

А.В. СОХАЦЬКИЙ

Інститут транспортних систем та технологій НАН України
Університет митної справи та фінансів

М.С. АРСЕНЮК

Інститут транспортних систем та технологій НАН України

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБТІКАННЯ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ТИПУ AHMED CAR

Реальні течії навколо транспортних апаратів є турбулентними. Розрахунок таких течій залишається однією з найбільш складних проблем. На сьогодні в обчислювальній аеродинаміці відсутні універсальні математичні моделі турбулентності. Надійне передбачення характеристик турбулентних потоків належить до винятково важливої наукової проблеми і пов'язане зі складністю та недостатнім вивченням турбулентності як фізичного явища. Розглядається задача математичного моделювання аеродинаміки наземного транспортного засобу. Метою роботи є побудова математичної моделі, числового методу, алгоритму розв'язування задачі та створення програмного забезпечення для дослідження аеродинамічних характеристик наземного транспортного засобу типу погано обтічного тіла. Для опису течії навколо транспортного засобу використано осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса. Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса застосовано двопараметричну модель турбулентності SST Ментера. Модель SST за якістю перевершує ряд інших моделей турбулентності, але за обчислювальною простотою і витратами поступається моделям з одним рівнянням. Розроблено методику, алгоритм розв'язування задачі та програмне забезпечення. Для числового інтегрування системи диференціальних рівнянь використано скінченно-об'ємний метод. Задача розв'язувалася в багатоблочній постановці. Проведено тестування розробленої методики на стандартних задачах аеродинаміки.

Проведено числове моделювання обтікання моделі наземного транспортного засобу типу Ahmed Car. Всі розрахунки проводилися для числа Рейнольдса $Re=1,5 \cdot 10^6$. Досліджено вплив кута нахилу кормової частини моделі транспортного засобу на характер течії. Проведені дослідження показали, що величина куту нахилу кормової частини істотно змінює його аеродинамічні характеристики. Подальший аналіз теоретичних та практичних досліджень показує, що аеродинамічні характеристики мають значний вплив на динаміку руху наземного транспортного засобу. Таким чином, для забезпечення потрібних параметрів динаміки руху швидкісного наземного транспортного засобу необхідно враховувати його аеродинамічні характеристики.

Ключові слова: аеродинаміка транспортних апаратів, числове моделювання, рівняння Нав'є-Стокса, моделі турбулентності.

A.V. SOKHATSKY

Institute of transport systems and technologies of National academy of sciences of Ukraine
University of customs and finances

M.S. ARSENIUK

Institute of transport systems and technologies of National academy of sciences of Ukraine

NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW AROUND THE HULL OF AN AHMED CAR TYPE VEHICLE

Real currents around transport vehicles are turbulent. Calculation of such currents remains one of the most difficult problems. Today, there are no universal mathematical models of turbulence in computational aerodynamics. Reliable prediction of the characteristics of turbulent flows, refers to an extremely important scientific problem and is associated with the complexity and lack of study of turbulence as a physical phenomenon. The task of mathematical modeling of the aerodynamics of a ground vehicle is considered. The objective is to build a mathematical model, numerical method, solution algorithm and software to study the aerodynamic characteristics of a land vehicle of a poorly streamlined body type. The Reynolds averaged Navier-Stokes equations are used to describe the flow around the vehicle. To close the Reynolds averaged Navier-Stokes equations, the two-parameter SST Menter turbulence model is used. The SST model is superior to a number of other turbulence models, but in terms of computational simplicity and cost, it is inferior to single-equation models. A methodology, solution algorithm, and software have been developed. The finite-volume method was used for numerical integration of the system of differential equations. The problem was solved in multiblock formulation. The developed method was tested on standard problems of aerodynamics.

A numerical simulation of the flow around the Ahmed Car ground vehicle model has been performed. All calculations were performed for Reynolds number $Re=1.5 \cdot 10^6$. The influence of the inclination angle of the stern part of

the vehicle model on the flow pattern was investigated. The studies have shown that the value of the angle of inclination of the stern significantly changes its aerodynamic characteristics. Further analysis of theoretical and practical research shows that the aerodynamic characteristics have a significant impact on the dynamics of ground vehicle movement. Thus, it is necessary to take into account the aerodynamic characteristics of a high-speed land vehicle in order to provide the necessary motion dynamics parameters.

