

**ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Кривохатько Іллі Станіславовича

**" Метод визначення аеродинамічних характеристик літального апарата  
схеми «Тандем» "**,

поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності  
05.07.01 – аеродинаміка та газодинаміка літальних апаратів.

Детальний аналіз дисертації Кривохатько І. С. " Метод визначення аеродинамічних характеристик літального апарата схеми «Тандем» " дозволяє сформулювати наступні узагальнені висновки щодо актуальності, ступеня обґрунтованості основних наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності, наукової новизни, практичного значення, а також загальної оцінки роботи.

**Актуальність теми дисертаційного дослідження.**

Вибір аеродинамічної схеми займає ключове місце в загальному процесі проектування літального апарата. Від вдалого вибору аеродинамічної схеми як правило залежить успіх всього проекту літального апарату. За всю історію розвитку авіації аеродинамічна схема «тандем» хоч і не набула широкого розповсюдження, але вирізняється серед інших аеродинамічних схем високими аеродинамічними якостями і компактністю. На жаль в силу конструктивних особливостей аеродинамічної схеми «тандем» не вдалося реалізувати всі її переваги при створенні великих літальних апаратів. На сучасному етапі розвитку авіації дуже активно розвиваються малі та безпілотні літальні апарати, принципи конструювання та методи забезпечення міцності яких суттєво спрощені. При проектуванні таких літальних апаратів аеродинамічна схема «тандем» стає дуже привабливою.

Для оптимізації аеродинамічної схеми літального апарата необхідно мати ефективні методи визначення його аеродинамічних характеристик, які можна було застосовувати уже на початкових стадіях проектування. Застосування існуючих

*Відгук надіслано до секретаря 26.06.2015 16.09.2016  
В. секр. МКОФМ / Козлов І.В.*

методів визначення аеродинамічних характеристик при аналізі схеми «тандем» малих літальних апаратів призводить до суттєвих похибок. Тому розробка методів визначення аеродинамічних характеристик літальних апаратів схеми «тандем» на сьогоднішній день є **актуальною задачею**.

Актуальність теми також підтверджується актами впровадження (акт впровадження на ДП «ДККБ «Луч» від 16.06.2015 р. і акт впровадження на ДП «ДКБ авіації загального призначення» від 03.06.2015 р.) та виконаними науково-дослідними роботами по державній бюджетній тематиці кафедри приладів та систем керування літальними апаратами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ»): «Дослідження аеродинамічних та конструктивно-технологічних параметрів телескопічного крила безпілотного літального апарата» (дослідна робота №0114U004361 від 11.06.2014 р), та за господарчими договорами №1 між НТУУ «КПІ» та ДП «ДККБ «Луч» від 04.07.2008 р. та №12 від 19.11.2014 р.

#### **Основні наукові положення, висновки і рекомендації, що сформульовані у дисертації, ступінь їх обґрунтованості і достовірності**

Наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі Кривохатько І. С. достатньо обґрунтовані:

- застосуванням сучасних аналітично-чисельних методів досліджень, в тому числі математичного моделювання на ПК з використанням пакетів прикладних програм;
- застосуванням експериментальних методів фізичного моделювання, зокрема в аеродинамічній трубі;

Достовірність розробленого аналітично-числового методу визначення стаціонарних аеродинамічних характеристик літального апарату схеми «тандем», що дозволяє уточнити розрахунок поздовжніх характеристик і розраховувати бокові характеристики з урахуванням інтерференції переднього та заднього крил, не викликає сумніву.

Наведені в дисертаційній роботі теоретичні обґрунтування та експериментальні дослідження виконані коректно на високому науковому рівні.

Результати теоретико-експериментальних досліджень підтверджені льотними випробуваннями безпілотного літака схеми «тандем».

Висновки, які сформульовані в дисертаційній роботі, містять нові наукові положення для удосконалення літального апарату схеми «тандем». Зокрема, висновок 2 підтверджує перспективність застосування в конструкції літального апарату схеми «тандем» телескопічного крила, висновок 3 дає можливість вдосконалення аеродинамічного профілю крила для літального апарату в умовах низьких чисел Рейнольдса, а висновок 6 свідчить про можливість використання результатів досліджень в системах автоматизованого проектування літальних апаратів.

