

РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ ІМПУЛЬСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УКОРОЧЕНОГО НАДЗВУКОВОГО СОПЛА

Анотація. Актуальність роботи визначається необхідністю вибору оптимального контуру надзвукової частини сопла для підвищення імпульсних характеристик потоку в укороченому соплі. Розглянута в роботі регресійна модель надзвукового потоку в укороченому соплі з насадком, створена на основі отриманих раніше результатів моделювання в пакеті ANSYS. Ціль роботи – вибір оптимального контуру укороченого сопла з дзвоноподібним насадком з урахуванням геометричних та технологічних параметрів. Аналіз даних проводився на основі програми STATGRAPHICS Plus. Отримані величини впливу кожного прийнятого фактора і їх взаємний вплив на підвищення тягових характеристик потоку в укороченому соплі. Побудована регресійна модель дозволяє вибрати оптимальний контур укороченого сопла з насадком.

Ключові слова: укорочене надзвукове сопло, дзвоноподібний насадок, тиск, імпульсна характеристика.

Постановка проблеми. При проектуванні та відпрацюванні ракетних двигунів важливою проблемою є вибір оптимального контуру надзвукової частини сопла. Раніше використовувалися переважно традиційні сопла Лавалю. Однак з розвитком ракетно-космічної техніки почали з'являтися різні контури сопел, що відповідають новим завданням, вимогам до щільності компонування, необхідності підвищення коефіцієнта імпульсу, обліку різних умов роботи тощо. Перспективним типом сопел для ракетних двигунів вважаються дзвоноподібні сопла, які мають, на відміну від класичного сопла Лавалю, більший кут входу в надзвукову частину сопла. В роботах [1-2] досліджуються сопла з двійним раструбом (Duel-bell nozzle), які мають два різних режими роботи та забезпечують підвищення продуктивності. Течії в укорочених соплах з різними насадками мають свої особливості і переваги. В роботах [3-4] досліджуються характеристики укорочених сопел Лавалю з дзвоноподібним насадком. З використанням обчислювального пакету ANSYS Fluent показано, що на картини течії в соплі впливає довжина вхідної конічної частини, загальна довжина сопла та

умови роботи сопла, тобто вхідний тиск та тиск навколишнього середовища. Було встановлено, що характер відривної течії в насадку, а значить і коефіцієнт імпульсу, залежить від ступеня розширення потоку з укороченого сопла. Необхідно виявити основні геометричні і технологічні параметри течій в укороченому соплі з дзвоноподібним насадком та визначити залежність коефіцієнту імпульсу від них.

Мета роботи – вибір оптимального контуру укороченого сопла з дзвоноподібним насадком з урахуванням геометричних та технологічних параметрів.

Аналіз одержаних даних проводився на основі програми STATGRAPHICS Plus [5], яка дозволяє проводити повне факторне планування технологічних процесів на основі центрально-композиційних ротатбельних планів другого порядку.

Якщо ми маємо справу з k факторами, кожен з яких може встановлюватися на q рівнях, то для того, щоб здійснити повний факторний експеримент необхідно поставити $n = q_k$ дослідів. Найбільшого поширення набули експерименти, в яких фактори варіюються на двох рівнях, тобто експерименти типу 2^k . В нашому випадку незалежними факторами є два геометричних і два технологічних параметра: довжина конічної частини (l) та загальна довжина сопла (L), вхідний тиск (P_0) та тиск зовнішнього середовища за соплом (P_n). Функція відгуку – коефіцієнт імпульсу (K_T). Вибрані фактори задовольняють вимогам керованості, взаємнезалежності, однозначності, яким повинні задовольняти варіативні фактори при плануванні експерименту.

Необхідно провести кодування факторів для переведення натуральних значень факторів в безрозмірні величини. Це забезпечує можливість порівняльної оцінки впливу на процес різних параметрів незалежно від їх розмірності, а також дозволяє побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту. Зв'язок між кодованим і натуральним виразом фактора задається фо-

рмулою:
$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i},$$
 де x_i – кодований вираз i -го фактора; X_i – натуральне значення фактора; X_{i0} – значення i -го фактора на нульовому рівні; ΔX_i – інтервал варіювання i -го фактора.

В таблиці 1 наведено інтервали варіювання факторів, що розглядаються.