Keywords: aerodynamics of vehicles, numerical modeling, Navier-Stokes equation, turbulence models.

Постановка проблеми

Сучасні потреби суспільства в перевезенні пасажирів та вантажів вимагають створення ефективних автомобільних транспортних засобів. Високі швидкості руху призводять до значного зростання опору руху, що збільшує витрати палива. Так, збільшення швидкості автомобіля в два рази потребує збільшення потужності у вісім разів. Окрім цього, аеродинамічні процеси навколо швидкісних транспортних апаратів є одним із основних факторів, що істотно впливають на динаміку руху. Застосування фізичного моделювання динаміки руху наземних транспортних засобів в цілому ряді випадків є малоприматним. Це пов'язано з необхідністю адекватного відображення фізичних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні найбільш досконалі математичні моделі аеродинаміки побудовані на фізичних властивостях в'язкого стисливого газу та базуються на рівняннях Нав'є-Стокса [1, 2, 3]. Правомірність їх використання підтверджується багаточисельними дослідженнями. Складності додає той факт, що реальні течії є турбулентними. Розрахунок турбулентних течій і на теперішній час залишається однією з найбільш складних проблем, а надійне передбачення характеристик турбулентних потоків, що представляють практичний інтерес, як і раніше, є швидше виключенням, ніж правилом, що пояснюється винятковою складністю турбулентності як фізичного явища [1-5].

Проте, не дивлячись на величезний прогрес обчислювальної техніки, досягнутий в останні десятиліття, її можливості все ще далеко не достатні для розв'язування цих рівнянь. Вважається, що для високих чисел Рейнольдса, які представляють практичний інтерес, навіть за найоптимістичнішими прогнозами проблеми моделювання турбулентності залишатимуться такими принаймні аж до кінця ХХІ століття [1, 2].

Таким чином, математичне моделювання турбулентних течій і на сьогодні залишається виключно актуальною проблемою, хоча і спостерігається швидкий розвиток теоретичної та обчислювальної аеродинаміки.

У роботі викладено особливості математичного моделювання аеродинаміки транспортних апаратів на основі моделей в'язкої рідини з використанням осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса.

Мета дослідження

Течія навколо швидкісного транспортного засобу є турбулентною. Математична модель для розрахунку аеродинамічних характеристик повинна враховувати цілий ряд особливостей фізичних процесів. Метою роботи є побудова математичної моделі, числового методу, алгоритму розв'язування задачі та розробка програмного забезпечення для дослідження аеродинамічних процесів турбулентних течій навколо наземних швидкісних транспортних засобів з використанням персональних комп'ютерів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Математична модель та методика розв'язування задачі

Для розв'язування задачі з розрахунку характеристик течії навколо наземного 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 так:

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

де \hat{Q} – вектор невідомих змінних; $\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$ – вектори нев'язких потоків;

$$\hat{E}_v = \xi_x E_v + \xi_y F_v + \xi_z G_v, \quad \hat{F}_v = \eta_x E_v + \eta_y F_v + \eta_z G_v, \quad \hat{G}_v = \zeta_x E_v + \zeta_y F_v + \zeta_z G_v -$$

вектори в'язких потоків; $\hat{H} = 1/j H$ – вектор джерельних членів.

Вектори $\hat{Q}, \hat{E}, \hat{F}, \hat{G}, E_v, F_v, G_v$ визначаються наступними співвідношеннями:

$$\hat{Q} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E_t \end{bmatrix}, \quad \hat{E} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho U u + \xi_x p \\ \rho U v + \xi_y p \\ \rho U w + \xi_z p \\ (E_t + p)U - \xi_i p \end{bmatrix}, \quad \hat{F} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ \rho w V + \eta_z p \\ (E_t + p)V - \eta_i p \end{bmatrix}, \quad \hat{G} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho W \\ \rho u W + \zeta_x p \\ \rho v W + \zeta_y p \\ \rho w W + \zeta_z p \\ (E_t + p)W - \zeta_i p \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$E_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \end{bmatrix}, \quad F_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y \end{bmatrix}, \quad G_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz} - q_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \eta_x, \eta_y, \eta_z, \zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$ – метричні коефіцієнти,

$J = \alpha(\xi, \eta, \zeta) / \partial(x, y, z,)$ – якобіан перетворення координат,

