

Сохацький А. В., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри транспортних технологій
та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-3593-6517

ДО ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ НАДВОДНИХ ТРАНСПОРТНИХ АПАРАТІВ

У статті розглянуто проблеми моделювання аеродинаміки надводних швидкісних транспортних апаратів крилового компонування, що рухаються на невеликій відстані від водної поверхні. Для їх підтримки в повітрі повинен використовуватися екранний ефект, що формується під впливом близькості до водної поверхні. Ефект близькості землі спостерігається на авіаційному транспорті в злітно-посадкових режимах літаків. Близькість землі впливає на формування аеродинамічних характеристик транспортних апаратів.

На сьогодні дослідження аеродинаміки перспективних транспортних апаратів, що рухаються поблизу підстилюючої поверхні можливі з використанням наступних підходів: натурних випробовувань; моделювання на спеціальних треках; моделювання в аеродинамічних трубах.

Натурні випробовування за звичай використовуються на фінальних етапах розробки транспортних апаратів. Моделювання на спеціальних треках пов'язане з складністю зняття аеродинамічних характеристик і не отримало поширеного застосування. Найбільш придатним вважається моделювання з використанням аеродинамічних труб. Сучасний рівень оснащення експериментальних лабораторій дозволяє коректно проводити аеродинамічні дослідження літальних апаратів. Проте при моделюванні аеродинамічних процесів навколо транспортних апаратів, що рухаються поблизу межі розділу середовищ виникають складні проблеми з відтворенням умов динаміки руху.

В роботі детально розглянуті методи дослідження впливу близькості землі на формування аеродинамічних характеристик транспортних апаратів в аеродинамічних трубах. До них належать: метод з використанням нерухомої пластини; метод дзеркального відображення моделі; метод з відсмоктування або здування прилежового шару; метод з застосуванням рухомого поясу. Проведено оцінку можливості їх використання для моделювання аеродинаміки швидкісних надводних транспортних апаратів крилового компонування.

При моделюванні обтікання швидкісних транспортних апаратів, що рухаються поблизу водної поверхні, виникає ряд труднощів, пов'язаних з реалізацією реальних умов обтікання, а саме урахування динаміки руху водної поверхні. В ідеалі між транспортним апаратом та водною поверхнею реалізується відносний рух. Проведений огляд методів, які застосовуються при моделюванні аеродинаміки транспортних засобів над твердим екраном виявився малопридатним для швидкісних транспортних апаратів крилового компонування, що рухаються на невеликій відстані від водної поверхні. Забезпечення подібності відносного руху є надзвичайно складною задачею. Вона вимагає обґрунтованого аналізу фізичних процесів та пошуку шляхів розробки фізичних та математичних моделей, придатних для використання при проектуванні швидкісних надводних транспортних апаратів крилового компонування. Це повинні бути моделі від простих інженерних методик до методик на основі повних та осереднених рівнянь Нав'є-Стокса.

Ключові слова: аеродинаміка надводних транспортних апаратів; експериментальні методи аеродинаміки, математичне моделювання, рівняння Нав'є-Стокса, моделі турбулентності.

Sokhatsky A. V. To the problem of modeling the aerodynamics of surface transportation vehicles

The article deals with the problems of modeling the aerodynamics of surface high-speed vehicles of winged layout moving at a short distance from the water surface. To support them in the air, the screen effect formed under the influence of proximity to the water surface should be used. The effect of ground proximity is observed in air transport in the takeoff and landing modes of aircraft. The proximity of the ground affects the formation of the aerodynamic characteristics of vehicles.

Today, the study of the aerodynamics of advanced vehicles moving near the underlying surface is possible using the following approaches: full-scale tests; modeling on special tracks; wind tunnel modeling.

Full-scale tests are usually used at the final stages of vehicle development. simulation on special tracks is associated with the complexity of obtaining aerodynamic characteristics and is not widely used. The most suitable is modeling using wind tunnels. The current level of equipment of experimental laboratories allows for correct aerodynamic studies of aircraft. However, when modeling aerodynamic processes around vehicles moving near the interface, complex problems arise with reproducing the conditions of motion dynamics.

The paper describes in detail the methods of studying the influence of the proximity of the ground on the formation of aerodynamic characteristics of vehicles in wind tunnels. These include: a method using a fixed plate; a method of mirroring the model; a method of suction or blowing the boundary layer; a method using a moving belt. The possibility of their use for modeling the aerodynamics of high-speed surface vehicles of winged layout is evaluated.

When modeling the flow of high-speed vehicles moving near the water surface, a number of difficulties arise due to the realization of real flow conditions, namely, taking into account the dynamics of the water surface. Ideally, relative motion is realized between the vehicle and the water surface. The review of methods used in modeling the aerodynamics of vehicles over a solid screen proved to be of little use for high-speed winged vehicles moving at a short distance from the water surface. Ensuring the similarity of relative motion is an extremely difficult task. It requires a reasonable analysis of physical processes and the search for ways to develop physical and mathematical models suitable for use in the design of high-speed surface vehicles with wing arrangement. These models should range from simple engineering techniques to techniques based on the full and averaged Navier-Stokes equations.

Key words: aerodynamics of surface vehicles; experimental methods of aerodynamics, mathematical modeling, Navier-Stokes equations, turbulence models.

