

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію Дубровського Івана Дмитровича

«Розробка економічної методики проєктування надзвукової частини камери рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання»,

подану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії
зі спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Актуальність теми дисертації

У контексті стрімкого розвитку аерокосмічних технологій та високої конкуренції серед постачальників послуг космічних запусків дослідження, спрямовані на підвищення продуктивності рідинних ракетних двигунів, набувають особливого значення.

Ключовим компонентом конструкції рідинного ракетного двигуна є його надзвукове сопло. Хоча сучасні класичні профільовані сопла досягли меж оптимізації геометрії контуру та ефективності у своєму застосуванні, через значні зміни тиску навколишнього середовища під час польоту першого ступеня ракети-носія такі сопла здебільшого працюють у нерозрахунковому режимі. Тому одним із шляхів підвищення ефективності роботи ракетних двигунів може стати застосування багатосекційних сопел із нестандартною формою. Необхідно відзначити, що успішна реалізація цієї концепції вимагатиме проведення великої кількості чисельних досліджень, та, відповідно, розробки ефективної методології проєктування.

Дисертаційна робота Дубровського Івана Дмитровича «Розробка економічної методики проєктування надзвукової частини камери рідинного ракетного двигуна методами обчислювального моделювання» присвячена розробці методики проєктування багатосекційних сопел, яка дозволить отримати конур надзвукового сопла, що забезпечуватиме максимальну тягу при заданих конструктивних обмеженнях та використовуватиме ефективні чисельні методи для моделювання течії продуктів згоряння у камері рідинного ракетного двигуна.

Дисертаційна робота 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

У дисертаційному дослідженні здобувачем отримано низку важливих наукових результатів, а саме:

- вперше, з урахуванням конструктивних обмежень, спроектовано багатосекційне оптимальне надзвукове сопло для двигуна першого ступеня ракети-носія із застосуванням розробленої методики;
- розроблено новий метод розширених об'ємів для постановки граничних умов на криволінійній границі розрахункової області при застосуванні декартових сіток;
- вперше отримано узагальнену формулу для розрахунку осьової складової тяги багатосекційного сопла в залежності від кількості його секцій.

Практичне значення отриманих результатів

Отримане програмне забезпечення, яке реалізує розроблену методику, дозволяє автоматизувати проектування багатосекційних оптимальних сопел, а запропонована математична модель може бути використана для здійснення чисельного моделювання двовимірних внутрішніх течій потоку невязкого стисливого газу постійного хімічного складу.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність

Обґрунтованість та достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю математичних постановок задач, використанням апробованих законів та співвідношень газової динаміки. Отримані результати не суперечать розрахункам, здійсненим за класичними методами, реалізованими у комерційних програмних пакетах.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу окремо та загального висновку і списку літератури, який містить 83 найменування. Загальний обсяг дисертації – 117 сторінок, 40 рисунків та 17 таблиць.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу наявних методик проєктування надзвукових сопел для рідинних ракетних двигунів та способів розрахунку параметрів потоку продуктів згоряння у камері двигуна. У роботі детально розглянуто метод характеристик, методи, що базуються на розв'язках варіаційних та оптимізаційних задач, а також методи чисельного моделювання двовимірної течії нев'язкого стисливого газу. На основі отриманих даних сформульовані вимоги до методики проєктування, яка має забезпечити розробку контуру надзвукового багатосекційного сопла з максимальною тягою за умови врахування конструктивних обмежень. Крім того, ця методика повинна ґрунтуватися на ефективній обчислювальній моделі течії продуктів згоряння із застосуванням декартових сіток.

У другому розділі дисертації розглянуто результати розробки обчислювальної моделі для чисельного моделювання течії продуктів згоряння у камері рідинного ракетного двигуна. Вона заснована на розв'язанні системи двовимірних нестационарних нелінійних рівнянь Ейлера, яка замикається рівнянням стану Менделєєва-Клапейрона. Для чисельного розв'язку запропонованої системи застосовано методи третього порядку точності, для дискретизації розрахункової області – декартова регулярна сітка. З метою збереження стійкості розрахунків на криволінійній границі області у роботі розроблено метод розширених об'ємів. Цей метод забезпечує збереження ефективності використання декартових сіток без втрати стійкості розрахунків. Розроблена модель верифікована на прикладах одновимірної задачі відбиття ударної хвилі від плоскої стінки, двовимірної задачі подвійного відбиття Маха

і чисельного моделювання течії продуктів згоряння у камері рідинного ракетного двигуна.