$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненти тензора напружень,

q_x, q_y, q_z – компоненти вектора теплових потоків,

$$E_t = \rho \left[e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \right].$$

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]. В загальному вигляді ця система рівнянь запишеться:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - Y_k, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega, \end{aligned} \quad (4)$$

де G_ω – генерація дисипації кінетичної турбулентності ω на одиницю k ; Y_k – дисипація кінетичної енергії турбулентності; Y_ω – дисипація кінетичної турбулентності ω ; $\Gamma_k = \mu + \mu_t / \sigma_k$; $\Gamma_\omega = \mu + \mu_t / \sigma_\omega$; D_ω – перехресний дифузійний член.

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. Ця модель турбулентності позбавлена ряду недоліків початкових $k - \varepsilon$ і $k - \omega$ моделей. Вважається, що модель SST за якістю перевершує ряд інших моделей турбулентності. Проте за обчислювальною простотою і витратам вона поступається моделям з одним рівнянням [1-5].

Числовий метод. Для числового розв’язування системи рівнянь (3) використано метод контрольного об’єму. Основні засади методу контрольного об’єму (МКО) полягають в тому, що розглядаються класичні рівняння балансу деякої величини Q в контрольному об’ємі Ω , обмеженому поверхнею $S = \sum S_k$ з зовнішньою нормаллю \vec{n} . Інтегруючи рівняння (1) по контрольному об’єму $\Delta\Omega$ отримаємо

$$\iiint_{\Delta V} \left[\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\hat{G} - \hat{G}_v)}{\partial \zeta} - H \right] d\Omega = 0. \quad (5)$$

Застосовуючи до рівняння (5) теореми про середнє і Остроградського-Гаусса, отримаємо:

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} = - \frac{1}{\Delta\Omega} \iint_S \left[(\hat{E} - \hat{E}_v)_x n_x + (\hat{F} - \hat{F}_v)_y n_y + (\hat{G} - \hat{G}_v)_z n_z \right] dS + \tilde{H}, \quad (6)$$

де S – поверхня навколо контрольного об’єму $\Delta\Omega$; \vec{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні S . Верхній знак $[\sim]$ означає середнє значення шуканої функції за об’ємом:

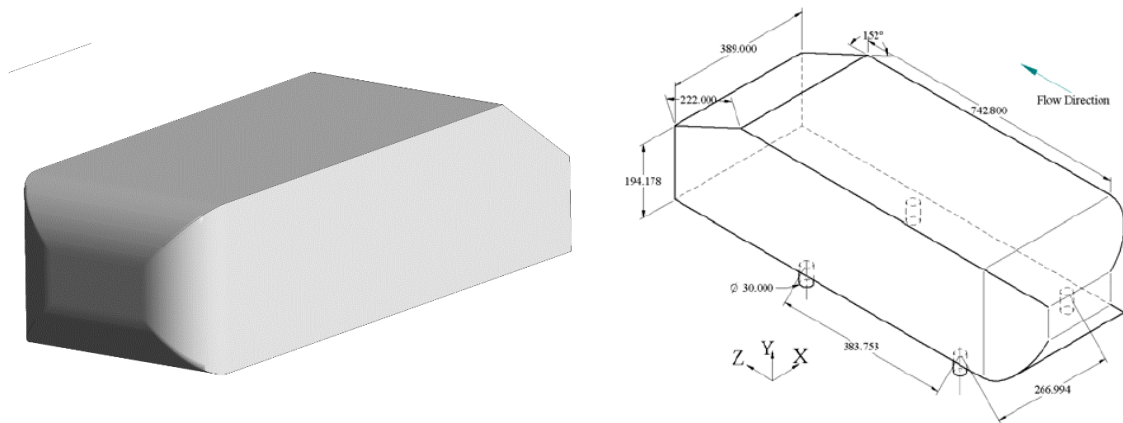
$$\tilde{f} = \frac{1}{\Delta\Omega} \iiint_{\Delta V} f d\Omega \quad (7)$$

Отримана система алгебраїчних рівнянь розв’язувалася методом Гаусса-Зейделя. Розроблена методика, алгоритми та програмне забезпечення тестувалося на ряді стандартних задач: обтіканні поперечно розміщеного колового циліндра та кулі. Проведене тестування показало придатність розробленої методики, алгоритмів та програмного забезпечення.