Однією з найскладніших проблем створення швидкісних надводних транспортних апаратів є задача пошуку раціонального аеродинамічного компоновання. 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 крилових надводних транспортних апаратів.

Постановка проблеми. Аеродинамічні процеси мають визначаючий вплив на технічні характеристики надводних транспортних апаратів. 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 надводному транспортному апарату раціонального аеродинамічного компоновання.

Задача формування аеродинамічного компоновання транспортного апарата формується наступним чином: знайти такий вектор параметрів, що характеризує форму, структуру, розміри, кінематичні та динамічні параметри, конструктивні особливості та інше, які б забезпечували задоволення вимог та обмежень, що висуваються до транспортного апарата, та досягнення оптимального значення відповідної цільової функції.

Створення аеродинамічних компоновань надводних транспортних апаратів, їх обрисів визначається великим числом параметрів, які з достатнім ступенем точності характеризують структуру, розміри, конструктивні особливості і підлягають визначеності. Сукупність цих параметрів утворює вектор

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_m). \quad (1)$$

З технічної точки зору такий транспортний апарат визначається набором характеристик, виставлених замовником. Ними можуть бути: маса спеціального навантаження; висота руху над водною поверхнею; розрахункова дальність маршруту L_p^* ; характеристики спеціальних дистанцій руху $L_{3,0}^*$; крейсерська швидкість руху $V_{кр}^*$ та інші.

Сукупність цих характеристик позначимо вектором

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n). \quad (2)$$

Параметри та характеристики пов’язані між собою рівняннями зв’язку

$$\begin{aligned} y_1 &= y_1(x_1, x_2, \dots, x_m), \\ y_2 &= y_2(x_1, x_2, \dots, x_m), \\ &\dots \\ y_n &= y_n(x_1, x_2, \dots, x_m). \end{aligned} \quad (3)$$

Вони відображають взаємозв’язок параметрів та характеристик транспортного апарата, алгоритм його функціонування і є математичним описом об’єкта проектування. Тоді математичною моделлю транспортного апарата буде вектор параметрів та рівняння зв’язку (3).

При прийнятті рішення вибору того чи іншого варіанту аеродинамічних компоновань транспортного апарата важливим є вибір критеріїв оцінки його досконалості. Найбільш поширеним є критерій типу «вартість-ефективність». Тобто, необхідно знайти параметри надводного транспортного апарата, що відповідають найбільшій ефективності при заданій вартості, або ті, що відповідають мінімальній вартості при заданій ефективності. Вважається, що вимога з знаходження максимальної ефективності при мінімальних затратах не може бути реалізованою [1].

Взагалі, задача пошуку раціонального аеродинамічного компоновання транспортного апарата є оберненою задачею: спроектувати транспортний апарат так, щоб величини похідних давали саме той розв’язок

рівняння руху, який відповідає бажаному руху, заданим критеріям технічних властивостей, стійкості та керованості. На сьогодні одержання загального розв'язку такої оберненої задачі є малоімовірним, тому необхідно розв'язувати пряму задачу. Аналіз методів формування аеродинамічних компонувань літальних апаратів показує, що для урахування впливу нестационарних аеродинамічних параметрів на динаміку руху необхідні розробки більш ефективних підходів. Таким методом повинен бути сумісний розв'язок зв'язаної задачі динаміки та аеродинаміки транспортного апарата. Якщо розглядати транспортний апарат як тверде тіло, то розв'язок такої задачі може представляти собою сумісний розв'язок рівнянь аеродинаміки та рівнянь динаміки руху, доповнених кінематичними співвідношеннями та параметричними обмеженнями у відповідності з умовами задачі.

Одержання загального розв'язку такої оберненої багатокритеріальної задачі є неможливим і необхідний розв'язок хоча б зв'язаної задачі динаміки та аеродинаміки транспортного апарата як твердого тіла.

Методи фізичного моделювання аеродинамічних процесів відіграють важливу роль у дослідженні аеродинаміки транспортних апаратів. Вважається, що вони дозволяють отримати найбільш близькі до дійсності розв'язки аеродинамічних задач [2-16]. Проте не завжди легко змоделювати умови обтікання тіла. Так, при моделюванні обтікання транспортних апаратів, що рухаються поблизу водної поверхні, виникає ряд труднощів, пов'язаних з реалізацією реальних умов обтікання. В ідеалі між транспортним апаратом та водною поверхнею реалізується відносний рух. Порушення подібності відносного руху може призводити до значних похибок при моделюванні.

Для формування раціональних аеродинамічних компонувань надводних транспортних апаратів, окрім розробки ряду математичних моделей розв'язування зв'язаної задачі аеродинаміки, динаміки руху, аеропружності, необхідно проводити експериментальні дослідження. Вони повинні базуватися на відповідних критеріях подібності фізичних процесів [11]. Враховуючи досягнення експериментальної аеродинаміки задача проведення коректних експериментальних досліджень залишається невирішеною. Методи фізичного моделювання аеродинаміки вимагають подальших розробок.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні дослідження аеродинаміки перспективних транспортних апаратів, що рухаються поблизу підстилаючої поверхні можливе з використанням наступних підходів:

- натурних випробувань [2, 5];
- моделювання на спеціальних треках [3];
- моделювання в аеродинамічних трубах [6, 7, 10, 12-14, 17, 18];

Натурні випробування транспортних апаратів дозволяють отримувати найточніші технічні характеристики. Але вони можливі після виготовлення повномасштабного транспортного апарата. Натурні випробування широко використовували в Інституті гідромеханіки Національної академії наук України при дослідженні аеродинаміки екранопланів. Але такий підхід пов'язаний із значними фінансовими та матеріальними затратами і вимагає повного випуску технічної документації. Практика проектування показує, що використання натурального випробування доцільно проводити перед запуском серійного виробництва для отримання комплексної оцінки технічних характеристик.

