газифікуються та відводяться каналами в камеру згоряння (як продемонстровано на відповідному слайді презентації). Сам твердопаливний заряд подається в газифікаційну камеру під тиском, що дозволяє подолати тиск у камері згоряння і забезпечує надходження парогазової суміші в зону горіння.

Доктор техн. наук, проф. О. В. Голубек (05.13.03 – системи та процеси керування); професор кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

У завданнях дослідження Ви зазначили необхідність визначення раціональних параметрів теплових і газодинамічних процесів. Що саме Ви розумієте під терміном «раціональні параметри» у контексті Вашої роботи?

Ємець М.В.:

Під терміном раціональні параметри в контексті даного дослідження розуміються такі теплові й газодинамічні характеристики, які забезпечують стабільну та ефективну роботу автофажного двигуна. Їх не обирають довільно або емпірично — вони визначаються на основі фізично обґрунтованих критеріїв оптимальності. Зокрема, раціональність полягає у забезпеченні стійкої газифікації палива, що також є конструкційним елементом, а також у досягненні високих енергетичних і тягових характеристик. Таким чином, раціональні параметри — це ті, що сприяють узгодженій роботі системи з урахуванням фізичних, теплотехнічних та конструктивних обмежень.

Доктор техн. наук, проф. О. В. Голубек (05.13.03 – системи та процеси керування); професор кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Поясніть, будь ласка, як фізична модель двигуна (з газифікаційною камерою, твердопаливним зарядом пального та окислювача), яку Ви демонстрували, спрощується для тривимірної розрахункової області CFD-моделювання? І що це за прямокутна область праворуч на зображенні сіткової моделі (слайд 12) після сопла?

Ємець М.В.:

Фізична модель показує повну конструкцію двигуна, тоді як розрахункова область для CFD-моделювання охоплює лише внутрішній простір, де протікає газ. Зокрема, це об'єм камери згоряння та конічні (конфузорна і дифузорна) частини сопла Лавалю. Після вихідного зрізу сопла в моделі додано спеціальну область, що дає змогу врахувати газодинаміку потоку на виході. Та ділянка виглядає прямокутною на двовимірному розрізі, але фактично в розрахунку моделюється половина осесиметричної конфігурації двигуна: область за соплом являє собою половину циліндра (у поперечному перерізі це і відображається як прямокутник).

Доктор фіз.-мат. наук, проф. Давидов С.О. (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), професор кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Ви згадали, що проводили моделювання зменшеного прототипу ракетного двигуна з автофажним принципом. Чи застосовувалися при цьому критерії геометричної подібності? Якими є основні технічні характеристики ракети, для двигуна якої проведено моделювання (стартова маса, маса корисного навантаження, довжина)? На яку орбіту вона здатна вивести корисний вантаж?

Ємець М.В.:

Моделювання виконувалося для експериментального зразка автофажного двигуна, тобто фактично для зменшеної натурної моделі. У зв'язку з цим класичні критерії геометричної подібності не застосовувалися. Основні характеристики самого двигуна наведено в дисертації: питомий імпульс становить приблизно 260 с, розрахункова тяга – близько 100 Н, а швидкість подачі автофажного паливного заряду – порядку 20 мм/с. Ці параметри можуть змінюватися залежно від умов та вихідних даних. Загальні характеристики автофажних ракетноносіїв досліджені в попередніх працях: наприклад, для інерційної автофажної ракети-носія стартова маса може становити близько 100 кг, при цьому маса корисного навантаження – близько 100 г (для виведення на низьку навколосезну орбіту). За використання інших схем подачі або рідкого окислювача ці показники можуть коригуватися.

Доктор техн. наук, проф. М. М. Дронь (05.13.03 – системи і процеси керування); професор кафедри проектування та конструкцій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Чи розглядали ви у своїх моделюваннях лише паливо на основі поліетилену з перхлоратом амонію? Чи плануєте розширити коло досліджуваних полімерних матеріалів і окислювачів? Якими є потенційні сфери застосування отриманих результатів у подальшому?

