

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертацію

**Ємця Михайла Віталійовича**

**«Моделювання газодинамічних і теплообмінних процесів в двигуні з**

**центральною тілом автофажної ракети»,**

подану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113

Прикладна математика

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

Актуальність роботи зумовлена потребою у надлегких носіях та пошуком схем, що зменшують конструктивну масу без втрати енергетичних характеристик. Перспективним рішенням є автофажна ракета, у якій частина конструкції виконує також роль пального; це дає змогу підвищити масовий коефіцієнт досконалості та зробити малі запуски технологічно та економічно доцільними. Ключовою науковою задачею для реалізації цієї концепції є дослідження та прогнозування режимів роботи двигуна з центральною тілом-газифікатором, де поєднуються процеси газифікації полімерного палива, теплообміну зі стінками та газодинаміки в камері згоряння.

У дисертації здобувач зосереджується на математичному описі та чисельному моделюванні термогазодинаміки: виконує розрахунки рівноважного складу продуктів згоряння й проводить просторове CFD-моделювання стисливої течії та теплообміну для різних геометрій і режимів; оцінює теплові потоки й умови стійкого горіння в камері. Отримані поля тиску, температур і швидкості, а також параметричні залежності теплових навантажень і швидкості газифікації подано у формі, придатній для подальшого аналізу та обґрунтованого вибору діапазонів геометричних і режимних параметрів на основі моделі.

### **2. Особистий внесок здобувача в отримані наукових результатів, наданих у дисертаційній роботі**

Здобувач самостійно сформулював мету й завдання дослідження, розробив фізико-математичну постановку процесів у двигуні автофажного типу та побудував і верифікував просторову CFD-модель. Виконано власні термодинамічні розрахунки рівноважного складу продуктів, проведено серії параметричних

обчислювальних експериментів, здійснено інтерпретацію результатів. На підставі одержаних даних автор сформулював технічні рекомендації щодо конструктивних параметрів і режимів роботи двигуна та підготував основний текст дисертації й публікації за темою. У співавторських роботах визначальним є внесок здобувача у постановку задач, реалізацію моделей і аналіз отриманих результатів.

### **3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій**

Наукові положення й висновки обґрунтовані: задачі подано в коректній фізико-математичній постановці; виконано термодинамічні розрахунки рівноважного складу та просторове CFD-моделювання течії й теплообміну в камері згоряння. Чисельні результати підтверджено контролем сіткової збіжності та перевіркою енергетичних балансів; наведено геометрію, граничні умови й параметри моделей. Рекомендації спираються на параметричні розрахунки та є достатньо аргументованими для практичного застосування.

### **4. Наукова новизна отриманих автором результатів**

Дисертаційна робота містить результати, що мають самостійну наукову новизну у сфері математичного та комп'ютерного моделювання процесів у двигуні автофажного типу. Новизна визначається такими положеннями:

- Розроблено чисельну модель газодинамічних і теплообмінних процесів у камері згоряння автофажного двигуна з урахуванням центрального тіла (газифікаційної камери) та переходу полімерного палива з твердого в рідкий та газоподібні стани із тепловою взаємодією з конструкцією.

- Вперше методами математичного моделювання досліджено перебіг газодинаміки і теплообміну продуктів згоряння нового полімерного палива та встановлено закономірності розподілу температурних і швидкісних полів у камері згоряння за різних режимів.

- Вперше засобами комп'ютерного моделювання підтверджено ефективність застосування газифікованого полімерного палива: показано, що його поєднання з твердими окислювачами забезпечує питомий імпульс 240–280 с; визначено швидкість газифікації поліетилену у газифікаційній камері, окремо відзначено підвищення масової досконалості ракети за рахунок відсутності металевих баків.

У сукупності ці результати становлять особистий внесок здобувача та розвивають підходи з моделювання для дослідження автофажних двигунів



## **5. Практичне значення отриманих результатів**

Отримані результати мають прикладну цінність для моделей проєктування автофажних ракетних двигунів з центральним тілом. Розроблена математична та чисельна моделі дають змогу прогнозувати поля тиску й температури, теплові навантаження та робочі параметри камери й сопла. Модель може використовуватись для добору раціональних геометричних розмірів і режимів. Результати залучено у проєктах зі створення автофажної ракети на базі ДНУ ім. Олесея Гончара.

