

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію Ємця Михайла Віталійовича

«Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з центральним тілом автофажної ракети», подану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота М.В. Ємця присвячена актуальній науковій задачі математичного моделювання фізичних процесів у перспективних ракетних системах нового покоління. Дослідження орієнтоване на розвиток теоретичних і прикладних засад моделювання процесів у так званих автофажних ракетах — інноваційних носіях, конструктивні елементи яких поступово спалюються під час польоту. На відміну від класичних підходів до проектування ракет, де значна частина стартової маси витрачається на конструктивні компоненти, що після виконання своїх функцій стають баластом, концепція автофажності потребує побудови нових моделей взаємопов'язаних процесів газової динаміки і теплообміну, з урахуванням термохімічної деградації твердого палива, та з урахуванням оригінальної конструкції двигуна, яка не має аналогів. Використання методів математичного моделювання уможливорює якісний опис динаміки роботи двигуна та оптимізацію його конструкцію, забезпечуючи підвищення енергоефективності та зменшення вартості запусків. Особливе значення мають моделі, що описують газифікацію полімерного палива, теплообмін з центральним тілом та враховують вплив параметрів паливного заряду, який скорочується під час горіння. Дослідження зазначених процесів потребує розробки та аналізу складних математичних моделей, а також чисельних методів для розв'язання систем рівнянь газової динаміки і теплообміну.

Актуальність теми підтверджується й практичними досягненнями: у Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара вперше створено

експериментальний прототип автофажного двигуна, який успішно пройшов стендові випробування. Це відкриває можливості для верифікації математичних моделей на основі експериментальних даних, що є важливою складовою сучасного прикладного моделювання.

Таким чином, дослідження є своєчасним і має значну наукову та прикладну цінність. Воно інтегрує математичне моделювання складних фізико-хімічних процесів із практичними задачами інженерної механіки та теплофізики, що відповідає сучасним тенденціям розвитку прикладної математики як міждисциплінарної науки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження тісно пов'язане з науковими програмами і планами університету та виконувалося в межах держбюджетних науково-дослідних тем. Зокрема, робота проведена в рамках НДР “Теоретичне та експериментальне обґрунтування автофажнихдвигунних систем відведення об’єктів з низьких навколоземних орбіт” (2020–2022рр., №0120U102254) та НДР “Обґрунтування проєктно-балістичних параметрів надлегких ракет-носіїв з полімерними корпусами з урахуванням аеродинамічних та теплофізичних ефектів на атмосферній ділянці” (2021–2023рр., №0121U109770). Тематика цих наукових проєктів безпосередньо пов'язана з предметом дисертації, що свідчить про її відповідність пріоритетним напрямам досліджень університету.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота структурно складається зі вступу, анотацій українською та англійською мовами, трьох основних розділів (кожен із них завершується висновками), загальних висновків, переліку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 123 сторінки. У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, визначено мету і основні

завдання, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, окреслено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, описано методи дослідження та особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведено огляд літературних джерел за тематикою малого ракетного носія та концепції автофажного ракетного двигуна. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку надлегких ракет-носіїв і показано актуальність використання полімерних паливних оболонок для підвищення ефективності таких ракет. Розглянуто історичні передумови створення автофажних ракет та еволюцію відповідних ідей. Описано конструкцію експериментального автофажного ракетного двигуна з центральним тілом (внутрішнім газифікатором) та принцип його роботи. На основі аналізу публікацій визначено основні відмінності між автофажними і традиційними ракетними двигунами, а також окреслено специфічні проблеми їх математичного моделювання (безперервна подача твердого полімерного палива, процес газифікації в камері згоряння, наявність центрального тіла тощо).

У другому розділі представлено розвиток аналітичної термодинамічної моделі згоряння полімерного палива в ракетному двигуні. У стаціонарному наближенні сформульовано стехіометричні рівняння горіння поліетилену з різними твердими окислювачами (перхлорат літію, перхлорат амонію, нітрат калію). За допомогою програмного комплексу ASTRA-4 визначено рівноважний хімічний склад продуктів згоряння та розраховано основні термодинамічні параметри газової суміші – температуру продуктів, середню молекулярну масу, питому теплоємність тощо. Виконано порівняльний аналіз отриманих параметрів для різних пар «пальне – окислювач», що дозволило оцінити перспективність кожної з цих комбінацій з точки зору досягнення високих енергетичних характеристик двигуна.

