

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»
з галузі знань 13 «Механічна інженерія»

Актуальність теми дисертації

У сучасних умовах зростаючої конкуренції у ракетно-космічній галузі та підвищення вимог до ефективності й надійності двигунів дослідження, спрямовані на вдосконалення ключових елементів їх конструкції, набувають особливого значення. Камера рідинного ракетного двигуна функціонує в умовах екстремально високих теплових навантажень, що обумовлює необхідність створення високоефективних систем охолодження. Попри значну кількість існуючих рішень, задача точного моделювання теплообміну залишається актуальною, особливо з урахуванням нових технологічних та експлуатаційних факторів.

Додаткову складність вносить впровадження сучасних методів виготовлення, зокрема адитивних технологій, а також необхідність скорочення термінів розробки та підвищення економічної ефективності створення двигунів. У поєднанні з потенційним використанням рідинних ракетних двигунів (РРД) в оборонному секторі це визначає стратегічну важливість підвищення точності та надійності інженерних розрахунків.

Представлена робота синтезує комплекс розроблених автором нових математичних моделей теплообміну та систематизує існуючі підходи до проєктування трактів охолодження камер РРД. У дослідженні зосереджено увагу на задачах, розв'язання яких є критично важливим як для розвитку ракетно-космічної галузі, так і для підвищення конкурентоспроможності вітчизняної

ракетної техніки. Із цього випливає, що тема дисертаційної роботи є важливою, актуальною та чітко орієнтованою на досягнення практичних результатів.

Формулювання наукової задачі, нове вирішення якої одержано в дисертації

Метою роботи є розробка методики оптимального проєктування тракту охолодження рідинного ракетного двигуна, виготовленого адитивним методом, яка забезпечувала б мінімальну вагу конструкції при допустимих значеннях температури стінки.

Сформульовані та вирішені завдання дослідження:

- проаналізовано сучасні підходи до розрахунку охолодження камер рідинних ракетних двигунів, визначено напрями досліджень;
- розроблено диференціальну модель тракту охолодження камери рідинного ракетного двигуна;
- проведено чисельне моделювання теплопровідності в ребрах трактів охолодження РРД;
- за результатами обчислювальних експериментів сформульовано нові розрахункові залежності для коефіцієнту ефективності оребрення з урахуванням нерівномірності поля температур в поперековому перерізі ребра;
- поставлено задачу оптимізації тракту охолодження, розроблено алгоритм її розв'язку та проведено тестові розрахунки;
- проведено оптимізацію параметрів тракту охолодження камери перспективного двигуна та визначено отриману перевагу.

Об'єктом дослідження є процеси теплопередачі та гідродинаміки в агрегатах рідинних ракетних двигунів

Предметом дослідження є теплофізичні процеси у трактах охолодження рідинних ракетних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій.

Для отримання, аналізу та обґрунтування результатів були використані: чисельні методи теплогідравліки – використання системи диференціальних

рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії для опису стаціонарної течії охолоджувача в каналах тракту; математичне моделювання зі спеціальними функціями – застосування апроксимацій, функції Дірака для математичного опису місцевих гідравлічних опорів у диференціальній формі; методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) – використання програмного комплексу Ansys Fluent, для верифікації розроблених одновимірних моделей та проведення чисельних експериментів; методи математичної статистики та апроксимації – побудова емпіричних залежностей на основі обробки результатів багатофакторних чисельних розрахунків; методи математичного програмування – застосування градієнтного методу для знаходження геометричних параметрів тракту, що мінімізують масу системи «камера + насос»; методи інженерного аналізу міцності – використання четвертої теорії міцності для визначення напружено-деформованого стану стінок камери та формування обмежень у задачі оптимізації; методи порівняльного аналізу – співставлення результатів розрахунків із наявними експериментальними та проєктними даними існуючих двигунів (РД-107, РД-119).