#### **Наукова новизна дисертаційної роботи.**

Дисертантом отримані наступні основні наукові результати:

- вперше розроблено аналітично-числовий метод визначення аеродинамічних характеристик літального апарату схеми «тандем», що дозволяє розраховувати як поздовжні, так і бокові аеродинамічні коефіцієнти з урахуванням інтерференції переднього та заднього крил при наявності V-подібності крил.
- вперше визначено критерії подібності вихрових систем літальних апаратів схеми «тандем», що дозволяють переносити результати розрахунку індуктивного опору моделей при відсутності їх повної геометричної подібності.
- новими є результати щодо впливу початкового ступеня турбулентності потоку на інтерференцію крил в схемі «тандем»: при збільшенні ступеня турбулентності негативна інтерференція зменшується; вперше визначено поправки на ступінь турбулентності (наприклад, в аеродинамічній трубі) для заднього крила, які відрізняються від поправок для переднього крила.
- експериментально виявлено нові закономірності впливу геометричних параметрів ЛА (винесення крила, співвідношення розмахів, кута поперечного V) на аеродинамічні характеристики (максимальну аеродинамічну якість): якщо розмах

заднього крила більше, ніж переднього, ефективність поперечного V крила зростає при збільшенні поздовжнього винесення. Причиною є взаємодія і, як наслідок, деформація вільних вихорів переднього та заднього крил.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Запропонований метод дозволяє на початкових стадіях проектування визначати поздовжні та бокові аеродинамічні характеристики безпілотної літальної апаратури схеми «тандем», що забезпечує пришвидшення та здешевлення процесу проектування літальної апаратури.

2. Метод доведено до інженерного використання, розроблено прикладне програмне забезпечення, що дозволяє визначати аеродинамічні характеристики літальної апаратури в автоматизованому режимі.

3. Запропоновано порядок побудови аеродинамічного профілю для літальної апаратури схеми «тандем» в умовах низьких чисел Рейнольдса (патент України №75557), який порівняно з найближчими аналогами забезпечує при незмінній максимальній аеродинамічній якості приріст максимального коефіцієнту піднімальної сили та зменшення балансувальних втрат.

4. Для заднього крила визначено поправки на ступінь турбулентності, що дозволяє підвищити точність визначення профільного опору на ~20...25 %.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при створенні безпілотної літальної апаратури в ДП «ДККБ «Луч» (Акт впровадження від 16.06.2015 р.), в ДП «ДКБ авіації загального призначення» (Акт впровадження від 03.06.2015 р.)

### **Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях.**

Основні положення дисертації опубліковані в 18 наукових працях, з них: 8 статей у фахових виданнях за переліком ВАК України, в т.ч. 5 статей у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз; 1 стаття у закордонному виданні; матеріали 8 науково-технічних конференцій; 2 патенти України на корисну модель.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Зміст автореферату є ідентичним до змісту дисертації і достатньо повно відображає основні положення дослідження.

### **Аналіз змісту дисертації.**

Дисертація складається з вступу, переліку основних скорочень та позначень, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел з 72 найменувань, додатків. Основна частина дисертації надрукована на 140 сторінках, містить 183 рисунки та 28 таблиць.

У *вступі* Кривохатьком І.С. обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і задачі досліджень, викладені наукова новизна та практична значимість отриманих результатів, наведені дані про особистий внесок, публікації та апробацію наукових розробок.

В *першому розділі* дано аналіз сучасного стану та перспектив розвитку як літальних апаратів схеми «тандем», так і методів визначення їх аеродинамічних характеристик. Показано, що аеродинаміка даної схеми досліджена в значно меншій мірі, ніж традиційної схеми. Насамперед це пов'язано зі складнощами врахування інтерференції між крилами: скосу потоку, турбулізації та уповільнення потоку на задньому крилі. Зроблено узагальнення рекомендацій щодо вдосконалення аеродинамічного обрису літального апарата схеми «тандем».

В *другому розділі* на основі аналітично-чисельного методу проведено теоретичні дослідження аеродинамічних характеристик літального апарата схеми «тандем». Зокрема, досліджено вплив кута поперечного  $V$  переднього та заднього крил на аеродинамічні характеристики; проаналізовані аеродинамічні характеристики телескопічного крила як перспективного напрямку вдосконалення аеродинаміки безпілотного літального апарату схеми «тандем» класу «мікро»; розроблено алгоритм вибору аеродинамічного профілю крила для низьких чисел Рейнольдса; досліджено

вплив початкового ступеня турбулентності потоку на аеродинамічні характеристики профілю крила.

