

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЖЕКТОРА З ЛОПАТКАМИ У СКЛАДІ ТРД БПЛА МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

А. М. Красильнікова^{1,a}, А. А. Халатов^{1,2}, А. П. Чиркова^{1,2}

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

² Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

У даній роботі описано принцип роботи ежектора та його вплив на тягу турбореактивного двигуна (ТРД). За допомогою програмного пакету *Ansys Fluent* створено модель потоку газу на виході із сопла двигуна та на її основі верифіковано розрахункову модель. Проведено розрахунок параметрів потоку та тяги для двигуна без ежектора та зі стандартним ежектором, особливу увагу приділено модифікації внутрішньої поверхні ежектора шляхом встановлення тонких металевих лопаток, оцінено відносний приріст тяги за відповідної модифікації.

Ключові слова: ежектор, тяга двигуна, числове моделювання

Вступ

Безпілотні літальні апарати з ТРД перевершують аналоги з іншими типами двигунів за швидкістю, дальністю, маневровістю та вантажопідйомністю, хоча їхня тяга залишається невисокою.

Аналіз наявних досліджень показав, що найбільш перспективним вирішенням даної проблеми може бути встановлення на виході двигуна газового ежектору (рис. 1) — пристрою, у якому тиск вхідного потоку газу зменшується під дією іншого потоку газу.

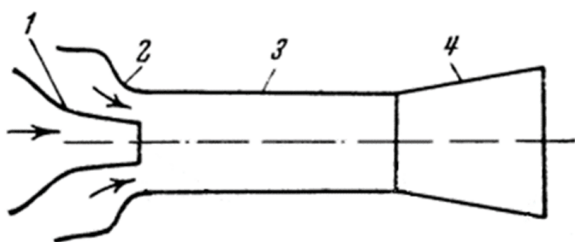


Рис. 1. Принципова схема ежектора. 1 — вхідне сопло ТРД, 2 — вхідне сопло, 3 — камера змішування, 4 — дифузор.

Встановлення вихідного ежектора сприяє перемішуванню первинного потоку газу, що витікає із сопла двигуна, із повітрям навколишнього середовища. Первинний струмінь із певним наближенням вважається турбулентним, а перемішування відбувається за рахунок пульсацій поперечної компоненти швидкості потоку.

У даній роботі розглядається можливість встанов-

лення лопаток на внутрішню поверхню ежектора для інтенсифікації перемішування потоків повітря із сопла двигуна та з навколишнього середовища із метою покращення тягових характеристик двигуна.

1. Ежектор у системах підсилення тяги

На сьогоднішній день вплив параметрів ежектора на тягові характеристики двигуна та параметри вихідного потоку вивчається різнобічно. Так, в [1] досліджують вплив на тягу ширини вхідного сопла ежектора, [2] розглядають форму камери змішування як основний параметр, що визначає тягові характеристики. Роботи [1, 2, 3] демонструють вплив параметрів ежектора на температуру вихідного струменя, зменшення питомої витрати пального тощо.

Дослідження [4] присвячено встановленню газових ежекторів на імпульсно-детонаційні двигуни та демонструє більш суттєвий приріст тяги порівняно із ТРД, що зумовлено більш інтенсивним перемішуванням первинного і вторинного потоків газу за рахунок наявності завихрень у первинному потоці.

Для інтенсифікації перемішування потоків газу у вихідному ежекторі ТРД, первинному струменю якого не властиві такі завихрення, ежектор можна проектувати таким чином, щоб радіальна компонента швидкості потоку була напрямлена до осі камери змішування. Тоді, з попереднього аналізу задачі можемо отримати співвідношення:

$$2\pi\rho Ru_r = -\frac{dG}{dz} \quad (1)$$

де ρ — густина газу, R — радіус камери змішування, u_r — радіальна компонента швидкості, G — масова витрата газу.

^akrasylnikova.anna-ipt@lll.kpi.ua

У той же час, тяга визначається виразом:

$$P = G(C_c - V) + F_c(p_c - p_H) \quad (2)$$

де G — витрата газу на виході з двигуна, C_c — швидкість витікання газу із сопла, V — швидкість руху апарату, F_c — площа вихідного перерізу сопла, p_c та p_H — тиски на виході із сопла та в навколишньому середовищі відповідно [5].

