DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.045

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ НАДЗВУКОВОГО ПЕРЕРОЗШИРЕНОГО СТРУМЕНЮ

Польовий О.Б., Редчиць Д.О., Тучина У.М.

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Україна

При проектуванні стартових споруд необхідно досліджувати газодинамічні процеси, які виникають при старті двигунів космічних ракет-носіїв (КРН) та при взаємодії надзвукових струменів з конструктивними елементами пускових установок. Тут реалізується складна просторова нестаціонарна картина течії газу, що характеризується наявністю стрибків ущільнення, відривних зон, турбулентністю, багатофазністю надзвукового струменя, залишковими хімічними реакціями. Якісне комп'ютерне моделювання газодинамічних параметрів струменя ракетного двигуна дозволить точніше визначати конфігурацію стартового комплексу та траєкторією руху КРН на початковій ділянці польоту.

У доповіді розглянуто задачу нестаціонарного формування холодного надзвукового струменя під час продування конічного сопла Лаваля (імітація запуску двигуна).

Математичне моделювання ґрунтується на чисельному розв'язанні нестаціонарних рівнянь Нав'є-Стокса стисливого газу (URANS), записаних у довільній криволінійній системі координат. Неявний чисельний алгоритм другого порядку точності за часом та простором ґрунтується на кінцево-об’ємному підході зі схемою Roe. В якості моделі турбулентності використовувалася диференціальна однопараметрична модель Спаларта-Аллмараса із застосуванням технології від'єднаних вихорів (Detached Eddy Simulation – DES). Раніше такий підхід успішно використовувався авторами для моделювання двовимірних та просторових транс- та надзвукових турбулентних течій, включаючи стаціонарні надзвукові струмені [1].

При комп'ютерному моделюванні початкові умови для нерухомого повітря визначалися двома станами відповідно до експериментальних даних [2]:

а) усередині сопла та в навколишньому просторі значення тиску дорівнювало $1.01 \cdot 10^5$ Па при температурі 300 К, що практично збігалося з параметрами стандартної атмосфери;

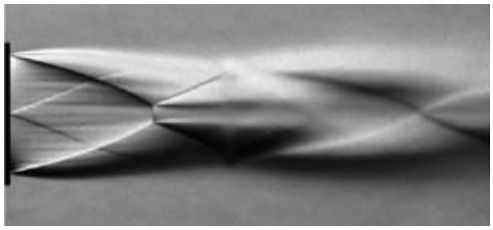
б) у форкамері знаходилося стиснене повітря з тиском $2.34 \cdot 10^6$ Па (~22 атм) за такої ж температури 300 К.

Після подачі стисненого повітря в сопло Лаваля починалася взаємодія між цими двома станами повітря за відомою схемою розпаду розриву. Першою через сопло проходила головна ударна хвиля і лише потім основна маса стисненого повітря. На зрізі конічного сопла з вихідним діаметром 30 мм утворювався надзвуковий струмінь з числом Маха 3 та ступенем перерозширення 0.58. Число Рейнольдса, визначене за діаметром сопла склало $4.27 \cdot 10^6$, що відповідає розвиненому турбулентному режиму.

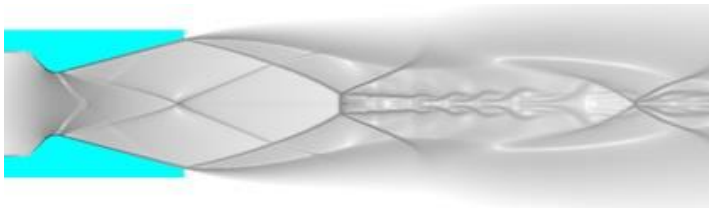
При витіканні струменя в навколишній простір утворюються соплові стрибки ущільнення, що перетинаються. Між струменем і атмосферою, що її оточує, розвивається зовнішній шар змішування. Максимальні значення локальних чисел Маха на цій стадії розвитку струменя було зафіксовано на периферії струменя, а не вздовж осі симетрії. Потім формується перша «бочка» струменя, яка включає диск Маха та системи ударних хвиль та хвиль розрідження (рис. 1а, б). Диск Маха перетворює частину надзвукової течії на дозвукову з додатковим шаром змішування.

Подальше просування стисненого повітря вниз по потоку формує відому бочкоподібну структуру надзвукового струменя (рис.1в). Загальний процес розвитку струменя супроводжується поширенням звукових хвиль у навколишньому просторі.