У третьому розділі розроблено комп'ютерну модель стаціонарних процесів теплообміну та газодинаміки в двигунах з автофажним принципом роботи з внутрішнім газифікатором (центральним тілом). Описано конфігурацію

розрахункової області, що включає камеру згоряння з центральним тілом, конфузорно-дифузорну частину сопла Лавалю та зовнішню ділянку для коректного задання граничних умов; обґрунтовано вибір конфігурації розрахункової сітки і параметрів турбулентності. Виконано серію чисельних експериментів для різних режимів роботи двигуна. У результаті отримано розподіли основних параметрів потоку (тиску, температури, швидкості, густини) в камері згоряння та соплі, а також температурні поля у стінках центрального газифікатора. Проаналізовано структуру течії поблизу центрального тіла та у соплі. Розраховано теплові потоки на поверхні газифікатора.

Сформульовані загальні висновки узагальнюють отримані в розділах результати та відображають наукову новизну і практичну цінність проведеного дослідження.

За результатами перевірки електронною системою “StrikePlagiarism” встановлено показник оригінальності роботи ~99,9%, що свідчить про самостійність виконання дослідження.

Отже, представлена дисертація є завершеною науковою працею, яка повністю відповідає встановленим вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Оцінка обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертації є належно обґрунтованими і достовірними. Здобувач чітко сформулював постановку задач дослідження з урахуванням фізичних особливостей роботи автофажного ракетного двигуна з центральним тілом, а розроблені моделі спираються на закони теорії теплообміну та стисливої газодинаміки. Застосовані моделі добре апробовані у практиці інженерних розрахунків, що забезпечує достовірність отриманих результатів. Чисельна реалізація проведена з використанням сучасних і надійних методів чисельного моделювання.

Наукова новизна отриманих автором результатів

Наукова новизна результатів дослідження, отриманих здобувачем, полягає у наступному:

1. Вперше методами чисельного моделювання встановлені закономірності газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні ракети з автофажним принципом з урахуванням наявності центрального тіла (газифікаційної камери). На відміну від відомих моделей, запропонована модель враховує наявність полімерного пального, яке в процесі роботи двигуна переходить із твердого стану в рідкий, здійснюючи теплообмін з конструкцією центрального тіла.

2. Вперше методами математичного моделювання досліджено перебіг процесів газодинаміки і теплообміну продуктів згоряння палива для перспективного нового автофажного ракетного двигуна з центральним тілом. Визначено просторові розподіли теплових та газодинамічних полів для цієї конфігурації, чого раніше не було представлено в літературі.

3. Вперше за допомогою комп'ютерного моделювання підтверджено ефективність використання газифікованого полімерного пального в автофажних ракетних двигунах. Зокрема, встановлено, що поєднання полімерного пального з твердим ракетним окислювачем забезпечує питомий імпульс двигуна в діапазоні $\sim 240\text{--}280\text{с}$, що співставно з показниками традиційних твердопаливних двигунів. Також розраховано швидкість газифікації поліетиленового пального (близько 20мм/с) у газифікаційній камері, цього достатньо для стійкої роботи двигуна.

Отримані результати є новими і оригінальними, раніше в наукових джерелах не публікувалися.

Практичне значення одержаних результатів

Отримані в дисертації результати мають велике практичне значення для проєктування ракетних двигунів нового типу. Вперше створено комп'ютерну модель для розрахунку термогазодинамічних процесів в двигунах з автофажним принципом роботи, яка дозволяє проводити параметричні дослідження і підбирати конструктивні параметри внутрішніх елементів двигуна (газифікаційної камери, сопла тощо) та режими його роботи. Така модель може слугувати інструментом

інженерного аналізу при проєктуванні реальних автофажних ракетних установок, оскільки дає можливість оцінити вплив різних конструкційних рішень на характеристики двигуна без необхідності проведення численних дорогих експериментів. Практична цінність підтверджується тим фактом, що результати дисертаційного дослідження вже впроваджено в ході виконання досліджень в рамках держбюджетних тем та грантових програм в ДНУ ім. Олеса Гончара

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Основні результати дисертації Ємця М.В. були апробовані в ході наукових конференцій та опубліковані в статтях міжнародних видань. Здобувач активно представляв свою роботу, зокрема на міжнародній конференції “Людина і Космос” (Дніпро, 2020) та на 73-му Міжнародному астронавтичному конгресі (IAC2020, Дубай). За темою дисертації автором опубліковано 4 наукові статті, всі – у виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus (дві з них у журналах рівня Q3). Отже, результати дисертації пройшли необхідну апробацію: вони були висвітлені на конференціях та повністю або частково викладені у наукових статтях, що свідчить про належну апробацію отриманих результатів.

