

РЕЦЕНЗІЯ

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. Сучасні тенденції скорочення термінів розробки та зменшення вартості створення ракетно-космічної техніки надають дослідженням, спрямованим на підвищення ефективності інженерних методів проектування агрегатів рідинних ракетних двигунів, особливої актуальності.

Однією з ключових задач при створенні камери РРД є забезпечення її надійного охолодження при мінімальних масогабаритних характеристиках. Існуючі підходи до розрахунку теплообміну часто не забезпечують необхідного балансу між точністю та швидкістю отримання результатів, що ускладнює їх використання на ранніх етапах проектування.

З урахуванням сучасних можливостей зміни геометрії каналів охолодження завдяки застосуванню адитивних технологій виникає необхідність у розробці гнучких та ефективних моделей теплових процесів, придатних для інтеграції у процедури оптимізації конструкції.

Дисертаційна робота спрямована на розробку методів моделювання теплообміну, які дозволять підвищити ефективність проектування систем охолодження камер РРД та скоротити витрати часу і ресурсів на розробку таких систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи пов'язана з держбюджетною науково-дослідною роботою Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара: «Дослідження процесів у новітніх ракетних двигунах та енергетичних установках» (номер держреєстрації 0122U001325, ФТФ-4-22, 2022–2024). Наукова новизна та

практична значущість проведених досліджень підтверджені актом реалізації результатів, засвідченими відповідальними особами ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛЬ».

Наукова новизна отриманих результатів. Дисертаційне дослідження містить наступну наукову новизну:

- математичну модель тракту охолодження камери двигуна, яка на відміну від існуючих моделей не передбачає явної дискретизації розрахункової області;
- математичну модель місцевих опорів із застосуванням узагальнених функцій, що дозволяє уніфікувати опис процесів у каналах тракту охолодження;
- уточнену математичну модель процесу теплообміну у ребрі довільної форми, до якої введено поправку на різницю між локальною температурою поверхні та середньою температурою у перерізі ребра;
- критеріальну залежність для визначення температури поверхні ребра через середню температуру ребра у перерізі, яка враховує геометричні параметри ребра та вплив теплофізичних властивостей матеріалу ребра й охолоджувача.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені математичні моделі представляють практичну цінність, як інструмент підвищення ефективності розрахунків процесів теплопередачі у камерах РРД. Упровадження нових та уточнених моделей у практику проектування дозволяє підвищити точність та скоротити часові витрати на розрахунки, що позитивно впливає на терміни відпрацювання агрегатів двигуна, а отже, і на зменшення загальної вартості процесу розробки двигуна.

Практичне значення також мають результати роботи, які пов'язані з розробкою формалізованого підходу до оптимального проектування трактів охолодження. Застосування такого підходу дозволяє перевести задачу вибору геометричних параметрів системи охолодження з площини інтуїтивного пошуку у площину обґрунтованої оптимізації, що забезпечує відчутне скорочення тривалості процесу проектування двигуна.

Аналіз змісту дисертації. Дисертаційна робота присвячена дослідженням особливостей проектування систем охолодження камер рідинних ракетних двигунів та містить усі необхідні структурні елементи: анотацію, вступ, чотири основні розділи з проміжними висновками, загальні висновки, список літератури та додатки.

Перший розділ присвячений критичному аналізу існуючих підходів до моделювання теплопередачі в агрегатах РРД, а також розгляду теплофізичних особливостей процесів, що обумовлено застосуванням адитивних технологій. Вплив параметрів 3D-друку на проектування систем охолодження з одного боку суттєво розширює конструктивні можливості, а з іншого – накладає додаткові конструктивні обмеження. Однією з найбільш значущих особливостей адитивного виробництва є підвищена шорсткість поверхонь трактів охолодження, що безпосередньо впливає на збільшення гідравлічного опору трактів та інтенсифікацію теплопередачі.

