

КИЇВСЬКИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

На правах рукопису

КОЗЛОВА Тетяна Володимирівна

ФІЗИЧНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЙ ВОДЯНИХ
ПЛІВОК НА ПОВЕРХНЯХ ЗЛІТНО-ПОСАДОЧНИХ СМУГ ТА
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

05.07.01 - Аеродинаміка та процеси теплообміну
літальних апаратів

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на одбуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 1996

ДВ 34.300

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському міжнародному університеті цивільної авіації.

Наукові керівники: доктор технічних наук, професор
ВЛОХІН В.І.
доктор фізико-математичних наук, професор
МОВЧАН В.Т.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ЯХНО О.М.,
кандидат фізико-математичних наук, с.н.с.
ГАСВ Є.О.

Провідна організація: Науково-дослідний інститут
технічної теплофізики НАН України
(м. Київ).

Захист відбудеться "24" квітня 1996 р. о 14³⁰ години
на засіданні спеціалізованої ради К 01.35.05 при Київському
міжнародному університеті цивільної авіації.

Адреса: 252058, Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, КМУЦА.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці КМУЦА.

Автореферат розісланий "21" березня 1996 року.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
кандидат технічних наук

Баслакова А.Г.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00740364 (0)

Стефаника
ЛННБ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найважливішою проблемою експлуатації авіаційного транспорту є забезпечення безпеки польотів, яка значною мірою визначається впливом на літальний апарат (ЛА) несприятливих метеорологічних факторів, зокрема, інтенсивних опадів. Останні роки характеризуються підвищенням інтересу до вивчення впливу дощових опадів на аеродинамічні та динамічні характеристики ЛА як в Україні, так і за її межами. Ця проблема є особливо важливою при розробці і експлуатації як легких та надтолегких, так і важких та надтоважких ЛА. Необхідність вивчення впливу оливи на характеристики ЛА підтверджується результатами аналізу ряду авіаційних катастроф, пов'язаних з погодними умовами. В програмі дослідних та експериментальних робіт по ЛА NASA (США) серед напрямків досліджень, визначених як актуальні і перспективні, міститься проблема вивчення впливу сильного дощу.

Несприятливий вплив дощу на характеристики літака збільшується на етапах розбігу та пробігу внаслідок формування шару водяної плівки на поверхні олітно-посадочної смуги (ЗПС). Згідно матеріалів Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) мокра ЗПС є однією з причин скатування та викатування літака при розбігу та пробігу. Традиційно, з метою зменшення цього небажаного впливу використовується поперечний ухил ЗПС, який забезпечує стік води з її поверхні. В теперішній час вимоги до відведення води з поверхні ЗПС підвищуються. Оскільки існуючі методи організації відведення води не можуть забезпечити осушення поверхні до рівня, що вимагається, тому проблема залишається невирішеною. Формули для визначення товщини шару стоку, що використовуються в розрахунках, є, значною мірою, емпіричними та принципом побудови і приводять до результатів, які не завжди угоджуються один з одним, а також з відомими експериментальними даними в широкому діапазоні умов, що представляють інтерес. В зв'язку з цим можливо зробити висновок про необхідність удосконалення існуючих підходів до опису формування стоку.

Для всебічного обґрунтування ухилів, що призначаються, необхідні не лише сучасні математичні моделі стоку, але й дослідження впливу ухилу на траєкторію руху ЛА по ЗПС. З проблемою обґрунтування величини ухилу також тісно пов'язано вивчення та моделювання впливу вітру на формування плівки води на ЗПС. В матеріалах ІКАО відмічається важливість урахування цього фактору як під час повсякденної експлуатації існуючих аеродромних покриттів, так і при виборі типа поверхні для будівництва нових ЗПС.

Актуальність розробок теоретичних моделей стоку, які враховують з необхідною точністю вплив характеристик мікрорельєфа покриття, а також несприятливу дію метеорологічних факторів (інтенсивність дощу та швидкість вітру) може бути обґрунтована також потребою в побудові табличних та орієнтованих на використання ЕОМ методів для експрес-оцінок коефіцієнту очеплення за даними плинної метеорологічної інформації, що є необхідним для забезпечення належного рівня безпеки польотів сучасної авіаційної техніки. Запорукою успіху побудови теоретичних моделей є усвідомлення розуміння фізичних процесів, які відбуваються в шарі стоку, та притаманних їм кількісних закономірностей. Це обумовлює актуальність узагальнення відомої експериментальної інформації, проведення необхідних експериментальних досліджень та побудови на цій основі фізичних моделей явища, яке досліджується.

Таким чином, задачі моделювання вільно- та вимушеноконвективних течій водяних плівок з урахуванням впливу шорсткості поверхні, що обтікається, дії зовнішніх факторів, турбулентності є актуальними в теперішній час як в теоретичному плані, так і в прикладному. Крім того, на підставі викладеного вище можна стверджувати, що проблема вивчення та побудови моделей впливу інтенсивних опадів на аеродинамічні та динамічні характеристики ЛА повинна розглядатись як комплексна шляхом дослідження та опису процесів, які відбуваються не лише на поверхні ЛА, але й на ЗПС.