У зв’язку з обмеженими обсягом оперативної пам’яті та характеристиками процесора обчислювальний експеримент для дослідження аеродинаміки реальної компоновки транспортних засобів є неможливим.

Для полегшення моделювання конкретної геометрії її доводиться спрощувати. Так, завдяки експериментальним роботам Ahmed S.R. [6], з’явилася універсальна спрощена модель погано обтічного транспортного засобу, яку використовують дослідники всього світу в числовому моделюванні та розв’язуванні прикладних задач аеродинаміки наземних транспортних засобів, в тім числі автомобілів [6].

Для проведення обчислювального експерименту була обрана модель транспортного засобу Ahmed Car [6]. Вона представляє собою спрощену геометрією погано обтічного транспортного засобу – шестигранну призму із заокругленою передньою частиною та скосом верхньої частини корми з можливістю зміни кута нахилу (рис. 1). Модель корпусу автомобіля розміщується на невеликій відстані від шляхової структури, яка імітує дорожнє полотно. В експериментальних дослідженнях, що викладені в роботі [6], швидкість потоку, що натікав на модель транспортного засобу, дорівнювала 60 м/с, а число Рейнольдса становило 1.5×10^6 , розраховане за довжиною моделі. Геометрію моделі показано на рис. 1.



а) загальний вигляд моделі
 б) схема геометрії моделі
Рис. 1. Загальний вигляд моделі транспортного засобу типу Ahmed Car

На рис. 2(а, б). показано лінії течії в площині симетрії моделі корпусу транспортного засобу Ahmed Car, отримані в результаті числового моделювання для кутів скосу кормової часті 25° та 35° .

Для оцінки достовірності обчислювального експерименту на рис. 2(в, г) викладено результати, що отримані у роботах [7, 8]. Видно задовільне співпадіння ліній течії та утворення відривного вихору. При збільшенні куту нахилу кормової частини в сліді поблизу шляхової структури більш інтенсивно формується вторинний вихор, що спричиняє певне зростання лобового опору.

На рис. 3(а, б). показано розподіл усереднених векторів швидкості та ізоліній модуля швидкості в площині перерізу сліду за кормовою частиною моделі корпусу транспортного засобу Ahmed Car. Результати числового моделювання отримані для кутів скосу кормової часті 25° та 35° .

