УДК 533.6.013.14 : 629.1.025.3 https://doi.org/10.15407/itm2024.03.031

К. В. ТЕРНОВА, Н. П. СИРОТКІНА, Л. В. МУЗИКА

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КРИТИЧНОГО ПЕРЕТИНУ КОНТУРУ НА ТЕЧІЮ У НАДЗВУКОВОМУ КРУГЛОМУ СОПЛІ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: ternovayakaterina@gmail.com

У роботі було проаналізовано вплив кутової точки контуру сопла ракетного двигуна на характеристики внутрішнього потоку. Розглянуто двофазний потік у соплах різних контурів третьої ступені ракети. Визначено місце осадження конденсованої фази на стінку сопла з гострим кутом у критичній області. При заокругленні контуру сопла в кутовій точці на вході в надзвукову частину сопла відбувалась зміна траєкторії частинок, причому для меншого осадження виявлено кращий радіус заокруглення. Порівняння показало, що, не зважаючи на різні профілі, питомий імпульс цих сопел мало відрізняється між собою і виявляється нижче питомого імпульсу базового сопла на (6,5 – 7) %.

Проведено дослідження течії газу в соплах з кутовою точкою при сполученні укороченого конічного сопла з дзвіноподібним насадком. Було розраховано характеристики потоку для трьох конфігурацій контуру сопла в області зламу контуру: в кутовій точці без заокруглення контуру сопла, в кутовій точці і в точці сполучення конічної частини сопла зі дзвоноподібним насадком із заокругленням. Заокруглення контуру сопла в кутовій точці переходу від базового контуру к насадку дещо збільшує імпульс, хоча загалом не має суттєвого значення для волнової структури газового потоку в надзвуковому соплі без частинок.

При роботі сопла в земних умовах тиск на стінці конічної надзвукової ділянки сопла перед кутовою точкою (заокругленням) різко знижується до приблизно однакового мінімального значення для різних насадків. При цьому відстань мінімуму тиску від критичного перерізу сопла зменшується зі збільшенням радіуса заокруглення контуру сопла в кутовій точці. Таким чином, «розтягується» зона пониженого тиску (в порівнянні з незбуреним тиском на конічній ділянці сопла) на стінці практично пропорційно радіусу заокруглення контуру сопла в кутовій точці. Після досягнення мінімального значення тиск плавно підвищується до значення у відривній зоні на приблизно однаковій відстані від критичного перерізу сопла (в області кутової точки входу в насадок).

У висотних умовах залежність тиску від радіуса заокруглення контуру сопла в кутовій точці не має вираженого мінімального значення (з подальшим зростанням до тиску у відривній зоні насадка). При заокругленні тиск падає, як і в попередньому випадку (з приблизно таким же градієнтом), залишаючись після цього постійним і рівним значенню, отриманому у хвилях розширення при розвороті потоку у області зрізу (~ 20 мм від критичного перерізу сопла) конічної укороченої частини сопла.

***Ключові слова**: укорочене сопло, дзвоноподібний насадок, імпульсні характеристики, кутова точка, заокруглення контуру сопла в кутовій точці.*

The goal of this work was to analyze the effect of the corner point of the rocket engine nozzle contour on the nozzle flow characteristics. A two-phase flow in third rocket stage nozzles of different contours was considered. The site of condensed phase deposition onto the wall of a nozzle with an acute angle in the critical area was determined. Rounding the corner point at the supersonic area inlet changed the particle trajectory. The rounding radius best in terms of deposition reduction was found. A comparison showed that, despite the different profiles, the specific impulses of these nozzles differed little from one another and were lower than the specific impulse of the base nozzle by 6.5 - 7%.

The gas flow in nozzles with a corner point at the truncated conical nozzle – bell-shaped tip junction was studied. The flow characteristics were calculated for three nozzle contour configurations in the contour kink area: for an unrounded corner point and for a rounded corner point at the conical nozzle – bell-shaped tip junction. Rounding the corner point at the nozzle – tip junction slightly increases the impulse, although in general it has no significant effect on the wave structure of a particle-free gas flow in a supersonic nozzle.

In terrestrial conditions, the pressure on the wall of the conical supersonic area of a nozzle upstream of the corner point (rounding) sharply decreases to about the same minimum value for different nozzles. In this case, the distance of the pressure minimum from the nozzle throat decreases with increasing rounding radius at the corner point. Thus, the reduced pressure zone on the wall (as compared with the undisturbed pressure in the conical part of the nozzle) extends nearly in proportion to the rounding radius at the corner point. After reaching its minimum value, the pressure gradually increases to its value in the separation zone at approximately the same distance from the nozzle critical section (in the corner point area at the tip inlet).

At high altitudes, the pressure as a function of the corner point rounding radius does not have any pronounced minimum value (with a further increase to the pressure in the separation zone of the tip). For a rounded corner point, the pressure drops as in the previous case (with about the same gradient) and then remains constant and egual to its value in the expansion waves generated when the flow turns in the truncated conical nozzle exit area (about 20 mm downstream of the nozzle throat) .