Метою роботи є: -розробка більш сучасних, ніж існуючі, фізичних та математичних моделей формування течій водяних плівок на поверхнях ЗПС та ЛА на основі рівнянь руху в'язкої рідини, теорії прибережного шару, сучасних півемпіричних моделей турбулентності, детального опису взаємодії течії води в плівках з елементами шорсткості поверхні, а також з повітряним потоком через межу розподілу фаз; -проведення багатофакторного фізичного експерименту по визначенню характеристик вільноконвективної гравітаційної течії водяної плівки по похилій шорсткій поверхні, яка імітує поверхню ЗПС в діапазоні величин ухилу поверхні, що обтікається ($i=0.005-0.025$) та інтенсивності опадів ($a=0.46-2.7$ мм/хв); -побудова на цій основі ефективних розрахункових методів, що забезпечують необхідну точність.

Наукову новизну роботи складають розроблені фізичні та математичні моделі течій водяних плівок на поверхнях ЗПС та ЛА, а також нові експериментальні результати в широкому діапазоні факторів, вплив яких вивчається.

Положення, що виносяться на захист:

- результати дослідження впливу поперечного ухилу як геометрично-

го параметру ЗПС на рух літака по ній при виконанні злітно-посадочних операцій;

- комплекс експериментальних результатів, що характеризують вплив ухилу шорсткої плоскої обтікаємої поверхні та інтенсивності дощових опадів на товщину водяної плівки в шарі стоку;

- математична модель і відповідний їй метод розрахунку вільноконвективної гравітаційної турбулентної течії води в шарі стоку дощових опадів, що формується на похилій плоскій поверхні, середня висота шорсткості якої того ж порядку, що й товщина водяної плівки;

- математична та фізична моделі турбулентної течії водяної плівки по похилій шорсткій плоскій поверхні, які враховують вплив повітряного потоку, направлено в ту ж сторону, що й ухил або в протилежну йому сторону, відповідний розрахунковий метод;

- математична модель вимушеноконвективної ламінарної течії водяної плівки на гладкій поверхні при наявності сунутньої турбулентної течії газу, що враховує особливості взаємодії фаз через межу їх розподілу хвильової структури. Реалізація цієї моделі в інтегральному розрахунковому методі;

Практична цінність роботи полягає в тому, що одержані результати є теоретичною основою для розв'язку прикладних задач моделювання аеродинамічних характеристик елементів ЛА з урахуванням впливу оливи, а також дослідно-теоретичною базою для розв'язку задач призначення та обґрунтування поперечних ухилів при проектуванні та реконструкції ЗПС. Крім того, практичне значення одержаних в роботі результатів полягає в можливості їх використання для розробки табличних або базованих на використанні ЕОМ екс.прес-методів оцінки величини коефіцієнту зчеплення по даним плинної метеорологічної інформації.

Методи досліджень. Результати роботи одержані з використанням: теорії прилежового шару, півемпіричної теорії турбулентності, методів чисельного моделювання та чисельного експерименту, а також теорії планування експерименту, методів статистичної обробки експериментальних даних, в тому числі методу найменших квадратів.

Впровадження результатів досліджень здійснено в формі розрахункових методик, програмного забезпечення та експериментального устаткування в АТ "Тісма" та міжгалузевому НДІ проблем механіки "Ритм".

Достовірність наукових результатів. Достовірність теоретичних результатів роботи підтверджена порівнянням виконаних розрахунків з відомими в літературі експериментальними та теоретичними результатами ряду авторів, які одержані іншими розрахунковими методами в основі різних моделей, а також порівнянням з даними власних експери-

ментів. Коректність одержаної в роботі експериментальної інформації обгрунтована результатами відповідної статистичної обробки. Розроблене експериментальне устаткування оахищено двома авторськими свідоцтвами N 1606939, 1654666.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 8 друкованих робіт.

Апробація роботи. Результати досліджень, що представлені в дисертаційній роботі, доповідались автором та обговорювались на: - науково-технічних конференціях КПЦА (Київ: 1987, 1988 рр.); - Всесоюзній науково-практичній конференції по безпеці польотів "Безпека польотів та профілактика авіаційних подій" (Ленінград: ОЛІАЦА, 1988 р.); - IV науковій конференції вчених Росії, Белорусії, України "Прикладні проблеми механіки рідини та газу" (Севастополь: Держтехуніверситет, 1995 р.); - Всеукраїнській науковій конференції "Застосування обчислювальної техніки, математичного моделювання та математичних методів у наукових дослідженнях" (Львів: Держуніверситет, 1995 р.); - Міжнародній конференції "Розвиток легкомоторної авіації" (Київ: КМУЦА, 1995 р.); - Міжнародній науково-технічній конференції "Динаміка систем, механізмів і машин" (Омськ, 1995 р.); - науковому семінарі інституту технічної теплофізики НАН України (Київ: 1996 р.); наукових семінарах кафедр аеропортів, вищої математики, аеромеханіки та динаміки польоту ЛА (Київ, КПЦА, КМУЦА, 1987-1996 рр.).