Ємець М.В.:

У ході дослідження встановлено, що паливно-окислювальні пари «поліетилен – перхлорат амонію» та «поліетилен – перхлорат літію» є найбільш ефективними для двигуна з автофазним принципом і мають близькі загальні характеристики. Тому повний комплекс чисельного моделювання було здійснено саме для пари поліетилену з перхлоратом амонію. В дисертації також наведено порівняння енергетичних характеристик перспективних ракетних палив на основі трьох різних термопластичних полімерів та чотирьох різних окислювачів.

Голова семінару, канд. фіз-мат. наук, проф. Хамініч О.В., декан механіко-математичного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Запитань більше немає. Переходимо до обговорення дисертаційної роботи Ємця Михайло Віталійовича. Дослідження виконувалася на кафедрі аерогідромеханіки та енергомасопереносу. Науковим керівником роботи є доктор технічних наук, завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дреус Андрій Юлійович, який є провідним фахівцем в цьому напрямі. Стосовно нашого пошукача. Ємець М.В. закінчив ДНУ ім. О. Гончара у 2018 році, отримав ступінь бакалавра. У 2020 році отримав ступінь магістра за спеціальністю 113 прикладна математика. У тому ж 2021 році він вступив до аспірантури університету за спеціальністю 113 Прикладна математика і навчався за цією однойменною освітньою програмою підготовки докторів філософії, а саме Прикладна математика. За даними відділу аспірантури і докторантури ДНУ ім. О. Гончара він повністю виконав навчальний план підготовки. Підсумковий звіт Ємця М.В. з навчальної та наукової роботи був заслуханий на засіданні кафедри аерогідродинаміки та енергомасопереносу, на якій було прийнято рішення заслухати Михайла Віталійовича на міжкафедральному семінарі механіко-математичного факультету. Слово надається науковому керівнику.

ВИСТУП НАУКОВОГО КЕРІВНИКА:

Дисертація Ємця М. В. присвячена актуальній науково-технічній проблемі – комплексному моделюванню газодинамічних та теплообмінних процесів в інноваційному ракетному двигуні автофажного типу з центральним тілом. Це дослідження є важливим для розвитку сучасних ракетних технологій, оскільки спрямоване на підвищення ефективності ракетноносіїв шляхом використання автофажного принципу, що мінімізує частку конструктивної (пасивної) маси. Робота містить значну наукову новизну – автором вперше застосовано математичну та чисельну модель, яка дає змогу комплексно описати теплообмінні процеси та внутрішню балістику такого нестандартного ракетного двигуна. Отримані результати розширюють існуючі уявлення про поведінку автофажних двигунів і є вагомим внеском у розвиток прикладної механіки та ракетно-космічної техніки.

Під час виконання дисертаційної роботи Ємець М. В. провів ґрунтовний аналіз сучасного стану досліджуваної проблематики, чітко обґрунтував вибір об'єкта, предмета та методів дослідження, сформулював мету і наукові завдання. Здобувач проявив себе як відповідальний, наполегливий і дослідливий науковець, здатний самостійно формувати та розв'язувати складні задачі. Він опанував сучасні методи математичного моделювання, виконав серію чисельних експериментів та належним чином узагальнив їх результати.

Основні результати дисертації апробовані та опубліковані. Здобувач має 4 наукові публікації, з них 2 статті – у фахових наукових журналах (у тому числі у міжнародних виданнях, що індексуються у Scopus, Quartile Q1–Q2) та 2 праці – у матеріалах престижних міжнародних конференцій. Результати досліджень доповідалися на наукових семінарах і конференціях, що підтверджує апробацію роботи.