Із наведених виразів бачимо, що для сприяння підвищенню тяги конструкція ежектора має забезпечувати зростання витрати газу вздовж камери змішування, чого, спираючись на рівняння (1), можна досягти шляхом напрямлення радіальної компоненти швидкості до осі камери змішування ежектора. Для цього пропонується модифікація ежектора шляхом встановлення лопаток на його внутрішню поверхню для закрутки потоку. Дослідження проводитиметься методом комп'ютерного моделювання з огляду на ресурсоемність та довготривалість фізичного експерименту.

2. Постановка задачі та верифікація розрахунку

У якості об'єкта дослідження було обрано двигун JetCatP180-NX та його стандартний ежектор [6]. Дослідження потоку проводяться у стендовому режимі, тобто двигун зафіксовано, а тиск зовнішнього середовища відповідає атмосферному. Стационарний потік повітря вважався таким, що підпорядковується рівнянню стану ідеального газу, а залежність в'язкості від температури — моделі Сазерленда [7].

Для моделювання досліджуваного потоку було обрано метод Pressure Based Numerical Solver зі схемою корекції полів та швидкості Coupled. Для опису турбулентних явищ було обрано модель $k-\epsilon$ Realizable [8].

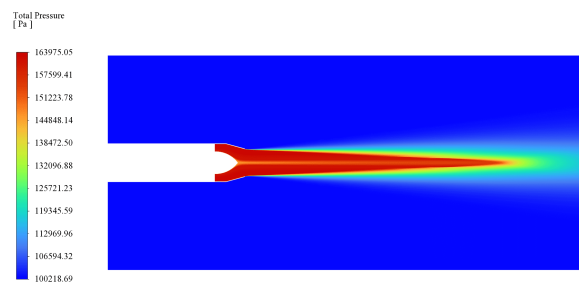
Встановлені граничні умови відповідали технічним характеристикам досліджуваного двигуна. Так, потік на виході із сопла має температуру 1023 К, масова витрата становить 0.38 кг/с. По межах навколишнього середовища на зони вхідної, вихідної меж та проникної стінки встановлено атмосферний тиск та температуру 300 К.

Попередньо модель було верифіковано шляхом обчислення параметрів газу та тяги двигуна без ежектора у 2D-моделі (рис. 2). Основним показником, за яким здійснювалась перевірка точності розрахунків, була тяга. Отримане у верифікаційному розрахунку значення тяги для двигуна без ежектора становить 179 Н, що відхиляється від заданого в характеристиках двигуна значення 175 Н на 2%. Підібрані при верифікації параметри розрахункової моделі використовуватимуться у подальших дослідженнях.

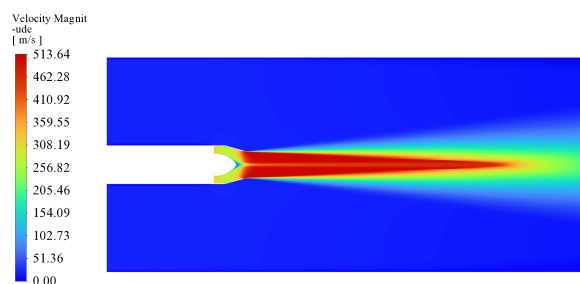
3. Оцінка впливу ежектора на тягу двигуна

3.1. Порівняльна модель

У рамках дослідження було побудовано тривимірну модель двигуна без ежектора, з огляду на анало-



(а) Поле повного тиску p_{tot}



(б) Поле модуля швидкості v

Рис. 2. Обчислені параметри потоку для 2D-моделі

гічні міркування, що були використані при створенні двовимірної моделі. Застосовані граничні умови та параметри розрахункової моделі були збережені такими ж для забезпечення відповідності між верифікаційною моделлю та поточним розрахунком. Отримане для цієї моделі значення вважались еталонним для оцінки приросту тяги у подальших дослідженнях.

На рис. 3 наведено отримані поля повного тиску та швидкості потоку, обчислене значення тяги становить 132 Н.