Структура і обсяг роботи. Робота складається з вступу, п'яти глав, вилучення, списку літератури, що містить 137 назв та двох додатків. Зміст роботи викладено на 158 сторінках машинописного тексту, вміщує 9 таблиць, 42 рисунка.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність теми, визначено проблематику та мету досліджень, викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено стислий зміст дисертаційної роботи.

В першій главі проведено аналіз течій, що є предметом досліджень, в'ясовано, що ці течії можна класифікувати як: - вільноконвективні, які розвиваються під дією гравітаційних сил (у випадку формування водняних плівок на поверхні ЗПС); - вимушеноконвективні, які розвиваються внаслідок дії напружень тертя, що виникають на зовнішній поверхні плівки завдяки супутньому газовому потоку (в разі формування плівок на поверхнях ЛА); - а також проміжний вид течії, в якому сили тертя та гравітаційні сили мають однаковий порядок (у випадку розвитку течії води на похилій поверхні ЗПС в одночасною дією вітру, супутнього або протилежно спрямованого відносно ухилу). Обгрунтовано, що водянні плівки на

поверхнях ЗПС є турбулентними в широкому діапазоні умов їх формування, тоді як плівки води, що розвиваються на поверхнях літальних апаратів під впливом супутнього повітряного потоку, є ламінарними з хвильовою поверхнею межі розподілу фаза. Повітряний потік у всіх випадках, які досліджуються в роботі, є турбулентним. Показано, що поверхню ЗПС слід розглядати як надто шорстку з такою середньою висотою шорсткості, яка має той самий порядок, що й товщина водяної плівки. В той же час поверхня літальних апаратів з точки зору розвитку на ній вимушеноконвективної течії водяної плівки є гідравлічно гладкою.

На основі проведеного критичного огляду робіт по дослідженню течій водяних плівок встановлено наступне. 1) Існуючі розрахункові гідравлічні підходи до моделювання характеристик течій водяних плівок на шорстких поверхнях з ухилом не є в достатньому ступені універсальними і теоретично обґрунтованими, в зв'язку з чим допускають розбіжності при однакових розрахункових умовах в 10 та більше відсотків. Крім того, ці підходи не допускають можливості узагальнення на більш складні умови розвитку течії рідини, наприклад, на урахування впливу вітру, а також, як правило, мають обмежений діапазон використання. 2) Експериментальна інформація, одержана по цим течіям, досить обмежена, а іноді й суперечлива, що зумовлює необхідність проведення моделювання на фізичному рівні в межах ухилів поверхні $i = 0.005 - 0.025$ та інтенсивності опадів $a = 0.46 - 2.7$ мм/хв, який є цікавим в практичному відношенні стосовно задач проектування нових та реконструкції діючих ЗПС. В зв'язку з цим обґрунтована необхідність проведення досліджень в напрямку удосконалення експериментального обладнання. 3) Існуючі чисельні методи розрахунку змущеноконвективних течій з межею розподілу фаза (рідина-газ) хвильової структури є досить трудомісткими та громіздкими, головним чином із-за труднощів моделювання і проведення чисельних розрахунків характеристик супутнього газового потоку. Тому доречно адаптація інтегральних методів розрахунку турбулентних примежевих шарів до розрахункового випадку, що має відношення до формування течій на поверхнях ЛА. 4) Розробка математичної моделі та методу розрахунку турбулентних течій плівок рідини на похилій шорсткій поверхні, в яких сили тертя, зумовлені впливом вітру, мають однаковий порядок з гравітаційними силами, є цікавою в науковому відношенні і важливою в прикладному аспекті проблемою. В зв'язку з труднощами узагальнення існуючих гідравлічних моделей на цей розрахунковий випадок з'ясована доцільність побудови математичної моделі течії водяної плівки на похилій шорсткій поверхні на базі теорії примежевого шару та класичних півемпіричних моделей турбулентності з врахуванням в її

рамках впливу дії вітру. 5) На підставі проведеного аналізу рівних розрахункових моделей та схем руху ЛА по ЗПС в'ясована необхідність їх доробки з метою коректного врахування впливу поперечного ухилу як геометричного параметру ЗПС на траєкторію руху по ній ЛА.

Здобуті в першій главі результати дозволили обгрунтувати мету та виначити задачі досліджень дисертаційної роботи.