Вважаю, що здобувач повною мірою виконав індивідуальний навчальний план і план наукової роботи, досягнув всіх запланованих результатів навчання відповідно до освітньо-наукової програми. Дисертація є самостійним науковим дослідженням, містить елементи наукової новизни, виконана на високому теоретичному та методичному рівні й відповідає вимогам, встановленим до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. Наукові результати, викладені в роботі, мають важливе практичне значення для розвитку ракетних двигунів нового покоління, що використовують полімерне паливо. Отже, дисертаційну роботу Ємця М. В. вважаю за можливе рекомендувати до захисту. Прошу підтримати здобувача та його роботу. Дякую за увагу.

В ОБГОВОРЕННІ ДИСЕРТАЦІЇ ЄМЦЯ М. В. ВЗЯЛИ УЧАСТЬ:

Доктор техн. наук, проф. М. М. Дронь (05.13.03 – системи і процеси керування); професор кафедри проектування та конструкцій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Дисертація є технічно значущою і присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання. Хотів би запропонувати автору чітко окреслити пріоритет отриманих результатів у порівнянні з зарубіжними аналогами. Зокрема, варто наголосити, які нові конфігурації або підходи були вперше розроблені саме в нашому університеті (наприклад, у співставленні з дослідженнями Університету Глазго) та в чому полягають їх переваги. Крім того, при розгляді трикомпонентної паливної конфігурації слід враховувати, що окремі компоненти можуть повністю не згорати. Будь-які незгорілі залишки виступають як пасивна маса, яка згідно з рівнянням Ціолковського зменшує кінцеву швидкість ракети-носія. Незважаючи на наведені зауваження, відзначаю, що дисертант продемонстрував здатність розв'язувати складні наукові завдання, а сама робота містить суттєві наукові результати. Дисертаційна робота виконана якісно, має значний елемент оригінальності та розвиває напрям досліджень. Вважаю, що ця дисертація відповідає вимогам та може бути рекомендована до захисту у спеціалізованій вченій раді.

Кандидат техн. наук, доц. Губін О.І. (01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи), доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Дисертаційна робота і доповідь здобувача справили позитивне враження. Водночас необхідно чіткіше підкреслити, в чому полягає новизна отриманих результатів саме за спеціальністю, оскільки значна частина представленої інформації більше відповідає напряму двигунобудування. Також варто звернути увагу на процеси переходу між трьома фазовими станами (твердим, рідким та газоподібним), що відбуваються в двигуні. Рекомендую підкреслити у дисертації та презентації, яким чином у моделюванні та експериментальній установці відстежується наявність того чи іншого фазового стану – особливо з огляду на різкі зміни температури та складні режими роботи двигуна. Загалом тема дослідження є актуальною, а запропонована математична модель розширює розуміння процесів в автофазному ракетному двигуні. Дисертація виконана на високому науковому рівні, отримані результати відзначаються новизною та практичною значущістю. У зв'язку з цим підтримую дану роботу і вважаю за доцільне рекомендувати її до захисту.

Доктор техн. наук, проф. О. В. Голубек (05.13.03 – системи та процеси керування); професор кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

У процесі виступу та відповідей на запитання Ємець М. В. продемонстрував ґрунтовні знання предмету дослідження і високий рівень наукової підготовки, що свідчить про його становлення як дослідника. Щодо зауважень, хочу відмітити наступне. Для повноти картини доцільно порівняти результати чисельного моделювання з даними експериментальних випробувань відповідного двигуна. Також рекомендую чіткіше описати у роботі конфігурацію розрахункової області за межами сопла та деталізувати, яким чином фізична модель двигуна переноситься в обчислювальну сіткову модель для CFD-аналізу. В цілому повністю поділяю позитивну думку колег щодо цієї дисертації. Вважаю, що робота є завершеним дослідженням, яке відповідає встановленим вимогам, і пропоную рекомендувати її до захисту. Бажаю здобувачеві успіхів.

