

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ ВИСОКОШВИДКІСНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Сохацький А.В., Арсенюк М.С.

Інститут транспортних систем та технологій НАН України

Вступ. Математичне моделювання аеродинаміки транспортних апаратів є доволі складною та актуальною задачею [1-3]. На сьогодні найбільш досконалі математичні моделі аеродинаміки побудовані на фізичних властивостях в'язкого стисливого газу та ґрунтуються на рівняннях Нав'є-Стокса. Реальні течії навколо транспортного засобу є виключно турбулентними. Їх математичне моделювання і на сьогодні залишається складною проблемою обчислювальної аеродинаміки [1-3]. Тому розробка математичних моделей аеродинамічних процесів є актуальним та важливим завданням. Метою роботи є побудова математичної моделі, числового методу, алгоритму розв'язування задачі та створення програмного забезпечення для дослідження аеродинамічних процесів турбулентних течій навколо високошвидкісного наземного транспортного засобу.

Математичне моделювання. Для розв'язування задачі з визначення аеродинамічних характеристик транспортного засобу обрано модель течії в'язкого стисливого газу, що описується осередненими за Рейнольдсом рівняннями Нав'є-Стокса. Розрахункова область навколо транспортного апарата є складною, тому доцільно використовувати багатоблоковий підхід та криволінійну систему координат. Система рівнянь Нав'є-Стокса осереднена за Рейнольдсом для довільної криволінійної системи координат запишеться [3]

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\hat{G} - \hat{G}_v)}{\partial \zeta} = \hat{H}, \quad (1)$$

де \hat{Q} – вектор невідомих змінних; $\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$ – вектори нев'язких потоків; $\hat{E}_v = \xi_x E_v + \xi_y F_v + \xi_z G_v$, $\hat{F}_v = \eta_x E_v + \eta_y F_v + \eta_z G_v$, $\hat{G}_v = \zeta_x E_v + \zeta_y F_v + \zeta_z G_v$ – вектори в'язких потоків; $\hat{H} = 1/jH$ – вектор джерельних членів.

В системі рівнянь (1) n -компонентні вектори $\hat{Q}, \hat{E}_i, \hat{F}_i, \hat{G}_i, \hat{E}_v, \hat{F}_v, \hat{G}_v$ мають відповідний вигляд в залежності від моделі турбулентності.

Для замикання системи рівнянь (1) використано модель турбулентності SST (Shear Stress Transport) Ментера [4]. Модель турбулентності SST є комбінацією $k-\varepsilon$ і $k-\omega$ моделей турбулентності. Для розрахунку течії у вільному потоці використовуються рівняння $k-\varepsilon$ моделі, а в області

поблизу стінок - рівняння $k-\omega$ моделі. Вимоги до щільності сітки тут ті ж, що і у $k-\omega$ моделі і низькорейнольдсової $k-\varepsilon$ моделі. Для числового розв'язування системи рівнянь (1) використано метод контрольного об'єму.

Отримана система алгебраїчних рівнянь розв'язувалася методом Гаусса-Зейделя. Розроблена методика, алгоритм та програмне забезпечення тестувалося на ряді стандартних задач.

Для математичного моделювання впливу просторового положення високошвидкісного наземного транспортного засобу на його аеродинамічні характеристики було обрано модель транспортного засобу типу Maglev (рис.3) [3]. Досліджувався вплив просторового положення високошвидкісного наземного транспортного засобу в без крилевому варіанті на його аеродинамічні характеристики поблизу шляхової структури. Відстань від днища корпусу ВШНТЗ в крайній задній точці до шляхової структури складала 0,013 висоти корпусу ВШНТЗ.



Рисунок 1 - Фото моделі високошвидкісного наземного транспортного апарату в крилевому компонуванні з від'ємною V-подібністю крила [3]

Всі розрахунки проводилися для числа Рейнольдса $Re=3,8 \cdot 10^6$ та числа Маха $M=0,15$. Числове моделювання проводилися на гексаедральній багатоблочній сітці, що складалася з 3,3 млн. вузлів.

Мінімальний крок сітки складав $2,5 \cdot 10^{-6}$ довжини корпусу. Середня товщина в'язкого підшару по корпусу складала $y^+=0,88$.

На рис.2 представлені залежності аеродинамічних коефіцієнтів C_x , C_y , m_z від кута встановлення транспортного засобу відносно шляхової структури. Видно, що при зростанні кута встановлення до значення $\alpha = 0,1^\circ$ коефіцієнт лобового опору C_x спадає. Зі збільшенням кута встановлення після значення $\alpha = 0,1^\circ$ коефіцієнт лобового опору C_x починає зростати на усьому дослідженому проміжку зі значення 0,302 до 0,318. Аналогічні особливості спостерігаються і для зміни коефіцієнта підйімальної сили C_y . Мінімальне значення коефіцієнта C_y спостерігається при значенні кута установки $0,05^\circ$. Після значень кута

установки $\alpha = 0,05$ спостерігається зростання значень коефіцієнта C_y . При цьому негативні значення коефіцієнта C_y спостерігаються при кутах установки від 0° до $0,7^\circ$, а при великих кутах установки він стає позитивним.