***Keywords**: truncated nozzle, bell-shaped tip, impulse characteristics, corner point, corner point rounding.*

© К. В. Тернова, Н. П. Сироткіна, Л. В. Музика, 2024

Вступ. Велика увага у ракетно-космічній техніці приділяється дослідженню течій в соплах ракетних двигунів різної форми. На характеристики двигуна та ракети в цілому впливає характер до- і надзвукової течії в соплі. Для підвищення енергетичних характеристик двигунної установки потрібна оптимізація характеристик сопла для різних умов експлуатації. Для конструювання сопла необхідно мати відомості про характеристики різних конфігурацій сопел.

В традиційних соплах Лаваля існує точка зламу контуру в критичному перерізі. У цьому місці дозвуковий потік переходить в надзвуковий. Геометричні параметри сопла в критичному перерізі сильно впливають на характер течії в соплі.

В укорочених соплах з насадками, зокрема так званих соплах «dual bell nozzle» (дзвоноподібне сопло подвійного розширення) [1 – 4], є ще одна додаткова точка зламу контуру. Ця точка може знаходитись у місці приєднання насадка до конічної частини вкороченого сопла. Колективом авторів в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України проводилмся дослідження характеристик укорочених сопел зі дзвоноподібними насадками [5, 6]. Вибір профілю та довжини насадка при проєктуванні твердопаливних ракет визначається конкретними особливостями конструкції ракети, умовами компонування ступенів.

Проводились дослідження впливу зміни геометрії контуру в області його зламу. Розглядались сопла з різними кутами сполучення насадка з конічною частиною сопла [7], різною довжиною конічної частини [8]. Однак, важливо розглянути вплив геометрії контуру у точці сполучення конічної надзвукової частини з насадком.

Мета роботи – дослідження поведінки потоку в області зламу контуру надзвукового кругового сопла та впливу заокруглення контуру сопла в кутовій точці.

Головна частина. Розрахунки проводились з використанням комплексу програм, який дозволяє визначати локальні й інтегральні характеристики вісесиметричної надзвукової двухфазної течії продуктів згоряння твердого палива з урахуванням процесів коагуляції і дроблення частинок, а також зворотнього впливу частинок на газ.

Наведений нижче метод використовує як математичне середовище модель взаємопроникних континуумів [5] та докладно описаний у монографіях [5, 6]. Основні припущення моделі зводяться до такого:

– середовище є багатошвидкісним і низькотемпературним та складається з несучого газу і N фракцій частинок різних розмірів. Кожна i-а фракція має умовну густину ρ_i, рівну добутку числа частинок n_i в одиниці об’єму на масу m_i однієї частинки;

– тиск створюється тільки газом;

– течія стаціонарна;

– частинки є сферами;

– в’язкі сили та теплопередача виявляються лише при взаємодіях частинок з газом;

– об’ємом, займаним частинками, можна знехтувати;

– температура частинок постійна за їх об’ємом;

– гравітаційними та електричними силами можна знехтувати;

– несучий газ вважається ідеальним, хімічно не реагує і має постійний показник адіабати.

Загальна система рівнянь, що описує вісесиметричний рух полідисперсного двофазного суцільного середовища в рамках моделі багатошвидкісного континууму з урахуванням обміну масами, кількістю руху та енергією між окремими фракціями частинок має вигляд [5]