Доктор фіз.-мат. наук, проф. Давидов С.О. (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), професор кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Дисертаційна робота присвячена цікавій і актуальній для ракетно-космічної техніки тематиці. Дослідження двигуна ракети з автофажним принципом є порівняно новим напрямом, тому не всі присутні глибоко знайомі з можливостями таких систем. Вважаю, що автору варто ширше висвітлити у дисертації загальні технічні характеристики автофажних ракетноносіїв та зіставити їх із характеристиками традиційних ракет – це допоможе краще зрозуміти значущість отриманих результатів. Водночас слід відзначити, що дисертація містить нову фізичну модель складних газодинамічних і теплообмінних процесів, розв'язану з використанням класичних чисельних методів. Робота виконана на високому науковому рівні й має практичну цінність. Підтримую висновки колег: дисертаційна робота М. В. Ємця є завершеною, відповідає всім вимогам до докторських досліджень і безумовно заслуговує на підтримку та рекомендацію до захисту.

Голова семінару, канд. фіз.-мат. наук, проф. Хамініч О.В., декан механіко-математичного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Чи є ще бажаючі виступити? Якщо ні, то хочу зазначити, що робота справила на мене позитивне враження. Самі публікації і виступ здобувача, розуміння ним процесів, висвітлених у роботі, підтверджують, що він чудово володіє предметом і ґрунтовно підготувався до захисту. Відповіді на запитання були чіткі й аргументовані, що свідчить про належний рівень формування його

як дослідника. Пропоную за результатами обговорення визнати, що представлена Михайлом Ємцем дисертаційна робота на тему «Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з центральним тілом автофажної ракети» є завершеним науковим дослідженням. Вона відповідає вимогам стандарту вищої освіти за спеціальністю 113 «Прикладна математика» на третьому (освітньо-науковому) рівні. Тематика роботи є актуальною, результати мають наукову новизну і практичну значущість, що було відзначено в обговоренні. Дисертація виконана якісно, і я вважаю, що вона заслуговує на підтримку та рекомендацію до подальшої процедури захисту. Пропоную рекомендувати цю роботу до розгляду у спеціалізованій вченій раді ДНУ.

Тепер щодо формальної процедури. Якщо немає питань до голови семінару, до здобувача, то давайте перейдемо до висновку.

ВИСНОВОК

Актуальність теми дисертації обумовлюється розвитком технології створення автофажних ракет, що зумовлює необхідність розробки математичних моделей і методик розрахунку газодинамічних та теплообмінних процесів в автофажному ракетному двигуні. Особливу складність становить моделювання процесів у двигуні з центральним тілом, яке виконує функцію газифікаційної камери. Саме дослідження таких процесів є ключовим для визначення раціональних конструктивних параметрів двигуна та забезпечення ефективної і стабільної роботи системи згоряння. Тема дисертаційної роботи повністю відповідає сучасному рівню задач прикладної механіки та є перспективною для розвитку надлегких ракетних систем нового покоління.

Затвердження теми та плану дисертації.

Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (протокол № 5 від 18 листопада 2021 року). Уточнена тема вченою радою механіко-математичного факультету, протокол № 4 від 7 грудня 2024 року. Науковим керівником призначено д-ра техн. наук, проф. Дреуса А.Ю. Підготовка здобувача третього рівня вищої освіти здійснюється за акредитованою освітньо-науковою програмою «Прикладна математика» зі спеціальності 113 Прикладна математика (сертифікат про акредитацію освітньої програми 2068, дійсний до 01.07.2027 р.).

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

Дослідження за темою дисертації виконувалися згідно планів наукової роботи Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара та в рамках НДР «Теоретичне та експериментальне обґрунтування автофажних двигунних систем відведення об'єктів з низьких навколоземних орбіт», 2020-

2022 (№ д/р 0120U102254) та НДР «Обґрунтування проектно-балістичних параметрів надлегких ракет-носіїв з полімерними корпусами з урахуванням аеродинамічних та теплофізичних ефектів на атмосферній ділянці», 2021-2023 (№ д/р 0121U109770).