## **6. Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації**

За результатами роботи опубліковано 4 статті: дві — у фахових журналах, індексованих у Scopus, і дві — у матеріалах міжнародного конгресу. Сукупність публікацій відображає ключові положення дисертації (термодинамічні розрахунки, постановка й реалізація CFD-моделі, параметричні результати). Тематика праць повністю відповідає змісту дисертації. Апробація результатів відбулася на 4-х міжнародних конференціях.

## **7. Аналіз основного змісту роботи**

Дисертація має чітку структуру: вступ, три розділи, висновки, список джерел (72 найм.), один додаток; загальний обсяг — 123 с., у тексті 31 рисунок і 6 таблиць. У вступі подано зв'язок роботи з темами НДР ДНУ 2020–2023 рр., що підтверджує впровадження результатів роботи.

У розділі 1 систематизовано передумови і сучасні підходи: подано історію формування ідей автофажних носіїв (1.2), базову концепцію двигуна автофажного типу (1.3) та особливості схем із центральним тілом (1.4). Окремо наведено опис лабораторної моделі та вузла газифікаційної камери із ілюстраціями стендових випробувань, що конкретизує предмет подальшого моделювання.

Розділ 2 присвячено термодинамічній частині: сформовано аналітичну модель згоряння ряду потенційних пар окислювача з паливом, розраховано рівноважний склад продуктів згоряння, одержано термодинамічні властивості газової суміші та виконано порівняльний аналіз різних палив для ракети з автофажним принципом.

У розділі 3 викладено математичну та чисельну постановку і комп'ютерну реалізацію в програмному пакеті ANSYS; описано побудову сітки, граничні умови

та серії CFD-розрахунків. За результатами моделювання визначено теплові потоки на елементах газифікаційної камери, оцінено можливий показник швидкості газифікації поліетилену і діапазон питомого імпульсу, що використано для формування висновків та технічних рекомендацій.

Матеріали дисертації становлять самостійне завершене дослідження. Виклад побудовано послідовно: кожен розділ містить підсумкові положення, що корелюють із метою та завданнями роботи. Джерела використано коректно, бібліографічні посилання оформлено належним чином.

## **8. Оцінка структури дисертації, мови та стилю викладення**

Дисертація має класичну структуру: вступ, три розділи з проміжними висновками, загальні висновки, список джерел і додаток; матеріал подано послідовно, ілюстративний матеріал використано доречно. Написана українською мовою, із коректною науковою термінологією, істотних орфографічних чи стилістичних огріхів не виявлено, формули, позначення та бібліографічні посилання оформлено відповідно до вимог.

## **9. Зауваження щодо змісту дисертації**

1. У роботі бракує систематичного параметричного аналізу для оцінки впливу ключових змінних на моделювання роботи двигуна. Наприклад, було б корисно дослідити як варіювання співвідношення пального/окислювач, діаметра паливного стрижня чи швидкості його подачі впливають на тягу та ефективність.
2. У дисертації проведено моделювання для варіанту із геометричною постановкою, де центральне тіло повністю розміщене в камері згоряння, і не виходить за критичний переріз. Варто було би розглянути конфігурацію з виступанням центрального тіла за критику в соплі, оскільки такі сопла теж є перспективними для автофажних двигунів, і такі конфігурації описані в попередніх експериментальних роботах.
3. Доцільно було би виокремити розділ із технічними рекомендаціями та висновками моделювання.

## **11. Загальні висновки**

Дисертаційна робота М.В. Смія є завершеним дослідженням у галузі прикладної математики: подано коректну термогазодинамічну постановку, виконано розрахунки рівноважного складу та серії тривимірних CFD-моделювань



стисливої течії й теплообміну в камері згоряння з центральним тілом. Отримані поля тиску, температур і швидкості та параметричні залежності теплових навантажень є узгодженими та придатними для обґрунтованого вибору геометричних і режимних параметрів у подальших розрахунково-аналітичних роботах. Рівень викладення, застосований математичний і чисельний апарат та публікаційна база відповідають вимогам до дисертацій за спеціальністю 113 «Прикладна математика». Роботу доцільно допустити до прилюдного захисту, автор заслуговує на присудження зазначеного наукового ступеня.

Офіційний опонент,  
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
Інституту геотехнічної механіки  
ім. М.С. Полякова  
Національної академії наук України

**Віталій ПЕРЦЕВИЙ**

**Підпис Віталія ПЕРЦЕВОГО засвідчую:**

Заступник директора  
Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова  
Національної академії наук України,  
член-кореспондент  
Національної академії наук України



**Олександр КРУКОВСЬКИЙ**