

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію Дубровського Івана Дмитровича
«Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери
рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
зі спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Актуальність теми дисертації. Наукові дослідження, спрямовані на підвищення ефективності рідинних ракетних двигунів, є актуальними з кількох ключових причин, особливо в контексті України. Україна має значний потенціал у ракетно-космічній галузі, яка є однією з ключових галузей високотехнологічного сектора. Враховуючи наявний досвід та інфраструктуру, спрямованість на покращення рідинних ракетних двигунів в Україні є логічним кроком для подальшого розвитку та зміцнення її позицій у світовій космічній індустрії. Підвищення ефективності рідинних ракетних двигунів може сприяти розвитку нових технологій і виробництву конкурентоспроможних космічних систем, що сприятиме економічному розвитку країни. У контексті глобальної конкуренції в аерокосмічній галузі, розвиток ефективних рідинних ракетних двигунів може допомогти Україні зайняти більш впевнені позиції на світовому ринку космічних послуг та технологій.

Надзвукові сопла відіграють ключову роль у процесі створення тяги рідинним ракетним двигуном. У роботі автор зауважує, що традиційні профільовані сопла вже досягли ліміту геометричної оптимізації, тому у сучасному ракетобудуванні доцільно використовувати сопла з нестандартною формою з метою подальшого збільшення ефективності рідинних ракетних двигунів. Одним із видів подібних сопел є багатосекційні. Суттєвою проблемою, яка заважає їхньому широкому розповсюдженню, є відсутність ефективних методик проектування оптимальних багатосекційних сопел.

У своєму дослідженні на тему «Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання» Дубровський Іван Дмитрович

пропонує нову методику проектування багатосекційних сопел, яка ґрунтується на методах чисельного моделювання і дозволяє отримати контур сопла, що забезпечуватиме максимальну тягу при певних конструктивних обмеженнях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації пов'язана з виконанням 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).

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- шляхом побудови у локальній системі координат, пов'язаній із криволінійною границею області, нового розширеного об'єму з розміром не менше звичайного скінченного об'єму вперше доведено можливість без зменшення стійкості розрахунку точно враховувати криволінійну границю розрахункової області при використанні декартових сіток;
- вперше для розрахунку осьової складової сили тяги багатосекційного сопла отримано узагальнену формулу, яка дозволяє здійснювати розрахунки в залежності від кількості секцій сопла;
- вперше спроектовано контур оптимального багатосекційного сопла для двигуна першого ступеня ракети-носія з урахуванням траєкторії польоту та заданих конструктивних обмежень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- використання розробленої обчислювальної моделі, яка базується на застосуванні декартових сіток та методу розширених об'ємів для постановки граничних умов на криволінійній границі розрахункової області, дозволяє здійснювати чисельне моделювання двовимірної течії нев'язкого стисливого газу швидше, аніж існуючі моделі, які реалізовано в комерційних пакетах програм;

— застосування розроблених моделей, методів та алгоритмів дозволяє автоматизувати процес побудови оптимального контуру багатосекційного сопла.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність. Математичні моделі, формулювання задач, застосування відповідних законів й співвідношень газової динаміки забезпечують обґрунтованість та достовірність результатів наукового дослідження, проведеного у межах дисертаційної роботи. Верифікація результатів дослідження показала їхню гарну збіжність із загальновідомими, отриманими за допомогою перевірених класичних методів результатами.

Аналіз змісту дисертації. Усі необхідні структурні елементи, а саме анотація, вступ, чотири розділи з проміжними висновками, загальні висновки, список літератури, у роботі Дубровського Івана Дмитровича наявні. Робота представлена на 117 сторінках, містить 40 рисунків та 17 таблиць. Список використаних джерел складається із 83 позицій.

Перший розділ дослідження присвячений огляду існуючих способів проєктування традиційних профільованих сопел ракетних двигунів, зокрема, класичних методу характеристик та методу Rao, а також пошуку найбільш ефективного методу чисельного моделювання двовимірної течії нев'язкого стисливого газу, який може бути застосований для розрахунку параметрів продуктів згоряння у ракетному двигуні. На основі отриманих даних автор наводить аргументи на користь створення нової обчислювальної моделі течії продуктів згоряння, що ґрунтуватиметься на використанні декартових сіток, та методики для проєктування нетрадиційних багатосекційних сопел.

