



УДК 533.6

## EVOLUTION OF HIGH-SPEED AERODYNAMICS

## ЕВОЛЮЦІЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ АЕРОДИНАМІКИ

Martyniuk Y.V. / Мартинюк Я.В.

Student / студентка

Chursanova M.V. / Чуранова М.В.

PhD, as.prof. / к.ф.-м.н, доцент

ORCID: 0000-0001-6977-7473

Drozdenco O.V. / Дрозденко О.В.

Senior Lecturer / ст. викладач

ORCID: 0000-0002-2141-411X

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
Kyiv, Beresteiskiy prospekt (Peremohy), 37, 03056

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ, Берестейський проспект (Перемоги), 37, 03056

**Анотація.** Робота присвячена огляду розвитку аеродинаміки літальних апаратів, з точки зору інженерних викликів, що стояли перед конструкторами останні кілька десятиліть. Особливо гостро вони проявилися в трансзвуковому та надзвуковому діапазонах швидкостей, де виникла «криза» стисливості повітряного потоку.

Локальні надзвукові потоки, утворення ударних хвиль і відрив примежового шару робили традиційні аеродинамічні рішення непридатними. Подолання звукового бар'єра стало можливим завдяки інженерній революції: появі реактивних двигунів, упровадженню стрілоподібних крил, спойлерів та застосуванню правила площ. Паралельно розвивалася експериментальна аеродинаміка, зокрема створення надзвукових аеродинамічних труб на основі принципів роботи ракетних сопел. На сучасному етапі розвиток галузі визначається інтеграцією експериментальних методів і чисельного моделювання. Технології PIV, CFD, LES і DNS у поєднанні зі штучним інтелектом відкривають нові можливості оптимізації літальних апаратів і дослідження складних високошвидкісних режимів. Таким чином, еволюція високошвидкісної аеродинаміки відображає шлях від експериментального подолання фізичних обмежень «на льоту» до їх прогнозування завдяки сучасному моделюванню.

**Ключові слова:** аеродинаміка, високошвидкісна аеродинаміка, стисливість повітря, надзвукова швидкість, реактивний двигун

## Вступ

Стрімкий розвиток авіації, що почався у ХХ столітті на фоні наукової революції та Другої світової війни, став рушієм нових відкриттів та новітніх інженерних рішень. Проте коли на сучасному етапі швидкості літальних апаратів досягли трансзвукових (в межах від 0,8 до 1,2 числа Маха; число Маха – це характеристична величина, що дорівнює відношенню швидкості руху тіла в рідині чи газі до швидкості звуку в цьому середовищі, також позначається як  $M$ ) та навіть надзвукових ( $M > 1$ ), виник ряд проблем, які необхідно вирішити науковцям.



Першою «кризою» стало виникнення ефектів стисливості повітряного потоку: літаки з гвинтовими двигунами, що наближалися до високих швидкостей, зіштовхувалися з тим, що повітря вже не могло розглядатися як нестисливе середовище. Внаслідок локального зростання швидкості потоку над окремими елементами літака, зокрема над вигнутими поверхнями крила, відбувалися значні зміни тиску та густини повітря. Наприклад, коли літак наближався до швидкості звуку, над верхньою поверхнею крила виникали локальні зони надзвукового потоку, що супроводжувалися формуванням ударних хвиль. Ці ударні хвилі порушували ламінарність обтікання і викликали відрив примежового шару, що призводило до різкого збільшення аеродинамічного опору (хвильового опору) і втрати ефективності управління літаком. Таке явище призводило до втрати контролю, наприклад, пікірування, що потім не давало можливості відновлення висоти [1].

Далі було помічено, що під найбільшим впливом стисливості повітряного потоку опинявся гвинт (або пропелер) літака. І хоча було вкладено значні ресурси для створення високошвидкісних гвинтів, результат був незначним. Революція прийшла з появою ракетних та реактивних двигунів, що значно збільшило силу тяги. Такі роботи були проведені Йоном Огайном, Віттлом та Годдардом в Німеччині, Англії та США. Розробка літака з реактивним двигуном велася в США на початку 1940-х років з використанням двигуна General Electric, створеного на основі робіт Віттла. Першим американським реактивним літаком був двомоторний Bell P-59 Airacomet. Проте P-59 мав деякі проблеми, однією з яких була асиметрична тяга від двомоторного двигуна [1].

