

ВІДГУК

офіційного опонента Стрельникова Геннадія Опанасовича
на дисертацію Дубровського Івана Дмитровича
«Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери
рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання», по-
дану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії
зі спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

1. Актуальність і характеристика основних положень роботи.

В даний час ведеться активний пошук нових конфігурацій надзвукових сопел ракетних двигунів для підвищення їх ефективності, вдосконалення конструкції літального апарату, підвищення його енергомасових характеристик. У своїй роботі автор вдало вибрав напрямок досліджень – розробку методичного забезпечення створення нестандартних конфігурацій круглого надзвукового сопла з авторегульованою висотністю. Зокрема, автор коректно обґрунтував необхідність розробки ефективної методики проектування оптимальних багатосекційних сопел.

Судячи з зарубіжних та вітчизняних публікацій, цей напрям робіт **актуальний**.

Мета і завдання роботи в достатній мірі **корелюють** з об'єктом і предметом дослідження.

Автор правильно підібрав **методичну базу** для досліджень: методи чисельного **моделювання** процесів в термогазодинаміці надзвукових сопел, методи **оптимізації** для вирішення багатовимірних завдань проектування складних об'єктів.

Наукове обґрунтування результатів досліджень забезпечено їхньою **верифікацією** на простих моделях із відомими аналітичними рішеннями та порівнянням з результатами, отриманими з використанням комерційних програмних пакетів.

Наукова новизна досліджень автора полягає у розробці методики проектування оптимального багатосекційного сопла. При цьому розроблені неста-

ндартні **підходи**: до побудови розрахункової сітки для чисельного моделювання течії у надзвуковому соплі; вирішення варіаційного завдання створення сопла з енергетичними характеристиками, що перевищують характеристики сопла Лаваля класичної конфігурації.

Результати досліджень та розроблена автором методика проектування сопла можуть використовуватися у конструкторських бюро при розробці нових конфігурацій надзвукових сопел, зокрема багатосекційних сопел з оптимальними характеристиками. У цьому полягає **практичне значення** виконаної автором роботи.

Робота автора проводилась в рамках **держбюджетної** науково-дослідної роботи «Дослідження процесів у двигунних та енергетичних установках космічної техніки та енергетичних системах господарчого призначення на базі нетрадиційних джерел енергії», 2019-2021 роки (номер державної реєстрації 0119U101165).

2. Зміст та результати дослідження.

Структура дисертаційної роботи **відповідає** вимогам, що висуваються.

Робота виконана на 117 сторінках, містить 40 рисунків та 17 таблиць. Список використаних джерел включає 83 найменування.

У **першому** розділі аналізуються існуючі підходи до проектування надзвукового круглого сопла ракетного двигуна. Основну увагу автор звернув на існуючі чисельні методи розрахунку характеристик сопла та оптимізацію геометрії для підвищення ефективності його роботи за умов змінного тиску доквілля. У результаті автор правильно сформулював **мету та завдання** власної роботи: удосконалення розбиття розрахункової галузі на кінцеві елементи для чисельного інтегрування рівнянь Ейлера; розробка методу розв'язання задачі побудови надзвукового багатосекційного сопла з оптимальними характеристиками.

Основним результатом **другого розділу** була розробка **методу** розширених обсягів для граничних умов на криволінійній стінці надзвукового сопла.

Метод дозволяє використання декартових ортогональних сіток у розрахунковій області із збереженням його ефективності без зниження стійкості розрахунку.

У **третьому розділі** розроблено **методику** профілювання багатосекційного надзвукового сопла із заданими конструктивними обмеженнями та максимальною тягою. Методика верифікована порівнянням результатів профілювання контуру надзвукового сопла з розрахунком за методом Рао, що добре зарекомендував себе для вирішення подібних завдань.

У **четвертому розділі** було поставлено та вирішено задачу **оптимізації** геометрії багатосекційного надзвукового сопла. Було показано, що використання двосекційного сопла підвищує енергоефективність ракети (питомий імпульс) ракетного двигуна, що працює в умовах змінного зовнішнього тиску.

Загалом зміст розділів дисертації і **висновки** свідчать про виконання поставлених у роботі завдань та мети досліджень.

Оформлення дисертаційної роботи відповідають сучасним **вимогам** МОН України до дисертацій в галузі технічних наук.

У дисертації не виявлено фактів академічного **плагіату**, фабрикацій та фальсифікацій.

Судячи з публікацій, основні результати отримані автором **самостійно** або за безпосередньої участі.

Дисертаційна робота Дубровського І. Д. на тему «Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання» **відповідає** спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

3. Публікація основних результатів дисертації

Кількість та рівень публікацій автора на тему дисертації **відповідають** вимогам МОН України.