$$\left.\begin{aligned}
&\nabla^{\circ}\bar{W}y = 0,\\
&\nabla^{\circ}u\bar{W}y + \frac{\partial}{\partial x}yp = y\sum_{i=1}^{N}{}^{\circ}{}_i C_{R_i}(u_i - u),\\
&\nabla^{\circ}v\bar{W}y + \frac{\partial}{\partial y}yp - p = y\sum_{i=1}^{N}{}^{\circ}{}_i C_{R_i}(v_i - v),\\
&\nabla^{\circ}H_0\bar{W}y = y\sum_{i=1}^{N}{}^{\circ}{}_i\{C_{a_i}c_p(T_i - T) + C_{R_i}[u_i(u_i - u) + v_i(v_i - v)]\},\\
&p = {}^{\circ}RT, H_0 = c_pT + (u^2 + v^2)/2,\\
&\nabla^{\circ}{}_i\bar{W}_i y = y[n_i\sum_{j=1}^{i}\bar{k}_{ij}\Phi_{ij}{}^{\circ}{}_i - {}^{\circ}{}_i\sum_{j=i}^{N}\bar{k}_{ij}\Phi_{ij}n_j],\\
&\nabla n_i\bar{W}_i y = -yn_i\sum_{i=1}^{N}\bar{k}_{ij}\Phi_{ij}n_j,
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned}
&\nabla^{\circ}{}_i u_i\bar{W}_i y = y\{{}^{\circ}{}_i C_{R_i}(u - u_i) + n_i\sum_{j=1}^{i}\bar{k}_{ij}{}^{\circ}{}_j[u_j - (1-\Phi_{ij})u_i] - {}^{\circ}{}_i\sum_{j=i}^{N}\bar{k}_{ij}n_j[u_i - (1-\Phi_{ij})u_j]\},\\
&\nabla^{\circ}{}_i v_i\bar{W}_i y = y\{{}^{\circ}{}_i C_{R_i}(v - v_i) + n_i\sum_{j=1}^{i}\bar{k}_{ij}{}^{\circ}{}_j[v_j - (1-\Phi_{ij})v_i] - {}^{\circ}{}_i\sum_{j=i}^{N}\bar{k}_{ij}n_j[v_i - (1-\Phi_{ij})v_j]\},\\
&\nabla^{\circ}{}_i E_i\bar{W}_i y = y\{{}^{\circ}{}_i[c_pC_{a_i}(T - T_i) + C_{R_i}[u_i(u_i - u) + v_i(v_i - v)]\} +\\
&n_i\sum_{j=1}^{i}\bar{k}_{ij}{}^{\circ}{}_j[E_j - (1-\Phi_{ij})E_i] - {}^{\circ}{}_i\sum_{j=i}^{N}\bar{k}_{ij}n_j[E_i - (1-\Phi_{ij})E_j]\},\\
&E_i = C_{a_i}T_i + (u_i^2 + v_i^2)/2,\ \bar{k}_{ij} = k_{ij}\Omega_{ij},\ i = 1,....,N,
\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

де C_{R_i}, C_{a_i} – коефіцієнти опору та теплопередачі відповідно; k_{ij} – константа коагуляції; Φ_{ij} – коефіцієнт ефективності зіткнень; Ω_{ij} – коефіцієнт захоплення частинок; n_i – число частинок i-ї фракції у одиниці об’єму; n_j – число частинок вздовж j-ї траєкторії i- фракції; N – кількість фракцій, c_p.– питома теплоємність, R – газова стала, T – температура, T_i – температура i-ї фракції; ρ – густина, ρ_i – густина i- фракції; ρ_j – густина частинок вздовж j-ї траєкторії i- фракції; p – тиск, $\bar{W}$ (u,v) – швидкість потоку (її складові), y – координата, u_i,v_i – складові швидкості потоку i- фракції, E_i – енергія окремих фракцій

частинок; E_j – енергія частинок вздовж *j*-ї траєкторії *i*- фракції; u_j,v_j – складові швидкості частинки при русі вздовж *j*-ї траєкторії *i*- фракції, $\overline{W}_i$ – швидкість потоку *i*- фракції.

Для коефіцієнтів опору C_{R_i} використовувалася, зокрема, формула Хендерсона [9], коефіцієнт теплопередачі C_{a_i} знаходився за формулою з [5].

Значення коефіцієнта ефективності зіткнень визначалося за допомогою виразу [10], а коефіцієнт захоплення частинок Ω_{ij} знаходився за формулою з [11]. Облік деформації частинок конденсату через обдування потоком газу проводився шляхом введення поправок до величин C_{R_i}, k_{ij} [5].

Розподіл числа частинок за розмірами задавався у вигляді нормально-логарифмічного закону

$$f(r) = 1/\sqrt{2®}\ \ln\pm\ \exp[-(\frac{\ln(r/r_0)}{\sqrt{2}\ln\pm})^2], \qquad (3)$$

де r – радіус частинки; r_0, $\ln\sigma$ – математичне очікування та середньоквадратичне відхилення логарифмів радіусів частинок. При розрахунках використовується розподіл за фракціями n_i.

Завдання розрахунку двофазної полідисперсної суміші газу з частинками зводиться до інтегрування системи рівнянь (1), що описує течію несучого газу, та системи рівнянь (2), що описує рух частинок конденсату.

У дотрансзвуковій області течії три перші рівняння системи (1) подавалися в нестаціонарній формі та інтегрувалися за часом за допомогою явної різницевої схеми Мак-Кормака. Четверте рівняння енергії системи (1), яке відповідає руху вздовж ліній струму

$$\frac{dH_0}{dt} = y\sum_{i=1}^{N}\frac{°_i}{°}\{C_{a_i}c_p(T_i - T) + C_{R_i}[u_i(u_i - u) + v_i(v_i - v)]\} \qquad (4)$$

при $u > 0$ є х-гіперболічним; воно поєднується із системою рівнянь (2), що відповідає руху вздовж *j*-ї траєкторії *i*- фракції [5].