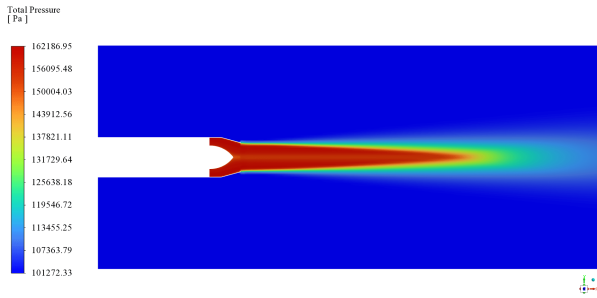
3.2. Вплив стандартного ежектора на тягу двигуна

Модель зі стандартним ежектором було відтворено згідно з параметрами власне ежектора та параметрами розрахункової моделі (рис. 4). До переліку граничних умов було додано умову сталюї стінки товщиною 0.2 мм.

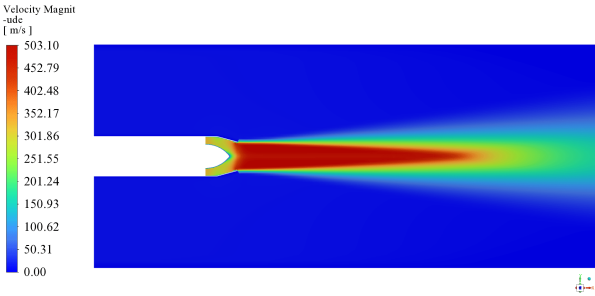
Обчислене значення тяги становить 180 Н, тобто приріст тяги складає 36%.

3.3. Вплив лопаток на тягу двигуна

Основними критеріями щодо форми лопатки для встановлення на внутрішню поверхню ежектора були простота форми, достатня площа та здатність прискорити потік вздовж камери ежектора. Також маємо зазначити, що завелика площа лопаток може призвести до запирання ежектора, тому геометричні параметри лопаток підбирались із припущення,

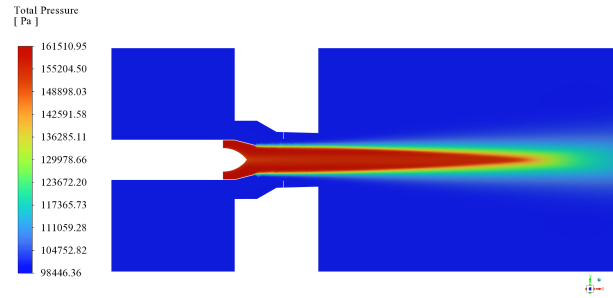


(а) Поле повного тиску p_{tot}

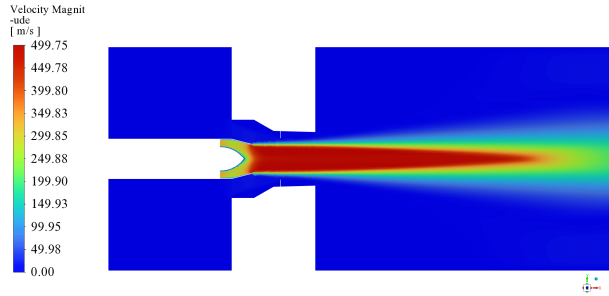


(б) Поле модуля швидкості v

Рис. 3. Обчислені параметри потоку для 3D-моделі двигуна без ежектора

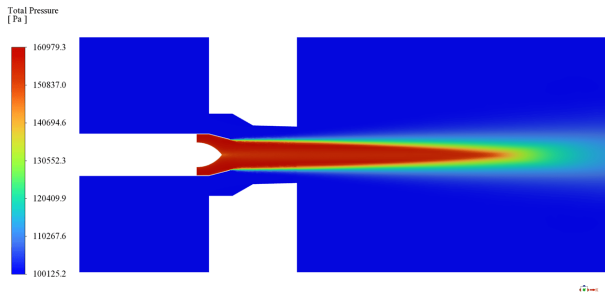


(а) Поле повного тиску p_{tot}

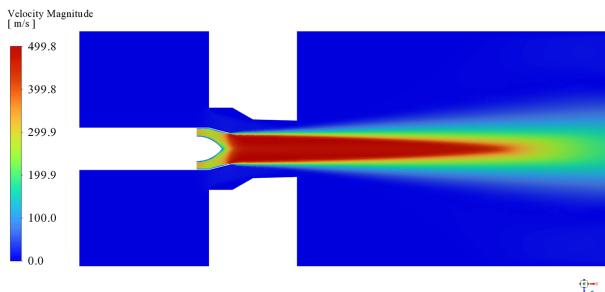


(б) Поле модуля швидкості v

Рис. 5. Обчислені параметри потоку для 3D-моделі двигуна із модифікованим ежектором