Друга глава присвячена дослідженням впливу поперечного ухилу ЗПС як геометричного параметру на траєкторію руху ЛА по ній. На підставі аналізу статистики авіаційних подій виначено, що найбільш несприятливим розрахунковим випадком є посадка літака, яка відбувається при максимально принудимій швидкості бокового вітру в середньостатистичним відхиленням B_1 центру мас ЛА від осі ЗПС в протилежну до напрямку вітру сторону в момент торкання ЗПС. Аналіз декількох розрахункових схем траєкторії руху ЛА по ЗПС дозволив запропонувати для подальших досліджень розрахункову схему руху літака після торкання ЗПС, що вміщує наступні три етапи: – торкання ЗПС в деяким відхиленням від її осі; – розвертання літака внаслідок попадання однієї з його основних опор на ділянку ЗПС зі зменшеним коефіцієнтом очіщення (на протязі 0.5 с); – боковий некерований рух, який триває 3 с та приводить до збільшення відхилення літака від осі ЗПС на величину B_3 . Наступний рух вважається керованим таким чином, що подальше збільшення відхилення ЛА від осі ЗПС припиняється. Величина відстані крайнього від осі ЗПС колеса основної опори літака від осі ЗПС виначається як сума бокових відхилень B_1, B_3 , відстані між площиною симетрії ЛА та найбільш віддаленим від неї колесом основної опори $B_{ш}/2$, та впа-су C , що привначається нормами проектування аеродромів.. Подвоєне значення цієї величини й розглядається як цотребна ширина ЗПС, то-бто $B_i = 2(B_1 + B_3 + B_{ш}/2 + C)$. Умоєю безпеки руху літака по ЗПС є наступне $B_i \leq B_{норм}$, де $B_{норм}$ – нормативна ширина ЗПС. Розро-блена математична модель, яка описує особливості кожного з виначених вище етапів та враховує вплив ухилу ЗПС і на рух літака, дозволила о'ясувати, що збільшення ухилу приводить до збільшення бокового відхи-лення від осі ЗПС. Викопаний аналіз для різних типів літаків, а саме для Іл-86, Іл-62, Ту-154, Ту-134, Ан-24 в широкому діапазоні несприятливих співвідношень розрахункових умов довів, що поперечний ухил в межах $0 \leq i < 0.03$, які означно перевищують величини, що практично вико-ристовуються для ЗПС, не є причиною зменшення рівня безпеки руху літака по ЗПС. На цій підставі зроблено висновок про те, що попереч-ний ухил поверхні, як геометрична характеристика ЗПС, в практичному діапазоні величин $i < 0.03$ не впливає негативним чином на динамічні

характеристики ЛА, навіть в разі наявності на ЗПС калу к або п'ятев льоду. Таким чином, вплив ухилу ЗПС на рух літака проявляється виключно через формування стоку дощових опадів, на який ухил впливає безпосередньо, що й визначило стік як об'єкт подальших досліджень.

Третя глава висвітлює результати експериментального дослідження властивостей вільноконвективної течії водяної плівки в шарі стоку дощових опадів на шорсткій похилій плоскій поверхні, що імітує поверхню ЗПС. Метою цього дослідження є визначення товщини водяної плівки в залежності від довжини формування стоку L , ухилу поверхні i та інтенсивності дощових опадів a . Розглянуті постановка, планування та проведення експерименту, а також обробка одержаних результатів та їх аналіз. Аналіз стратегії проведення експериментальних досліджень інших авторів та використаного ними експериментального устаткування дозволив обґрунтувати необхідність постановки активного фізичного експерименту, тобто такого, який повинен бути незалежним від погодних умов та забезпечував би можливість як швидкої зміни, так і підтримання на заданому рівні величин факторів, що умовляють процес формування стоку дощових опадів (i , a). Це умовило відмову від проведення натурального фізичного дослідження та визначило вимогу постановки модельного експерименту та розробки відповідного експериментального стенду. Крім того, потреба забезпечення швидкого визначення товщини водяної плівки в будь-якому перерізі шару стоку привела до необхідності розробки мобільного вимірного датчика.

Аналіз практичних потреб, до яких має відношення дисертаційна робота, а також реальних умов розвитку течій, що досліджуються, зокрема інтенсивностей опадів, хилів поверхні, дозволив виконати планування експериментального дослідження i , перш за все, визначити наступні діапазони та рівні цих величин, цікаві в прикладному відношенні: ($a = 0.47, 0.84, 1.48, 2.66$ [мм/хв], $i = 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025$). Одержані величини дали змогу цілеспрямовано проаналізувати відомі принципи імітації дощу, вимірів ухилу поверхні і інтенсивності опадів та обґрунтовано розробити експериментальний стенд, який включає наступні основні елементи: стокову площадку з цементно-бетонним покриттям, що має змогу обертатися навколо осі, та зв'язана з датчиком кута - селсіном; гідравлічну систему, що забезпечує імітацію дощових опадів на поверхні стокової площадки; обладнання для визначення інтенсивності опадів; датчик товщини водяної плівки та пристрій цифрової та світлової індикації. Стисла технічна характеристика устаткування наведена нижче. Стокова площадка: довжина в напрямку стоку - 4 м^2 ; ширина - 2 м^2 ; середня висота шорсткості покриття $\Delta = 1.7 \pm 0.1 \text{ мм}$ (визначена методом

піщаного п'ятна); діапазон кутів ухилу $0 - 5^\circ$; спосіб реєстрації показань - дистанційний, цифровий. Дощовальна система: принцип роботи - форсуночне рообригування води в горизонтальному напрямку двома пристроями, розташованими один назустріч другому по рівні сторони стокової площадки; цикл циркуляції води - замкнений; характеристики рообригування - рівномірне на площі поверхні, що зрошується із спектром діаметрів крапель, близьким до реального дощу; діапазон інтенсивностей - $0.35-2.7$ мм/хв. Датчик товщини водяної плівки: принцип дії - електромеханічний, заснований на замиканні водяною плівкою електричних контактів датчика, розташованих на рівній відстані від його базової поверхні; вимірний діапазон становить $0.2-5$ мм з дискретністю $0.2-0.3$ мм залежно від товщини водяної плівки; розташування датчика відносно поверхні - в будь-якому місці стокової площадки; спосіб реєстрації показань - дистанційний, світловий, безінерційний. Обладнання для визначення інтенсивності дощових опадів: мірний стакан, секундомір.