Мета дослідження. При моделюванні обтікання швидкісних транспортних апаратів, що рухаються поблизу водної поверхні, виникає ряд труднощів, пов'язаних з реалізацією реальних умов обтікання. В ідеалі між транспортним апаратом та водною поверхнею реалізується відносний рух. Забезпечення подібності відносного руху є надзвичайно складною задачею і вимагає обґрунтованого аналізу експериментальних методів та пошуку шляхів розробки фізичних та математичних моделей, придатних для використання при їх проектуванні з забезпеченням часових та функціональних критеріїв.

Методи фізичного моделювання. Вважається, одним з найточніших підходів для дослідження аеродинамічних характеристик транспортних апаратів, що рухаються над межею розділу середовищ є моделювання на спеціальних треках [9]. Він дозволяє отримувати результати експериментальних досліджень з точністю, близькою до натурних випробувань. Хоча виникають труднощі з визначенням інтегральних характеристик, але розвиток електронної техніки та математичного моделювання дозволяє отримувати прийнятні розподілені характеристики з певними обмеженнями. У порівнянні з дослідженнями в аеродинамічних трубах застосування моделювання на спеціальних треках дозволяє усунути цілий ряд проблем, пов'язаних з виконанням межових умов на шляховій структурі. Так, використання трекового способу для дослідження аеродинамічних характеристик наземних транспортних засобів дозволило отримати більш точні величини підйимальної сили та лобового опору в роботі [19]. Аналіз досліджень, викладених в роботі [20], свідчить про високу точність отриманих даних при застосуванні трекового підходу.

Найбільш поширеним способом дослідження аеродинаміки транспортних апаратів є аеродинамічні труби. Для моделювання впливу шляхової структури на аеродинамічні характеристики транспортного апарата використовують наступні методи трубних досліджень:

- а) нерухома шляхова структура (рис. 1 а, рис. 2 а);
- б) дзеркальне відображення моделі (рис. 1 б, рис. 2 б);
- в) управління примежовим шаром (рис. 1 в, рис. 2 в);
- г) рухомий пояс (рис. 1 г, рис. 2 г).

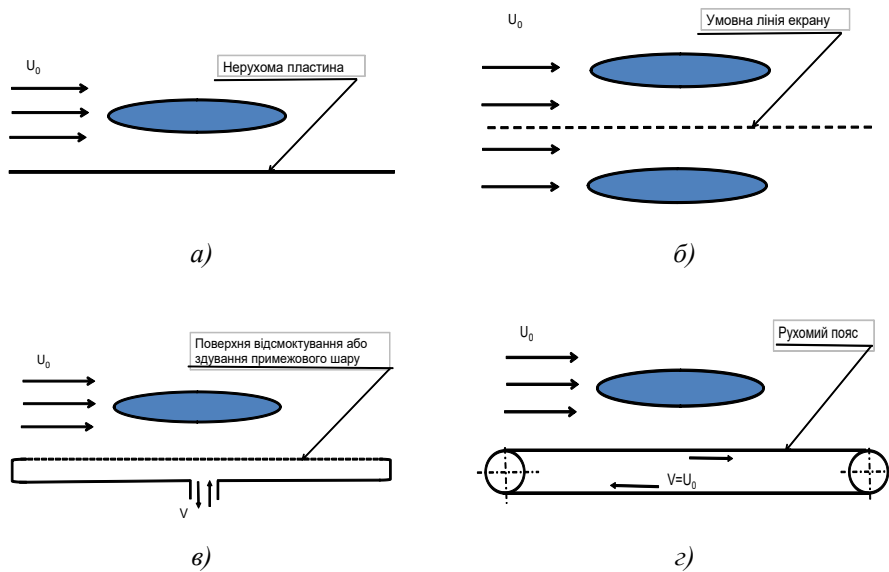


Рис. 1. Моделювання руху транспортного апарата поблизу землі в аеродинамічній трубці:
а – використання нерухомої пластини, *б* – дзеркальне відображення моделі, *в* – відсмоктування або здування прилежого шару, *г* – застосування рухомого поясу

Використання нерухомої шляхової структури є найбільш поширеним і самим простим методом [6, 7, 21]. Модель транспортного апарата закріплюється над шляховою структурою на відстані, яка дає можливість урахувати наростання прилежого шару на поверхні шляхової структури. При такому моделюванні може виникати циркуляція навколо комбінації "шляхова структура – модель" [7]. Але цю проблему можна усунути завдяки застосуванню різноманітних аеродинамічних пристроїв, але не у всіх випадках.