Мова та стиль викладення

Дисертацію написано українською мовою у чіткому науковому стилі. Автор упевнено оперує фаховою термінологією, подає матеріал послідовно й логічно; текст читається без труднощів, грубих стилістичних та орфографічних помилок не виявлено. Усі формули, позначення й посилання оформлено коректно, що підтверджує дотримання норм академічної доброчесності та вимог до дисертаційних досліджень.

Зауваження та побажання

1. Моделювання процесів змішування та горіння виконано в спрощеному вигляді. Фактично приймається, що компоненти палива й окислювача миттєво перемішуються та згорають після потрапляння до камери, тоді як просторово-часові аспекти цих процесів не досліджувалися. Доцільно було б провести 3D-моделювання нестационарного процесу інжекції палива в камеру згорання,

випаровування (газифікації), перемішування та згоряння палива в камері. Такий підхід, хоча і виходить за рамки поставлених у роботі завдань, дозволив би краще відобразити реальну картину протікання процесів і оцінити вплив просторових факторів на результати.

2. У дисертації недостатньо досліджено теплофізичні властивості матеріалів у широкому діапазоні температур та умов. Залишається нез'ясованим, наскільки точно враховані теплові ефекти, які зазнають полімерне паливо та твердий окислювач при нагріванні до високих температур. Більш глибокий аналіз змін теплофізичних параметрів компонентів палива та окислювача (теплоємності, теплоти фазових переходів, розкладання тощо) підвищив би достовірність моделі.

3. Автор концентрується на порівнянні автофажного двигуна із традиційним твердопаливним і таке співставлення наведено (зокрема, за питомим імпульсом). Проте було б цікаво розширити аналіз, включивши порівняння також з рідинними ракетними двигунами або іншими перспективними схемами (гібридними, багаторазовими і т.д.). Наприклад, в дисертації можна було б додатково обговорити, в яких сценаріях автофажна ракета має найбільші переваги: для виведення малих супутників, для суборбітальних польотів, для систем видалення космічного сміття тощо. Також варто було б згадати про закордонні аналоги: відомо, що дослідження в галузі автофажних ракет ведуться, наприклад, у Великій Британії та Франції. Порівняння отриманих в дисертації результатів з опублікованими даними інших авторів показало б пріоритетність і унікальність напрацювань здобувача.

4. Автору слід було б більш виразно та чітко відокремити новизну в математичній моделі або в підході до моделювання.

5. Слід відзначити, що в роботі мають місце синтаксичні помилки, описки, також автори слід більш уважно ставитися до форматування та оформлення тексту.

Вказані зауваження не є критичними і не ставлять під сумнів отримані здобувачем результати, а радше окреслюють можливості для продовження роботи в майбутньому.

Загальні висновки

Дисертація М.В. Ємця є завершеною науковою роботою, що виконана на високому фаховому рівні: поставлені завдання вирішено, результати обґрунтовано та апробовано. Робота містить всі необхідні кваліфікаційні ознаки дисертаційного дослідження на здобуття ступеня доктора філософії, і подані до захисту наукові положення є достатніми за обсягом, новизною та практичним значенням. Дисертація Ємця Михайло Віталійовича «Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з центральним тілом автофажної ракети» відповідає всім вимогам «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), а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Рецензент

доцент кафедри аерогідромеханіки

та енергомасопереносу

Дніпровського національного університету

імені Олеся Гончара

канд. техн. наук, доцент



Олександр ГУБІН

Підпис к.т.н. наук, доцента Губіна О. І. засвідчую

Проректор з наукової роботи Дніпровського національного університету

імені Олеся Гончара



Олег МАРЕНКОВ