Аналіз проблем інтерпретації та обробки результатів експериментів інших дослідників дозволив обґрунтувати необхідність проведення вимірів товщини водяної плівки в багатьох перерізах шару стоку уздовж напрямку його розвитку з метою мінімізації впливу помилок, зумовлених дискретним принципом вимірювання датчика, в зв'язку з чим в діапазоні $L = 0.25-4$ м було призначено 25 рівней L розташованих на відстані 0.15 м один від одного. Це обумовило відмову від проведення дробного факторного експерименту. Таким чином, експеримент по визначенню $h = f(L, i, a)$ є повним трьохфакторним з несиметричним планом, який був реалізований шляхом послідовного перебору рівней факторів в наступній послідовності: довжина стоку, ухил поверхні, інтенсивність опадів, причому в кожній крапці факторного простору проводилось від 5 до 10 повторних вимірів в різних перерізах шару стоку по його ширині. Загальний обсяг одержаної статистичної інформації склав 3835 вимірів, які були виконані в 490 точках факторного простору. При проведенні кожного виміру реєструвався номер останнього замкненого електроду, причому крім двох стаціонарних станів електродів, тобто постійного замкнення та постійного розімкнення були зафіксовані два нестационарних стани: рідкого розімкнення та рідкого замкнення електроду. Аналіз процесу проведення виміру товщини водяної плівки з урахуванням нерегулярної хвильової структури її поверхні дозволив зробити висновок про те, що з метою мінімізації помилок, зумовлених дискретністю датчика, інформативним слід вважати показання того електроду, який знаходиться в стані рідкого замкнення, або, при його відсутності, електроду, який допускає рідке розімкнення. При відсутності електродів з нестационарним станом роботи

інформативним є останній замкнений електрод.

З метою обробки результатів експериментального дослідження був використаний метод найменших квадратів (МНК), коректність вастосування якого по відношенню до одержаного статистичного матеріалу була обгрунтована. Зокрема, завдяки використанню критерія Бартлета була доведена однородність дисперсій вимірюваної величини в різних крапках факторного простору, а на підставі аналізу вимірів a , i , L зроблено висновок про те, що фактори експерименту можуть розглядатись як невідповідні та некорельовані величини, які можна підтримувати на заданому рівні на протязі необхідного часу.

Вид моделей регресії визначений на базі аналізу досвіду інших авторів, що був накопичений до теперішнього часу по побудові гідравлічних моделей стоку дощових опадів в похилих поверхнях. Результати використання МНК в двома формами рівняння регресії довели, що найбільш простою і одночасно адекватною експериментальним даним є така модель регресії

$$\bar{h} = 0.0774 (a L)^{0.592} i^{-0.316} \quad (1)$$

Статистичний аналіз дозволив одержати оцінки меж довірчого інтервалу визначення h на підставі (1): $h = \bar{h} \pm \Delta h$, де $\Delta h = 0.213 - 0.265$ мм, що є співставним з кроком виміру h датчиком - (0.2-0.3) мм. Адекватність моделі (1) результатам експерименту була обгрунтована на підставі критерію Фішера, а аналіз знайдених значень коефіцієнтів регресії довів, що вони знаходяться в діапазонах, які визначені для аналогічних коефіцієнтів шляхом зіставлення багатьох моделей інших авторів. Це є підставою для висновку, що одержана модель регресії, а також використані для її визначення експериментальні дані не суперечать іншим моделям стоку дощових опадів, але, на відміну від них, одержана модель апроксимує результати дослідів по визначенню $h = f(L, i, a)$ в більш широкому діапазоні ухилів поверхні та інтенсивностей дощу, які є цікавими для розв'язку рівноманітних практично важливих задач будівництва ЗПС та доріг. Завдяки цьому, одержані результати в формі рівняння регресії будуть вастосовані як тест для перевірки подальших теоретичних рообок, викладення яких складає зміст наступної глави.

Четверта глава присвячена побудові математичної моделі вільноконвективної течії шару стоку дощових опадів, що формується на похилій шорсткій плоскій поверхні. Метою цього теоретичного дослідження є рообка такої моделі, яка б була значно більш універсальною та теоретично обгрунтованою, ніж існуючі, та завдяки цьому не мала б обмежень діапазону по a , i , та, перш за все L , що завжди суттєві для моделей, одержаних шляхом обробки емпіричної інформації. Основу побудови

математичної моделі складають наступні рівняння.