Вилучити прилежовий шар з поверхні шляхової структури можна шляхом застосування методів управління прилежовим шаром (УПШ) [18]. Він реалізовується шляхом тангенціального вдування або відсмоктування прилежого шару з поверхні. Цей метод не отримав такого широкого використання в порівнянні з іншими підходами моделювання впливу шляхової структури на параметри течії [9].

Застосування методу дзеркального відображення моделей дозволяє уникнути процесу утворення прилежого шару, характерного для нерухомої шляхової структури [10, 12, 22]. Проте в площині симетрії може виникати змішування основного та дзеркально-відображеного потоків. Цей процес може мати місце при моделюванні відривних течій.

В роботі [10] наведено результати експериментальних досліджень аеродинамічних характеристик профілю CLARK-Y-4%, поблизу землі. Експерименти проводилися в аеродинамічній трубці Т-3 кафедри аеродинаміки Харківського авіаційного інституту з використанням методу дзеркальних моделей [14].

З рисунку 2 видно, що профілі швидкості при моделюванні руху транспортного апарата поблизу шляхової структури різними методами мають різний характер.

На рис. 3 наведено отримані залежності коефіцієнтів підйомної сили, лобового опору та моменту тангажа, аеродинамічної якості як функції від кута атаки та відстані до землі. Дослідження показали, що вказані залежності мають нелінійний характер. Окрім цього, для вивчення поля течії в області носика профілю та в площині симетрії проводилась візуалізація потоку з використанням масляної плівки.

На рис. 4 наведено фотографії поля течії. На спеціально виготовлені пластини за шаблоном профілю наносилась масляна плівка. Під дією потоку повітря масляна плівка розтікалась відповідно до поля швидкостей. Виконувалось фотографування пластин. Аналіз полів течії показав, що із зменшенням відстані між моделями змінюється характер течії в околі передньої крайки профілю. При цьому передня точка розтікання зміщується вниз до уявної землі.

Результати досліджень підтвердили, що застосування методу дзеркального відображення моделей дозволяє отримати симетричну течію відносно лінії уявної землі. Змішування потоків, в досліджену діапазоні кутів атаки, поміж основним та дзеркально-відображеним криловими профілями не відбувається.

Застосування рухомого поясу дозволяє забезпечити виконання межових умов для швидкості на поверхні шляхової структури. Проте при використанні цього способу виникають труднощі моделювання руху над шляховою структурою, що має складний поперечний профіль. Проте даний спосіб вимагає точної синхронізації швидкостей течії та рухомого поясу. Крім цього, виникає ряд труднощів спряження поясу з нерухомим екраном.

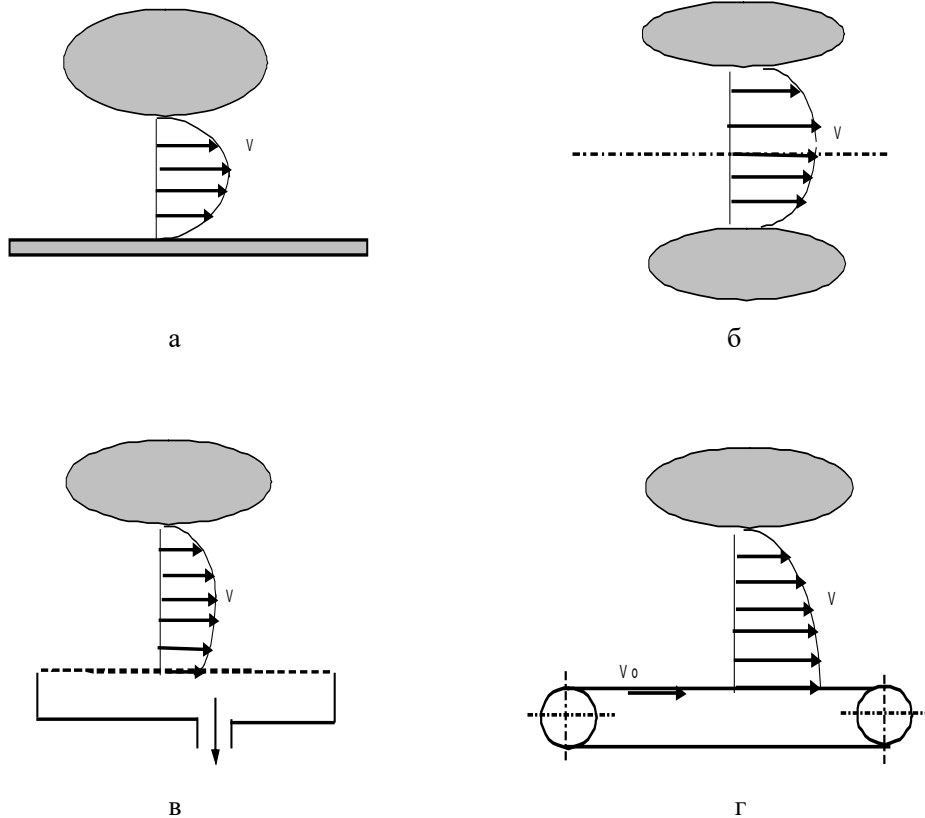


Рис. 2. Профілі швидкості при моделюванні руху транспортного апарата поблизу шляхової структури: *a* – використання нерухомої пластини, *б* – дзеркальне відображення моделі, *в* – відсмоктування або здування прилежового шару, *г* – застосування рухомого поясу