У третьому розділі дослідження наведені результати розробки методики проєктування надзвукового контуру багатосекційного сопла. Головною перевагою методики є можливість отримання контуру, який забезпечуватиме максимальну тягу та задовольнятиме накладеним конструктивним обмеженням. Основна ідея цієї методики полягає у використанні апроксимації контуру кожної секції сопла степеневими поліномами та подальшим визначенням їхніх коефіцієнтів шляхом розв'язання оптимізаційної задачі. У ході верифікації розробленої методики з її допомогою на основі поліномів 2, 3 та 4 степенів було отримано декілька контурів, які порівнювалися із контурами, отриманими класичним методом Rao. Порівняння показало гарну кількісну збіжність між одержаними контурами.

У четвертому розділі роботи використано запропоновану методику проєктування для отримання багатосекційного надзвукового сопла двигуна першого ступеня ракети-носія. У розділі була виконана постановка і подальше розв'язання відповідної задачі оптимізації. Крім цього, була проведена оцінка ефективності роботи спроектованого сопла шляхом обчислення питомого імпульсу та порівняння цього значення із відповідним показником для класичного сопла.

Проведений аналіз змісту дисертації свідчить про відповідність її меті та завданням. Висновки адекватно відображають наукові та практичні досягнення автора, викладені в роботі.

У дисертації не виявлено фактів академічного плагіату, фабрикацій та фальсифікацій. Результати дослідження, що представлені у роботі, отримані здобувачем самостійно, або за його особистої участі.

В цілому дисертація є завершеною науковою працею, характеризується цілісністю і логічністю викладу матеріалу дослідження та оформлена відповідно до вимог Міністерства освіти та науки України, що висуваються до

дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 134
Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Публікація та апробація основних результатів дисертації

Основні результати дисертаційного дослідження викладено 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 підготовлена без співавторів, – у фахових виданнях категорії Б. Крім цього, основні положення дисертаційного дослідження апробовано на 5 науково-практичних конференціях.

Зауваження до викладеного у дисертації

Відзначаючи хороший рівень роботи, наукове та прикладне значення результатів доцільно зробити деякі зауваження та побажання:

1. Нажаль, в тексті дисертаційної роботи присутні деякі друкарські помилки та неточності при оформленні.

2. При формулюванні практичного значення одержаних результатів автор недостатньо точно дотримувався прийнятих правил, а саме – недостатньо чітко сформулював рекомендації щодо практичного використання результатів роботи, недостатньо висвітлив їх практичну цінність та ступінь готовності до використання.

3. Твердження, що «багатосекційне сопло у будь-який момент часу працює на розрахунковому режимі» (стор. 81) не є правильним, більш коректним було б використати формулювання «працює в режимі, наближеному до розрахункового».

4. На мій погляд, в четвертому розділі для більш переконливої демонстрації ефективності потенційного використання в рідинних ракетних двигунах багатосекційних сопел, слід було обрати приклад із більшою кількістю секцій, ніж дві.

Загальна оцінка роботи і висновок

Дисертаційна робота Дубровського Івана Дмитровича на тему «Розробка економічної методики проектування надзвукової частини камери рідинного

ракетного двигуна методами обчислювального моделювання» є цілісною завершеною кваліфікаційною працею, зміст якої повністю відповідає спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

За актуальністю, змістом, науковою новизною, обґрунтованістю висновків, прикладним значенням отриманих результатів та відсутністю ознак порушення здобувачем академічної доброчесності, вважаю, що дисертаційна робота Дубровського Івана Дмитровича «Розробка економічної методики проєктування 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, а її автор, Дубровський Іван Дмитрович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технологій
машинобудування та матеріалознавства
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»



Сергій АЛЕКСЕЄНКО

