

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Векілова Саміра Шамсійовича

на тему «Підвищення гідравлічних характеристик трактів рідинних ракетних двигунів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

### **1. Актуальність теми дисертації**

Адитивне виробництво — це передова технологія, що демонструє величезний потенціал скорочення термінів і витрат за виготовлення компонентів рідинних ракетних двигунів. Технологія адитивного виробництва дозволяє виготовляти компоненти рідинних ракетних двигунів (РРД) із складними просторовими конфігураціями зовнішніх і внутрішніх профілів, такими як форсуночні (змішувальні) головки та внутрішні канали охолодження камер згоряння. У традиційному випадку виготовлення цих компонентів РРД вимагало б складних виробничих операцій. Сучасні високоефективні ракетні двигуни вимагають застосування матеріалів з високою теплопровідністю та високою міцністю, а також мінімальної маси конструкції, що можливо забезпечити адитивними технологіями. Таким чином, завдання комплексного аналізу параметрів раціонального застосування адитивних технологій та визначення умов виготовлення трактів та складових елементів сучасних рідинних ракетних двигунів для досягнення високих гідравлічних характеристик є актуальним науково-технічним завданням.

### **2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності та дотримання принципів академічної доброчесності**

Вирішення науково-технічної проблеми представлено у 5 розділах дисертації.

Робота починається з розгляду і аналізу сучасного стану 3D-друку, який включає класифікацію категорій адитивного виробництва з їх перевагами та

недоліками. Підкреслюється, що нові технології не завжди швидко стандартизуються (тобто переходять у розряд загального використання), але для комерціалізованих типів технологій, таких як Powder Bed Fusion та Directed Energy Deposition, можливе використання існуючих підходів до застосування. В роботі аналізуються конструктивні особливості рідинних ракетних двигунів, зокрема поясів завісного охолодження, з пропозицією їх застосування при виготовленні за допомогою Laser Powder Bed Fusion (L-PBF).

В дисертації досліджено шорсткість поверхонь виробів, виготовлених із застосуванням технології L-PBF. Проведено металографічний аналіз тестових зразків і реальних виробів, а також зроблені порівняння адитивного та класичного типів виробництва на прикладі відцентрової форсунки РРД. Результати аналізу підтвердили раціональність використання адитивної технології для виготовлення компонентів РРД зі складними просторовими конфігураціями та необхідність подальших досліджень з метою визначення впливу технології на характеристики елементів камери двигуна, зокрема на гідравлічні характеристики відцентрових форсунок.

Також експериментально досліджено властивості зразків, зокрема гідравлічні характеристики жиклерів і тангенціальних отворів. Розроблено та досліджено конструкції поясів завісного охолодження та елементи трактів регенеративного охолодження рідинних ракетних двигунів. Підтверджено можливість виготовлення комплексних частин камер РРД без паяння та зварювання, а також вплив шорсткості поверхонь на гідравлічний опір.

Дослідження систем сумішоутворення РРД, виготовлених із застосуванням технології L-PBF, показали, що змішувальні головки, виготовлені адитивною технологією, перевищують ефективність класичних аналогів.

Аналіз експериментальних даних щодо шорсткості поверхонь і гідравлічних характеристик відцентрових форсунок, зроблений у дисертації, підтвердив високу якість виробів, виготовлених адитивними технологіями.

На основі визначених при науково-експериментальних дослідженнях закономірностей розроблено інженерні методики розрахунку основних характеристик відцентрових форсунок, які визначаються на ранніх етапах при

проектуванні систем сумішоутворення камер РРД.

Результати роботи дозволяють виготовляти системи сумішоутворення РРД, що здатні підвищити ефективність роботи конструкції, відкриваючи нові можливості для їх впровадження в різних ракетно-космічних галузях.

### **3. Наукове та практичне значення отриманих результатів**

Дані щодо характеристик шорсткості поверхонь виробів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій, описані в ряді робіт інших авторів, що здебільшого представляє практичний інтерес з точки зору набору статистичних значень. Однак в дисертаційному дослідженні вперше розглянуто та зазначено зміну шорсткості поверхонь 3D друку як набір функцій, що дає можливість прогнозування характеристик поверхонь на ранніх етапах проектування (напр., на етапі технічної пропозиції, та т. п.). В роботі розглянуто зміну коефіцієнта витрати відцентрових форсунок в залежності від комплексу геометричних параметрів. Отримані результати свідчать про неможливість застосування відомих залежностей інших авторів для прогнозування параметра на ранніх етапах проектування. В дисертаційному дослідженні автором вперше для відцентрових форсунок, виготовлених із застосуванням адитивної технології, запропоновано формулу, що описує залежність коефіцієнта витрати від сукупності геометричних параметрів. Зважаючи на великий обсяг взаємопов'язаних досліджуваних процесів (зокрема, технологічних та гідродинамічних), запропонований експериментальний підхід до емпіричної формалізації є доцільним.