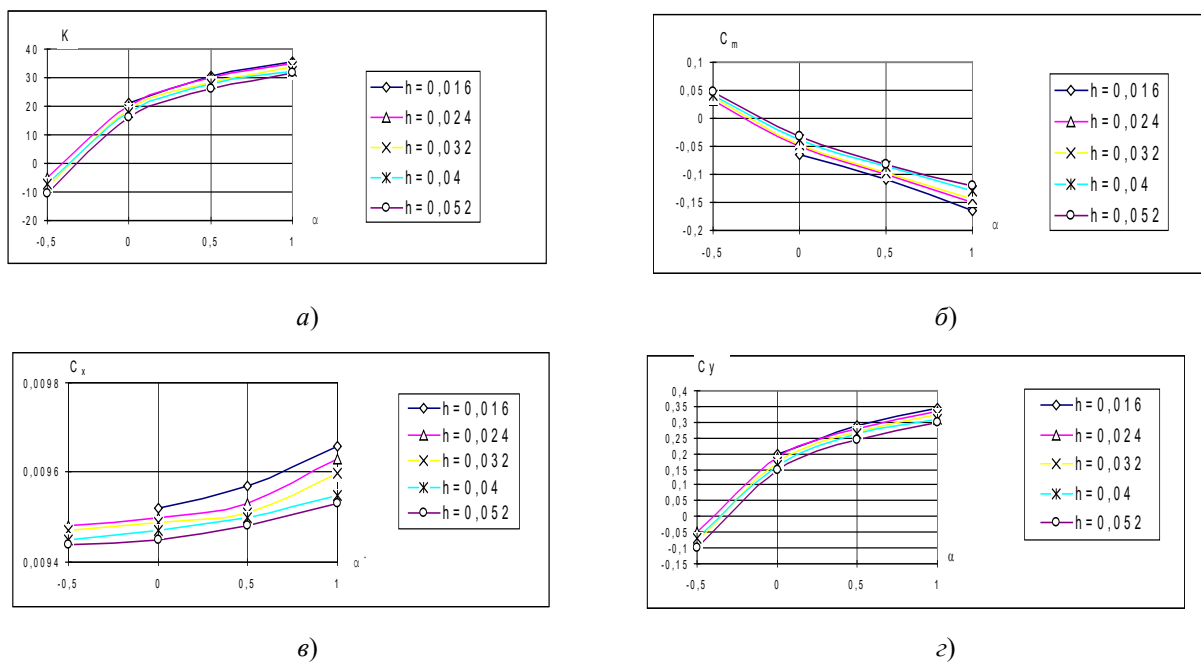
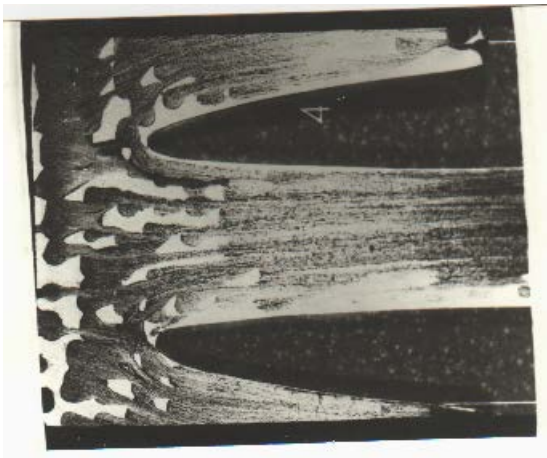


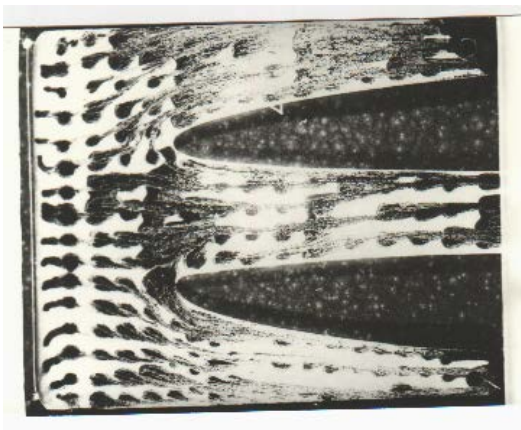
Рис. 3. Аеродинамічні характеристики профілю Clark-Y-4% поблизу землі: *a* – аеродинамічна якість; *б* – коефіцієнт поздовжнього моменту; *в* – коефіцієнт лобового опору; *г* – коефіцієнт підйомної сили