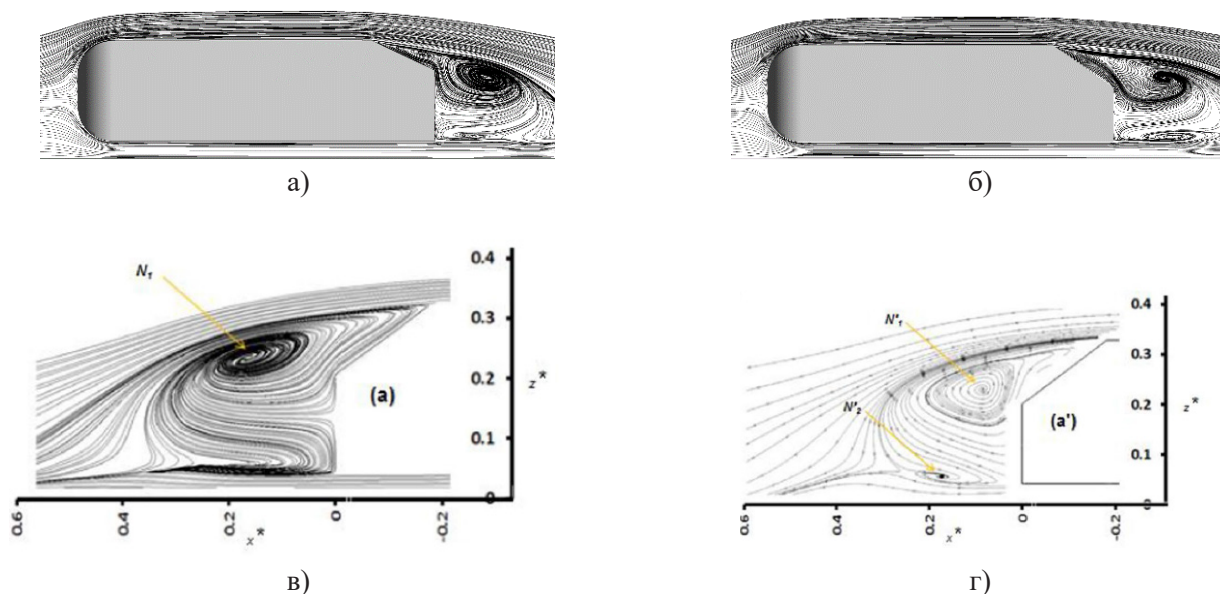


Рис. 2. Лінії течії в площині симетрії моделі корпусу автомобіля Ahmed Car
 а – з кутом скосу 25° , отриманого в даній роботі,
 б – з кутом скосу 35° , отриманого в даній роботі,
 в – з кутом скосу 25° , отриманого в роботі [7],
 г – з кутом скосу 35° , отриманого в роботі [8]

На рис. 3(в, г) показано результати, що отримані у роботах [9], [8]. Видно задовільне співпадіння ліній течії та процес утворення поздовжніх вихорових структур.

При збільшенні куту нахилу кормової частини поблизу шляхової структури більш інтенсивно формується вихорові структури, що спричиняє зміну аеродинамічних характеристик.

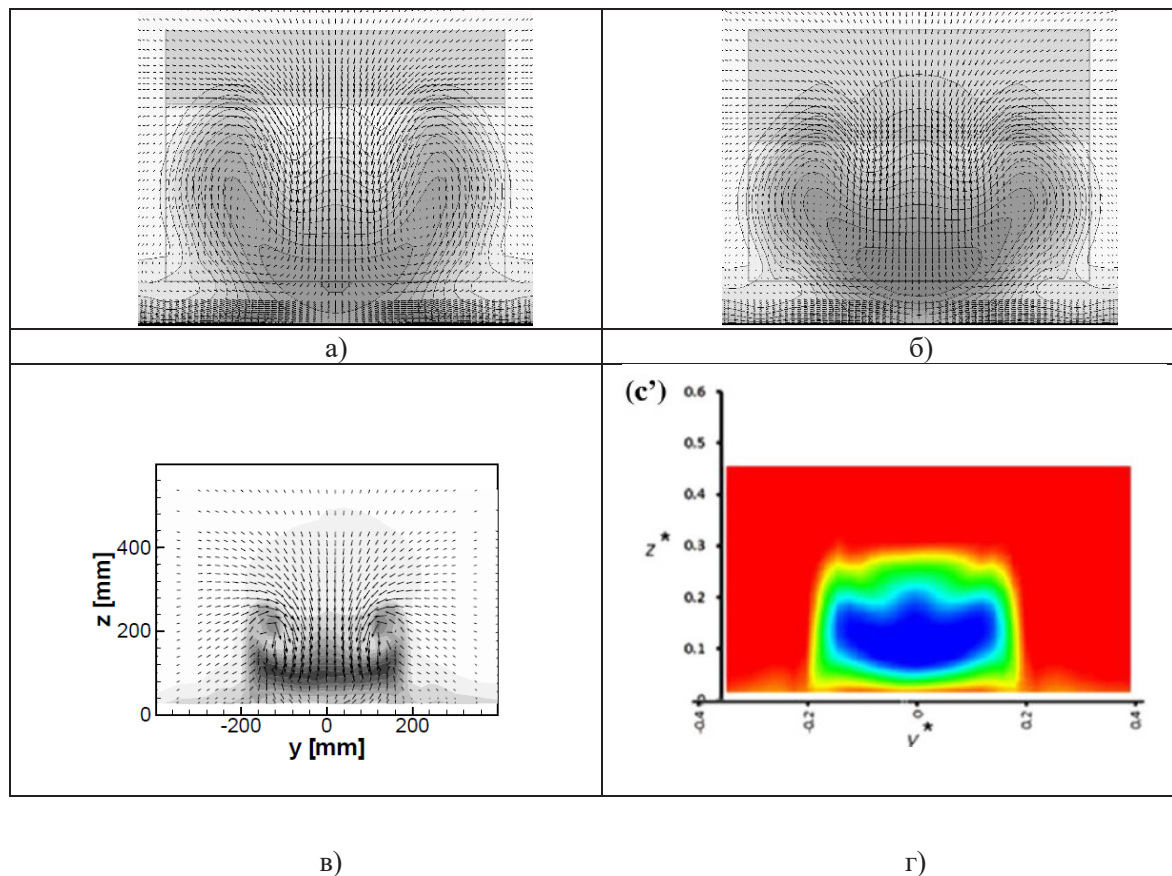


Рис. 3. Розподіл усереднених векторів швидкості та ізолінії модуля швидкості в сліді за корпусом Ahmed Car з цієї роботи для 25° (а), 35° (б) і з роботи [9] (в) 25° і з роботи [8] 35° (г)

