

## 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*

Однією з ключових проблем сучасного ракетного двигунобудування є забезпечення надійного теплового захисту камер рідинних ракетних двигунів (РРД) за умов надзвичайно інтенсивних теплових навантажень. Ефективність охолодження камери безпосередньо визначає ресурс, надійність та масові характеристики двигуна, що робить цей напрям досліджень постійно актуальним.

Разом із тим, широке впровадження адитивних технологій у виробництво агрегатів РРД відкриває принципово нові можливості для реалізації складних геометричних форм охолоджувальних каналів – таких, що є недосяжними при традиційних методах виготовлення. Зокрема, з'являється можливість створення каналів зі змінними поперечними перерізами та розвиненими ребристими поверхнями, що дозволяє суттєво підвищити ефективність тепловідведення.

Водночас характерна для адитивного виробництва підвищена шорсткість внутрішніх поверхонь каналів ускладнює застосування класичних розрахункових методів, сформованих для умов гладких стінок. Це зумовлює необхідність розробки нових математичних моделей, здатних адекватно описати процеси тепломасообміну та гідравлічний опір у каналах складної форми з нерегулярним мікрорельєфом поверхні.

Дисертаційна робота Слюсарєва В. В. присвячена розв'язанню саме цих завдань: розробці та обґрунтуванню математичних моделей теплообміну в трактах охолодження камер РРД, виготовлених із застосуванням адитивних технологій, а також формуванню на їх основі методології оптимального

проектування систем охолодження. Запропоновану тему дослідження слід вважати актуальною та своєчасною.

### ***Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами***

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара відповідно до одного з напрямів держбюджетної науково-дослідної роботи університету: «Дослідження процесів у новітніх ракетних двигунах та енергетичних установках» (номер держреєстрації 0122U001325, ФТФ-4-22, 2022–2024). Практичне значення роботи підтверджується Актом реалізації, засвідченим відповідальними особами ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛ».

Метою дисертаційної роботи є розробка математичних моделей теплообміну та гідравлічного опору в трактах охолодження камер РРД для підвищення точності інженерних розрахунків і ефективності проектування з урахуванням особливостей адитивного виробництва.

### ***Наукова новизна отриманих автором результатів***

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

1. Удосконалено математичну модель тракту охолодження камери двигуна, відмінною рисою якої є відсутність необхідності явної дискретизації розрахункової області. Зазначена особливість суттєво спрощує практичне застосування моделі та скорочує обчислювальні витрати при проведенні інженерних розрахунків.

2. Розроблено математичну модель місцевих гідравлічних опорів на основі апарату узагальнених функцій, зокрема функції Дірака, що дозволяє трактувати втрати тиску на місцевих опорах як точкову взаємодію. Запропонований підхід природним чином інтегрується із загальною моделлю тракту охолодження та не потребує введення окремих граничних умов у вузлах зміни геометрії.

3. Розроблено математичну модель ребра довільної геометричної форми, у якій враховано змінну товщину ребра вздовж його висоти, а також

відмінність між температурою поверхні ребра та середньою температурою у відповідному поперечному перерізі. Зазначені удосконалення дозволяють суттєво підвищити точність розрахунку коефіцієнту оребрення трактів охолодження РРД.

4. Отримано критеріальну залежність, що пов'язує температуру поверхні ребра із середньою температурою ребра в перерізі, геометричними параметрами ребра та теплофізичними характеристиками матеріалу ребра й охолоджувача. Залежність встановлено на підставі серії чисельних експериментів із попереднім аналізом розмірностей, що дозволило перейти до безрозмірного формулювання задачі та суттєво скоротити обсяг необхідних обчислювальних досліджень.

Проаналізувавши та оцінивши наукові результати, їх новизну і достовірність, слід зазначити, що сформульована в дисертаційній роботі мета дослідження досягнута повністю, наукові результати обґрунтовані і мають наукову цінність, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

### ***Практичне значення одержаних результатів***

. Нові математичні моделі теплопередачі в камері двигуна дозволяють підвищити точність інженерних розрахунків і знизити трудомісткість їх проведення, що в підсумку сприяє скороченню строків і вартості розробки агрегатів двигуна. Запропоновані моделі є достатньо універсальними і можуть бути застосовані для широкого класу трактів охолодження — як традиційної, так і адитивної технологій виготовлення.

