

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Алексеєнка Сергія Вікторовича «Науково-методологічні основи моделювання зледеніння аеродинамічних поверхонь літальних апаратів», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

### 1. Актуальність теми

Безпека польоту а також забезпечення надійності та безперебійної експлуатації як цивільних, так і військових літальних апаратів (ЛА) має першорядне значення в авіаційній галузі. Всесвітньо визнаною проблемою в авіації є виникнення небезпечних ситуацій під час польоту в несприятливих метеорологічних умовах. Нажаль, до сьогодні продовжують реєструватися випадки виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із зледенінням аеродинамічних поверхонь літальних апаратів. Внаслідок виникнення крижаних наростів на елементах ЛА змінюється структура обтікання, що призводить до зменшення підйомної сили і кута зриву потоку з крила та елементів хвостового оперення, зменшення тяги, втрати поздовжньої стійкості, виникнення нерозрахункових режимів експлуатації. Це може призводити до аварійних ситуацій з тяжкими наслідками для літального апарату в цілому, пасажирів та екіпажу.

Поряд із натурними та наземними випробуваннями, чисельне моделювання процесів зледеніння аеродинамічних поверхонь ЛА під час польоту в складних метеорологічних умовах, разом із визначенням ступеню впливу зледеніння на ЛА, в сучасних умовах стає досить ефективним інструментом, який дозволяє значно скоротити час і вартість проведення досліджень, та, відповідно, створювати найбільш досконалі системи захисту від зледеніння. Необхідно зазначити, що відомі методики та програмні комплекси, які дозволяють моделювати форми крижаних наростів на обтічних поверхнях, мають ряд недоліків, як, наприклад, обмежене застосування у випадку досить великих швидкостей і складних форм наростів, не дозволяють оцінювати вплив шорсткуватих наростів криги на аеродинамічні характеристики профілю, містять протиріччя при описі фізичної картини зледеніння і, відповідно, термодинаміки процесу наростання криги. Тому проблема розробки методології та програмно-методичного забезпечення, які б дозволяли чисельно моделювати процеси зледеніння ЛА є актуальною проблемою авіаційної галузі.

Таким чином, дисертація має важливе наукове і прикладне значення. Її результати можуть бути використані в різних сферах діяльності, але насамперед в авіаційній техніці. Тема дисертації тісно пов'язана з науково-дослідними темами, що виконувались на кафедрі механотроніки фізико-технічного університету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, а основні результати були використані при вдосконаленні програмно-методичного забезпечення ДПі КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля при розрахунку швидкості наростання криги на оболонці паливного відсіку в процесі підготовки ракети-носія до запуску, а також є корисними

№51.08/33  
25.11.2019

при розробці систем захисту від зледеніння та проектуванні нових типів повітряних суден.

## **2. Наукова новизна, обґрунтованість і достовірність наукових положень, результатів і висновків**

У дисертації і авторефераті однозначно представлена актуальність, наукова новизна і практична значущість проведених досліджень та отриманих результатів.

У роботі здійснено аналіз відомих експериментальних та теоретичних досліджень, присвячених зледенінню ЛА, моделей і методів моделювання процесів намерзання криги на аеродинамічних поверхнях. Сформульовано основні проблеми, які виникають при розробці систем захисту від зледеніння. За результатами виконаного аналізу визначено мету роботи, обрано і обґрунтовано напрями досліджень.

Наукову новизну здобутих результатів щодо отриманих експериментальних даних процесу зледеніння, удосконалення методики моделювання процесів наростання криги, розробки нового підходу до вирішення проблеми чисельного моделювання зледеніння ЛА та результатів систематичних досліджень показано й доведено шляхом порівняння з відомими результатами досліджень, методами або експериментальними даними.

Достовірність наукових положень дисертації забезпечено: використанням фундаментальних законів механіки рідини і газу, коректною постановкою граничних умов, задовільним узгодженням між собою числових, аналітичних і експериментальних даних, отриманих в роботі, а також відповідністю отриманих результатів відомим експериментам і розрахунковим даним інших авторів.

У даній дисертаційній роботі результати кандидатської дисертації не використано. Результати дисертації пройшли широку апробацію у наукових виданнях та багатьох міжнародних конференціях. Висновки, наведені в авторефераті й дисертації, відображають основний зміст виконаних досліджень.

## **3. Основні наукові результати**

У дисертації на підставі проведених теоретичних, розрахункових і експериментальних досліджень розв'язано актуальну наукову проблему створення наукових та методологічних основ для розробки математичних моделей, методик, алгоритмів і програм, що описують процеси гідроаеродинаміки і тепломасопереносу, з урахуванням фазових переходів, що відбуваються при зледенінні літальних апаратів. Основними науковими результатами є такі:

1. Експериментальним шляхом виявлено нові закономірності мікрофізики процесу взаємодії переохолоджених крапель води з аеродинамічною поверхнею, процесу замерзання нерухомої переохолодженої поверхневої краплі, мікроструктури криги, що утворюється.

2. На основі проведених експериментальних і теоретичних досліджень розроблена методика розрахунку обтікання тіл повітряно-крапельним в'язким стисливим потоком в тривимірній постановці, яка описує процес осадження вологи на обтічну поверхню з використанням моделі взаємопроникних середовищ та удосконалена методика розрахунку наростання криги на обтічній поверхні.



3. Розроблено програмно-методичне забезпечення, яке дозволяє, відповідно до вимог, що висуваються при сертифікації літальних апаратів, визначати місця виникнення криги на аеродинамічних поверхнях літальних апаратів, її форму і оцінювати ступінь впливу на аеродинамічні характеристики і, відповідно, керованість як обладнаного, так і необладнаного системою захисту від зледеніння ЛА.

4. Відтворено основні типи зледеніння: крига на початковому етапі процесу зледеніння, відносно великі «рогоподібні» крижані нарости, «бар'єрна» крига, і проведена оцінка їх впливу на аеродинамічні характеристики профілю крила.

5. Проведено систематичні дослідження в широкому діапазоні льотних і метеорологічних параметрів: довжини хорди обтічного тіла від 0,3 до 3 м; висоти польоту від 0 до 8000 м; швидкості потоку, що набігає, від 20 до 200 м/с; температури від 0 до -40 °С; водності від 0,2 до 2,0 г/м<sup>3</sup>; діаметру переохолоджених крапель від 5 до 500 мкм. Вперше результати розрахунків представлені у вигляді чотиріпараметричних номограм.

6. Запропоновано нову методику визначення ступеню негативного впливу зледеніння на літальний апарат, який має певні компоновку, конфігурацію і розміри в заданих метеорологічних і льотних умовах.

У цілому здобуті наукові результати є новими, вони є істотним внеском у вирішення проблеми підвищення безпеки польотів.

#### **4. Повнота викладення в опублікованих працях і апробація**

Основні результати дисертації викладено у 39 роботах: у главі монографії (у співавторстві), 22 статті у фахових вітчизняних та зарубіжних виданнях (з них 5 одноосібні), 1 стаття в періодичному науковому виданні, 15 робіт в збірниках праць та тез міжнародних конференцій. З опублікованих робіт 6 індексовані у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science. В опублікованих роботах викладено основні ідеї, методи, алгоритми, закономірності досліджуваних процесів зледеніння аеродинамічних поверхонь ЛА, основні висновки, які викладені в дисертації.

Результати виконаної роботи доповідалися на численних міжнародних і національних конференціях і семінарах, які безпосередньо пов'язані з тематикою дисертації. Позитивну оцінку дисертаційної роботи підтверджено актами впровадження.

#### **5. Значення отриманих результатів для науки і практики**

Розроблене програмно-методичне забезпечення може бути використане поряд з льотними випробуваннями в природних та імітованих умовах зледеніння, а також наземними експериментами для моделювання процесу формування крижаних наростів, в тому числі криги, що утворюється при роботі системи протизледеніння, теплової системи антизледеніння в умовах виникнення «бар'єрної» криги в заданих метеорологічних умовах і оцінки впливу таких наростів на експлуатаційні характеристики ЛА. Отримані результати представляють практичний інтерес для ДП «Антонов», та можуть бути використані при розробці систем захисту від зледеніння та проектуванні нових типів повітряних суден. Також результати досліджень було використано при вдосконаленні програмно-методичного забезпечення ДП КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля, що описує процеси взаємодії крапель води з поверхнею паливних відсіків з криогенними компонентами, а також при розрахунку швидкості



наростання криги на оболонці паливного відсіку в процесі підготовки ракети-носія до запуску.

#### **6. Критичні зауваження щодо змісту та оформлення роботи**

1. В роботі на фоні великої кількості виконаних розрахунків та отриманих номограм не наведені **безрозмірні** параметри, які могли б зв'язати критичні розміри крижаної шорсткості, місця та форми розташування крижаних наростів на обтічній поверхні з температурою, щільністю та розміром краплин у повітрі, температурою поверхні та швидкістю потоку.
2. У дисертації викладено опис схеми чисельного рішення двомірних задач на основі схеми Рое, але перехід до тривимірного рішення не може бути виконаний автоматично і цей крок потребує опису (Розділ 4.2.2).
3. Застосування криволінійної системи координат для опуклих поверхонь виправдано і не викликає принципових труднощів, але з появою локальних увігнутих крижаних ділянок на обтічній поверхні така система координат може стати непридатною.
4. У чисельному моделюванні задачі, що була розглянута, запропоновано використовувати модифіковану модель турбулентності Spalart-Allmaras. Але відомо, що дана модель у порівнянні з іншими моделями турбулентності неадекватно описує вихрову динаміку у сліді за обтічним тілом та зонах відриву, що проявляється у частковій або повній штучній дисипації вихрового сліду за рахунок значної турбулентної в'язкості. В дисертації не достатньо обґрунтовано вибір даної моделі для цього класу моделювання.
5. Застосування поняття "пісочної шорсткості" до модифікації "в'язкості Спаларта-Аллмараса" вимагає додаткової параметризації, так як з одного боку підвищує ступінь турбулентності, яка може запобігати носового відриву, а з іншого фактично згладжує обтічну поверхню, що також запобігає відриву, в тому місці де він повинен бути. Крім того не можна порівнювати величину шорсткості на початку крила з хордою крила.
6. При оцінці льотних якостей літальних апаратів практично не врахований зв'язок масштабного та часового факторів зледеніння поверхонь.
7. Розроблена модель обтікання зледенілих аеродинамічних поверхонь не враховує можливого часткового зриву крижаного утворення з поверхні обтічного крила під дією потоку повітря, що набігає.
8. У тексті дисертації відзначаються технічні помилки:
  - збій нумерації формул (4 Розділ);
  - повтори реферованих робіт;
  - позначення одним символом різних змінних;
  - українська термінологія "прикордонний шар", "клетінка";
  - в визначення ентальпії потрапила кінетична енергія потоку (стор. 200);
  - в моделі Спаларта-Аллмараса не прописані константи моделі і функції, що модифікують (стор. 202-203), і т.д.
9. Автореферат відображає зміст дисертації, але надмірно багато уваги приділено поданню результатів двомірних розрахунків на шкоду викладу і поясненню застосовуваних емпіричних і напівемпіричних залежностей, замикаючих постановку задачі зледеніння обтічних поверхонь.

## 7. Висновки щодо дисертаційної роботи

Висловлені зауваження не впливають суттєвим чином на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Алексеєнка С.В. В роботі досліджувалась складна наукова і прикладна проблема і в рамках однієї дисертації її неможливо вирішити повністю. Тому більшість зауважень можна розглядати як побажання для подальших досліджень. Рецензована робота є закінченим науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обгрунтовані результати, які у сукупності є суттєвими для дослідження процесів зледеніння аеродинамічних поверхонь ЛА. Автореферат відповідає змісту дисертації.

Зважаючи на актуальність теми досліджень Алексеєнка С.В., ступінь обгрунтованості науково-технічних результатів його дисертаційної роботи, новизну та повноту викладу результатів в опублікованих працях автора, вважаю, що дисертація Алексеєнка Сергія Вікторовича «Науково-методологічні основи моделювання зледеніння аеродинамічних поверхонь літальних апаратів» відповідає вимогам пп. 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою КМ України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами та доповненнями згідно Постанов КМ № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015, № 567 від 27.07.2016), що висуваються до дисертації, а її автор, Алексеєнко Сергій Вікторович заслуговує присудження наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Доктор фізико-математичних наук, професор  
член-кореспондент НАН України  
Заступник директора з наукової роботи  
Інституту гідромеханіки НАН України



  
Г.О.Воропаєв