

УДК519.6: 533.6: 629.7

До питання числового моделювання аеродинаміки транспортних апаратів поблизу розділу середовищ

Сохацький А.В., доктор технічних наук, професор

Університет митної справи та фінансів

Інститут транспортних систем та технологій НАН України

Анотація: Створення крилатих транспортних апаратів, що рухаються поблизу розділу середовищ є важливою задачею проектувальників. Вплив близько розміщеної межі розділу середовища на аеродинаміку та динаміку руху є недостатньо вивченим питанням. Наявність турбулентного середовища та нестабільність кінематичних параметрів повітряного середовища ускладнюють проблему забезпечення заданого руху транспортного апарата. Окрім цього математичне моделювання турбулентних течій залишається однією з найбільш складних проблем механіки рідини та газу. Надійне передбачення характеристик турбулентних потоків, відноситься до винятково важливої наукової проблеми. Це пов'язано зі складністю та недостатнім вивченням турбулентності як фізичного явища. В доповіді розглядаються проблеми побудова математичної моделі, числового методу, алгоритму розв'язування задачі та розробки програмного забезпечення для дослідження аеродинамічних характеристик транспортних засобів, що рухаються поблизу розділу середовищ. Оцінюються можливості використання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса з застосуванням емпіричних моделей турбулентності. Розроблено методичку, алгоритми, та комплекс програм для розв'язування задачі аеродинаміки транспортних апаратів, що рухаються поблизу розділу середовищ. Приводяться приклади числового розв'язування з використання персональних електронно-обчислювальних машин. Проведені дослідження показали, що наявність близько розміщеного розділу середовищ має значний вплив на характеристики течії навколо транспортного засобу.

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

Однією з найскладніших проблем створення швидкісних наземних та надводних транспортних апаратів є задача пошуку раціонального аеродинамічного компонування. Рух такого транспортного засобу з великою швидкістю відбувається поблизу межі розділу середовищ в атмосферних умовах, близьких до параметрів стандартної атмосфери на рівні моря. Близькість водної поверхні сприяє формуванню екранного ефекту – це явище завдяки якому відбувається збільшення підйімальної сили, зменшення індуктивної складової лобового опору, зміна моментних аеродинамічних залежностей. Завдяки екранному ефекту можна досягти високого значення аеродинамічної якості крилевих надводних та наземних транспортних апаратів.

Аеродинамічні процеси мають визначаючий вплив на технічні характеристики транспортних апаратів, що рухаються поблизу розділу середовищ. Для забезпечення заданого режиму руху транспортного апарата необхідно, щоб його аеродинамічні, геометричні, масові, міцносні та динамічні параметри знаходилися в певному діапазоні, а їх похідні за часом мали необхідні значення. Розв'язування цієї проблеми полягає у проведенні цілого комплексу досліджень з аеродинаміки для надання транспортному апарату раціонального аеродинамічного компонування.

Аналіз Методи моделювання турбулентних течій, з певною мірою умовності можна розділити на три групи: підходи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier - Stokes - RANS); два класичних підходи - пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation - DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation - LES); гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів для різних областей течії [1,2].

На сьогодні найбільш поширеними підходами є методи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier - Stokes - RANS). Вони замикаються за допомогою тієї або іншої напівемпіричної моделі турбулентності [1-6].

Класичні вихоророзрізняючі підходи є найбільш досконалими. Це пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation - DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation - LES). Метод DNS базується на безпосередньому прямому числовому розв'язуванні тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса з розрізненням усіх просторово-часових масштабів турбулентності. Він ґрунтується на фізичних принципах аеродинаміки і повністю вільний від емпіричних припущень.

У рамках методу LES ті ж рівняння розв'язуються безпосередньо після їх попередньої просторової фільтрації. Це дозволяє виключити з розгляду частину просторово-часових масштабів. Проведена операція дозволяє значно понизити вимоги до просторово-часового розрізнення. Таким чином понижуються вимоги до необхідних обчислювальних ресурсів.

Для урахування впливу відфільтрованих ("підсіткових") масштабів турбулентності притягуються ті або інші напівемпіричні моделі. В науковій літературі для підкреслення кардинальних відмінностей методу LES від підходів, що використовуються для замикання RANS, їх називають "підсітковими".