. Розроблено підхід до оптимального проектування трактів охолодження, що надає процесу визначення геометричних параметрів системи охолодження формалізованого характеру. Завдяки цьому на етапі проектування стає можливим обґрунтований вибір раціональних параметрів без вдавання до трудомісткого перебору варіантів, що скорочує загальний цикл розробки.

. Встановлено, що оптимальні геометричні параметри тракту охолодження суттєво залежать від застосованої технології виготовлення — традиційної чи

адитивної, — що є важливим практичним висновком для проєктувальників перспективних РРД. Отримані результати дозволяють кількісно обґрунтовувати вибір технології виготовлення вже на ранніх етапах проєктування.

. Практичне значення отриманих результатів підтверджується Актом реалізації ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛ», що засвідчує впровадження розроблених підходів у реальну інженерну практику зі створення перспективних конструкторсько-технологічних рішень у галузі ракетного двигунобудування.

### ***Аналіз змісту дисертації***

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох основних розділів із проміжними висновками, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Структура роботи є логічно побудованою, повною і відповідає меті та завданням дослідження.

У першому розділі проведено ґрунтовний аналіз існуючих методів розрахунку теплопередачі в агрегатах РРД, а також висвітлено теплофізичні особливості, зумовлені застосуванням адитивних технологій виготовлення. Автором переконливо показано, що 3D-друк елементів систем охолодження є фактором, який одночасно розширює проєктні можливості й формує нові конструктивні обмеження. Детально розглянуто вплив підвищеної шорсткості поверхонь охолоджувальних каналів – невід'ємної характеристики адитивного виробництва – на гідравлічні втрати в тракті та ефективність теплообміну. Результати аналізу визначили постановку задач подальших розділів дисертації.

У другому розділі розроблено дві нові математичні моделі: модель каналу охолодження та модель місцевого опору. Перша отримана з фундаментальних рівнянь збереження і являє собою систему диференціальних рівнянь, що описує процеси в тракті охолодження; її коректність підтверджено відповідними верифікаційними розрахунками. З огляду на те, що зазначена модель описує лише втрати тиску на тертя, вона була розширена шляхом введення моделі місцевого опору. При побудові останньої використано математичний апарат узагальнених функцій із застосуванням функції Дірака. Верифікацію розширеної моделі

здійснено на основі порівняння з результатами чисельного моделювання нагрівання рідини в тракті охолодження сопла камери двигуна.

Третій розділ містить розробку та обґрунтування математичної моделі ребра, відмінною рисою якої порівняно з існуючими підходами є врахування змінної товщини ребра вздовж його висоти. Для підвищення адекватності моделі її доповнено множником, що описує різницю між температурою поверхні ребра та середньою температурою в поперечному перерізі. Числові значення цього множника та його залежність від параметрів теплопередачі встановлено на підставі серії чисельних експериментів. Попередньо проведений аналіз розмірностей дозволив перейти до безрозмірного формулювання задачі, що суттєво скоротило необхідний обсяг обчислювальних досліджень. Показано, що реалізовані вдосконалення забезпечують значне зростання точності розрахунку коефіцієнту оребрення.

У четвертому розділі сформульовано задачу оптимізації трактів охолодження камер РРД та представлено результати тестових розрахунків. Постановка задачі охоплює цільову функцію – масу системи «тракт охолодження + насос», функцію штрафу для дотримання температурних обмежень на стінку, вектор оптимізованих параметрів, рівняння-зв'язки та нерівності-обмеження. Описано запропонований алгоритм оптимізації з обґрунтуванням вибору методу. Перевірку алгоритму здійснено на реальних трактах охолодження існуючих двигунів; тестові розрахунки засвідчили коректну роботу алгоритму та існування глобального мінімуму в розглянутих задачах. Розроблений підхід використано при проєктуванні тракту охолодження камери перспективного двигуна з урахуванням двох альтернативних технологій виготовлення.