Інтегрування рівняння (4) вздовж лінії струму та системи (2) вздовж обраної траєкторії виконувалося за допомогою різницевої схеми предиктор-коректор [5], розробленої спеціально для розв'язання жорстких систем диференціальних рівнянь. Спільне розв'язання систем диференціальних рівнянь (1), (2), (4) здійснювалося методом ітерацій. На першому етапі за заданим полем швидкостей інтегрувалася система рівнянь (2) вздовж *j*-ї траєкторії *i*- фракції та уточнювалися праві частини нестаціонарної системи (1). Після цього було стаціонарне розв'язання (1) і процес повторювався до збіжності.

У надзвуковій області течії, де система (1) та рівняння (4) є гіперболічними, вони інтегрувалися спільно за допомогою стаціонарного аналога різницевої схеми Мак-Кормака для (1) та різницевої схеми предиктор-коректор з роботи [5] для (4) та (2) вздовж *j*-ї траєкторії *i*- фракції.

У вхідному перерізі сопла, зважаючи на малі швидкості руху двофазного середовища, течія вважається рівноважною. У цьому випадку на вході задавалося гомогенне середовище $¥_l = ¥[(1-z) + zC_b/c_p]/[(1=z) + z¥C_b/c_p]$

і $\mathrm{Re} = (1 - z) \cdot R$, де z – масова доля частинок; C_b – коефіцієнт теплопередачі на вході; γ – показник адаібати; R – газова стала.

Для чисельного розв'язання системи рівнянь використовували метод скінченних різниць. Нижче наведені результати дослідження течії в сопловому тракті двигуна третього ступеня. Як початковий розподіл частинок по розмірам було взято нормально-логарифмічний закон в діапазоні розмірів (0,5 – 10) мкм і розглядався рух I0 фракцій. Параметри частинок у вхідному перерізі сопла задаються рівними параметрам газу (умова відсутності швидкістного і температурного відставання). Всі лінійні розміри знерозмірюються радіусом мінімального перерізу сопла.

Базовий контур сопла з кутовою точкою на вході в надзвукову частину в знерозмірених координатах наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Контур сопла з кутовою точкою

$\bar{x}$	0	0,006	0,094	0,05	0,108	0,158	0,218	0,253	0,334
$\bar{y}$	1	1,003	1,018	1,027	1,06	1,088	1,124	1,145	1,193

0,432	0,552	0,621	0,781	0,874	0,876	1,088	1,5	1,849	2,274
1,254	1,329	1,372	1,474	1,533	1,598	1,67	1,93	2,144	2,397

2,791	3,069	3,782	4,182	4,623	5,109	6,237	6,888	7,607	15,19
2,689	2,852	3,2	3,404	3,611	3,829	4,298	4,55	4,811	7,59

На рис. 1 показано вихідне сопло з кутовою точкою і сопло з радіусним входом (R).

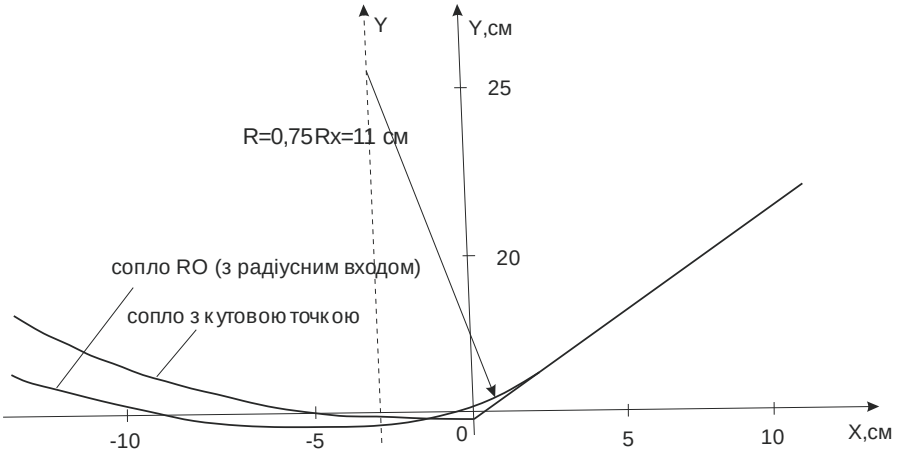


Рис. 1 – Побудова сопла (RO) з радіусним входом

Як вхідні були задані такі параметри: початковий тиск P_o = 7,7 МПа, початкова температура T_o = 3605 К, коефіцієнт динамічної в'язкості μ = 24,74 кг/кмоль, масова доля частинок z= 0,429, газова стала γ=1,17, радіус критичного перерізу сопла r_* = 0,145 м.

Розрахунками двофазного потоку було показано вплив форми сопла у критичному перетині. Аналізувалась область осадження частинок на стінку сопла. Осадження частинок погіршує роботу сопла і зношує його внутрішню поверхню. Чим більше відстань від траєкторії частинок до стінок сопла, тим

меньше вірогідність зносу. Отже, критерій мінімального зносу стінок сопла – найбільша відстань граничної траєкторії частинок до стінки. За цим критерієм були проаналізовані траєкторії руху частинок 3 розмірів у двофазному потоці в соплі з кутовою точкою на вході в надзвукову частину і в соплі з «гладким» радіусним входом.