1) Рівняння руху в'язкої рідини, в якому врахована дія сили тяжіння та нехтується конвективними членами, дифузійною узадовж напрямку розвитку течії та відсутній градієнт тиску

$$\frac{1}{\rho_L} \frac{\partial \tau}{\partial y} = -g \sin i, \quad (2)$$

де ρ_L - густина рідини (для води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$), τ - напруження тертя в шарі стоку, y - координата, яка нормальна до площини поверхні, що обтікається, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння.

2) Рівняння для визначення напружень тертя при турбулентному режимі течії рідини (формула Бусінеска, в якій нехтується молекулярною в'язкістю)

$$\tau = \rho_L \nu_{tL} \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (3)$$

де $u = u(y)$ - подовжна швидкість течії в шарі стоку на відстані y від базової площини, за яку прийнята та площина, з якої беруть початок елементи шорсткості поверхні, що обтікається.

3) Формула для визначення турбулентної в'язкості ν_{tL}

$$\nu_{tL} = l v_*, \quad (4)$$

де $l = ky$ - довжина путі змішування, k - стала Кармана, v_* - динамічна швидкість, яка визначається як $v_* = \sqrt{\tau_w / \rho_L}$, τ_w - дотичне напруження при $y = 0$.

Рівняння (2,3,4), з врахуванням зроблених в них припущень, використовуються, починаючи з деякої відстані y_* від площини, що прийнята за базову.

4) Рівняння, що виражає баланс притоку маси води в шар стоку з дощовими опадами та витрати через поперечний переріз водяної плівки, який знаходиться на відстані L від початку формування стоку

$$h = \frac{al}{v_{cp}} - y_*, \quad v_{cp} = \frac{Q}{(h + y_*)}, \quad (5)$$

де v_{cp} - середня швидкість водяної плівки по її поперечному перерізу, Q - витрата обсягу води.

Інтегрування (2) дозволило визначити розподіл дотичних напружень по товщині водяної плівки при $y > y_*$, а при $y \leq y_*$ зроблене припущення про постійність напружень тертя. Таким шляхом був одержаний наступний вираз $\tau = \rho_L g h \sin i (1 - (y - y_*)/h)$ при $y > y_*$, який при

$y \leq y_s$ трансформується до вигляду $\tau = \rho_L gh \sin i$. Останнє рівняння дозволило визначити динамічну швидкість як

$$v_s = \sqrt{gh \sin i}; \quad (6)$$

а використання виразу для розподілу τ при $y > y_s$ разом з (3, 4) дало можливість одержати наступний вираз для профілю швидкості в формі запису, що наближена до виразу, запропонованого Нікурадзе

$$u_{\text{лог}}^+ = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{\Delta} - \frac{1}{hk} (y - y_s \ln y^+) + B, \quad (7)$$

де $u^+ = v/v_s$, $y^+ = yv_s/\nu_L$ - швидкість та нормальна координата в омінних "закоу стінки", B - стала логарифмічного закоу. Для опису розподілення швидкості в діапазоні $y < y_s$ використано лінійну апроксимацію $u^+ = u_{\text{лог}}^+(y/y_s)$, що задовольняє межевій умові прилипання при $y = 0$ та повністю замикає побудову профілю швидкості. Згідно підходу, що був запропонований Є.О. Шкваром, були одержані вирази для розрахунків витрати обсягу рідини з урахуванням захарачення потоку шорсткістю поверхні завдяки використанню функції захарачення $\beta = (y/\Delta)^p$ при $y \leq \Delta$, та $\beta = 1$ при $y > \Delta$, де p - показник степеня, величина якого дозволяє врахувати характер зміни поперечних розмірів елементів шорсткості по z висоті. В зв'язку з кусочно-неперервним видом функцій $u(y)$ та $\beta(y)$ товщину водяної плівки умовно розділено на три зони, що позначені як ("s"; "in", "out") та відповідають наступним діапаонам "s" - ($0 \leq y \leq y_s$), "in" - ($y_s < y \leq \Delta$), "out" - ($\Delta < y \leq h$). Крім того, залежно від співвідношення товщини водяної плівки та середньої висоти шорсткості, виділено дві ділянки шару стоку, які відповідають наступним умовам 1 - $h \leq \Delta$, та 2 - $h > \Delta$. Таким чином, інтегрування виразу $Q_n = \int_{y_{1n}}^{y_{2n}} \beta(y)u(y)dy$ в межах $y_{1n} - y_{2n}$ кожної з виділених вище зон

(де n - позначення відповідної зони) привело до розрахункових виразів $Q_n = f(h, y_s, \Delta, p, k, B, v_s(i), \nu_L)$, конкретний вид яких відрізняється залежно від конкретної з визначених вище ділянок та зон шару стоку. Сумарна витрата Q розраховується наступним чином

$$Q = Q_s + Q_{\text{in}} + Q_{\text{out}}. \quad (8)$$

Таким чином, формули (5, 6, 8) складають систему нелінійних алгебраїчних рівнянь, що дозволяє розрахувати v_{cp} і h як функції інтенсивності опадів a , довжини стоку L , ухилу поверхні i , характеристик шорсткості Δ, p та властивостей рідини ν_L . Розв'язок цієї системи не складає труднощів в разі необхідності визначення v_{cp} , коли задана

товщина водяної плівки h , що досягається шляхом підстановки h в (6, 8), а значення Q – в формулу для v_{cp} (5). В разі необхідності знаходження h при заданих a , L , i для розв'язку цієї системи вистосовувався ітераційний метод, в якому з метою підвищення обігу використовувалась нижня релаксація, коефіцієнт якої дорівнював 0.5 – 0.7.

Остаточне замикання одержаної системи полягає в визначенні значень k , B , p , y_s . Стала Кармана була прийнята $k = 0.45$ згідно даним, одержаним О.Д. Альтшулем. Величина y_s була призначена як функція характеристик шорсткості на підставі геометричного підходу до знаходження віртуального початку розвитку течії при умовній заміні шорсткої поверхні гладкою, що привело до виразу $y_s = (p/(p+1))\Delta$. Значення p та вид функції $B = f(\Delta v_s/\nu_L)$ були знайдені шляхом проведення чисельного експерименту з використанням даних експериментів ряду авторів, в тому числі і автора дисертаційної роботи, що стосуються течій плівок дощових опадів уздовж похилих поверхонь з бетонним покриттям. Цей експеримент привів до наступних результатів: $p = 0.2 - 0.3$, $B = 5.75 + 2.75 \tanh(\ln(\Delta v_s/\nu_L))$. Одержана залежність для B ілюструється рис. 1 (лінія 3). Вона співпадає з експериментальними результатами Нікурадзе (лінія 1) для режимів гідравлічної гладкості та розвиненого впливу шорсткості, але на відміну від емпіричної функції Нікурадзе є монотонною в межах перехідного режиму впливу шорсткості, що є характерним для технічної шорсткості. Прикладом залежності $B = f(\Delta v_s/\nu_L)$ для технічної шорсткості є результати експериментів В.М. Михайлова, Г.М. Ткачука – рис.1 (лінія 2).

На рис. 2 виконано зіставлення розрахунків середньої швидкості шару стоку $v_{cp} = f(h)$ на базі розробленої моделі (суцільна лінія) з експериментальними даними Л.Т. Абрамова, які охоплюють діапазон $0 \leq h \leq 9$ мм (крапки), та з розрахунками по дев'яти найбільш поширених формулах інших авторів (Манінга, В.М. Гончарова, М.М. Павловського, І.І.Агроскіна, О.Д. Альтшуля, А.В. Полякова, Burke та інших), що були виконані для умов цих експериментів $i = 0.01$, $\Delta = 0.3$ мм (штрихові лінії). Це зіставлення довело несуперечність одержаних результатів по відношенню як до експериментальних даних, так і до шести з дев'яти використаних розрахункових формул. По відношенню до решти формул розроблений теоретичний підхід довів в цих умовах свою перевагу.

Результати використання розробленої моделі з метою визначення залежності $h = f(L, a)$ демонструються рис. 3, де зображені розрахунки h (суцільна лінія 5), що відповідають умовам проведення експериментів ІСАО ($i = 0.01$, $\Delta = 2$ мм, $a = 0.212 - 1.058$ мм/хв, $L = 0 - 42$ м) – крапки. Штрихові лінії зображують розрахунки, що виконані по фор-

мулах І.А.Агроскіна (лінія 1), М.М. Павловського (лінія 2), Вугке (лінія 3), В.М. Гончарова (лінія 4). Рис. 4 зображує одержані за розробленим теоретичним підходом профілі швидкості, що відповідають умовам розрахунків рис. 3 в декількох перерізах шару стоку, позовджна координата L кожного з яких приведена над відповідним до неї профілем. Рис. 5 ілюструє віставлення розрахунків $h = f(L, i)$ на базі побудованої математичної моделі з даними експериментального дослідження автора ($a = 2.66$ мм/хв, $\Delta = 1.7$ мм, $i = 0.005 - 0.025$, $L = 0 - 4$ м), а також з розрахунками для цих умов по формулах інших авторів. На рис. 6 приведені результати розрахунків розподілів швидкості, що відповідають умовам цих експериментів. Позначення на рис. 5, 6 ті ж самі, що на рис. 3, 4.

Приведені результати демонструють перевагу розробленої математичної моделі над моделями інших авторів та відсутність протиріччя отриманих теоретичних результатів як одержаним експериментальним даним, так і даним ІСАО. Адекватність математичної моделі з результатами описаного вище експериментального дослідження статистично обґрунтована за допомогою критерія Фішера.