Розподіл коефіцієнта тиску C_p по поверхні корпусу Ahmed Car з кутом скосу 25° та з кутом скосу 35°, отриманого в даній роботі, показано на рис 4а, 4б відповідно.

За результатами числового моделювання визначено аеродинамічні характеристики моделі транспортного засобу типу Ahmed Car. Для кута заднього скосу 25° коефіцієнт лобового опору $C_d = 0.255$, а для кута заднього скосу 35° коефіцієнт $C_d = 0.268$. Для порівняння, у роботі [10] для кута заднього скосу 20°, коефіцієнт лобового опору C_d був 0.2619 та 0,2978 для кута заднього скосу 30°. За результатами експериментів Ahmed S.R. [6] отримав $C_d = 0.28$ для 25° і понад 0.38 для 30°. Gilliéron P. [11] отримав значення 0.34 і понад 0.378 для 25° і 30° відповідно. Vanga S. [10] отримав значення коефіцієнта лобового опору близько 0.28 для 25° і 0.294 для 35°. Аналіз отриманих розрахункових результатів та даних робіт [6-11] показує, що в проведеному обчислювальному експерименті відтворюються усі відомі особливості структури потоку під час обтікання моделі корпусу типу Ahmed Car.

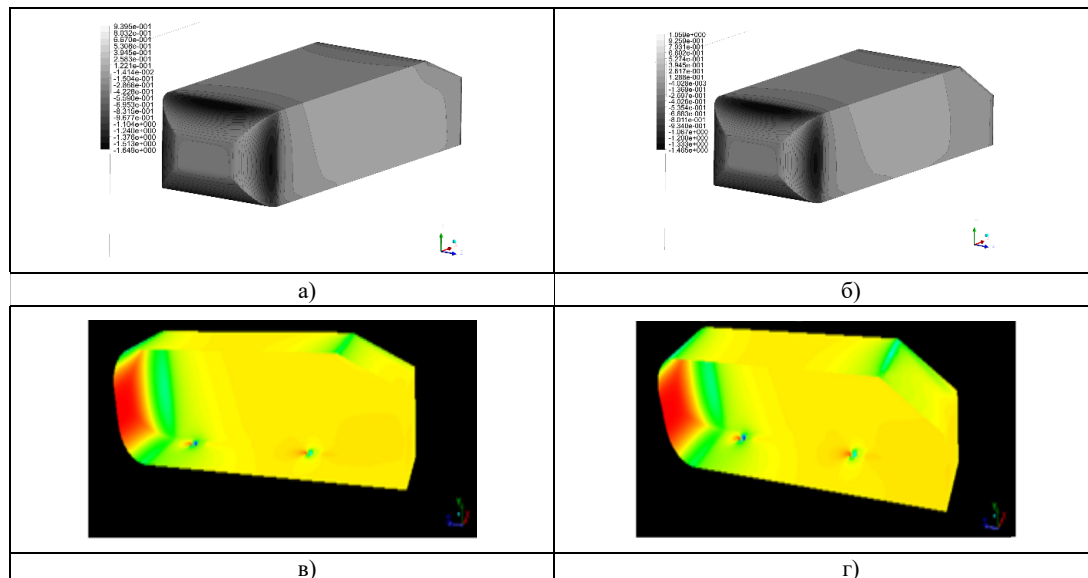


Рис. 4. Розподіл коефіцієнта тиску C_p по поверхні моделі корпусу Ahmed Car

- а – з кутом скосу 25° , отриманого в даній роботі,
- б – з кутом скосу 35° , отриманого в даній роботі,
- в – з кутом скосу 20° , отриманого в роботі [10],
- г – з кутом скосу 30° , отриманого в роботі [10]