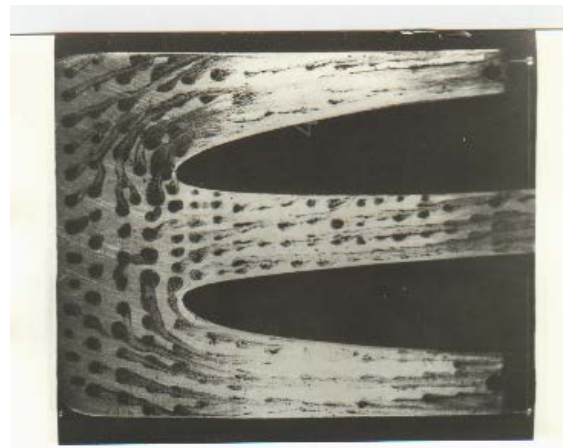
а



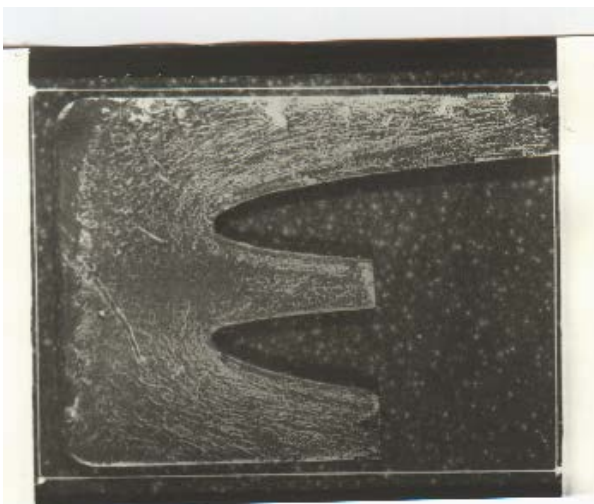
б



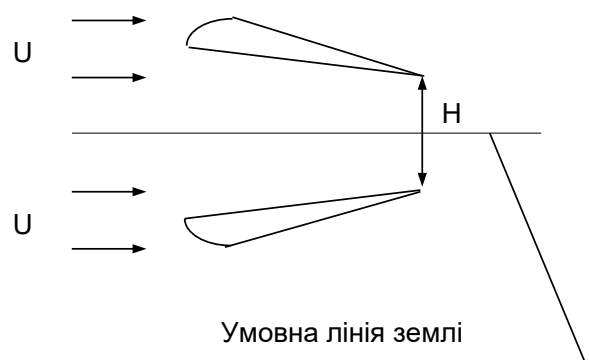
в



г



д



е

Рис. 4. Візуалізація потоку в околі передньої крайки профілю Clark-Y-4%:
a – $h=26$ mm; *б*– $h=20$ mm; *в*– $h=16$ mm; *г*– $h=12$ mm; *д*– $h=8$ mm; *е* – схема моделювання

Даний метод намагалися реалізувати в Центральному науково-дослідному інституті імені А.М. Крилова [23]. Швидкість повітряного потоку в аеродинамічній трубі досягала 100 м/с. Максимальну швидкість рухомого поясу удалось довести тільки до 30 м/с. У відповідності з теорією подібності необхідно щоб критерій за числом Рейнольдса свідчив про відповідність подібності фізичних процесів в експерименті та реальному явищі. Складність конструкції установки моделювання є серйозною проблемою для проведення таких експериментів. Тому даний експеримент на вдалось довести до коректного завершення.

Рухомий пояс широко використовується і для моделювання руху повнорозмірних легкових автомобілів в аеродинамічній трубі [9]. Проте даний спосіб вимагає точної синхронізації швидкостей течії та рухомого поясу. Крім цього, виникає ряд труднощів спряження поясу з нерухомим екраном.

Аналіз результатів дослідження аеродинамічних характеристик різного роду довгих тіл, які рухаються поблизу екрану, використовуючи стаціонарний та рухомий пояс, метод дзеркального відображення викладено в роботах [7, 10, 12, 13]. При порівнянні методу дзеркального відображення з першими двома способами він дав більш точні показники бокової стійкості, але занижені значення моменту тангажа. Величина підйомної сили виявилась в проміжку величин, одержаних вказаними методами. При зменшенні кліренсу метод дзеркального відображення давав занижені значення сили опору.

Більш детальний аналіз методів моделювання руху наземних транспортних засобів в аеродинамічних трубах проведено в роботі [14].

Вплив землі на аеродинамічні характеристики літаків проявляється тільки на злітно-посадкових режимах. Близькість злітно-посадкової смуги, як екрана, урахується через поправку до коефіцієнта підйомної сили $\Delta C_{y_{зем}}$, коефіцієнта лобового пору $\Delta C_{x_{зем}}$, коефіцієнта моменту тангажа $\Delta m_{z_{зем}}$ яка залежить від відстані до поверхні землі. Вплив землі веде до зміни індуктивного опору та зміщення фокусу крила і як результат зміни величини коефіцієнта поздовжнього моменту. Як показують експерименти з екранопланами вплив водної поверхні призводить до необхідності збільшення

площі горизонтального оперення до величини порядку 40% площі крила для забезпечення необхідної стійкості та керованості [24]. Це в свою чергу призводить до збільшення маси літального апарата.

Як приводилося вище, дослідження аеродинаміки екранопланів проводили в Інституті гідромеханіки Національної академії наук України [3, 16].

Схематичні моделі екранопланів (рис. 5) випробовували в гідродинамічному каналі завдовжки 140 м, завширшки 4.0 м і глибиною 1.2 м. Було застосовано гідродинамічний метод дослідження задач аеродинаміки [16, 24]. У цьому разі він зводився до того, що схематичні моделі екранопланів приводили в рух у водному середовищі над твердим нерухомим хвильовим екраном, влаштованим на дні каналу [16]. Заміна повітряного середовища водним середовищем в умовах цього дослідження є доцільною, оскільки дає змогу в експерименті одержувати відносно великі сили, що підлягають вимірюванню, що може підвищувати точність вимірювань, і досягати досить великих чисел Рейнольдса (близько 10^6) за відносно малих швидкостей буксирування (близько 4-5 м/с) [16].