Область зміни факторів

Фактор	Код фактору	Одиниця виміру	Рівні факторів		
			-1	0	1
Довжина конічної частини сопла l	X1	мм	5	10	20
Загальна довжина сопла L	X2	мм	30	35	45
Тиск на вході P ₀	X3	бар	100	200	300
Тиск зовнішній P _н	X4	бар	0,1	0,55	1,0

Використовуються поліноміальні плани другого порядку виду:

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i \cdot x_i + \sum_i^n a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j,$$

де Y – функція відклику (K_T); a₀ – вільний член рівняння; a_i · x_i, a_{ii} · x_i² – лінійні і квадратичні доданки; ± a_{ij} · x_i · x_j – доданки парних добутків факторів; n = 4 – число перемінних факторів.

За вихідний матеріал було прийнято параметри потоку і геометричні параметри укороченого сопла з насадком [3 - 4]. За результатами розрахунків параметрів визначався коефіцієнт імпульсу K_T.

Проведемо аналіз отриманої регресійної моделі на основі оцінки статистичної значущості коефіцієнтів отриманої регресійної моделі. Коефіцієнти моделі, для яких p-рівень (p-value) менше 0,05, вважаються статистично значущими при довірчій ймовірності 95%. Найбільш зручно і наочно значимість коефіцієнтів моделі можна перевірити за допомогою Pareto Chart (Парето-карта).

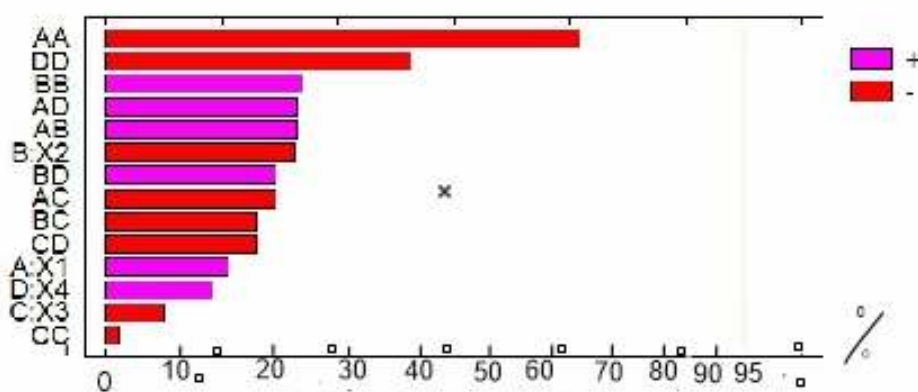
Standardized Pareto Chart for K_T

Рисунок 1 – Парето-карта коефіцієнтів моделі

Горизонтальні стовпці свідчать про статистичну значущість відповідних коефіцієнтів моделі. Парето-карта наочно підтверджує статистичну незначущість коефіцієнтів, встановлену за допомогою таблиці дисперсійного аналізу, а саме: коефіцієнтів при першому ступені всіх факторів, за винятком X_2 , при квадраті X_3 та X_4 . Тому при розрахунках члени з зазначеними коефіцієнтами можуть не враховуватися. Як видно з наведених на рис. 1 даних, статистично значущими є коефіцієнти при X_1^2 , X_2^2 та X_3^2 .

Парето-карта також дає уявлення про порівняльну значущість вхідних факторів для досліджуваного процесу. Збільшення довжини горизонтальних стовпців свідчить про збільшення впливу на процес відповідного фактора. Колонки, колір яких відзначений знаком плюс, відповідають факторам і їх парним взаємодіям, які сприяють зростанню цільової функції. І, навпаки, колонки, колір яких відзначений знаком мінус, відповідають факторам і їх парним взаємодіям, які сприяють зменшенню значень цільової функції.

З урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії має вигляд:

$$K_T = 1,64 - 0,01L - 0,033l^2 + 0,01L^2 - 0,23P_n^2 + 0,012l \cdot L - 0,01l \cdot P_0 + 0,012l \cdot P_n + 0,1L \cdot P_n$$

Адекватність отриманої моделі підтверджується високим значенням коефіцієнта детермінації $R^2 = 86,4 \%$.

На рис. 2 а) представлений тривимірний графік залежності цільової функції K_T від факторів l і L (коефіцієнту імпульсу від геометричних параметрів). При цьому фактори P_0 і P_n зафіксовані на середньому рівні (тобто X_3 , X_4 на нульовому рівні). Переріз графіка має сідловидну форму (рис. 2 б), Найбільше значення K_T при фіксованих при $P_0 = 0,5$ бар і $P_n = 100$ бар відзначено при середньому значенні довжини конічної частини сопла ($l = 10$ мм).