Аналіз структури дисертації свідчить про її відповідність поставленим задачам та меті наукового дослідження. Наприкінці кожного розділу дисертаційної роботи наведено висновки, які підсумовують отримані наукові результати. У загальних висновках узагальнено значущі результати роботи в цілому, які відображають наукові та практичні досягнення автора.

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

Дисертаційна робота за структурою та змістом відповідає вимогам, є завершеною науковою працею, її результати свідчать про наявність особистого внеску здобувача у галузі знань 13 Механічна інженерія.

### ***Публікація та апробація основних результатів дисертації***

Основні матеріали дисертаційної роботи відображено у 8 наукових публікаціях: двох статтях у виданнях категорії А, трьох – категорії Б та трьох – у наукових виданнях України. До здобутків автора слід віднести апробаційні публікації за результатами участі у трьох міжнародних та трьох всеукраїнських наукових конференціях.

### ***Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність***

Достовірність отриманих результатів забезпечується:

- спиранням розроблених математичних моделей на фундаментальні праці з двигунобудування та теорії теплообміну, що забезпечує належний рівень теоретичної обґрунтованості;
- процедурою верифікації, в ході якої встановлено задовільну збіжність запропонованих моделей із відомими аналітичними підходами та даними чисельного моделювання;
- публікацією статей у фахових виданнях України та апробацією отриманих наукових результатів на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях;

### ***Мова та стиль викладення результатів***

Дисертаційна робота Слюсарєва Володимира Володимировича написана українською мовою, має змістовну цілісність та послідовність.

### ***Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності***

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні, про що свідчить висновок перевірки на плагіат за допомогою спеціалізованої програми StrikePlagiarism.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Слюсарєва Володимира Володимировича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації та плагіату. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### ***Зауваження до дисертаційної роботи***

В роботі автором обґрунтовано побудована диференційна модель тракту охолодження камери двигуна з урахуванням місцевого гідравлічного опору, що не потребує явної дискретизації розрахункової області. Слід зазначити, що модель є квазіодновимірною, з наступними особливостями:

- використано значення дотичних напружень до усталеного турбулентного потоку рівняння (2.9), тобто не враховано можливих перехідних режимів;

- використано квазіістисливу модель рідини в рівнянні збереження маси, але густина потоку може змінюватися, зміна густини задана рівнянням (2.20), що справедливо тільки для малих градієнтів температур;

- для визначення кількості теплоти через стінки каналу використано рівняння закону Ньютона-Ріхмана в якому коефіцієнт тепловіддачі приймається заданим, а він може змінюватися.

Модель є коректною, як інженерна оцінка одновимірної задачі, але дуже важливо вказати обмеження до використання моделі та обґрунтувати прийняті припущення. Приведена верифікація по даним для одного двигуна РД-107 не є достатньою.

При рішенні задачі оптимізації трактів охолодження по критерію мінімуму маси використано метод градієнтного спуску, який знаходить лише локальний

мінімум. Слід зазначити, що оптимізація базується на моделі, яка вже має спрощення та містить неточності. Приведений висновок (стор. 99), що виконано «перевірка наявності глобального мінімуму» є не коректною.

### ***Загальні висновки про дисертаційну роботу***

Дисертація здобувача ступеня доктора філософії Слюсарєва Володимира Володимировича на тему «Особливості моделювання теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій» є самостійним та завершеним науковим дослідженням. З урахуванням цього факту можна зробити висновок, що 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, а здобувач, Слюсарєв Володимир Володимирович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

### **Рецензент:**

кандидат фізико-математичних наук, доцент  
доцент кафедри ракетно-космічних  
та інноваційних технологій  
Дніпровського національного  
університету імені Олеся Гончара,



Володимир ЛПОВСЬКИЙ

Підпис доцента Володимира ЛПОВСЬКОГО засвідчую:

Вчений секретар вченої ради  
Дніпровського національного  
університету імені Олеся Гончара,  
кандидатка фізико-математичних наук,  
доцентка



Тетяна ХОДАНЕН