

ВІДГУК

офіційного опонента

*на дисертацію Слюсарєва Володимира Володимировича на тему
«Особливості моделювання теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів,
виготовлених з використанням адитивних технологій»
подану на здобуття ступеня доктора філософії
зі спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка*

Актуальність теми дисертації

У сучасних умовах розвитку ракетно-космічної техніки особливого значення набувають дослідження, спрямовані на підвищення ефективності та надійності рідинних ракетних двигунів. Одним із ключових факторів, що визначають працездатність камери згоряння, є ефективність її системи охолодження, від якої залежить як ресурс роботи двигуна, так і можливість реалізації високих теплових навантажень.

Існуючі інженерні методики розрахунку процесів теплопередачі в камерах РРД значною мірою базуються на спрощених підходах, сформованих у період обмежених обчислювальних можливостей. Такі підходи не дозволяють у повній мірі враховувати складну геометрію трактів охолодження, зміну теплофізичних властивостей теплоносія, а також специфічні особливості сучасних технологій виготовлення.

Зокрема, активне впровадження адитивних технологій відкриває нові можливості у формуванні складних каналів охолодження, але водночас потребує перегляду традиційних підходів до їх розрахунку. Це обумовлено як відмінностями геометричних параметрів, так і підвищеною шорсткістю поверхонь, що істотно впливає на гідродинамічні та теплові процеси.

У зв'язку з цим, актуальною є задача розробки уточнених математичних моделей теплообміну в камерах РРД, які б враховували зазначені фактори та

забезпечували підвищення точності прогнозування температурного стану конструкції.

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

Тема дисертаційної роботи пов'язана з виконанням держбюджетною науково-дослідною роботою «Дослідження процесів у новітніх ракетних двигунах та енергетичних установках» (номер держреєстрації 0122U001325, ФТФ-4-22, 2022–2024) у Дніпровському національному університеті ім. Олеся Гончара. Актуальність та практичність даної роботи підтверджені Актом реалізації, засвідченим відповідальними особами ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛ».

Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі отримано нові наукові результати, які полягають у наступному:

1. розроблено математичну модель процесів у тракті охолодження камери рідинного ракетного двигуна, що базується на системі диференціальних рівнянь і дозволяє описувати перебіг теплогідравлічних процесів без необхідності явної дискретизації розрахункової області;
2. запропоновано підхід до моделювання місцевих гідравлічних опорів із використанням апарату узагальнених функцій, що забезпечує коректний опис різких змін параметрів потоку;
3. розроблено математичну модель оребрення довільної форми, яка враховує змінну геометрію ребра та відмінність між температурою його поверхні і середньою температурою в перерізі;
4. отримано узагальнену залежність, що встановлює функціональний зв'язок між температурою поверхні ребра, його геометричними характеристиками та теплофізичними параметрами системи.

Практичне значення отриманих результатів.

Практична цінність роботи визначається насамперед тим, що розроблені математичні моделі органічно доповнюють існуючі методи розрахунку теплопередачі в камерах РРД. Використання цих моделей дозволяє підвищити точність і скоротити тривалість розрахунків, що безпосередньо впливає на скорочення строків проектування та відпрацювання агрегатів двигунів і знижує загальні витрати на розробку.

Важливим практичним здобутком є також формалізований підхід до оптимального проектування трактів охолодження. На відміну від традиційного «ручного» підбору геометричних параметрів, запропонований підхід забезпечує їх обґрунтоване визначення безпосередньо на етапі проектування, що дозволяє суттєво скоротити тривалість розробки двигуна.

Аналіз вмісту дисертації.

Дисертаційна робота присвячена питанням проектування систем охолодження камер рідинних ракетних двигунів. За своєю структурою робота містить усі необхідні елементи: анотацію, вступ, чотири основних розділи з проміжними висновками, загальні висновки, список літератури та додатки.

Перший розділ охоплює аналіз існуючих підходів до моделювання теплопередачі в агрегатах РРД з урахуванням специфіки адитивного виробництва. Показано, що технологія 3D-друку, відкриває нові конструктивні можливості, але водночас накладає певні обмеження на процес проектування систем охолодження. Окрему увагу приділено підвищеній шорсткості поверхонь каналів охолодження, що характерно для адитивних технологій порівняно з традиційними методами виготовлення, та її впливу на гідравлічні втрати в тракті й інтенсивність теплопередачі.

Суттю другого розділу є розробка математичних моделей двох типів: моделі каналу охолодження та моделі місцевого опору. Модель каналу

охолодження виведена з фундаментальних рівнянь збереження і має вигляд системи диференціальних рівнянь, що описує перебіг процесів у тракті охолодження. Верифікаційні розрахунки отриманої моделі, які проведено через зіставлення з результатами чисельного моделювання нагрівання рідини в тракті охолодження сопла камери двигуна, засвідчили її коректність.