Висновки

Побудовано математичну модель та розроблено числову методику розв'язування задачі, алгоритми та програмне забезпечення моделювання течії в'язкого стисливого газу на основі розв'язування осереднених за Рейнольдом рівнянь Нав'є-Стокса. Проведено дослідження обтікання моделі транспортного засобу типу Ahmed Car та визначення його аеродинамічних характеристик. Аналіз теоретичних та практичних досліджень показує, що аеродинамічні характеристики мають основоположний вплив на експлуатаційні параметри швидкісних транспортних засобів. Таким чином, для забезпечення потрібних експлуатаційних параметрів швидкісного наземного транспортного засобу необхідно враховувати його аеродинамічні характеристики. В подальших дослідженнях потрібно розв'язувати зв'язану задачу динаміки та аеродинаміки транспортного засобу.

Список використаної літератури

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 компонентів 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.
5. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equations turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA paper*. 1992. Vol. 0439. 21p.
6. Ahmed S. R., Ramm G., Faltin G. Some Salient Features of the Time -Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE Transactions*, Vol. 93, Section 2: 840222-840402 (1984), pp. 473-503.
7. Viswanathan H. Aerodynamic performance of several passive vortex generator configurations on an Ahmed body subjected to yaw angles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. N: 131 43:131 pp. 1-2.

8. Lienhart, H., Becker, S., 2003. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model. SAE Technical Paper 2003-1-0656.
9. Lienhart H., Stoots C., Becker S. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model). *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III*. 2002. Vol. 12, p. 323–330.
10. Banga S., Zunaid Md., Ahmad N.A., Sharma S., Dungriyal R.S. CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN: 2015. Vol. 12, Ver. III. P. 87-94.
11. Gilliéron, P., Chometon, F. Modelling of stationary three-dimensional separated air flows around an Ahmed reference model. *Conference: ESAIM, Third International Workshop on Vortex*. Vol. 7. 1999. P. 173-182.

References

1. Volkov, K.N, & Emelyanov, V.N. (2008). Modelirovanie krupnyih vihrey v raschetah turbulentnyih techeniy. M.: Fizmatlit.
2. Garbaruk, A. V., Strelets, M.H., Travin, A.K., & Shur, M.L. (2016). Sovremennyye podhody k modelirovaniyu turbulentnosti . SPb. Izd-vo Politehn. un-ta.
3. Sohatsky, A. V. (2010). Teoretichni osnovi stvorennya aerodinamichnih komponuvan perspektivnih shvidkisnih transportnih aparativ: dis. doktora tehnicnih nauk: 05.07.01. Dnipropetrovsk.
4. Menter, F.R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. **32** (8), 1598-1605.
5. Spalart, P.R., & Allmaras, S.R. (1992). A one-equations turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA paper*. **0439**, 21.
6. Ahmed, S. R., Ramm, G., & Falin, G. (1984). Some Salient Features of the Time -Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE Transactions*, **93**, Section 2: 840222—840402, 473-503.
7. Viswanathan, H. (2021). Aerodynamic performance of several passive vortex generator configurations on an Ahmed body subjected to yaw angles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. **131** (43:131), 1-2.
8. Lienhart, H., & Becker, S. (2003). Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model. SAE Technical Paper. 2003-1-0656.
9. Lienhart, H., Stoots, C., & Becker, S. (2002). Flow and Turbulence Structures in the Wake of Simplified Car Model (Ahmed Model). *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III*. **12**, 323–330.
10. Banga, S., Zunaid, Md., Ahmad, N.A., Sharma, S., & Dungriyal, R.S. (2015). CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* : **12**, Ver. III, 87-94.
11. Gilliéron, P., & Chometon, F. (1999). Modelling of stationary three-dimensional separated air flows around an Ahmed reference model. *Conference: ESAIM, Third International Workshop on Vortex*. **7**, 173-182.

Сохацький Анатолій Валентинович – д.т.н., проф., професор кафедри транспортних систем та технологій Університету митної справи та фінансів, провідний науковий співробітник Інституту транспортних систем та технологій Національної академії наук України, e-mail: Sokhatsky_anatoly@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3593-6517

Арсенюк Михайло Сергійович – провідний інженер Інституту транспортних систем та технологій Національної академії наук України, e-mail: ars_mix@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7805-1372.