У другому розділі розроблено нові та уточнені математичні моделі тракту охолодження, а також модель місцевих опорів з розподіленими параметрами. Використання функції Дірака дозволило формалізувати втрати тиску на місцевих опорах як точкову взаємодію. Верифікацію здійснено шляхом порівняння результатів розрахунків процесу нагрівання рідини у тракті охолодження надзвукової секції сопла камери двигуна на основі запропонованої автором моделі з результатами чисельного моделювання за допомогою пакета прикладних комп'ютерних програм ANSYS.

У третьому розділі розглянуто математичну модель ребра, яка ураховує зміну товщини ребра по висоті. До параметрів моделі уведено коефіцієнт, який ураховує відмінність між температурою поверхні ребра та середньою температурою в його поперечному перерізі, а також теплофізичні властивості матеріалів та теплоносіїв. Аналіз розмірностей дозволив автору мінімізувати кількість незалежних параметрів варіювання та провести серію цілеспрямованих чисельних експериментів. Результати обчислювального експерименту доводять, що внесені автором уточнення призводять до

підвищення точності розрахунків коефіцієнту ефективності оребрення у трактах охолодження РРД.

Четвертий розділ присвячено розв'язанню задачі оптимізації трактів охолодження камер РРД. Постановка задачі включає визначення цільової функції, як масу системи «тракт охолодження + насос», а також функції штрафу, яка забезпечує неперевищення температурою стінки допустимої величини. У розділі описано запропонований автором алгоритм оптимізації та обґрунтовано вибір методу оптимізації. Алгоритм оптимізації апробовано на трактах охолодження існуючих двигунів. Тестові розрахунки доводять наявність глобального мінімуму у розглянутих задачах. Розроблений підхід застосовано також при проектуванні тракту охолодження камери перспективного двигуна. Порівняльний аналіз двох варіантів технології виготовлення – традиційної та адитивної – показав, що оптимальні геометричні параметри тракту охолодження суттєво відрізняються залежно від обраної технології виготовлення, що також підтверджує практичну актуальність проведеного дослідження.

Дисертаційна робота Слюсарєва Володимира Володимировича «Особливості моделювання теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій» за колом розглянутих питань та отриманих результатів відповідає спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність. Теоретична обґрунтованість наукових положень дисертації забезпечується систематичними посиланнями на відомі роботи у галузі гідродинаміки та теплопередачі. Достовірність розроблених моделей підтверджена їх верифікацією. Отримані автором результати задовільно узгоджуються з результатами розрахунків за відомими інженерними методиками та з результатами чисельного моделювання.

Публікація та апробація основних результатів дисертаційної роботи. Матеріали дисертації опубліковано у 8 наукових працях, розподілених таким чином: дві статті у виданнях категорії А, три – у виданнях категорії Б та три – у

наукових виданнях України. Широку апробацію отримані результати пройшли на шести наукових конференціях, три з яких мали міжнародний, а три – всеукраїнський статус.

Зауваження до дисертаційної роботи.

З точки зору методології в якості критерію оптимізації доцільнішим було обрати величину коефіцієнта ефективності обрешітки з подальшою прив'язкою величини коефіцієнта ефективності до маси камери двигуна.

2. У роботі не наведено результати порівняння розрахункових та експериментальних даних.

3. Для верифікації моделі використано застарілі дані, які стосуються двигуна РД-107.

Загальні висновки про дисертаційну роботу. За результатами ознайомлення із текстом дисертаційного дослідження та опублікованих наукових матеріалів можна зробити висновок про те, що дисертація здобувача ступеня доктора філософії Слюсарєва Володимира Володимировича на тему «Особливості моделювання теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій» є завершеною та актуальною працею, виконаною на високому рівні. Дисертаційна робота 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. Відтак, здобувач Слюсарєв Володимир Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри двигунобудування
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара,



Олександр ЗОЛОТЬКО

Володимир Слюсарєв

Г. Козак