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 держбюджетної науково-дослідної роботи «Дослідження процесів у новітніх ракетних двигунах та енергетичних установках» (номер держреєстрації 0122U001325, ФТФ-4-22, 2022–2024). До роботи додається акт реалізації, засвідчений відповідальними особами ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛ», що підтверджує практичну цінність отриманих результатів.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів дисертаційної роботи

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану наукової проблеми, обґрунтуванні та розробленні основних ідей дисертації, визначенні мети і

завдань дослідження; теоретичному обґрунтуванні та розробленні нових математичних моделей теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів; проведенні верифікаційних розрахунків; формуванні висновків; публікації результатів у вітчизняних та зарубіжних виданнях та їх апробації на конференціях. Усі результати теоретичних та розрахункових досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно.

Автором розроблено нову постановку математичної моделі тракту охолодження камери двигуна, яка дозволяє уникнути явної дискретизації розрахункової області, а також модель місцевих опорів, побудовану із залученням апарату узагальнених функцій. Здійснено верифікацію розроблених моделей шляхом порівняння отриманих за їх допомогою результатів з результатами чисельного моделювання в системі Ansys. Автором розроблено модель теплового стану ребра довільної форми з урахуванням неоднорідності температурного поля та сформульовано формалізовану постановку задачі оптимального проєктування трактів охолодження. Отримані результати продемонстрували суттєве підвищення точності розрахунків і наявність мінімуму в розглянутих оптимізаційних задачах.

Аналіз основного змісту роботи

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано її мету та завдання, визначено об'єкт та предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, представлено перелік публікацій за темою дисертації.

У першому розділі проведено ґрунтовний огляд існуючих методів моделювання теплопередачі в агрегатах РРД та проаналізовано особливості теплообміну, зумовлені впровадженням адитивних технологій. Встановлено, що 3D-друк, розширюючи конструктивні можливості при створенні систем охолодження, одночасно зумовлює нові проєктні обмеження. Окрему увагу приділено проблемі підвищеної шорсткості внутрішніх поверхонь каналів – характерній особливості адитивного виробництва, що суттєво впливає як на

гідравлічні втрати тиску в тракті охолодження камери РРД, так і на інтенсивність теплообміну.

Другий розділ присвячено теоретичному обґрунтуванню та розробці математичних моделей каналу охолодження і місцевого опору. Модель каналу охолодження базується на фундаментальних рівняннях збереження маси, імпульсу та енергії. Для врахування впливу втрат тиску на місцеві опори модель доповнено відповідною складовою, розробленою із застосуванням функції Дірака як інструменту теорії узагальнених функцій, що дозволило розглядати місцеві опори як зосереджені точкові збурення в потоці. Верифікацію запропонованої моделі проведено шляхом порівняння результатів розрахунків із даними чисельного моделювання нагрівання охолоджувача в тракті охолодження камери РРД.

Третій розділ присвячено побудові математичної моделі ребра. На відміну від відомих методів розрахунку ефективності оребрення розроблена модель враховує зміну товщини ребра вздовж його висоти. До моделі введено додатковий множник, що коректно відображає різницю між температурою поверхні ребра та середньою температурою в поперечному перерізі. Функціональну залежність цього множника від кута нахилу бічної поверхні ребра, безрозмірної температури охолоджувача та числа Біо визначено за результатами серії чисельних експериментів із попереднім аналізом розмірностей, що дозволило отримати безрозмірну форму залежності та суттєво скоротити простір варіюваних параметрів.

У четвертому розділі розроблено формалізовану постановку задачі оптимізації трактів охолодження камер РРД та проведено її тестову апробацію. Постановка задачі включає: цільову функцію у вигляді сумарної маси системи «тракт охолодження + насос», штрафну функцію для забезпечення температурних обмежень на стінку камери, вектор варіюваних параметрів, а також систему рівнянь-зв'язків та нерівностей-обмежень. Тестові розрахунки підтвердили збіжність алгоритму оптимізації та наявність глобального мінімуму в розглянутих задачах.

Завершується робота загальними висновками, які є логічними, цілком впливають із результатів дослідження та повною мірою відображають основні отримані результати.