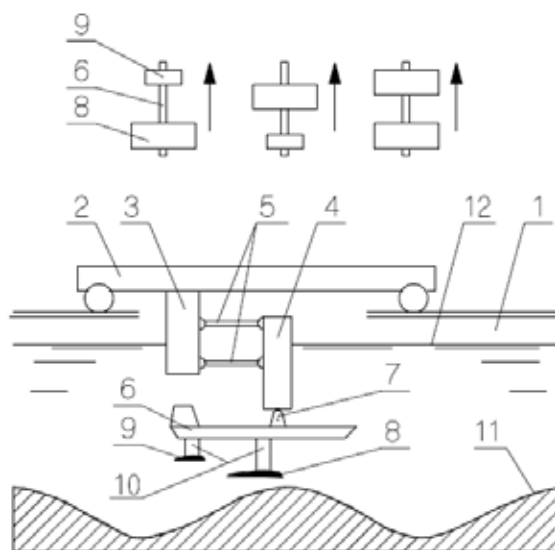


Рис. 5. Схема експериментальної установки в гідроканалі [16]

Схематичні моделі екранопланів (6) буксирували в гідроканалі (1) буксирувальним візком (2) під вільною поверхнею води (12) над хвильовим екраном (11) [16]. Моделі (6) з'єднувалися з буксирувальним візком (2) за допомогою двох гидродинамічних ножів (3) і (4), з'єднаних між собою шарнірним паралелограмом (5),

що забезпечував для моделі (6) свободу вертикальних переміщень. Ніж (3) жорстко кріпився до візка (2). Ніж (4) мав на своєму нижньому кінці шарнір (7) для кріплення моделі (6) [16].

Шарнір (7) міг бути приєднаний до моделі в будь-якому її місці по довжині і забезпечував їй свободу кутових коливань за тангажем. Крила великі (8) і малі (9) кріпилися до моделі за допомогою обтічних перехідників (10). Перехідники також могли бути приєднані до моделі в будь-якому її місці по довжині, чим забезпечувалася можливість зібрати модель за однією з можливих аеродинамічних компоновок. Конструкція перехідників давала змогу також регулювати кути атаки крил [16].

Вплив водної поверхні не є подібним до впливу злітно – посадкової смуги. Це пояснюється фізичними властивостями води. Дослідження аеродинаміки надводного транспортного апарата в аеродинамічній трубі є некоректним, так як не дозволяє провести моделювання водної поверхні, в такому випадку зникає можливість отримати подібність фізичних процесів для реальних режимів руху. Окрім цього явище хвилеутворення на водній поверхні буде спричиняти нестационарний режим руху транспортного апарата. Виходячи з цього слід зауважити, що безвідривне обтікання передньої крайки крила (подібне до обтікання передньої крайки крила при застосуванні методу дзеркально відображення моделі рис.4) може не реалізовуватися.

Під час руху транспортного апарата над хвилеутворенною водною поверхнею на нього діятиме низка додаткових нестационарних аперіодичних або періодичних сил і моментів. В основному величина цих сил і моментів буде залежати від висоти польоту над рівнем водної поверхні, відповідності напрямку польоту щодо руху фронту хвиль, а також геометричних та аеродинамічних характеристик самого транспортного апарата. В залежності і від погодних умов динамічні та кінематичні параметри можуть досягати критичних значень.

Під їхнім впливом на основні параметри руху будуть накладатися додаткові лінійні та кутові переміщення. В таких умовах транспортний апарат буде здійснювати складний нестационарний рух. Транспортному апарату необхідно надати такі характеристики стійкості та керованості, які б забезпечили безпечний рух.

Надзвичайно важливим питанням є забезпечення його динамічної стійкості, як в поздовжньому так і в поперечному напрямі. Його коливальний рух у вертикальній площині повинен мати частоту що відповідає частоті його зустрічі з гребнями хвиль водної поверхні. Необхідно забезпечити демпфувальні властивості конструкції транспортного засобу саме відповідним аеродинамічним компоуванням під впливом повітря. На сьогодні це питання не є вивченим достатньо. Вивчення демпфувальної дії повітряного середовища дозволить прояснити цілий ряд фізичних процесів при русі надводного транспортного засобу. Для цього необхідні розробки експериментальних та теоретичних методів та проведення відповідних досліджень.

Для вирішення проблеми необхідно розробляти математичні моделі різного рівня складності і розв'язувати їх вигляді зв'язаної задачі аеродинаміки та динаміки руху.

Висновки. Поведений огляд експериментальних підходів до моделювання руху швидкісного транспортного апарата над водною поверхнею вказує на необхідність подальшої розробки методів для забезпечення кінематичної та динамічної подібності фізичних процесів. Попередні дослідження в цьому напрямі проводились без урахування динаміки руху водної поверхні та її властивостей. Подальший розвиток обчислювальної аеродинаміки та її застосування дозволить проводити коректні числові експерименти і надасть можливість вивчити особливості фізичних процесів аеродинаміки та динаміки руху швидкісних надводних транспортних апаратів. В подальших дослідженнях необхідно розробляти математичні моделі з різним рівнем складності.