Описані результати мають безсумнівне **наукове і практичне** значення та можуть складати основу для подальшого більш детального розгляду впливу індивідуальних факторів на отримані характеристики відцентрових форсунок, виготовлених із застосуванням технології L-PBF.

### **4. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації та їх достовірності**

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертанта Векілова

Саміра Шамсійовича, на мій погляд, обґрунтовані в достатній мірі.

**Наукова новизна** результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному.

Для відцентрових форсунок РРД, виготовлених методом адитивних технологій, визначено залежність гідравлічних характеристик від зміни їх геометричних параметрів. Отримано рекомендації щодо проєктування гідравлічних трактів із складною конфігурацією з можливістю реалізації самопідтримуваних поверхонь при 3D друку. Отримана залежність зміни коефіцієнту витрати для відцентрових форсунок рекомендується до використання при проєктуванні для визначення характеристик змішувальних систем головок камери РРД.

Ці результати дисертаційного дослідження здебільшого базуються на експериментальному визначенні характеристик виготовлених виробів. Описане обладнання повністю сертифіковане та пройшло відповідну верифікацію, що не дозволяє мати сумнівів у достовірності отриманих даних.

В подальшому дослідженні дисертант проаналізував результати експериментальних досліджень та провів оцінку впливу зміни конструктивних параметрів на характеристики отримуваних виробів. Отримані висновки сформовані коректно за результатами та повністю відповідають змісту дисертаційного дослідження.

## **5. Оцінка академічної доброчесності дисертаційного дослідження**

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

## **6. Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота здобувача написана грамотною українською мовою, має змістовну цілісність, послідовність та довершеність. Стиль виконання відповідає вимогам наукової літератури, робота виконана з використанням загальноприйнятої термінології.

Дисертаційну роботу оформлено відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

## **7. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 12 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 7 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України. Опубліковані матеріали пройшли кваліфікаційну експертизу та безпосередньо стосуються наукових результатів дисертації.

Також результати дисертації були апробовані на 5 міжнародних наукових фахових конференціях.

Таким чином, наукові результати, які, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

## **8. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. В анотації до роботи отримана наукова новизна задекларована щодо аналітичних виразів чисельного визначення шорсткості поверхонь виробів, виготовлених за допомогою технології L-PBF. Однак, враховуючи існуючий в дисертації об'єм експериментальних даних, постановка задачі аналізу та узагальнення цих експериментальних даних може бути ускладнена та розширена на деякі процеси, що вимагають більш детального опису впливу шорсткості поверхонь відцентрових форсунок РРД на їх робочі характеристики. Також можливий подальший розвиток отриманих рівнянь з подальшим застосуванням робочої формули в більш значному діапазоні розрахункових випадків.

2. Розгляд особливостей конструкції рідинних ракетних двигунів, проведений в розділі 1 представляє собою загальний огляд існуючих варіантів конструкції поясів завісного охолодження. Автор в повній мірі демонструє всю складність та типові особливості конструкції камери РРД, а також основні тренди її вдосконалення, але цільова направленість роботи – 3D друк та гідравлічні характеристики відцентрових форсунок. На мій погляд, в розділі 1 в огляді доцільніше розглянути саме особливості 3D друку відцентрових форсунок, якщо результати таких досліджень були опубліковані в основних зарубіжних та українських наукових журналах.

3. В розділі 3 при обробці експериментальних даних та подальшому аналізі в розділі 5 не зрозуміло, як саме автор вирішує питання врахування в'язкості конкретної рідини. Доречно було б додати опис прийнятих допущень безпосередньо перед проведенням аналізу даних, зокрема, в розділі 5.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

## **9. Висновок про дисертаційну роботу**

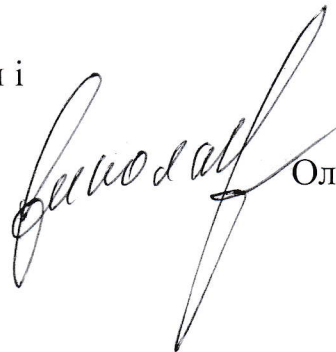
Вважаю, що дисертаційну роботу здобувача ступеня доктора філософії Векілова Саміра Шамсійовича на тему «Підвищення гідравлічних характеристик трактів рідинних ракетних двигунів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій» виконано на високому науковому рівні, вона не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6-9 «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.

Здобувач **Векілов Самір Шамсійович** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

**Офіційний опонент:**

Старший науковий співробітник  
Інституту технічної механіки  
Національної академії наук України і  
Державного космічного агентства  
України, кандидат технічних наук



Олексій **НИКОЛАЄВ**



**Учений секретар ІТМ НАНУ і ДКАУ**  
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник



Людмила **ЛАПІНА**

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 року