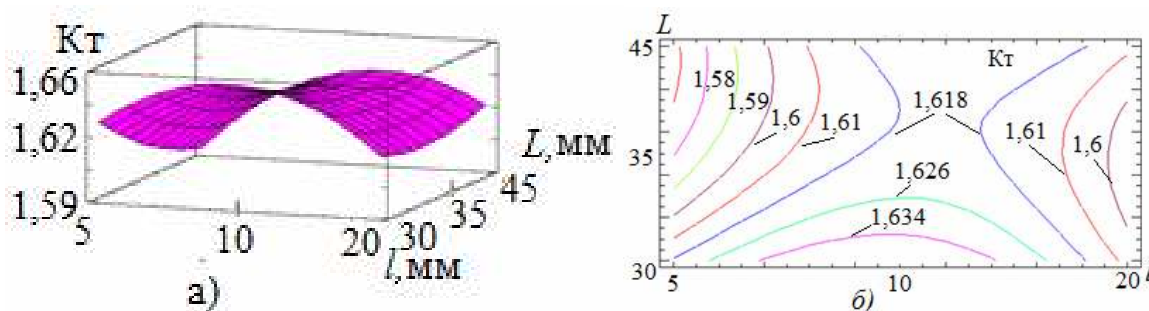


Рисунок 2 –Залежність коефіцієнту імпульсу від геометричних параметрів сопла (а) та переріз зазначеної залежності (б)

На рис. 3 представлений тривимірний графік залежності цільової функції K_T від факторів X_3 і X_4 (коефіцієнту імпульсу від тиску на вході в сопло P_0 та зо-

внішнього середовища P_n) при фіксованих факторах X_1 і X_2 (l і L) на нульовому рівні (див. табл. 1).

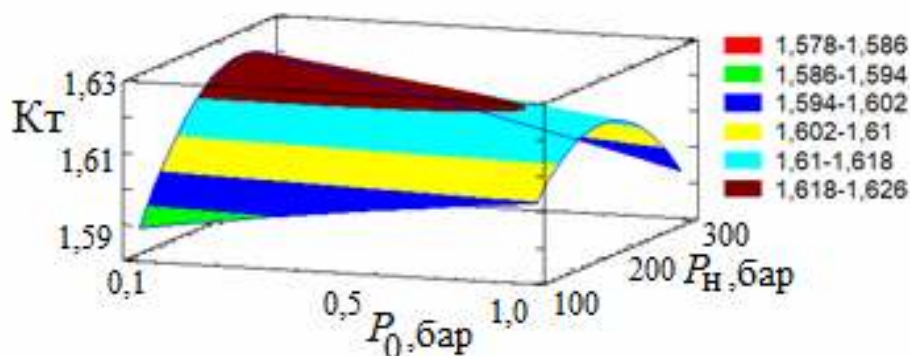


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнту імпульсу від тиску на вході P_0 в сопло та тиску зовнішнього середовища P_n

Переріз графіка має еліпсоподібні лінії на відміну від залежностей K_T від геометричних параметрів. Найбільше значення K_T для $l = 10$ мм і $L = 35$ мм досягається при збільшенні тиску зовнішнього середовища до 1,0 бар. Вхідний тиск має перемінний вплив: при збільшенні тиску до 200 бар K_T збільшується до максимального значення, а потім зменшується до мінімального значення при $P_n = 300$ бар.

Висновки

Проведений регресійний аналіз даних дозволив визначити формулу залежності коефіцієнту імпульсу від довжини конічної частини, загальної довжини сопла, тиску на вході в сопло та тиску зовнішнього середовища. Ця функція являє собою функцію другого порядку. Побудовані тривимірні графіки залежності цільової функції показали, що збільшення тиску зовнішнього середовища веде до збільшення імпульсної характеристики при середньому значенні тиску на вході в сопло. Залежності коефіцієнту імпульсу від довжини конічної частини, загальної довжини сопла та від вхідного тиску носить перемінний характер – K_T збільшується при збільшенні цих параметрів до значення їх середньої величини, а потім зменшується при подальшому рості параметрів. Така поведінка коефіцієнту імпульсу обумовлена хвильовою природою потоку у надзвуковому соплі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Emelyanov V. N., Volkov K. N., Yakovchuk M. S. Unsteady Flow in a Dual-Bell Nozzle with Displacement of an Extendible Section from the Initial to Working Position // Fluid Dynamics. – 2022. – Vol. 57, Suppl. 1. – P. 35 – 45.