Наукові положення, висновки та рекомендації Слюсарєва Володимира Володимировича, на мій погляд, обґрунтовані належним чином.

Оцінка структури дисертації, мови та стилю викладення

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів із висновками до кожного з них, загальних висновків, переліку використаних джерел та додатків. Дисертація написана українською мовою з фаховим використанням сучасної науково-технічної термінології. Викладення матеріалу є логічним, послідовним і повною мірою відповідає вимогам до наукових праць, а зміст роботи висвітлює основні результати проведених досліджень.

Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у наступних результатах:

- запропоновано нову постановку математичної моделі тракту охолодження камери двигуна, яка дозволяє уникнути необхідності явної дискретизації розрахункової області;

- розроблено модель місцевих опорів із застосуванням математичного апарату узагальнених функцій;

- побудовано модель теплового стану ребра довільної форми, що враховує неоднорідність температурного поля між поверхнею ребра та його середньою температурою в перерізі;

- встановлено критеріальну залежність температури поверхні ребра від його середньої температури в перерізі, геометричних характеристик, а також теплофізичних параметрів матеріалу й охолоджувача.

Практичне значення роботи полягає в розширенні інструментарію моделювання теплопередачі в камерах РРД. Впровадження розроблених моделей

сприяє підвищенню точності розрахунків при одночасному скороченні обчислювальних витрат. Це дозволяє прискорити темпи проєктування та відпрацювання агрегатів двигуна, що позитивно впливає на загальну вартість розробки.

Окремої уваги заслуговує розроблений формалізований підхід до оптимального проєктування трактів охолодження. Він дає змогу вже на ранніх етапах проєктування обґрунтовано визначати раціональні геометричні параметри системи охолодження, виключаючи необхідність їх емпіричного підбору та суттєво скорочуючи тривалість циклу розробки двигуна. Розроблений підхід застосовано при проєктуванні тракту охолодження камери перспективного двигуна для двох варіантів технології виготовлення: традиційної та адитивної, що наочно демонструє практичну цінність отриманих результатів.

Отримані результати дослідження є науково обґрунтованими та відповідають темі дисертації.

Рівень виконання поставленого наукового завдання, оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності

Розділи дисертації містять достатній обсяг матеріалу, що демонструє вирішення сформульованих завдань, і завершуються висновками. Вважаю, що здобувач Слюсарєв Володимир Володимирович оволодів необхідними для рівня доктора філософії компетентностями та методологією проведення наукових досліджень.

Оцінка академічної доброчесності дослідження

За результатами аналізу дисертаційної роботи та наукових публікацій автора порушень академічної доброчесності не виявлено. Ознаки фальсифікації чи фабрикації даних в роботі відсутні. Дисертаційна робота Слюсарєва Володимира Володимировича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів плагіату чи неналежних запозичень. Усі використані ідеї,

результати та твердження інших авторів супроводжуються відповідними посиланнями на першоджерела.

Відповідність дисертації спеціальності, за якою вона подається до захисту

Тематика, зміст та результати дисертаційної роботи Слюсарєва Володимира Володимировича «Особливості моделювання теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій» цілком відповідають спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» та галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність

Наукові положення дисертації ґрунтуються на фундаментальних засадах двигунобудування, теорії теплопередачі та гідродинаміки, що забезпечує їхню теоретичну коректність. Достовірність отриманих результатів підтверджується верифікацією розроблених моделей, яка продемонструвала високий ступінь збіжності з даними чисельного моделювання.

Опубліковані праці

За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць: 2 статті у наукових фахових виданнях України, що входять до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science, 3 статті у наукових фахових виданнях категорії «Б» Переліку МОН України, 3 статті у інших наукових виданнях України та 6 тез доповідей на конференціях.