У третьому розділі розроблено математичну модель ребра, яка якісно вирізняється від існуючих підходів до розрахунку ефективності оребрення тим, що дозволяє враховувати змінну товщину ребра по його висоті. Модель також доповнено коригувальним множником, що відображає різницю між температурою поверхні ребра та середньою температурою в його поперечному перерізі, проведено серію чисельних експериментів для визначення залежності цього множника від інших параметрів теплопередачі. У розділі показано, що впровадження запропонованих удосконалень дозволило суттєво підвищити точність визначення коефіцієнту оребрення в трактах охолодження РРД.

Четвертий розділ містить постановку та розв'язання задачі оптимізації трактів охолодження камер РРД. Задача сформульована у стандартній формі: визначено цільову функцію – масу системи «тракт охолодження + насос», введено функцію штрафу для обмеження температури стінки, задано вектор невідомих, а також обмеження у вигляді рівнянь та нерівностей. Тестування алгоритму виконано на трактах охолодження агрегатів існуючих двигунів; отримані результати підтвердили його ефективність та наявність глобального мінімуму в досліджуваних задачах. На наступному етапі розроблений підхід застосовано до проектування тракту охолодження камери перспективного двигуна в двох варіантах виготовлення – за класичною та адитивною технологіями. Продемонстровано, що різні технології виготовлення зумовлюють відмінні оптимальні геометричні параметри тракту, що наочно підтверджує актуальність і практичну цінність проведеного дослідження.

Дисертаційна робота Слосарева Володимира Володимировича «Особливості моделювання теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій» за своїм змістом та

спрямованістю повністю відповідає вимогам спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність.

Обґрунтованість викладених наукових положень забезпечується тим, що розробка математичних моделей на кожному етапі спирається на фундаментальні праці з гідродинаміки, теплопередачі та двигунобудування. Достовірність отриманих результатів підтверджена верифікацією, в рамках якої запропоновані моделі продемонстрували збіжність із результатами як аналітичних, так і чисельних методів розрахунку.

Публікація та апробація основних результатів дисертаційної роботи.

За матеріалами дисертаційного дослідження опубліковано 8 наукових праць: дві з них – у виданнях категорії А, три – у виданнях категорії Б, три – у вітчизняних наукових виданнях. Наукові результати пройшли апробацію на трьох міжнародних наукових конференціях та трьох конференціях всеукраїнського рівня.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. У роботі зазначено, що шорсткість після 3D-друку може бути в 10–12 разів вищою за традиційну. Чи враховується в моделі анізотропія шорсткості, яка залежить від кута нахилу стінки під час друку, і як це корелює з локальними коефіцієнтами тепловіддачі по довжині каналу?

2. Автор розробив модель ребра довільної форми, яка враховує нерівномірність температурного поля. Як враховується термічний опір контакту (або його відсутність) між матеріалом ребра та зовнішньою оболонкою, якщо камера виготовляється не монолітно, а із застосуванням різних циклів друку чи матеріалів?

3. Виникає питання щодо процесу оптимізації. Як цільова функція вибрано мінімізацію маси системи «тракт охолодження – насос». Чи враховувалися при цьому технологічні обмеження 3D-друку (наприклад, мінімально можлива товщина стінки або кути структур), які можуть зробити «математично оптимальну» форму неможливою для виготовлення?

4. Мета роботи – розробка методики оптимального проектування тракту охолодження РРД, яка забезпечувала б мінімальну вагу конструкції при допустимих значеннях температури стінки. Під час оптимізації РД-119 отримано зниження маси на 1.6 кг. Не зрозуміло, яка частка цієї економії у загальній масі двигуна і чи не перекривається цей вигравш ускладненням конструкції чи зниженням надійності через зменшення запасів міцності стін.

5. Верифікація проводилася на даних двигуна РД-107, що виготовлений за традиційною технологією. Чи є результати порівняння моделі із реальними вогневими випробуваннями саме 3D-друкарських камер, щоб підтвердити адекватність обліку специфічної адитивної шорсткості?

6. Подекуди в формулах не дається повне пояснення перетворень. Наприклад, не зрозуміло, чи враховував автор кут розширення каналу при обчисленні площі стінок каналу, що обмежують контур, адже бокова поверхня буде не прямокутник, а трапеція (формула 2.8)? Не пояснюється, чому в виразах на стор. 47 з'явився мінус перед проекціями сил дотичних напружень, хоча в (2.5) цей доданок позитивний.

В роботі є незначна кількість помилок, опісок (с. 5, 7, 25, 34, 132). Але вони не впливають на цілісність сприйняття тексту.

Загальні висновки про дисертаційну роботу.

Дисертація Слюсарєва Володимира Володимировича на тему «Особливості моделювання теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій» є завершеною кваліфікаційною працею, а напрямок досліджень, що в ній представлений, відповідає спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Все вищесказане дає підстави вважати, що дисертація здобувача ступеня доктора філософії Слюсарєва Володимира Володимировича на тему «Особливості моделювання теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій» відповідає 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. Відповідно, здобувач Слюсарєв Володимир Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор
завідувач відділу термогазодинаміки
енергетичних установок
Інституту технічної механіки
Національної академії наук України і
Державного космічного агентства України,



Наталія ПРЯДКО

Підпис Прядко Н.С. завіряю

Вчений секретар ІТМ НАНУ і ДКАУ, к.т.н.



Людмила ЛАПШНА