У другому розділі для чисельного моделювання двовимірної течії продуктів згоряння в камері двигуна автором пропонується використовувати систему двовимірних нестационарних рівнянь Ейлера та рівняння стану ідеального газу. Чисельний розв'язок системи рівнянь у роботі здійснювався згідно з явним методом скінченних об'ємів при застосуванні алгоритмів інтегрування Рунге-Кутти третього порядку точності та реконструкції WENO

третього порядку точності. Оскільки для дискретизації розрахункової області автор застосовував декартову регулярну сітку, у роботі вводиться новий метод постановки граничних умов на криволінійній границі розрахункової області – метод розширених об'ємів. Він дозволяє здійснювати явне інтегрування без втрати стійкості обчислень. Верифікація запропонованої математичної моделі проводилась шляхом розв'язку тестових задач та порівнянням одержаних результатів із результатами, отриманими при застосуванні перевірених методів.

Третій розділ роботи містить результати розробки та верифікації методики проєктування оптимального багатосекційного надзвукового сопла. Відповідно до алгоритму методики кожна секція сопла апроксимується степеневим поліномом, коефіцієнти якого є невідомими числами. Їхнє визначення відбувається у ході ітеративного процесу розв'язання багатовимірної задачі мінімізації, під час якого параметри потоку продуктів згоряння у камері двигуна розраховуються із застосуванням наведеної у попередньому розділі математичної моделі. Коректність результатів методики підтверджується гарною збіжністю одержаних за її допомогою контурів з тими, що були отримані класичним методом.

У четвертому розділі дисертації представлено результати проєктування багатосекційного надзвукового сопла для рідинного ракетного двигуна першого ступеня ракети-носія з урахуванням конструктивних обмежень та траєкторії польоту. Порівняння ефективності спроектованого сопла із класичним односекційним профільованим соплом показало збільшення підвищення питомого імпульсу двигуна на 1.6% у порівнянні із соплом класичної форми.

Кожен з розділів узагальнюється через послідовні проміжні висновки, що відображають основний зміст виконаного дослідження. Підсумкові висновки засвідчують високий рівень уміння узагальнювати спостереження, повністю відображають результати дослідження, переконують в успішному виконанні всіх поставлених завдань.

Детальне ознайомлення з текстом дисертаційного дослідження, а також його перевірка за допомогою академічної системи Strike Plagiarism дають підстави констатувати, що порушення академічної доброчесності в роботі відсутні. Також не зафіксовано текстові запозичення, що не містять посилань чи згадок використання відповідних джерел.

Дисертаційна робота Дубровського Івана Дмитровича «Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання» повністю відповідає спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Публікація та апробація основних результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження оприлюднено у 5 наукових публікаціях: дві з них опубліковані у виданні категорії А, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus та відноситься до третього квартилю Q3, три інші – у виданнях категорії Б. Основні результати дослідження висвітлено в доповідях на 5 конференціях: 1 тези доповіді у збірнику всеукраїнської наукової конференції та 4 тези доповідей у збірниках міжнародних наукових конференцій.

Зауваження до дисертації

1. Слід зазначити, для верифікації запропонованого автором методу для двомірних задач більш доцільним було б використання експериментального відомо дослідження, а не інший чисельний метод реадізований в пакеті Ansys Fluent. Такі роботи є, наприклад, експериментальне дослідження приведене в звіті NASA: Goodwin G., Creager M. O., Wincler E. L. Investigation of Local Heat-Transfer and Pressure Drag Characteristics of a Yawed Circular Cylinder at Supersonic Speeds // NACA RM A55H31, 1956. – 45p.

2. Для вирішення оптимізаційної задачі не зрозуміло з чим пов'язано використання для задання профілю камери кусочну поліноміальну апроксимацію з точками розриву першої похідної на межах апроксимацій без прив'язки до значення цього скачка на межі секцій. Якщо кожна секція створює

максимально можливе значення тяги, то такий скачок залежить від більш ефективного розширення газу на секції профіля тому використання цього параметра є доцільним.

3. При верифікації запропонованого методу проектування багатосекційного сопла на базі контуру сопла двигуна-прототипу – РД-107 не зрозуміло як в безрозмірній формі визначалася верхня та нижня межа параметрів оптимізації, а саме «з яких конструктивних міркувань та специфіки умов роботи двигуна вони вибиралися».

Загальні висновки. Уважний аналіз тексту дисертаційного дослідження та опублікованих наукових матеріалів дає підстави вважати дисертацію Дубровського Івана Дмитровича «Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання» самостійною, завершеною й актуальною працею, що 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. Відтак її автор, Дубровський Іван Дмитрович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії зі спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Рецензент:

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри ракетно-космічних
і 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,

кандидат фізико-математичних наук, доцент



Тетяна ХОДАНЕН