Публікації та особистий внесок здобувача.

За темою дисертації опубліковано 4 статті. Із них всі опубліковано у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus. Всі основні результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У публікаціях у співавторстві до компетенції автора належать: формулювання постановок задач, розроблення чисельних алгоритмів для їх розв'язання, а також виконання відповідних комп'ютерних розрахунків і побудова графічних матеріалів. Публікації Ємця М.В. відповідають вимогам пп. 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Обґрунтованість і достовірність отриманих у дисертації результатів забезпечуються використанням класичних фізико-математичних моделей теплообміну та стисливої газодинаміки, що добре апробовані у практиці інженерного моделювання. Постановки задач сформульовані коректно з урахуванням фізичних особливостей роботи автофажного ракетного двигуна з центральним тілом. Чисельна реалізація моделей здійснена з використанням надійних методів CFD-моделювання. Точність обчислень контролювалася шляхом сіткової збіжності та перевірки енергетичних балансів. Додаткову достовірність результатів забезпечує зіставлення отриманих температурних і швидкісних полів з даними експериментальних вогневих випробувань лабораторного зразка двигуна. Узгодженість результатів із відомими теоретичними положеннями та опублікованими дослідженнями інших авторів також підтверджує надійність зроблених висновків.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Побудовану чисельну модель що описує газодинамічні і теплообмінні процеси в камері двигуна автофажної ракети, яка на відміну від відомих моделей враховує наявність полімерного палива, яке переходить із твердого стану в рідкий, здійснюючи тепловий обмін із конструкцією центрального тіла.

2. Вперше методами математичного моделювання досліджено процеси газодинаміки і теплообміну продуктів газифікації нового полімерного палива, що

дозволило встановити закономірності розподілу теплових і газодинамічних полів в камері двигуна.

3. Вперше методами комп'ютерного моделювання підтверджено ефективність застосування газифікованого полімерного пального для автофажних двигунів. Встановлено, що поєднання полімерного пального з твердими окислювачами забезпечує питомий імпульс автофажного ракетного двигуна в діапазоні 240–280 с. Розраховано швидкість газифікації поліетилену в газифікаційній камері автофажного двигуна, яка становить 20 мм/с, що забезпечує його ефективну роботу. Додатково враховано підвищення масової досконалості ракети завдяки відсутності металевих паливних баків.

Практичне значення одержаних результатів.

Результати дисертаційного дослідження мають прикладну цінність для розробки і вдосконалення конструкцій автофажних ракетних двигунів. Запропонована фізико-математична модель та реалізована чисельна методика дозволяють прогнозувати газодинамічні параметри потоку, температурні поля та теплові навантаження у двигуні з центральним тілом, що виконує функцію газифікатора. Отримані закономірності можуть бути використані при проектуванні конфігурацій камери згоряння, виборі геометричних параметрів центрального тіла, обґрунтуванні теплофізичних характеристик матеріалів та розробці умов охолодження. Практична реалізація результатів можлива в рамках створення експериментальних зразків автофажних двигунів для ракет надлегкого класу, а також при моделюванні процесів роботи перспективних одноразових двигунів із вигоранням конструктивних елементів.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Yemets, M., Yemets, V., Harkness, P., Dron, M., Worrall, K., Pashkov, A., Yemets, T., Kostytsyn, O. and Zhuravel, P., 2018. Caseless throttleable solid motor for small spacecraft, Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC 2018.