На рис. 2 для цих сопел показано залежність відстані від стінки сопла (x) по довжині сопла до граничної траєкторії $\Delta\bar{S}$іп = $\bar{y}_к$(x) - $\bar{y}_{Siп}$ (де $\bar{y}_к$ – координата контура сопла, $\bar{y}_{Siп}$ – координата контуру траєкторії частинки з розміром S_i) різних фракцій (радіус частинки $r_ч$ = 0,59 мкм (криві 1), 0,79 мкм (2), 1,07 мкм (3)). Суцільною лінією позначені результати для базового сопла, пунктирною – для сопла з радіусним входом.

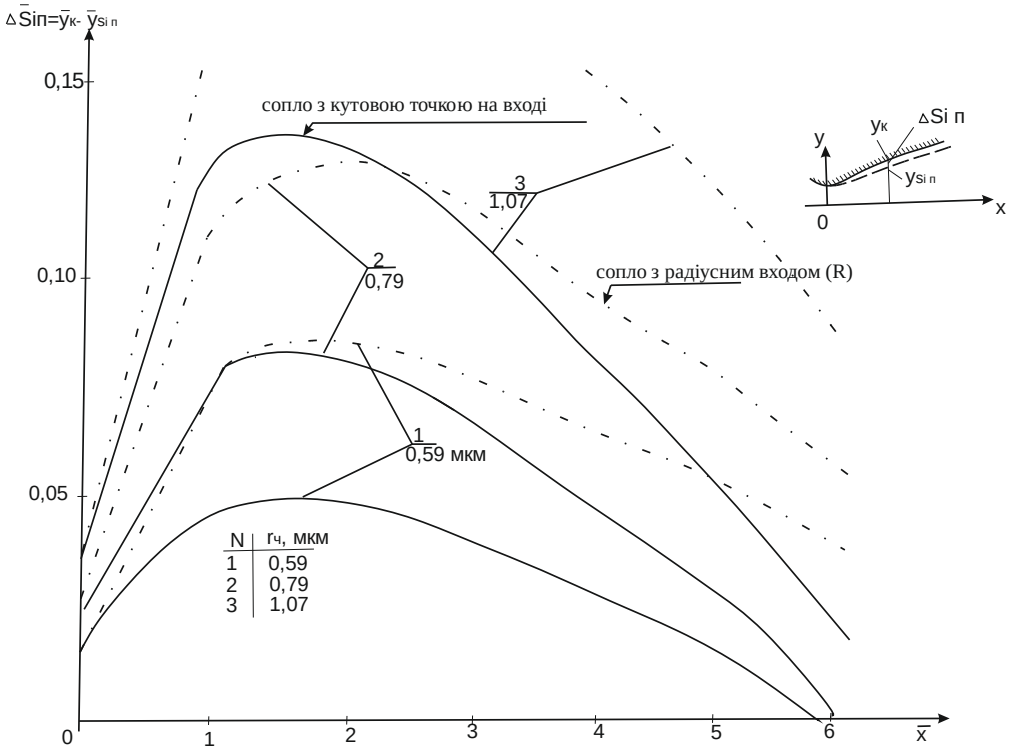


Рис. 2 – Відстань від граничної траєкторії частинок ($\Delta\bar{S}$ іп) до стінки сопла

Як видно з графіка, починаючи з координати $\bar{x} \approx 5,7$ починається осадження конденсованої фази (фракції з радіусом частинки $r_ч$=0,59 мкм) на стінку сопла, причому траєкторії крупніших частинок проходять на більшій відстані від стінок, тобто ближче до осі сопла.

Розрахунки показують, що введення радіусної ділянки суттєво віддаляє від стінки сопла граничні траєкторії (пунктирні лінії на рис. 2) частинок. Було визначено кращий радіус заокруглення $\bar{R} = 0,75r_*$. Осадження частинок на стінку цього сопла відсутнє.

Важливим показником осадження є густина частинок певного розміру ρ_{Si} в потоці. На рис. 3 показано розподіл густини частинок по перерізу для указаних варіантів сопла. Введення радіусної частини у вхідній частині

надзвокового сопла помітно змінює профіль густини частинок. До зрізу сопла розподіл частинок по перерізу стає рівномірним.

Таким чином, використання радіусного контуру в критичній зоні покращує характеристики двофазного потоку і зменшує знос поверхні сопла.

