

УДК 519.6: 533,6: 629.3

## Деякі питання комп'ютерного моделювання турбулентної течії навколо транспортного апарата

Сохацький<sup>2</sup> А.В., Арсенюк<sup>1</sup> М.С.

1-Інститут транспортних систем та технологій НАН України, м. Дніпро, Україна

2- Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро, Україна

**Анотація:** 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, відноситься до винятково важливої наукової проблеми і пов'язане з складністю та недостатнім вивченням турбулентності як фізичного явища.

Проведено аналіз сучасних моделей турбулентності. Метою роботи є побудова математичної моделі, числового методу, алгоритму розв'язування задачі та створення програмного забезпечення для дослідження аеродинамічних характеристик швидкісних наземних транспортних апаратів.

Розглядається задача моделювання турбулентної течії навколо транспортного апарата. Для опису течії навколо транспортного апарата використано осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса. Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса застосовано двопараметричну модель турбулентності SST Ментера. Проведено тестування розробленої методики на стандартних задачах аеродинаміки.

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

Реальні течії навколо транспортного засобу є виключно турбулентними. Їх математичне моделювання і на сьогодні залишається складною проблемою обчислювальної аеродинаміки. 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 швидкісного наземного транспортного засобу.

Для розв'язування задачі з визначення аеродинамічних процесів турбулентних течій навколо 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

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

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;  $\hat{H} = 1/j H$  – 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]. 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  $G_\omega$ , - генерація дисипації кінетичної турбулентності  $\omega$  на одиницю  $k$ ;  $Y_k$ , - дисипація кінетичної енергії турбулентності;  $Y_\omega$  - дисипація  $\omega$ ;  $\Gamma_k = \mu + \mu_t / \sigma_k$ ;  $\Gamma_\omega = \mu + \mu_t / \sigma_\omega$ ;  $D_\omega$ , - 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].

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  $V$ , обмеженому поверхнею  $S = \sum S_k$  з зовнішньою нормаллю  $\vec{n}$ . Інтегруючи рівняння (1) по контрольному об'єму отримаємо

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

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

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

де  $S$  - поверхня навколо контрольного об'єму  $\Delta V$ ;  $\vec{n}$  - вектор зовнішньої нормалі до поверхні  $S$ .

Верхній знак  $[\sim]$  означає середнє значення шуканої функції за об'ємом:

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

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

Транспортні засоби представляють собою погано обтічні тіла. Покращення їх аеродинамічних характеристик є доволі складною задачею. Часто, для полегшення моделювання конкретної геометрії її доводиться спрощувати. Так, завдяки експериментальним роботам Ahmed S.R. [6-8] з'явилася універсальна спрощена модель поганообтічного транспортного апарата, використовувана дослідниками усього світу для тестування чисельних методик на прикладному завданні аеродинаміки автомобіля. Запропонована спрощена геометрія - Ahmed Car - складається з прямокутного

тіла з передньою частиною, що округляє, і скосом верхнього заднього кута зі змінюваним кутом (Рис.1). Корпус розташовується на невеликій відстані від площини – імітації дорожнього полотна. У експериментах, швидкість потоку дорівнювала 60 м/с, а число Рейнольдса складало більше 1.5 млн., розраховане за довжиною моделі.

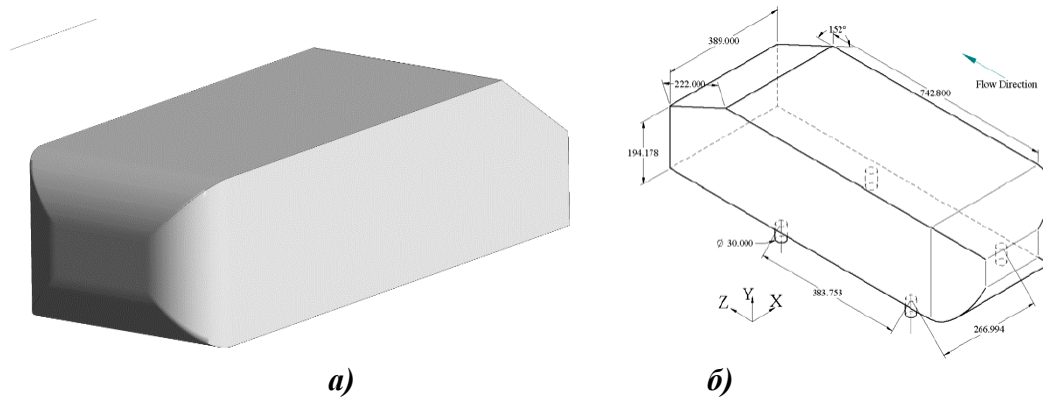


Рис. 1. Загальний вигляд моделі Ahmed Car (а) та її геометрія (б).

Модель транспортного засобу представляла собою паралелепіпед із округленнями передніх ребер і косим зрізом заднього верхнього ребра. Число Рейнольдса, розраховане за довжиною корпусу дорівнювало  $Re = 1.2 \cdot 10^6$ . Розміри розрахункової області складали: 10 довжин тіла вперед і назад і по 5 довжин вгору і в сторони.

За результатами числових розрахунків отримано розподіли параметрів течії в області навколо моделі Ahmed Car. На рис.2 показано лінії течії в площині симетрії Ahmed Car з кутом скосу  $25^\circ$  (а) та  $35^\circ$  (б), отримані в даній роботі та для кута скосу  $25^\circ$ , роботи [9] (в).

На рис.3 представлено розподіл тиску в площині симетрії Ahmed Car з кутом скосу  $25^\circ$  (а) та  $35^\circ$  (б).

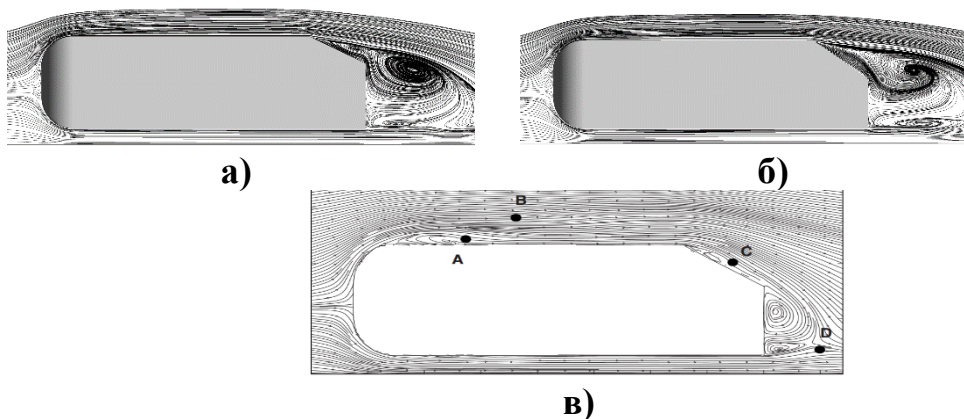


Рис. 2. Лінії течії в площині симетрії Ahmed Car з кутом скосу  $25^\circ$  (а) та  $35^\circ$  (б), отримані в даній роботі та для кута скосу  $25^\circ$  роботи [9] (в)

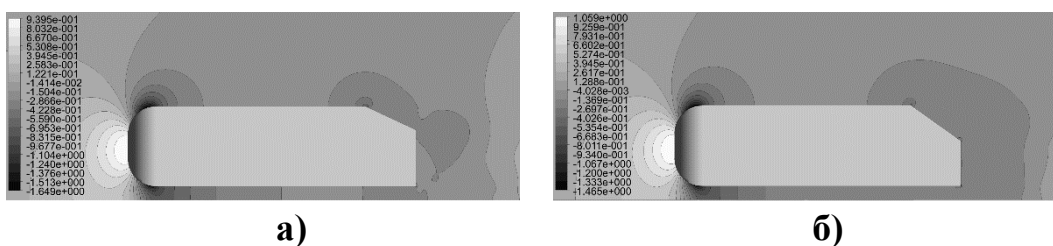


Рис. 3. Розподіл тиску в площині симетрії Ahmed Car з кутом скоса 25° (а) та 35° (б)

За результатами чисельного моделювання визначені усереднені за часом аеродинамічні характеристики Ahmed Car. Для кута заднього скосу 25° коефіцієнт лобового опору склав  $C_x = 0,255$ , а для кута заднього скосу 35° коефіцієнт  $C_x = 0.268$ . За результатами експериментів Ahmed S.R. [8] отримано  $C_x = 0,28$  для 25° і більше 0.38 для 35°.

Результати розрахунків відтворюють усі відомі особливості структури потоку при обтіканні корпусу Ahmed Car.

Таким чином в роботі побудовано математичну модель обтікання транспортного апарата турбулентним потоком. 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. Проведені дослідження показали, що величина куту скосу задньої частини транспортного апарата істотно змінює його аеродинамічні характеристики. Аналіз теоретичних та практичних досліджень показує, що аеродинамічні характеристики мають значний вплив на динаміку руху високошвидкісного транспортного засобу. Таким чином для забезпечення потрібних експлуатаційних параметрів високошвидкісного наземного транспортного засобу необхідно враховувати його аеродинамічні характеристики. В подальших дослідженнях потрібно розв'язувати зв'язану задачу динаміки та аеродинаміки транспортного засобу.

### Список 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. Wake Structure of typical automobile shapes [Text] / S.R. Ahmed // Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering. – 1981. – Vol.103. – P. 162 – 169.
7. 5. Ahmed, S.R. Influence of base slant on the wake structure and drag of road vehicles [Text] / S.R. Ahmed // Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering. – 1983. – Vol. 105. – P. 429 – 434
8. Ahmed, S.R. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake [Text]/ S.R. Ahmed, G. Ramm // SAE Technical Paper 840300. – 1984. – DOI:
9. Minguetz, M. High-order large-eddy simulation of flow over the «Ahmed body» car model [Text]/ M. Minguetz, R. Pasquetti, E. Serre // Physics of Fluids. – 2008. – Vol. 20. – Is. 9. – id. 095101-095101-17. – doi: 10.1063/1.2952595.

## Some questions of computer simulation of turbulent flow around the transport vehicle

Anatoliy Sokhatsky, Mikhaylo Arseniuk

**Abstract:** Real currents around traffic devices are turbulent. The calculation of such currents remains one of the most difficult problems. Today, in computing aerodynamics there are no universal mathematical models of turbulence. Reliable prediction of characteristics of turbulent flows relates to an exceptionally important scientific problem and is associated with complexity and insufficient study of turbulence as a physical phenomenon.

The analysis of modern turbulence models has been carried out. The purpose of the work is to build a mathematical model, numerical method, algorithm for solving the problem and the creation of software for the study of aerodynamic characteristics of speed ground transport vehicles.

The problem of modeling of turbulent flow around the transport apparatus to describe the flow around the transport apparatus is used by Reynolds-Stokes equation. A two-parameter model of turbulence of the SST Menter was applied to lock the ravolds. Testing the developed methodology on standard tasks of aerodynamics was carried out.

**Keywords:** aerodynamics of transport vehicles, computer simulation, rank equation, turbulence.