(а) Поле повного тиску p_{tot}



(б) Поле модуля швидкості v

Рис. 4. Обчислені параметри потоку для 3D-моделі двигуна зі стандартним ежектором

що те, що сумарна площа лопаток має складати не більше 20% від загальної площі потоку в ежекторі.

Із таких міркувань, у якості досліджуваного зразка було обрано трапецієвидну лопатку. Висота трапеції обрана такою, щоб лопатка перекривала близько половини потоку з ежектора вздовж радіуса камери змішування. Для забезпечення рівномірного впливу на потік по ежектору на однаковій відстані розташовано 6 лопаток під кутом 15° до осі потоку. Матеріал та товщина лопаток були обраними такими ж, як і для ежектора — сталь товщиною 0.2 мм.

На рис. 5 наведено поля повного тиску та швидкості потоку для випадку ежектора із лопатками. Обчислене значення тяги становить 183 Н, що зумовлює приріст тяги на 38% порівняно із тягою двигуна без ежектора.

Таблиця 1. Порівняння результатів розрахунків значень тяги

	Без ежектора	Стандартний ежектор	Модифікований ежектор
Тяга, Н	132	180	183
Приріст тяги, %	—	36	38

Висновки

У даній роботі було проведено числове моделювання процесів у вихідному струмені ТРД із метою оцінки впливу різних конфігурацій ежектора на величину тяги. Було побудовано та верифіковано розрахункову модель потоку газу на виході з сопла двигуна, а також створено тривимірні моделі з урахуванням геометрії стандартного та модифікованого ежекторів.

Проведені розрахунки показали, що встановлення стандартного ежектора дозволяє підвищити тягу двигуна на 36% порівняно з конфігурацією без ежектора. Подальша модифікація ежектора шляхом встановлення шести тонких лопаток на його внутрішню поверхню забезпечила додатковий приріст тяги до 38%.

У подальших дослідженнях планується покращення моделі для забезпечення більш точних результатів розрахунку тяги двигуна із різними конфігураціями ежекторів. Також планується дослідження зміни приросту тяги залежно від параметрів встановлення лопаток та від початкових умов задачі, зокрема, при русі апарату із заданою швидкістю.

Перелік використаних джерел

1. Micro turbojet engine nozzle ejector impact on the acoustic emission, thrust force and fuel consumption analysis / G. Cican, T.-F. Frigioescu, D.-E. Crunteanu, L. Cristea // *Aerospace*. — 2023. — URL: <https://doi.org/10.3390/aerospace10020162>.
2. O. Rodriguez. An experimental study of thrust augmentation with asymmetrical nozzle driven pulsed ejector, MSc Thesis of Engineering : PhD thesis / O. Rodriguez. — The University of Texas Rio Grande Valley, 2019. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019MsT.....29R>.
3. R. Schmidt, Hupfer A. Design and numerical simulation of ejector nozzles for very small turbojet engines // *CEAS Aeronautical Journal*. — 2021. — URL: <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00537-3>.
4. Experimental study of ejectors driven by a pulse detonation engine / A. Glaser, N. Caldwell, E. Gutmark, J. Hoke, R. Bradley, F. Schauer // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting. — 2007. — URL: <https://doi.org/10.2514/6.2007-447>.
5. Абрамович Г. И. Прикладная газодинамика : в 2 т. Том 1. — Изд. 5-е, перераб. и доп. — М. : Физматлит, 1991. — 600 с.
6. P180NX Gas Turbine Engine specifications. — 2011. — URL: https://www.20jetcat.20de/en/productdetails/produkte/jetcat/produkte/RC%5C%20ENGINES/Engines/p180%5C_nx.
7. ANSYS FLUENT User's Guide: Sutherland Viscosity Law. — 2009. — URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node294.htm>.
8. ANSYS Theory Guide: $k - \epsilon$ Realizable model. — 2009. — URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node59.htm>.