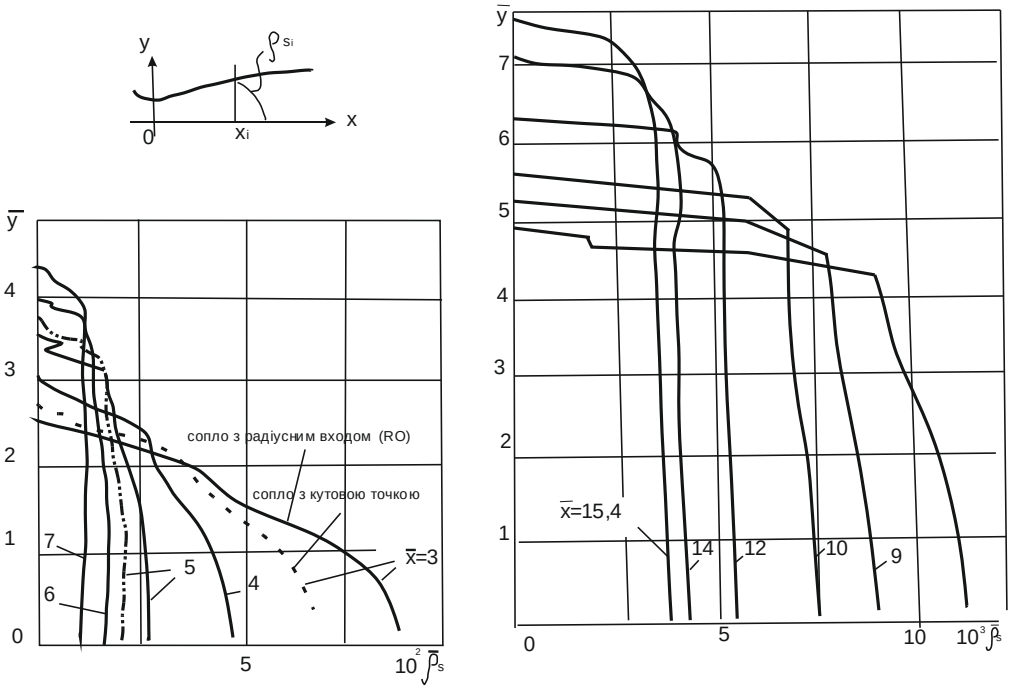


Рис. 3 – Розподіл густини частинок по перерізу для указаних варіантів сопла

Досліджено вплив точки сполучення конічної частини круглого укороченого сопла з насадками. Для прикладу розглянуто укорочені сопла зі дзвоноподібним насадком.

У цій роботі було проведено чисельні дослідження течії в соплах з кутовою точкою. Розрахункова сітка будувалася на ділянці розміром $4L \times 2L$, де L — довжина сопла. При побудові сітки розрахункова область була розбита на зони, для кожної встановлено різні розміри комірок для отримання більш адекватного результату в зонах, які найбільш цікавили. Також сітку побудовано зі згущенням в пристінкових зонах, перевірено на якість (рис. 4). Розрахунки проводились у нестаціонарній вісесиметричній постановці. Рух суцільної фази в ANSYS Fluent моделюється шляхом чисельного розв’язування нестаціонарних усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав’є–Стокса (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes – URANS) [12]. У рівняннях Нав’є–Стокса компоненти швидкості, температури і пов’язані з нею змінні осереднюються за Фавром.

Для обчислення коефіцієнта динамічної в’язкості використовується формула Сазерленда

$$« = «_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + C}{T + C},$$

де $«_0$ – коефіцієнт в’язкості при температурі $T = T_0$, для $T_0 = 273$ К коефіцієнт $«_0$ = 1,71·105 Н·с/м^2; C – стала, для газа C = 117.

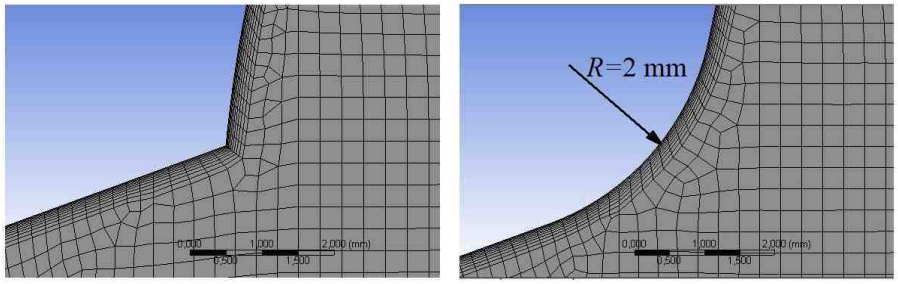
Для замикання усереднених рівнянь Нав'є–Стокса вводяться рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності і рівняння відносної швидкості дисипації. Як робоче тіло використовувалося повітря температурою 300 К. Дослідження проводилися з урахуванням припущень:

– змішувані гази підпорядковуються рівнянню стану ідеального газу і однакові за складом;

– профіль тиску, температури та швидкості в початковому перетині рівномірний;

– теплопередачею на стінках можна знехтувати.