Матеріали проведеного дослідження за темою «Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання» представлено: у 5 наукових

статтях, з яких 2 опубліковано у фаховому виданні категорії А, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus та відноситься до третього квартилю Q3, інші три статті, одна з яких без співавторів; у фахових виданнях категорії Б. Отримані результати також були представлені до обговорення на 5 науково-практичних конференціях. Зазначені публікації з достатньою повнотою **розкривають** основний зміст дисертаційної роботи.

4. Зауваження до дисертації

1. Використана модель **нев'язкого** газу справді знижує обчислювальні труднощі для опису газодинамічних процесів у надзвуковому соплі. Однак, облік в'язкості важливий для розрахунку течії в багатосекційному соплі, що працює в умовах змінного тиску навколишнього середовища. Це пов'язано з явищем можливого відриву **прикордонного шару** за кутовою точкою на вході до наступної секції сопла при тиску довкілля, більшому ніж тиск на розрахунковому режимі течії у попередній секції. Зазначене змінює імпульс сопла і повинен би враховуватися у методичних розробках автора. Мабуть вказане явище можна врахувати завданням певних значень (відмінними від нуля) коефіцієнтам α_i у виразі (3.4 на сторінці 82).

2. При розв'язанні задачі визначення **оптимального** контуру надзвукової частини сопла на мою думку слід вирішувати задачу мінімізації для цільової функції (3.7 на сторінці 83), яка включала б два параметри - імпульс і **масу** сопла. В такому випадку при виборі оптимального сопла із імпульсом враховується також площа і маса сопла.

3. Відповідно до мети та змісту роботи видається, що **назва** дисертації має бути сформульована таким чином: «Розробка метода чисельного моделювання щодо проектування нових форм круглих надзвукових сопел».

4. За текстом дисертації присутні окремі **неточності** формулювань та помилки.

Так, на сторінці 3 (3 рядок знизу) у реченні «...розробці ефективної обчислювальної моделі, яка може бути використана для чисельного моделю-

вання процесу течії продуктів згоряння всередині **камери** рідинного ракетного двигуна» більш коректною (за змістом роботи) було б формулювання «...розробці ефективної обчислювальної моделі, яка може бути використана для чисельного моделювання процесу течії продуктів згоряння у надзвуковому круглому **соплі** рідинного ракетного двигуна»

На сторінці 3 (7 рядок знизу) у тексті «...необхідність розробки більш ефективного методу інтегрування скінченних **об'ємів** на границі розрахункової області» мабуть мається на увазі «інтегрування **рівнянь** у скінченних об'ємах».

Найчастіше відсутність позначень чи **розмірності** шкал на графіках ускладнює роботу із ними. Іноді у таблицях (наприклад, таб. 2.1, 2.2, 2.3) та шкалах графіків (наприклад, рис. 2.7, 2.12 - 2.14, 3.4, 4.6) відсутні розмірності параметрів.

У формулі (2.3) **відсутні** s (ентропія) та H (ентальпія), наведені в позначеннях.

У формулі (3.3) **межі** інтеграла r_0 і r_N у розшифровках (позначеннях) представлені як r_1 та r_2 .

У підмалювальному підписі малюнку 1.4 (ст. 33) **посилання** (а) та (б) треба поміняти місцями.

По всій видимості, у таблиці 2.5 **параметр** $l = 0.2380$ має бути $l = 2.380$

До ключових слів роботи доцільно додати «**багатосекційні сопла**»

Зазначені недоліки **не знижують** цінності роботи, а, можливо, допоможуть йому в подальшій науковій роботі.

5. Загальний висновок

Дисертаційна робота Дубровського Івана Дмитровича «Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання» на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка є **закінченою** науковою роботою, яка виконана на актуальну тему.

У дисертації отримано **нові** науково обґрунтовані результати, пов'язані з чисельними моделями розрахунку газового потоку в надзвуковому соплі ракетного двигуна та методиками проектування сопла з підвищеною ефективністю роботи в умовах змінного тиску довкілля.

З огляду на актуальність обраної теми, новизну отриманих результатів, академічну доброчесність виконання праці, теоретичну і практичну цінність дисертаційна робота Дубровського Івана Дмитровича «Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання» **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 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023), а її автор, **заслуговує** на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Офіційний **опонент**:

виконуючий обов'язки завідувача відділу
термогазодинаміки енергетичних установок
Інституту технічної механіки НАН і ДКА України
доктор технічних наук, професор


Гениадій СТРЕЛЬНИКОВ

Підпис професора Стрельникова Г. О. засвідчую:

Вчений **секретар**

Інституту технічної механіки НАН і ДКА України
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник


Людмила ЛАПІНА