Положення, представлені в дисертаційній роботі, пройшли всебічну апробацію на науково-практичних конференціях. Автор особисто представляв результати досліджень на трьох міжнародних та трьох всеукраїнських наукових конференціях.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У роботі при розрахунках переходу до адитивних технологій основна увага приділяється геометрії тракту охолодження камери РРД, проте поза увагою залишається питання зміни фізико-механічних властивостей матеріалів (теплопровідності, границі плинності) внаслідок специфіки процесу пошарового спікання. Доцільним було б проаналізувати, як заміна традиційних конструкційних матеріалів на їх адитивні аналоги впливає на загальний тепловий та міцнісний стан виробу.

2. Автором запропоновано введення поправочного коефіцієнта Θ_w для узгодження одновимірної моделі ребра з реальним двовимірним розподілом температур. Даний коефіцієнт представлено у вигляді апроксимаційної залежності (3.7), структура якої не має достатнього фізичного обґрунтування, зокрема, щодо вибору експоненціальної форми для кута нахилу стінки. Це обмежує можливість екстраполяції даної моделі на умови, які виходять за межі проведеного чисельного експерименту.

3. Автор враховує шорсткість, характерну для адитивного виробництва, переважно як фактор збільшення гідравлічного опору. Разом з тим, значна шорсткість каналів, виготовлених методом SLM-друку, має суттєвий вплив на інтенсифікацію теплообміну завдяки турбулізації пристінкового шару рідини. Відсутність комплексного врахування шорсткості як чинника, що одночасно змінює і перепад тиску, і коефіцієнт тепловіддачі, може призводити до похибок у визначенні температури стінки.

4. За результатами верифікації алгоритму оптимізації встановлено, що оптимальна товщина ребра постійно лежить на межі технологічних обмежень. У такому випадку включення даної величини до вектору параметрів, що оптимізуються, виглядає методично зайвим. Доцільніше було б зафіксувати мінімально можливу товщину ребра як константу, що дозволило б підвищити стійкість алгоритму та знизити розмірність задачі оптимізації.

5. Використання градієнтного методу для мінімізації маси конструкції в умовах складної цільової функції з накладеними штрафними функціями за

температурою може призводити до знаходження лише локальних оптимумів. Робота була б більш переконливою за умови порівняння результатів градієнтного спуску зі стохастичними методами.

6. При розрахунку еквівалентних напружень автор оперує їх сумарними значеннями, проте у роботі чітко не визначено співвідношення між напруженнями, викликаними тиском охолоджувача, та температурними напруженнями. Враховуючи високі теплові потоки в РРД, залишається незрозумілим, який із цих факторів є визначальним для обраних режимів роботи, та як це співвідношення змінюється при оптимізації товщини стінки.

7. У роботі присутня певна термінологічна неузгодженість при описі об'єктів верифікації. Зокрема, у другому пункті загальних висновків автор згадує про використання даних двигуна РД-108, тоді як у підрозділі 1.1.2 та відповідних графіках наведено результати для двигуна РД-107. Здобувачу доцільним було б дотримуватися єдиної назви об'єкта дослідження по всьому тексту роботи для уникнення неоднозначності при трактуванні отриманих результатів.

Виказані зауваження та побажання не мають принципового характеру і не знижують високий науковий рівень дисертаційного дослідження. Більшість із них мають дискусійний характер і спрямовані на подальший розвиток методичних підходів автора. Представлені результати дисертаційного дослідження є цілком достовірними, належним чином обґрунтованими та характеризуються безперечною науковою новизною і вагомим практичним потенціалом для авіаційно-космічної галузі.

Загальні висновки про дисертаційну роботу

В розглянутій дисертаційній роботі «Особливості моделювання теплообміну в камерах рідинних ракетних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій» було отримано нові наукові результати, що можуть бути використані при проєктуванні нових зразків ракетної техніки. З огляду на це, а також на основі опублікованих наукових матеріалів здобувача можна зробити висновок про те, що дисертація 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 наказу МОН України від 12.01.2017 № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» (зі змінами) та постанови Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (зі змінами), а її автор, Слюсарев Володимир Володимирович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» з галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Офіційний опонент:

завідувач кафедри конструкцій
і проєктування ракетної техніки
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,
кандидат технічних наук, доцент



Ганна КОЛОСКОВА

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ:

Начальник відділу кадрів