Було розраховано характеристики потоку для трьох випадків конфігурації контуру сопла в області кутової точки: без заокруглення контуру сопла в кутовій точці, з заокругленням $\frac{R}{r_*} = 0,2$ (радіус сопла $R = 1$ мм) і 0,4 ($R = 2$ мм). В області заокруглення розрахункова сітка у пристінковій області контуру сопла згущувалась (рис. 4).

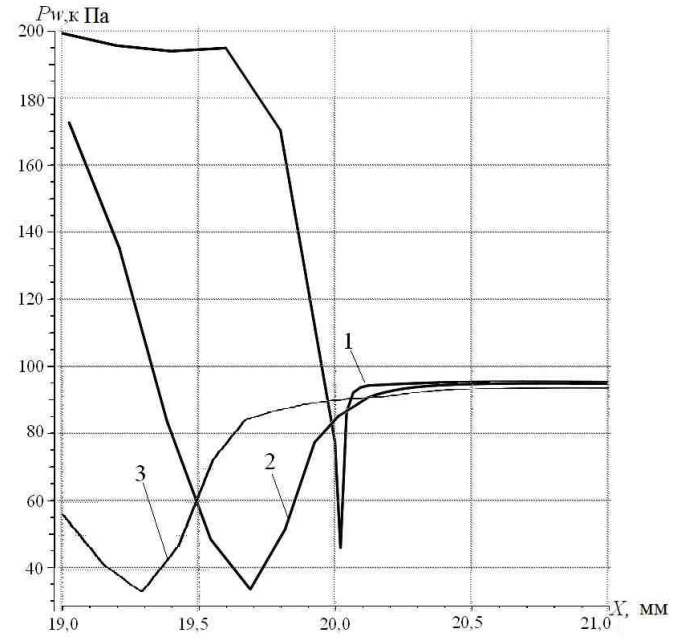


а) б)

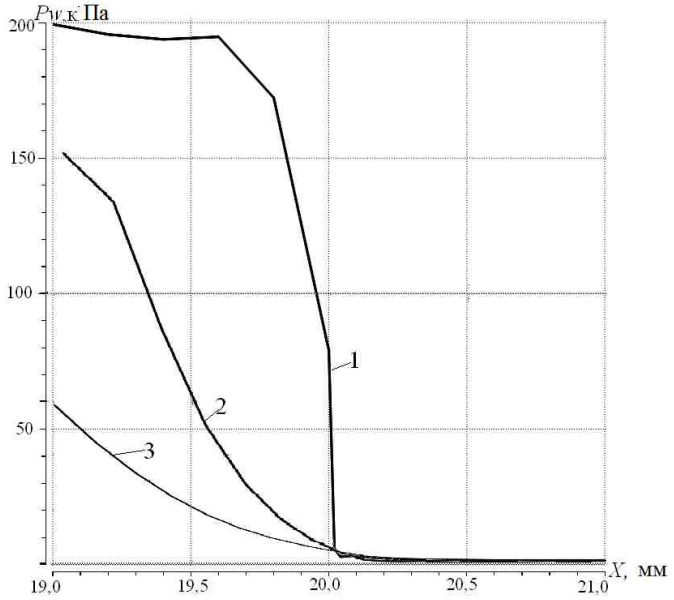
Рис. 4 – Розрахункова сітка в області заокруглення контуру сопла в кутовій точці входу в насадок (а – без заокруглення, б – з заокругленням)

При роботі сопла в земних умовах тиск на стінці конічної надзвукової ділянки сопла перед кутовою точкою (заокругленням) різко знижується до приблизно однакового (для різних насадків) мінімального значення (~ 10 % від тиску на зрізі конуса). При цьому відстань мінімуму тиску від критичного перерізу сопла зменшується зі збільшенням радіуса заокруглення контуру в кутовій точці (рис. 5, а)). Таким чином, «розтягується» зона пониженого тиску (в порівнянні з незбуреним тиском на конічній ділянці сопла) на стінці практично пропорційно радіусу заокруглення контуру сопла в кутовій точці. Після досягнення мінімального значення тиск плавно підвищується до значення у відривній зоні на приблизно однаковій відстані від критичного перерізу сопла (в області кутової точки входу в насадок).

У висотних умовах залежність тиску від радіуса заокруглення контуру сопла в кутовій точці не має вираженого мінімального значення (з подальшим зростанням до тиску у відривній зоні насадка). При заокругленні тиск падає, також як і в попередньому випадку (з приблизно таким же градієнтом), залишаясь після цього постійним і рівним значенню, отриманому у хвилях із розширення при розвороті потоку в області зрізу (~ 20 мм від критичного перерізу сопла) конічної укороченої частини сопла (рис. 5, б)).



а)



б)

Рис. 5 – Розподіл тиску на стінці насадка в області з'єднання його з конічною частиною 20 мм укороченого сопла з кутовою точкою (1), із заокругленням (радіусом 1 мм (2) і 2 мм (3)) при роботі в земних умовах (а), на висоті (б) і початковому тиску 10^4 кПа.