До третьої групи відносять гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів в різних областях течії. Вони є найбільш розповсюдженими для практичного використання, виходячи з можливостей обчислювальної техніки. У відповідності з даним підходом розрахунок турбулентних течій стисливої рідини проводиться шляхом безпосереднього розв'язування рівнянь Нав'є-Стокса осереднюються за Рейнольдсом для густини та тиску.

Незважаючи на характер осередненої течії, її вимірність та стаціонарність чи нестационарність, необхідно розв'язувати тривимірні нестационарні рівняння Нав'є-Стокса. Це пов'язано з тим, що турбулентність є принципово тривимірним і нестационарним явищем. Слід звернути увагу на те, що для ряду моделей, наприклад DNS, необхідно забезпечити достатню точність розрізнення усіх просторово-часових масштабів турбулентності.

Осереднені рівняння Нав'є-Стокса (рівняння RANS) для досконалого стислого газу в декартовій системі координат записані в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = 0, \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\tau_{ik} + \tau_{t,ik}) - \frac{\partial p}{\partial x_i}, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k H)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} [u_i (\tau_{ik} + \tau_{t,ik}) - (q_k + q_{t,k})], \\ \rho = pm/(RT), \end{cases} \quad (1)$$

де x_i - декартові координати ($i=1, 2, 3$); u_i - компоненти вектору швидкості усередненої течії; $E = C_v T + u_k u_k / 2$, $H = E + p / \rho = E_p T + u_k u_k / 2$ - відповідно питома повна енергія та повна ентальпія газу; T - температура; $C_v, C_p = C_v + R/m$ - питомі теплоємності при сталому об'ємі та постійному тиску; $R=8314,34$ Джоулів / (кмоль·К) - універсальна газова стала; m - молекулярна маса.

Перевагою рівнянь RANS перед вихідними Нав'є-Стокса є те, що вони сформульовані безпосередньо відносно осереднених за часом характеристик течії, що представляють основний інтерес в задачах аеродинаміки. Таким чином можна виключити необхідність

розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків шляхом інтегрування тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса (DNS). В реальних умовах течії, на даний час розвитку обчислювальної техніки, проведення розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків вважаються абсолютно неможливими. Слід відзначити, що рівняння RANS є незамкнутими, оскільки вони містять невідомий тензор рейнольдсових напружень та вектор турбулентного теплового потоку. Тому для їх практичного використання потрібні додаткові співвідношення, що зв'язують ці величини з характеристиками осередненого руху. Вони можуть бути отримані тільки з використанням тієї або іншої емпіричної інформації. Ці співвідношення прийнято називати моделями турбулентності для напружень Рейнольдса або для других моментів.

Альтернативний підхід до вирішення проблеми замикання рівнянь Рейнольдса полягає у використанні рівнянь перенесення рейнольдсових напружень, які формально можуть бути отримані з рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою процедури осереднювання за часом аналогічно тому, як це робиться при виведенні рівнянь Рейнольдса. Проте ці рівняння містять так звані моменти третього порядку ($\overline{u'_i u'_j u'_k}$). Їх зв'язок з параметрами осередненого руху і компонентами тензора рейнольдсових напружень (моментами другого порядку) є невідомий, і для їх визначення потрібне використання рівнянь перенесення для моментів третього порядку. Ці рівняння, у свою чергу, містять кореляції четвертого порядку і т. д., так що отримання строгої замкнутої системи рівнянь відносно статистичних характеристик турбулентності в принципі неможливе. У цій ситуації розумним компромісом видається обмеження моделювання рівняннями перенесення других моментів.

Значні успіхи в області побудови різноманітних напівемпіричних моделей турбулентності були досягнуті в 60-х, - 70-х роках минулого століття. Вони надали обманливі надії на створення універсальної RANS моделі, що може бути придатною для розрахунку будь-якої, в крайньому випадку більшості турбулентних течій.

Упродовж другої половини минулого століття науковими установами були проведені багато чисельні експериментальних і розрахункові дослідження турбулентних течій. Вони, переконливо показали, що локальні усереднені характеристики турбулентних потоків піддаються істотному глобальному впливу стійких, великомасштабних, з розмірами порядку макро-масштабу течії, принципово тривимірних і нестационарних структур.

Характеристики цих структур залежать від конкретної геометрії даної течії і межових. Таким чином, гіпотеза локальності і усереднених характеристик турбулентних потоків, на якій в неявній формі передбачалось побудувати RANS моделі турбулентності, не виконується.