2. Chloé Nürnberger-Génin, R. Stark Experimental Study on Flow Transition in Dual Bell Nozzles // Journal of Propulsion and Power. – 2009. – №2. – P. 1 – 8.
3. Ternova K., Strelnikov G., Pryadko N., Ihnatiev O. Characteristics of a Shortened Laval Nozzle with a Bell-shaped Nozzle // Технічна механіка. – 2022. – № 3. – С.35 – 46.
4. Ternova K., Strelnikov G., Pryadko N., Katrenko M.O. Influence of the bell-shaped tip shape on the thrust characteristic of a truncated nozzle // Технічна механіка. – 2022. – № 4. – С. 26 – 34.
5. Сергеев П. В., Білецький В. С. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин (практикум). – Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016. – 119 с.

REFERENCES

1. Emelyanov V. N., Volkov K. N., Yakovchuk M. S. Unsteady Flow in a Dual-Bell Nozzle with Displacement of an Extendible Section from the Initial to Working Position // Fluid Dynamics. – 2022. – Vol. 57, Suppl. 1. – P. 35 – 45.
2. Chloé Nürnberger-Génin, R. Stark Experimental Study on Flow Transition in Dual Bell Nozzles // Journal of Propulsion and Power. – 2009. – №2. – P. 1 – 8.
3. Ternova K., Strelnikov G., Pryadko N., Ihnatiev O. Characteristics of a Shortened Laval Nozzle with a Bell-shaped Nozzle // Technical mechanics. – 2022. – № 3. – С.35 – 46.
4. Ternova K., Strelnikov G., Pryadko N., Katrenko M.O. Influence of the bell-shaped tip shape on the thrust characteristic of a truncated nozzle // Technical mechanics. – 2022. – № 4. – С. 26 – 34.
5. Sergeev P. V., Biletsky V. S. Computer modeling of technological processes for the processing of brown copalins (workshop). – Mariupol: Skhidny vydavnychiy dim, 2016. – 119 p.

Received 31.03.2023.

Accepted 03.04.2023.

Regression analysis of impulse characteristics shorted supersonic nozzle

When designing and testing rocket engines, an important problem is the choice of the contour of the supersonic part of the nozzle. Recently, with the development of rocket and space technology, different contours of nozzles have appeared that meet new tasks, requirements for the density of the layout, the need to increase the momentum coefficient, accounting for various operating conditions, etc. Therefore, the relevance of the work is determined by the need to choose the contour of the supersonic part of the nozzle to increase the impulse characteristics of the flow in the shortened nozzle. The goal of the

work is to choose the optimal contour of a shortened nozzle with a bell-shaped nozzle, taking into account geometric and technological parameters. The regression model of the supersonic flow in a shortened nozzle with a nozzle considered in the work was created on the basis of previously obtained simulation results in the ANSYS package. It has been found that the flow patterns in the nozzle are affected by the length of the inlet cone, the total length of the nozzle and the operating conditions of the nozzle, i.e. inlet pressure and ambient pressure. The nature of the separation flow in the nozzle, and hence the momentum coefficient depends on the degree of expansion of the flow from the shortened nozzle, therefore it is necessary to identify the main geometric and technological parameters of the flows in the shortened nozzle with a bell-shaped tip and determine the dependence of the momentum coefficient on them. Data analysis was carried out on the basis of the STATGRAPHICS Plus program. The influence values of each adopted factor and their mutual influence on increasing the flow impulse characteristics in the shortened nozzle are obtained. Three-dimensional graphs of the dependence of the momentum coefficient on the geometric parameters, the pressure at the nozzle inlet, and the pressure of the external environment were obtained. The formula for the dependence of the impulse coefficient on the length of the conical part, the total length of the nozzle, the pressure at the nozzle inlet and the pressure of the external space was determined. It was established that an increase in the pressure of the external space leads to an increase in the impulse characteristic at the average value of the pressure at the nozzle inlet. The built regression model allows you to choose the optimal contour of a shortened nozzle with a tip.

Тернова Катерина Віталіївна – к.т.н., старший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

Сироткіна Наталія Петрівна – молодший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

Ternova Kateryna Vitaliyivna – PhD, senior researcher, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine.

Syrotkina Nataliya Petrivna - junior researcher, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine.