

У спеціалізовану вчену раду Д26.062.05
при Національному авіаційному
університеті

ВІДГУК

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

1. Актуальність теми

Проблема убезпечення польотів літаків у важких погодних умовах не втрачає своєї актуальності, оскільки, незважаючи на здійснювані зусилля, продовжують реєструватися випадки виникнення позаштатних ситуацій, пов'язаних з обмерзанням аеродинамічних поверхонь. Для забезпечення можливості безпечної експлуатації для кожного типу літального апарату розробляється система захисту від обмерзання і проводиться його сертифікація для польоту в несприятливих метеорологічних умовах, коли є ймовірність виникнення зледеніння. При вирішенні цих завдань при розробці нових повітряних суден або модернізації існуючих систем захисту від зледеніння окрім льотних випробувань і наземних експериментів, в сучасних умовах методи чисельного моделювання стають ефективними інструментами дослідження, які дозволяють значно скоротити кількість необхідних експериментальних досліджень і, відповідно, скоротити часові та фінансові витрати.

До теперішнього часу в різних країнах розроблено ряд математичних моделей та програмних комплексів, найбільш відомими з яких є LEWICE, ONERA, CANICE та ін., що дозволяють моделювати процеси наростання криги на аеродинамічних поверхнях. Тим не менше, як правило, такі моделі мають обмежене застосування у випадку досить великих швидкостей і складних форм крижаних наростів, конфігурацій з мультитілами, не дозволяють оцінювати вплив шорсткуватих наростів криги, що утворюється, на аеродинамічні характеристики профілю, мають складнощі та обмеження при переході до задач в тривимірній постановці, містять протиріччя при описі фізичної картини процесу наростання криги. Необхідно також відзначити, що використання цих програмних продуктів може бути

N 57.08/34
25.11.2019

заборонено за межами країни-розробника, або передбачає прийняття ліцензійних умов, що містять обмеження для використання в інших країнах останніх версій продукту.

Дана дисертаційна робота спрямована на вирішення проблеми розробки програмно-методичного забезпечення, що дозволяє моделювати процеси зледеніння літальних апаратів в несприятливих метеорологічних умовах для підвищення безпеки польотів і є актуальною для України.

2. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

У дисертації та авторефераті сформульована актуальність, наукова новизна та практична цінність виконаних досліджень.

Головна мета роботи полягає у створенні 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.

У дисертації наводиться значний обсяг теоретичних напрацювань, проведених експериментальних досліджень та детальний аналіз результатів. Обґрунтованість запропонованої методики розрахунку процесу намерзання криги на обтічних поверхнях та зовнішнього повітряно-крапельного потоку і достовірність одержаних результатів підтверджується результатами власних експериментальних даних, а також співпадінням з результатами відомих експериментальних і теоретичних досліджень.

Висновки, подані у дисертації та авторефераті, відображають головні результати досліджень.

3. Наукова новизна дисертаційної роботи

1. Вперше проведені комплексні дослідження мікрофізики процесу зледеніння аеродинамічних поверхонь: виявлені нові закономірності процесу взаємодії переохолоджених крапель води з поверхнею зледеніння, процесу замерзання переохолодженої поверхневої краплі, а також мікроструктури криги, що утворюється.

2. На основі нових експериментальних даних отримала подальший розвиток традиційна методика моделювання зледеніння аеродинамічних поверхонь, що полягає в розділенні процесів утворення об'ємної структури крига-вода і подальшого повного замерзання цієї структури, що дозволяє більшою мірою враховувати надзвичайно складні для математичного опису реальні фізичні процеси.

3. Вперше до вирішення проблеми чисельного моделювання зледеніння літальних апаратів реалізовано підхід, в якому повітряно-крапельний потік описано з використанням моделі взаємопроникних середовищ в тривимірній постановці, з урахуванням шорсткості поверхні, та в якому розрахунок конвективного теплообміну виконано за визначеним температурним полем.