Це в принципі унеможливорює побудову ідеальної моделі такого типу і робить згадані вище надії на можливість побудови універсальної RANS моделі турбулентності, по суті, нездійсненними. Дана ствердження в рівній мірі відноситься як до простих моделей, що базуються на гіпотезі Буссинеска про лінійний зв'язок між тензорами рейнольдсових напружень і швидкостей деформацій, так і до моделей перенесення рейнольдсових напружень.

Найбільш яскравим прикладом течій, для яких характерне формування когерентних турбулентних структур з розмірами порядку розмірів обтічного тіла, є течії з великими зонами відриву. Саме з цієї причини результати розрахунків таких течій з використанням RANS моделей виявляються, як правило, є незадовільними.

Для розрахунку обтікання використовувалися осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса, замкнені однопараметричною моделлю турбулентності Спаларта-Аллмараса в реалізації відокремлених вихорів [5]. На рис.1 представлено результати числового розрахунку параметрів течії на основі розв'язування осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, замкнених моделлю турбулентності Спаларта-Аллмараса в реалізації DES. Вихідна система

рівнянь записувалась та розв’язувалась в криволінійній тривимірній системі координат. Комплекс програм написано на мові програмування FORTRAN-95.

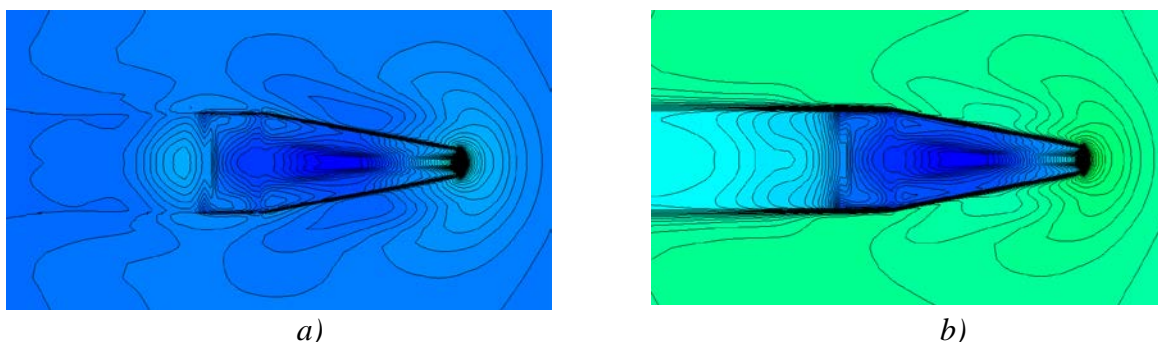


Рис.1. Розподіл характеристик течії навколо транспортного апарата поблизу землі:
а-Ізобари в площині XOZ , б – ізолнії завихренності у площині XOZ

Висновки. В доповіді представлено реалізовано розроблену методику, алгоритм та комплекс програм для розрахунку обтікання транспортного апарата, що рухається поблизу розділу середовищ з використанням гібридного підходу. Наявність розділу середовищ змінює параметри течії навколо транспортного апарата, що спричиняє зміну аеродинамічних характеристик транспортного апарата.

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. Сохаський 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.

ON THE ISSUE OF NUMERICAL SIMULATION OF THE AERODYNAMICS OF VEHICLES NEAR THE INTERFACE

Sokhatsky Anatoly, Doctor of Technical Sciences, Professor

The creation of winged vehicles moving near the interface is an important task for designers. The influence of a close interface on aerodynamics and motion dynamics is an insufficiently studied issue. The presence of a turbulent environment and the instability of the kinematic parameters of the air environment complicate the problem of ensuring a given movement of the vehicle. In addition, mathematical modeling of turbulent flows remains one of the most difficult problems in fluid and gas mechanics. Reliable prediction of the characteristics of turbulent flows is an extremely important scientific problem. This is due to the complexity and insufficient study of turbulence as a physical phenomenon. The report deals with the problems of building a mathematical model, numerical method, algorithm for solving the problem, and software development for studying the aerodynamic characteristics of vehicles moving near the interface. The possibilities of using the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with the use of empirical turbulence models are evaluated. A methodology, algorithms, and a set of programs for solving the problem of aerodynamics of vehicles moving near the interface are developed. Examples of numerical solutions using personal computers are given. The studies have shown that the presence of a closely placed interface has a significant impact on the characteristics of the flow around the vehicle.

Keywords: vehicle aerodynamics, numerical modeling, Navier-Stokes equation, turbulence models, aerodynamic characteristics.