Значення коефіцієнта моменту m_z в усьому дослідженому діапазоні кутів установки були негативними. Максимальне значення m_z спостерігається при куті встановлення $\alpha = 0,025^\circ$. Із зростанням кута встановлення понад $\alpha = 0,025^\circ$ значення коефіцієнта m_z спадає.

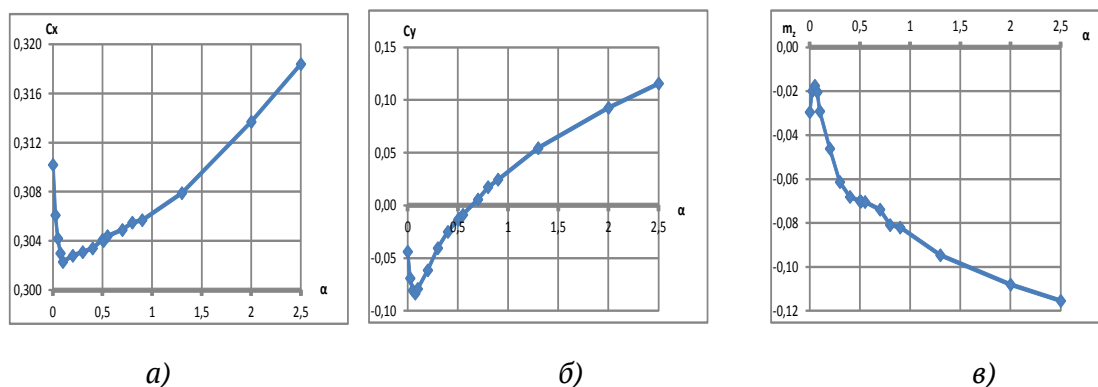


Рисунок 2 - Вплив величини кута встановлення транспортного засобу на аеродинамічні коефіцієнти: а- залежність коефіцієнта лобового опору C_x від кута атаки, б- залежність коефіцієнта підйимальної сили C_y від кута атаки, в- залежність коефіцієнта моменту тангажу m_z від кута атаки

Висновок. Проведені дослідження показали, що величина кута встановлення транспортного засобу відносно шляхової структури істотно змінює його аеродинамічні характеристики. Для забезпечення потрібних параметрів динаміки руху високошвидкісного наземного транспортного засобу необхідно урахувати його аеродинамічні характеристики.

Література

1. Волков К.Н, Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368с.
2. Гарбарук А. В., Стрелец М.Х., Травин А.К., Шур М.Л. Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб. Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 234 с.
3. Сохацький А. В. Теоретичні основи створення аеродинамічних компонувань перспективних швидкісних транспортних апаратів: дис. доктора технічних наук: 05.07.01. Дніпропетровськ. 2010. 364 с.
4. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. v. 32, N 8. P. 1598-1605.

References

1. Volkov K.N, Emelyanov V.N. Modelirovanie krupnyih vihrey v raschetah turbulentnyih techeniy. M.: Fizmatlit, 2008. 368s.

2. Garbaruk A. V., Strelets M.H., Travin A.K., Shur M.L. *Sovremennyye podhody k modelirovaniyu turbulentnosti*. SPb. Izd-vo Politehn. un-ta, 2016. 234 s.
3. Sokhatskyi A. V. *Teoretychni osnovy stvorennia aerodynamichnykh komponovan perspektyvnykh shvydkisnykh transportnykh aparativ: dys. doktora tekhnichnykh nauk: 05.07.01*. Dnipropetrovsk. 2010. 364 s..
4. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. v. 32, N 8. P. 1598-1605.

MATHEMATICAL MODELING OF AERODYNAMICS OF A HIGH-SPEED GROUND VEHICLE

Sohatsky Anatoly, Arseniuk Mykaylo

Abstract. Reliable prediction of the characteristics of turbulent flows is an extremely important scientific problem due to the complexity and insufficient study of turbulence as a physical phenomenon. Today, computational aerodynamics lacks universal mathematical models of turbulence. This paper considers the problem of modeling the aerodynamics of a high-speed ground vehicle. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations are used to describe the flow around the vehicle. To close the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, a two-parameter SST Menter turbulence model was used. The SST Menter model is superior in quality to a number of other turbulence models, but in terms of computational simplicity and costs it is inferior to models with a single equation. A methodology, algorithm for solving the problem, and software have been developed. The finite-volume method was used to numerically integrate the system of differential equations. The problem was solved in a multi-block formulation. The developed methodology was tested on standard aerodynamic problems.

Keywords: mathematical simulation, vehicle aerodynamics, numerical simulation, Navier-Stokes equation, turbulence models.