В **третьому розділі** проаналізовано результати дослідження аеродинамічних характеристик моделі літального апарата схеми «тандем» в аеродинамічній трубці. Зокрема, розглянуто вплив інтервалу винесення крил та кута поперечного  $V$  крила на поздовжні та бокові аеродинамічні характеристики; представлені результати візуалізації розташування вільних вихорів при різних геометричних параметрах моделі.

В **четвертому розділі** проведено порівняння результатів розрахунку аеродинамічних характеристик літального апарату схеми «тандем» з застосуванням запропонованого методу з результатами випробувань в аеродинамічній трубці. Порівняння розрахованих та експериментальних поляр, характеристик поздовжньої стійкості, бокової стійкості, аеродинамічних характеристик моделі з телескопічним крилом показало задовільний результат для методу, що використовується на початкових стадіях проектування літального апарату.

*Загальні висновки* по дисертації відповідають її змісту, конкретно і стисло висвітлюють основні наукові результати.

Загалом можна зазначити, що дисертація є закінченою науковою роботою, в якій отримані нові наукові результати, що мають теоретичну та практичну цінність

#### **Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційного дослідження.**

Разом з тим, по дисертаційній роботі слід зробити наступні зауваження:

1. Алгоритм вибору аеродинамічного профілю для літального апарата схеми «тандем» при низьких числах Рейнольдса, викладений в розділі 2.4, не зовсім переконливий. Не сформульовано чіткого комплексного критерію вибору профілю, який би базувався на геометричних та аеродинамічних характеристиках профілів. Основна частина алгоритму базується на основі експертних рішень/досвіду. Крім цього база профілів, з яких робиться вибір, обмежена базою програмного забезпечення *Profili 2.27c(2.30)*. В той-же час, якщо керуватися викладеним в розділі



2.4 алгоритмом, то серед найкращих профілів для низьких чисел Рейнольса мав би бути профіль у вигляді пластинки, вигнутої по дузі кола.

2. При визначенні коефіцієнта підйимальної сили літального апарату схеми «тандем» (формула 7, сторінка 50) не врахована інтерференція між крилами та фюзеляжем. Відомо, що інтерференція між фюзеляжем та крилом стає суттєвою, якщо останнє розташоване відносно фюзеляжу по схемі низькоплан. В досліджуваній схемі «тандем» це стосується заднього крила. Ситуація ще більше ускладнюється, якщо зважити на те, що заднє крило розташоване в задній частині фюзеляжу, що звужується.

3. Викликає сумнів правильність назви параграфа 3.10 «Результати візуальних випробувань». Ймовірно це невдалий переклад з російської мови терміну «*визуальные исследования*», які широко застосовуються в мистецтві та криміналістиці. Зміст параграфа свідчить про те, що в ньому йде мова про візуалізацію вихрових структур.

4. Дисертація переобтяжена додатками. Обсяг додатків становить близько 100 сторінок при 140 сторінках основного тексту дисертації. Додатки містять багато первинних матеріалів досліджень (додаток С) та матеріалів технологічного характеру (наприклад, скріншоти прикладів розрахунків). Вважаю, що обсяг додатків без втрати якості дисертації можна було скоротити вдвічі. Необхідно було ширше використовувати зведені та узагальнюючі графіки. Крім цього, частина рисунків до дисертації розміщена в додатках (розділи 1, 2 та 3), а рисунки до розділу 4 – в тексті розділу. Нумерація рисунків незрозуміла: в межах розділів 1, 2 і частини 3 – застосовано наскрізну нумерацію сторінок, а в частині 3-го і 4 розділах – нумерація рисунків містить вказівку на параграф.

### **Загальна оцінка дисертаційної роботи**

Дисертація Кривохатько Іллі Станіславовича є структурованою, цілісною, завершеною науково-дослідною роботою, а отримані в ній результати вирішують задачу вдосконалення методів визначення аеродинамічних характеристик літальних апаратів схеми «тандем».

Оформлення дисертації і автореферату в цілому, з урахуванням зазначених вище зауважень, відповідає діючим нормативним документам.

Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій згідно з п.п. 11, 13 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор, Кривохатько Ілля Станіславович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.01 – аеродинаміка та газодинаміка літальних апаратів.

Офіційний опонент,  
старший науковий співробітник  
Інституту гідромеханіки НАН України,  
канд. техн. наук, ст. наук. співробітник



В.В. Мороз

**Підпис Мороза В.В. засвідчую:**  
Вчений секретар  
Інституту гідромеханіки НАН України



Н.С. Городецька