ISSN: 00741795 | (Scopus)

2. Yemets, V., Dron, M., Dreus, A., Pashkov, A. and Yemets, M., 2021. Heat Flows in the Gasification Chamber of the Polymer Propelled Autophage Launch Vehicle, Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC 2021. ISSN: 00741795 | (Scopus)

3. Dreus, A., Yemets, V., Dron, M., Yemets, M., & Golubek, A. (2022). A simulation of the thermal environment of a plastic body of a new type of launch

vehicle at the atmospheric phase of the trajectory. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 94(4), 505-514. doi:10.1108/AEAT-04-2021-0100

Scopus, видання, віднесене до другого квартиля Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal

4. Dreus, A., Yemets, M., Dron, M., Khaminich, O., Rudominskyi, M. CFD Analysis of Gas-Dynamic and Heat Transfer Processes in a Propulsion System using Polymer Fuel, Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer, 2024, doi: 10.37934/arnht.21.1.1425

Scopus, видання, віднесене до першого квартиля Q1 відповідно до класифікації SCImago Journal

На підставі заслуховування та обговорення доповіді Ємця М. В. про основні положення дисертаційної роботи, питань та відповідей на них, члени семінару

УХВАЛИЛИ:

1. Вважати, що за актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованості, наукової та практичної цінності здобутих результатів дисертація Ємця Михайла Віталійовича на тему «Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з центральним тілом автофажної ракети», відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).
2. Рекомендувати дисертаційну роботу Ємця Михайла Віталійовича на тему «Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з центральним тілом автофажної ракети» до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика.
3. Клопотати перед вченою радою університету розглянути питання про створення спеціалізованої вченої ради для проведення разового захисту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика Ємця Михайла Віталійовича у такому складі:

№ з / п	Прізвище, ім'я, по батькові	Місце основної роботи, підпорядкування, посада	Науковий ступінь, шифр, назва спеціальності, за якою захищена дисертація, рік присудження	Вчене звання (за спеціальністю, кафедрою), рік присвоєння	Наукові публікації, опубліковані за останні п'ять років, за науковим напрямом, за яким підготовлено дисертацію здобувача
1	Давидов Сергій Олександрович (голова)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Міністерство освіти і науки України, професор кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій	Доктор технічних наук, 05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів, 2009 р	професор кафедри проектування і конструкцій літальних апаратів, 2011 р.	1. Давидов, С., Давидова, А., Склярський, І., & Чуприна, А. (2021). МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ С ГАЗОВИМИ ПУЗИРЯМИ В УМОВАХ ЗМІННОГО ПОЛЯ МАСОВИХ СИЛ. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки, 29(2), 23-38. DOI: 10.15421/472109 (фахове видання, категорія Б) 2. Давидов, С., Журавель, П., Кривенко, А., & Левченко, В. (2022). ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ КОСМІЧНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки, 30(1), 3-13. DOI: 10.15421/472201 (фахове видання, категорія Б) 3. Давидов, С. О., Давидова, А. С., Рак, Д. С. (2024). Математичне моделювання руху газових пазирів в потоці палива на перехідному етапі роботи маршових двигунів. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки, 35(2), 13-21. DOI: 10.15421/472410 (фахове видання, категорія Б)
2	Губін Олександр Ігорович (рецензент)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу	Кандидат технічних наук, 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, 2010 р.	Доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу, 2014 р.	1. Дреус, А., Губін, О., Бондаренко, В., Лисенко, Р., & Лю, Б. (2021). An approximate approach to estimation of dissociation rate of gas hydrate in porous rock bed. E3S Web of Conferences, 230, 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/202123001002. ISSN:2267-1242. (Scopus) 2. Дреус, А., Дронь, М., Губін, О., & Дубовик, Л. (2022). МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО

					НАГРІВУ І ПЛАВЛЕННЯ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ В АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки, 30(1), 20-34. DOI: 10.15421/472203 (фахове видання, категорія Б) 3. Бразалук, О., Бразалук, Ю., & Губін, О. (2022). МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ. Системні технології, 2(139), 137–145. DOI: 10.34185/1562-9945-2-139-2022-16 (фахове видання, категорія Б)
3	Бразалук Юлія Володимирівна (рецензент)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Міністерство освіти і науки України, доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу	Канд. фіз.-мат. наук (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), 2014 р.	Доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу, 2023 р.	1. Бразалук, О., Бразалук, Ю., & Губін, О. (2022). МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ. Системні технології, 2(139), 137–145. DOI: 10.34185/1562-9945-2-139-2022-16 (фахове видання, категорія Б) 2. Біляєв, М. М., Біляєва, В. В., Русакова, Т. І., Козачина, В. А., Берлов, О. В., Семененко, П. В., Козачина, В. В., Бразалук, Ю. В., Клим, В. Ю., & Татарко, Л. Г. (2022). Розробка методу оцінки запиленості повітря у головному обтічнику ракети-носія. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(1 (119), 17–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266013 (фахове видання, категорія А, Scopus, Q3) 3. Бразалук, О. К., Гоман, О. Г., & Бразалук, Ю. В. (2021). Особливості застосування методу граничних елементів для розв'язування крайових задач в областях з рухомими межами. Системи та технології, 62(2), 94–103. DOI: 10.32836/2521-6643-2021.2-62.5 (фахове видання, категорія Б)
4	Перцевий Віталій Олександрович (опонент)	Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, старший науковий співробітник	Кандидат технічних наук (05.14.06 Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика), 2009 р.	Відсутнє	1. Zhezhevskyi O., Potapchuk I., Pertsevyi V., Bosyi D., Biriukov D., Shevchenko S. Numerical modeling of the thermal characteristics of a fan spray cooling tower // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – Vol. 1348. – Article ID 012090. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012090. ISSN: 1755-1315. (Scopus) 2. Zhevzhyk O.V. Mathematical modeling of the borehole heating process by means of

					axial plasmatron / O.V. Zhevzyk, I.Yu. Potapchuk, V.I. Yemelianenko, M. Sekar, V.O. Pertseyi // Геотехнічна механіка.- 2022.- №160.- С. 152-159. DOI: 10.15407/geotm2022.160.152 (фахове видання, категорія Б) 3. Zhevzyk O.V. Analysis and ways for advancing of mathematical model of pulverized coal ignition and combustion / O.V. Zhevzyk, I.Yu. Potapchuk, V.O. Pertseyi, M. Sekar // Геотехнічна механіка.- 2022.- №163.- С. 119-139. DOI: 10.15407/geotm2022.163.119 (фахове видання, категорія Б)
5	Кваша Юрій Олександрович (опонент)	Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, завідувач відділу динаміки гідромеханічних і віброзахисних систем	Доктор технічних наук (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), 2007	Старший науковий співробітник за спеціальністю 05.07.05 - теплові двигуни літальних апаратів, 1998 р.	1. Пилипенко О. В., Петрушенко Н. В., Кваша Ю. О. Чисельне моделювання нестационарної течії в гідравлічній системі за кавітуючою шайбою. Технічна механіка. 2022. № 3. С. 16–22. DOI: 10.15407/itm2022.03 (фахове видання, категорія Б) 2. Pylypenko O. V., Dolgoplov S. I., Nikolayev O. D., Khorlak N. V., Kvasha Yu. A., Bashliy I. D. Determination of the Thrust Spread in the Cyclone-4M First Stage Multi-Engine Propulsion System During its Start. Sci. innov. 2022. Vol. 18. No. 6. P. 97 – 112. DOI: 10.15407/scine18.06.097 (фахове видання, категорія А, Scopus, Q4) 3. Кваша Ю. О., Петрушенко Н. В. До аеродинамічного вдосконалення повітрозабірників авіаційних газотурбінних двигунів. Технічна механіка. 2024. № 4. С. 3–9. DOI: 10.15407/itm2024.04.003 (фахове видання, категорія Б)

Результати голосування:

«За» – 11 осіб,
«Проти» – немає,
«Утримались» – немає.

Голова
наукового семінару

Секретар



Хамініч О. В.

Кравець О.В.