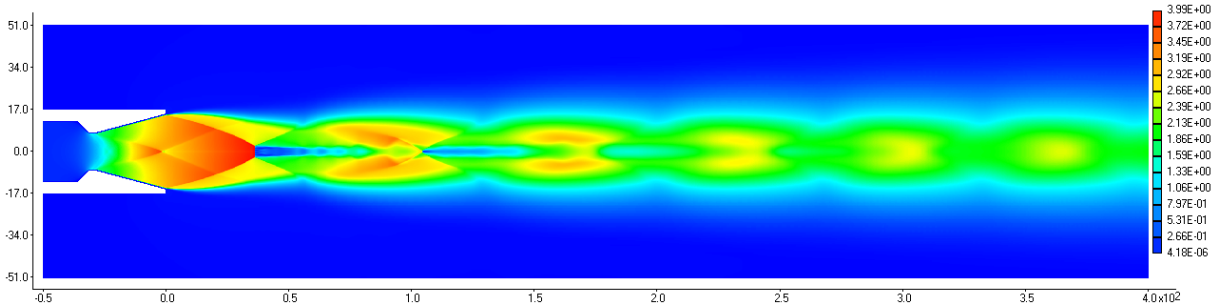
Виконано порівняння отриманих результатів по розподілу тиску гальмування вздовж осі симетрії для сталої течії з експериментальними даними та розрахунками інших авторів на основі пакетів ANSYS Fluent та FloEFD [2, 3].



а) експериментальна шлірен – фотографія



б) розрахункова тіньова «фотографія»



в) розподіл локальних чисел Маха

Рисунок 1 – Структура розвинутого надзвукового перерозширеного струменю

Література

1. Полевой О. Б., Тучина У. Н., Мирный С. С. Численная реконструкция структуры взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой // *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2017: тези доповідей Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 28 – 30 березня 2017 р.)*. – с. 72.
2. Запрягаев В.И., Кавун И.Н., Кундасев С.Г. Расчетно-экспериментальное исследование газодинамической структуры сверхзвуковой перерасширенной струи // *Вестник НГУ, серия Физика*, 2013, т.8, вып. 4 – с. 84-92.
3. Антипова М.С., Дядькин А.А., Запрягаев В.И., Крылов А.Н. Компьютерное моделирование истечения холодной сверхзвуковой струи из конического сопла с использованием программного пакета FLOEFD // *Космическая техника и технологии*, 2016, № 1(12), – с. 5-11.

COMPUTER SIMULATION OF THE NON-STATIONARY PROCESS OF THE SUPERSONIC OVEREXPANDED JET DEVELOPMENT

Polevoy Oleg, Redchyts Dmytro, Tuchyna Uliana

Abstract. Questions of numerical simulation of non-stationary process of the development of a supersonic overexpanded jet are considered. Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (URANS) of compressible flows, written in an arbitrary coordinate system, along with the Spalart-Allmaras one-equation differential turbulence model are applied. The calculations of non-stationary formation of an air cold supersonic jet during the blowing through a conical Laval nozzle (simulation of engine start-up) were made. The physical features of the shock and acoustic waves generation and propagation are discussed. In the stationary phase an overexpanded free supersonic turbulent jet is formed, which includes a Mach disc in its structure. The obtained results were compared with experimental data and calculations by other authors based on the ANSYS Fluent and FloEFD CFD tools.

Keywords: supersonic jet, shock waves, turbulence, Navier-Stokes equation, computer simulation.

References

1. Polevoi O.B., Tuchyna U.N., Myrnыi S.S. Chyslennaia rekonstruktsyia strukturы vzaymodeistvyia sverkhzvukovoi struy s prehradoi // Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni. ITMM'2017: tezy dopovidei Dev'iatoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Dnipro, 28 – 30 bereznia 2017 r.). – s. 72.
2. Zapriahaev V.Y., Kavun Y.N., Kundasev S.H. Raschetno-эksperymentalnoe yssledovanye hazodynamycheskoi strukturы sverkhzvukovoi pererasshyrennoi struy // Vestnyk NHU, seryia Fyzyka, 2013, t.8, vыp. 4 – s. 84-92.
3. Antypova M.S., Diadkyn A.A., Zapriahaev V.Y., Krылov A.N. Kompiuternoe modelyrovanye ystechenyia kholodnoi sverkhzvukovoi struy yz konycheskoho sopla s yspolzovanyem prohrammnoho paketa FLOEFD // Kosmycheskaia tekhnyka y tekhnolohyy, 2016, № 1(12), – s. 5-11.