Висновки. Було досліджено характеристики двофазного потоку у соплах різних контурів. Визначено місце осадження конденсованої фази (фракції з радіусом частинки $r_ч$=0,59 мкм) на стінку сопла з гострим кутом у критичній області. При заокругленні контуру сопла в кутовій точці на вході в надзвукову частину сопла відбувалась зміна траєкторії частинок, причому для меншого осадження виявлено кращий радіус заокруглення $\bar{R} = 0,75r_*$.

Були проведені чисельні дослідження течії газу в соплах з кутовою точкою при сполученні конічного сопла зі дзвіноподібним насадком. Розраховані характеристики потоку для трьох випадків конфігурації контуру сопла в області кутової точки: без заокруглення контуру сопла в кутовій точці, з заокругленням $\frac{R}{r_*} = 0,2$ ($R = 1$ мм) і 0,4 ($R = 2$ мм). Заокруглення контуру сопла в кутовій точці переходу від базового контуру до насадка дещо збільшує імпульс, хоча загалом не має суттєвого значення для хвилевої структури газового потоку в надзвуковому соплі без частинок.

При роботі укороченого сопла в земних умовах тиск газового потоку на стінці конічної надзвукової ділянки сопла перед кутовою точкою (заокругленням) різко знижується до приблизно однакового (для різних насадків) мінімального значення (~ 10 % від тиску на зрізі конуса). При цьому відстань мінімуму тиску від критичного перерізу сопла зменшується зі збільшенням радіуса заокруглення контуру сопла в кутовій точці. Таким чином, «розтягується» зона зниженого тиску (в порівнянні з незбуреним тиском на конічній ділянці сопла) на стінці практично пропорційно радіусу заокруглення контуру сопла в кутовій точці. Після досягнення мінімального значення тиск плавно підвищується до значення у відривній зоні на приблизно однаковій відстані від критичного перерізу сопла (в області кутової точки входа в насадок).

Було визначено, що в висотних умовах залежність тиску потоку від радіуса заокруглення контуру сопла в кутовій точці не має вираженого мінімального значення (з подальшим зростанням до величини тиску у відривній зоні насадка). При заокругленні тиск падає, як і в попередньому випадку (з приблизно таким же градієнтом), залишаючись після цього постійним і рівним значенню, отриманому у хвилях розширення при розвороті потоку в області зрізу (~ 20 мм від критичного перерізу сопла) конічної укороченої частини сопла.

1. *Arora R., Vaidyanathan A.* Experimental investigation of flow through planar double divergent nozzles. Acta Astronomica. 2015. № 112. P. 200–216. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.03.020
2. *Genin C., Stark R., Haidn O., Quering K., Frey M.* Experimental and numerical study of dual bell nozzle flow. Progr. Flight Phys. 2013. № 5. P. 363–376. https://doi.org/10.1051/eucass/201305363
3. *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. P. 35–45. https://doi.org/10.1134/S0015462822601267
4. *Hamitouche T., Sellam M., Kbab H., Bergheul S.* Design and Wall Fluid Parameters Evaluation of the Dual-Bell Nozzle. International Journal of Engineering Research and Technology. 2019. V. 12, № 7. P. 1064–1074.
5. *Коваленко Н. Д., Стрельников Г. А., Гора Ю. В., Гребенюк Л. З.* Газодинамика сверхзвуковых укороченных сопел. К.: Наукова думка, 1993. 223 с.
6. *Стрельников Г. А.* Регулируемые сверхзвуковые сопла малой длины. Д: ДГУ, 1993. 191 с.
7. *Прядко Н. С., Стрельников Г. О., Тернова К. В.* Вплив кута входу до дзвоноподібного насадку укороченого круглого надзвукового сопла ракетного двигуна на його імпульсні характеристики. Космічна наука і технологія. 2024. Т. 30, № 3. С. 53–60. https://doi.org/10.15407/knit2024.03.053
8. *Pryadko N. S., Strelnikov G. A., Ternova K. V.* Research of supersonic flow in shortened nozzles of rocket engines with a bell-shaped tip. Space Sci. & Technol. 2024. № 1. P. 03–13. https://doi.org/10.15407/knit2024.01
9. *Хендерсон С. В.* Коэффициенты сопротивления сферы в течениях разреженного газа и сплошной среды. Ракетная техника и космонавтика. 1976. Т. 14, № 6. С. 5–7. https://doi.org/10.2514/3.61409
10. *Стернин Л. Е.* Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974. 212 с.
11. *Клигель Дж., Никерсон Г.* Течение смеси газа и твердых частиц в осесимметричном сопле. Детонация и двухфазное течение. М.: Мир, 1966. С. 183–201.
12. *John E. Matsson*. An Introduction to ANSYS Fluent 2022. 688 с.

Отримано. 23.08.2024,
в остаточному варіанті 10.12.2024