Також виявилось, що в експериментальних установках для дослідження обтікання тіл повітряним потоком – аеродинамічних трубах – також стикалися з певним звуковим бар'єром. При цій, здавалося б, магічній швидкості, швидкості звуку, починають відбуватися дивні речі. Наприклад, в аеродинамічній трубі, коли на гвинти подається все більше і більше енергії, потік повітря в найвужчій частині випробувальної секції заглушається при швидкості  $M = 1$ , тобто при швидкості звуку. Незалежно від того, як швидко обертаються приводні гвинти,



швидкість повітря в цій частині випробувальної секції залишається на тому ж рівні. Традиційний силовий підхід не працює [2, 3].

### **Інженерні рішення криз**

Щоб усунути ефекти стисливості повітря, які спричиняли тенденцію до пікірування та втрату контролю на надзвукових швидкостях, інженери запровадили пікірувальні закрилки та замінили традиційні висотні рулі на повністю рухомі горизонтальні хвостові поверхні, щоб зберегти контроль над тангажем у випадках, коли ударні хвилі робили стандартні поверхні неефективними. Для контролю обертання, де елерони виходили з ладу через тенденцію до опускання крила, було розроблено альтернативний механізм управління – спойлери [2].

При розробці ракетних двигунів також важливо враховувати, що в соплах утворюються надзвукові потоки. Це відбувається під час розширення гарячих вихлопних газів в соплі ракетного двигуна, де газ прискорюється до швидкостей, що перевищують локальну швидкість звуку. За аналогічним принципом працюють надзвукові аеродинамічні труби: розширення потоку в конічних і Лаваль-соплах дозволяє досягати необхідних надзвукових режимів для випробувань моделей у керованих умовах. Здавалось би всупереч логіці, випробувальні моделі у надзвуковій аеродинамічній трубі встановлюються за горловиною, що відповідає режиму задушеного потоку: площа поперечного перерізу труби збільшується позаду горловини сопла. Проте швидкість повітря не зменшується, а, навпаки, зростає, оскільки запасена у потоці енергія стиснення і теплова енергія перетворюються на кінетичну енергію потоку [2, 4].

Для зменшення впливу стисливості повітря на саму конструкцію літального апарата також була змінена і геометрія крила. Так з'явилися стрілоподібні конструкції. Перевагами крила зі стрілоподібним профілем були зменшення впливу стисливості повітря, затримка утворення звукових ударних хвиль, зниження коефіцієнта аеродинамічного опору і, нарешті, збільшення критичного числа Маха. Але навіть це рішення мало свої недоліки, бо крила різко і нерівномірно на вищих швидкостях (більших за звукову) втрачали швидкість, а



ефективність елеронів помітно погіршувалась. Так винайшли слоти – вигнуті передні краї, які висувалися вперед на низьких швидкостях або при великому куті атаки (завдяки зміщенню вперед підйомних сил крила), тим самим збільшуючи хорду крила [5].

Було застосовано і правило «надзвукової» площі (Transonic Area Rule), коли фюзеляж звужували біля кореня крила. Це збільшувало площу поверхні і величину підйомної сили, що не давало літаку завалюватися [5].

### **Майбутнє аеродинаміки**

Наразі експериментальна аеродинаміка суттєво розвивається завдяки розробкам сучасних методів, інструментів і датчиків. Зокрема, завдяки випробуванням у зменшеному та повному масштабі, а також льотним експериментам, очікується досягнення значного прогресу в розробці високоточних вимірювальних систем, приладів і систем керування. Наприклад, подальший розвиток PIV (Particle Image Velocimetry – метод оптичної візуалізації та вимірювання швидкостей потоку за рухом частинок) з високою часовою роздільною здатністю, ймовірно, визначатиметься технологічними досягненнями в галузях візуалізації, обробки даних та інтеграції з новими технологіями.

Майбутні розробки можуть дозволити дослідникам одночасно спостерігати за потоками в декількох масштабах, що допоможе пов'язати дрібномасштабну турбулентну динаміку з великомасштабними структурами потоку та покращити наше розуміння турбулентності в усіх масштабах. Поєднання вищої роздільної здатності, аналізу в реальному часі, багатовимірних вимірювань та використання машинного навчання зробить PIV ще більш потужним інструментом для вивчення аеродинаміки.