4. Вперше проведено систематичні дослідження в широкому діапазоні льотних і метеорологічних параметрів; результати розрахунків представлені у вигляді чотирипараметричних номограм.

4. Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблена методика та програмно-методичне забезпечення можуть бути використані поряд з експериментальними методами для чисельного моделювання процесу формування крижаних наростів з метою зменшення часових та фінансових витрат при розробці систем захисту від зледеніння та проектуванні нових типів повітряних суден.

2. Результати роботи представляють практичний інтерес та впроваджені в ДП «Антонов» (Акт впровадження від 13.09.19) та ДП КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля (Акт впровадження від 07.08.19).

3. Проведена систематизація та результати, які можуть бути отримані для літального апарату заданої форми та розмірів, дозволять швидко аналізувати небезпеку зледеніння по маршруту польоту з використанням даних про стан атмосфери, виробляти рекомендації щодо зміни плану польоту.

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

Наукові положення, висновки і рекомендації достатньо повно викладені у 39 роботах, обговорені на численних конференціях та семінарах. Із них 1 робота є главою 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.

6. Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, переліку використаних джерел, додатків. Робота включає 268 сторінок основного тексту, 110 рисунків, 13 таблиць, усього 372 сторінки. Список використаних джерел містить 228 посилань.

У вступі розкрито сутність і стан наукової проблеми, обґрунтовано важливість і актуальність теми дисертації, викладена мета роботи і сформульовані основні положення, які виносяться на захист, аргументована наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану питання. Наведено основні метеорологічні та льотні параметри, а також виконано огляд типів хмар, при польоті в яких можливе виникнення зледеніння. Описано типи криги і перераховано фактори впливу крижаних наростів на характеристики літального апарату, наведено класифікацію систем захисту від зледеніння. Виконано огляд експериментальних та теоретичних досліджень проблеми зледеніння, моделей і методів моделювання процесів зледеніння аеродинамічних поверхонь. Сформульовано основні проблеми, які виникають при розробці систем захисту від зледеніння.

За результатами огляду визначено мету роботи, обрано і обґрунтовано напрями досліджень.

Другий розділ присвячено експериментальним дослідженням процесу зледеніння. Представлені результати трьох серій експериментів, присвячених вивченню процесу кристалізації невеликих об'ємів поверхневої переохолодженої води, фізики процесу взаємодії переохолоджених крапель води, що влітають із зовнішнього потоку, із поверхнею зледеніння профілю крила, а також мікроструктури наростаючої криги.

Розкрито фізичну сутність процесів, що відбуваються під час зледеніння аеродинамічних поверхонь. Було отримано висновок, що у вологому режимі основне замерзання поверхневої рідини відбувається з боку криги, що має горбисту поверхню, причому «горбики» в процесі теплообміну відіграють роль «містків холоду». Вода на поверхні криги знаходиться в западинах між «горбиками». Зі зниженням температури «горбики» мають тенденцію до зростання і з плином часу набувають форми «стовпчиків» або «голочок». У деяких режимах при відносно невеликій від'ємній температурі і високій водності потоку, що набігає, рідина на поверхні може приймати складну просторову форму, оминаючи «горбики» криги, і переміщуючись під дією аеродинамічних сил. Однак механізм розбризкування з подальшим «підхопленням» зовнішнім потоком і «вторинним» випадінням, а також «перестрибуванням» рідини в результаті зіткнення переохолоджених крапельок із поверхнею зледеніння, є єдиним при переміщенні рідини по/уздовж поверхні в області гальмування у всьому діапазоні температур. Встановлений механізм переміщення рідини вздовж поверхні зледеніння також дає істотний внесок (а при більш низьких температурах – основний) в процес руху рідини на віддаленні нижче за потоком.

У третьому розділі наведено методику моделювання та розрахунку процесу зледеніння аеродинамічних поверхонь із розділенням процесів утворення об'ємної структури крига-вода і подальшого повного замерзання

цієї структури. Для опису процесу наростання криги було використано метод поверхневих контрольних об'ємів. Рівняння масового та теплового балансів отримано на підставі законів збереження маси, енергії і кількості руху для контрольного об'єму, розташованого на поверхні обтічного тіла.

Процес зледеніння аеродинамічної поверхні розбитий на кроки за часом, протягом яких процес наростання криги вважається квазістаціонарним, тобто всі параметри потоку, що набігає, а також масові та теплові потоки приймаються постійними протягом цього кроку і відповідними моменту його початку. Фізичні перетворення в межах кроку за часом відбуваються миттєво.

На підставі масового і теплового балансів обчислюється замерзла частка структури «крига-вода», що проходить крізь контрольний об'єм за час, маса криги, що повністю замерзла та товщина шару криги, який утворився.

У четвертому розділі розглянуто математичну модель опису руху повітряно-крапельного потоку. Наведено рівняння, що описують зовнішній потік і переохолоджені краплі води, граничні і початкові умови.

Розглянуто чисельний метод розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, а також алгоритми моделювання турбулентності. В роботі також розглянуто основні підходи до моделювання шорсткості і запропоновано використовувати модифіковану модель турбулентності Spalart-Allmaras з корекцією для шорсткої стінки.

Дискретизація усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса виконана за допомогою неявного кінцево-об'ємного методу. Для обчислення конвективних складових використана схема Roe. В'язкі доданки апроксимуються по триточковому шаблону з другим порядком точності. Блоково-матрична система алгебраїчних рівнянь вирішується ітераційним алгоритмом Гауса-Зейделя.

Основні результати роботи отримані на основі розробленого програмно-методичного забезпечення, де для опису набігаючого двофазного потоку застосована модель взаємопроникних середовищ. Рівняння, що описують несучу та дисперсні фази, пов'язані через джерельні члени, що враховують міжфазовий обмін імпульсом і енергією. Для визначення складових, що описують міжфазну взаємодію, використані результати дослідження процесів, що відбуваються при обтіканні частинки потоком газу.

В п'ятому розділі виконано тестування та верифікація розробленого програмно-методичного забезпечення. Тестування програмного блоку, що описує зовнішню течію, було здійснено на прикладі двовимірного обтікання профілю NASA 0012 під різними кутами атаки з використанням моделей турбулентності Spalart-Allmaras і DES, а також на прикладі тривимірного обтікання крила ONERA M6. Методика, яка описує процес зледеніння, була верифікована шляхом порівняння отриманих розподілів теплових і масових потоків уздовж обтічної поверхні з відомими розрахунковими даними, а

також порівнянням утворених форм крижаних наростів з результатами відомих численних експериментальних досліджень. Верифікація розробленого програмно-методичного забезпечення була також виконана шляхом порівняння результатів розрахунків аеродинамічних характеристик профілю NASA 0012, виконаних з урахуванням шорсткості поверхні з результатами експериментів.

В шостому розділі проаналізовано результати моделювання процесів зледеніння аеродинамічних поверхонь. В якості основних характерних форм криги, що наростає, в роботі виділені і розглянуті: шорсткість, «бар'ерна» крига, а також великі нарости пухкої, склоподібної або змішаної криги.

Проаналізовано вплив кожного типу криги на структуру течії та характеристики крила. Верифікація методики проведена шляхом порівняння результатів розрахунків з відомими експериментальними формами наростів криги, а також результатами проведених власних експериментальних досліджень впливу наростів криги на аеродинамічні характеристики крила з профілем NASA 0012.

На прикладі крила ONERA M6 показано, що при розгляді процесу зледеніння крил із стрілоподібністю відбувається переміщення поверхневої рідини як уздовж перетину, так і за розмахом крила. В результаті, в міру віддалення за розмахом крила збільшується об'єм рідини, яка переміщується вздовж крила, що впливає на форму наростів в порівнянні з двовимірною постановкою.

В сьомому розділі наведено загальноприйняту систему оцінки ступеня зледеніння та підходи, які використовуються при визначенні ступеню впливу зледеніння на літальний апарат. Перелічено недоліки існуючої системи оцінки та розглянуто шляхи її вдосконалення.

Як параметр, що дозволяє оцінити ступінь небезпеки польоту в заданих льотних і метеорологічних умовах, була обрана маса криги, накопиченої на одиниці довжини обтічного крила, протягом певного часового інтервалу. На прикладі профілю NASA 0012 проведені дослідження в широкому діапазоні параметрів: швидкості, температури, виводності набігаючого потоку в умовах, відповідних польоту в шаруватих і купчастих хмарах. Результати розрахунків представлені у вигляді чотирипараметричних номограм. Ступінь небезпеки і передбачувану реакцію пілота запропоновано оцінювати за допомогою системи, співвіднесеної з правилами, прийнятими Федеральним управлінням цивільної авіації США, в залежності від ступеня зледеніння.

7. Зауваження

За текстом дисертації вважаю за необхідне зробити наступні зауваження:

1. В першому розділі забагато уваги приділено розгляду типів хмар, опису метеорологічних умов, в яких можливе виникнення зледеніння та ілюстративному матеріалу.

2. В роботі доцільно було б розглянути можливі варіанти аналітичного розв'язання задачі моделювання зледеніння аеродинамічних поверхонь.

3. В тексті дисертації при описі чисельного методу розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса схема дискретизації системи рівнянь приведена поверхнево.

4. В дисертації не наведено дослідження стійкості рішення кінцево-об'ємним методом розглянутої задачі.

5. При розгляді алгоритму чисельного моделювання процесу зледеніння недостатньо обгрунтовано вибір раціональної величини кроку за часом наростання криги.

6. Із тексту дисертації не зовсім зрозуміло причини, через які автором було прийнято рішення не застосовувати в запропонованій методології метод від'єднаних вихорів DES при моделюванні турбулентності.

7. Експериментальні дослідження аеродинамічних характеристик профілю крила NACA0012 з імітованими наростами криги, результати яких наведено в п. 6.6.1, були проведені для моделі крила, що має довжину хорди 0,2 м, у той час, як самі нарости криги були отримані на профілі з довжиною хорди 0,53 м.

8. В п.7.5 при оцінці ступеню небезпеки зледеніння на літальний апарат окрім маси накопиченої криги варто було б враховувати також вплив крижаного наросту на аеродинамічні характеристики, вірогідність виникнення вібрацій та втрату стійкості літального апарату.

Слід зазначити, що перераховані зауваження та пропозиції не зменшують наукову та практичну цінність одержаних результатів та не змінюють загальної позитивної оцінки роботи.

8. Висновки щодо дисертаційної роботи

Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обгрунтовані результати, що у сукупності є важливими для розвитку авіаційної галузі. Оформлення дисертації у цілому відповідає чинним вимогам. Автореферат відповідає змісту дисертації.

Вважаю, що дисертація Алексеєнка Сергія Вікторовича «Науково-методологічні основи моделювання зледеніння аеродинамічних поверхонь літальних апаратів» задовольняє 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 гідний присудження йому наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Професор кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення Університету митної справи та фінансів МОН України
доктор технічних наук професор

В.О.Яковенко

„12” 11 2019 р.

Підпис офіційного опонента

доктора технічних наук професора Яковенка В.О. засвідчую.

Вчений секретар Вченої ради Університету митної справи та фінансів

Кандидат наук з державного управління, доцент

Т.М. Брус

„12” 11 2019 р.



В.О. Яковенко

Підпис Т.М. Брус засвідчую

Начальник відділу кадрів

засв.



Господар Т.