Список використаних джерел:

1. Проектирование самолетов / Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисейцев Н.К., Бадягин А.А., Ротин В.Е.; под ред. С.М.Егера. М.: Машиностроение, 1983. 616 с.
2. Аэродинамика ракет: В 2-х книгах / Дж. Аллен, Ф. Балтакис, С. Вукелич и др. ; под ред. М. Хемша, Дж. Нилсена; пер. с англ. А.Д. Хонькина. М.: Мир, 1989. 738 с.
3. Бабенко В.В., Кузнецов А. И., Мороз В.В. Методика проведения буксировочных испытаний в опытовом бассейне с помощью двух моделей глиссирующего судна. *Прикладна гідромеханіка*. 2003. т. 5(77), № 4. С. 5–11.
4. Бирман П.У. Обзор. Течение вблизи плохо обтекаемых тел, применимых к аэродинамике автомашин. *Труды американского общества инженеров механиков. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1980. Т. 102, № 3. С. 85–97.
5. Brendon, D.M., Ngunn, L.T. (1989). Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya geometricheskoy formy nosovoy chasti fyuzelyazha na harakteristiki ustoychivosti samoleta pri bolshih uglah ataki, *AKT*, (5), 42-57.
6. Byichkova, N.M., Dikovskaya, N.D., Larichkin, V.V. (1990). Vzaimodeystvie poperechno obtekaemogo tsilindra s blizko raspolozhennyim ekranom. *Yzv. SO AN SSSR. Ser. teh. nauk*, (1), 57-63.
7. Gordon M.G. (1965). . Eksperimentalnoe issledovanie polya skorostey i davleniy vokrug profilya vblizi zemli. *Trudy TsAGY*, (974), 1- 24.
8. Gorlin S.M. (1970), *Eksperimentalnaya aeromehanika*. Moskva: Vysshaya shkola.
9. Guho, V.G. (1987). *Aerodinamika avtomobilya*. Moskva: Mashinostroenie.

-
10. Prykhodko, A.A., Sokhatskyi, A.V. (1998). *Matematicheskoe i eksperimentalnoe modelirovanie aerodinamiki elementov transportnykh sistem vblizi ekrana*. Dnepropetrovsk: Nauka i obrazovanie.
 11. Sedov, L.I. (1987). *Metodyi podobiya i razmernosti v mekhanike*. Moskva: Nauka.
 12. Serebriyskiy, Ya. M., Biyachuev, Sh. A. (1939). Issledovanie v trube gorizontavno ustanovivshegosya dvizheniya kryila na nebolshom rasstoyanii ot zemli. *Trudy TsAGI*. (437), 1- 32.
 13. Mercker, E., Wiedemann, J. (1990). Comparison of different ground simulation techniques for use in automotive wind tunnels. *SAE technical paper series*, (9000321), 1-16.
 14. Sokhatskyi, A. V. (2010). *Teoretychni osnovy stvorennia aerodynamichnykh komponovan perspektyvnykh shvydkisnykh transportnykh aparativ* (dys. doktora tekhnichnykh nauk). Dnipropetrovsk. Ukraina.
 15. Panchenkov, A.N., Drachev, P.T., Lyubymov, V.I. (2006). *Ekspertiza ekranoplanov*. Nizhniy Novgorod.
 16. Belynskiy, V.G. (2006). O vozmuschenom dvizhenii ekranoplanov nad vzvolnovannoy poverhnostyu morya. *Prykladna hidromekhanika*, (3), 3 - 15.
 17. Achenbach, E. (1972). Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.*, (54). 565–575.
 18. Reynolds, G.A., Sarik, V.A. (1986). . Eksperimentalnoe issledovanie ustoychivosti pogranichnogo sloya na ploskoy plastine s otsosom. *Aerokosmicheskie tekhnika*, (11), 202-207.
 19. Ohtahi, K., Takei, N., Sakamoto, H. (1972) Nissan full scale tunnel - its application to passenger car design. *Soc. Automot. Eng. (SAE)*, (720100).
 20. Volgepohl, G. (1934) Luftwiderstand von Eisenbahn-ahrzeugen: *Z. Ver. Dtsch. Ing .*
 21. Aiba, S., Tsuchida, H. (1985) Heat transfer around a circular cylinder near a plane boundary. *Trans. ASME*, (Vol. 51), 866-873.
 22. Haga, T., Kawaquiti, M., Fukuchi, G., Yamamoto, A. (1968). Aerodynamics of High Speed Train. *Monthly Bul. Int. Railway Congr. Assoc.*, (2), 1–25.
 23. Yun, L., Bliault, A., Doo, J. (2010). *Wig graft and ekranoplan. Ground effect craft techlogy*. NY.: Springer Science + Business Media.
 24. Maskalik, A.I., Nagapetyan, R.A., .. Ivanenko, V.V. (2005). *Ekranoplanyi: transportnyie suda 21 veka*. Sankt Piterbug: Sudostroenie.
 25. Epshteyn, L. A. (1980). Gidrodinamicheskie metodyi issledovaniya zadach aerodinamiki. *Trudy TsAGI*. (2035). 1-28.