Випробування в аеродинамічній трубі залишаться важливим методом оцінки характеристик літаків, особливо в різних фазах польоту. Одночасно з цим будуть розвиватися обчислювальні інструменти, такі як CFD (Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідрааеродинаміка). Уже сьогодні можливі більш точні симуляції повітряних потоків навколо складних тіл завдяки таким



підходам, як LES (Large Eddy Simulation – великомасштабне моделювання вихорів) та DNS (Direct Numerical Simulation – пряме чисельне моделювання), які забезпечують вищу роздільну здатність, але потребують значно більших обчислювальних ресурсів. Машинне навчання та штучний інтелект також набувають все більшого значення в аеродинаміці, дозволяючи оптимізувати конструкції, підвищити точність CFD та розробляти нові моделі турбулентності. Очікується, що CFD зазнає розвитку завдяки інтеграції штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволить швидше та точніше моделювати складні потоки, включаючи турбулентні та гіперзвукові режими [6, 7].

Таким чином, еволюція високошвидкісної аеродинаміки відображає шлях від експериментального подолання фізичних обмежень «на льоту» до їх прогнозування завдяки сучасним методам моделювання.

### **Література:**

1. Spearman, M. Leroy. A review of 50 years of aerodynamic research with NACA/NASA// NASA Technical Memorandum, 1994. 109163. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950007250/downloads/19950007250.pdf>

2. Baals, D. D., & Corliss, W. R. Wind Tunnels of NASA. Scientific and Technical Information Branch, National Aeronautics and Space Administration, 1981. Washington, D.C.: NASA Special Publication SP-440. 154 p. Available at: [https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=G0sCAAAAIAAJ&oi=fn&pg=PA1&dq=wind+tunnels+&ots=0NTsu9Px0M&sig=FEd6ueLLcpBIVw8O9aV8p6\\_BVd8](https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=G0sCAAAAIAAJ&oi=fn&pg=PA1&dq=wind+tunnels+&ots=0NTsu9Px0M&sig=FEd6ueLLcpBIVw8O9aV8p6_BVd8)

3. Molina, A. C., De Troyer, T., Massai, T., Vergaerde, A., Runacres, M. C., & Bartoli, G. Effect of turbulence on the performance of VAWTs: An experimental study in two different wind tunnels // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019. – Vol. 193. – p. 103969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.103969>

4. Silva, J. C., & Brójo, F. A Review on Supersonic Nozzle Design and Analysis with Traditional Methods 2025. <https://doi.org/10.20944/preprints202503.1464.v1>



5. Dildy, D. C., & Thompson, W. F-86 Sabre vs MiG-15: Korea 1950–53. Oxford: Osprey Publishing (Bloomsbury Publishing), 2013. 80 p. Available at: <https://books.google.com/books?hl=uk&lr=&id=WVebCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=f->

[86&ots=zlmyL0EM7n&sig=PBxdGVs36bQyRYvDZ0XhCHZTEpk](https://books.google.com/books?hl=uk&lr=&id=WVebCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=f-86&ots=zlmyL0EM7n&sig=PBxdGVs36bQyRYvDZ0XhCHZTEpk)

6. Shams Taleghani, A., & Torabi, F. Recent developments in aerodynamics // Frontiers in Mechanical Engineering, 2025. – Vol. 10. – p. 1537383. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1537383>

7. Drikakis, D., Kwak, D., & Kiris, C. C. Computational aerodynamics: Advances and challenges. // The Aeronautical Journal, 2016. – Vol. 120(1223). – p. 13-36. DOI: <https://doi.org/10.1017/aer.2015.2>

**Abstract.** *This paper presents a review of the development of aircraft aerodynamics from the perspective of the engineering challenges faced by designers over the past several decades. These challenges became particularly pronounced in the transonic and supersonic speed regimes, where a “compressibility crisis” of the airflow emerged.*

*Local supersonic flow regions, the formation of shock waves, and boundary-layer separation rendered traditional aerodynamic solutions ineffective. Overcoming the sound barrier became possible due to an engineering revolution, including the introduction of jet engines, the adoption of swept wings and spoilers, and the application of the area rule. In parallel, experimental aerodynamics advanced significantly, particularly through the development of supersonic wind tunnels based on the operating principles of rocket nozzles. At the present stage, the development of the high-speed aerodynamics is driven by the integration of experimental methods and numerical simulation. Technologies such as PIV, CFD, LES, and DNS, combined with artificial intelligence, open new possibilities for the optimization of aircraft and the investigation of complex high-speed flow regimes. Thus, the evolution of high-speed aerodynamics reflects a transition from experimental, in-flight overcoming of physical limitations to their prediction using advanced modeling techniques.*

**Keywords:** *aerodynamics, high-speed aerodynamics, air compressibility, supersonic speed, jet engine*

Стаття відправлена: 19.12.2025 р.

© Мартинюк Я.В., Чурсанова М.В., Дрозденко О.В.