В п'ятій главі наведені результати теоретичних розробок, що стосуються моделювання течії водняних шлівок, формування яких відбувається, значною мірою, під впливом напружень тертя на зовнішній поверхні водняної плівки, зумовлених повітряним потоком. Розглянуто два розрахункових випадки. Перший з них стосується моделювання течії водняної шлівки в шарі стоку, що розвивається на похилій плоскій шорсткій поверхні під впливом поперечного до осі ЗПС вітру. Для побудови цієї моделі виконано узагальнення результатів, висвітлених в главі 4 шляхом врахування ненулевих дотичних напружень τ_{out} на зовнішній поверхні плівки при побудові виразів для розподілів $\tau(y)$ та $u(y)$, що привело до наступних модифікацій:

$$\tau = \begin{cases} \tau_{out} + \rho_L gh \sin i (1 - (y - y_s)/h), & \text{при } y > y_s, \\ \tau_{out} + \rho_L gh \sin i, & \text{при } y \leq y_s, \end{cases}$$

$$v_s = \sqrt{\tau_{out}/\rho_L + gh \sin i},$$

$$u_{\text{кор}}^+ = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{\Delta} - \frac{\varphi}{hk} (y - y_s \ln y^+) + B, \text{ де } \varphi = \frac{gh \sin i}{v_s}. \quad (9)$$

Інтегрування профілю швидкості з урахуванням загарачення виконано аналогічно підходу глави 4, що привело до розрахункових залежностей для кожної зони n : $Q_n = f(h, y_s, \Delta, p, k, B, v_s(i, \tau_{out}), \nu_L)$. Для остаточного замикання моделі було визначено вид залежності τ_{out} від параметрів вітру та обґрунтовано незалежність τ_{out} від

характеристик водяної плівки. Це привело до наступної формули $\tau_{out} = C_{fG} (\rho W^2 / 2)_G \text{sign} W$, де $C_{fG} = d_1 Re_{1G}^{d_2}$ - місцевий коефіцієнт опору тертя, W - швидкість вітру, $Re_{1G} = |W|/\nu_G$ - одиничне число Рейнольдса, індекс G позначає параметри газового потоку. Чисельний експеримент, виконаний з використанням експериментальних даних $h = f(W)$, що були одержані групою дослідників ІСАО лише в одному перерізі шару стоку ($L = 6$ м) для трьох значень інтенсивності опадів a при $W < 0$ (тобто вітер мав протилежний напрямок відносно ухилу поверхні), дозволив визначити коефіцієнти d_1 , d_2 наступним чином $d_1 = (0.074 + 3.64a [\frac{mm}{xs}]) 10^5$, $d_2 = -1.36$.

Використання цієї моделі даю змогу не лише вапроксимувати характер зміни залежності $h = f(W)$ в її лінійному діапазоні (який відповідає $0 \geq W \geq -9$, та був використаний для визначення d_1, d_2) при $L = 6$ м, але й завдяки можливості одержання профілю швидкості в шарі стоку в'ясувати фізичні особливості формування течії водяної плівки, що приводять до відхилення цієї залежності при негативних швидкостях вітру $W < -9$ від лінійності. Ці особливості пов'язані з розвитком оберненої течії, яка виникає поблизу зовнішньої поверхні водяної плівки на деякій довжині стоку поблизу початку його формування. Крім того, випробування моделі при $W > 0$ продемонструвало фізично коректну модифікацію профілю швидкості та пов'язане з нею зменшення товщини водяної плівки. Результат впливу цих ефектів демонструється рис. 7, де лініями зображені результати розрахунків $h = f(W, a)$, виконаних для умов експериментів ІСАО, дані яких представлені крапками, але для більш широких, ніж в цих експериментах, меж швидкості вітру $-14 \leq W \leq 14$. Деформація профілю швидкості в залежності від W та a ілюструється рис. 8, де значення W приведено над відповідним до нього профілем. Рис. 9 є ілюстрацією результатів розрахунків $h = f(W)$ (лінії) що відповідають умовам експериментів ІСАО (крапки), але виконані не в одному перерізі шару стоку ($L = 6$ м), як в цих експериментах при $W < 0$, а в діапазоні $L = 0.5 - 16$ м. Аналіз виконаних розрахунків, а також відповідних до них розподілів швидкості в рівних перерізах шару стоку дозволив в'ясувати особливості та динаміку розвитку оберненої течії в залежності від величини W , усвідомити процес перетікання рідини через вісь ЗПС в двускатним поперечним профілем та побудувати фізично коректну схему формування стоку дощових опадів на такій ЗПС. Врахування цих особливостей в розробленій математичній моделі потребує значного її ускладнення, пов'язаного з корективами витрати рідини в зв'язку з протилежно направленими струмами в деяких перерізах стоку, що є причиною відхилення на рис. 7 розрахункових залежностей $h = f(W)$ від експериментальних

даних при означних величинах негативної швидкості вітру $W < -9(-12)$ м/с. Оскільки математична модель забезпечує працездатність в діапазоні $(-12 \leq W \leq 14$ м/с, $a = 0.212 - 1.058$ мм/хв, $L = 0 - 42$ м), який є достатнім для багатьох її практичних застосувань, пов'язаних з рухом ЛА по ЗПС, подальші модифікації цієї моделі визнані недоцільними.

Другий розрахунковий випадок, що розглядається в главі 5, стосується вимушеноконвективної ламінарної течії водяної плівки, яка формується на гідравлічно гладких поверхнях ЛА під впливом зовнішнього по відношенню до них супутнього турбулентного повітряного потоку. Зовнішня поверхня водяної плівки, що одночасно є поверхнею розподілу фаз розшарованої газо-рідинної течії, внаслідок обурень, обумовлених турбулентністю в примежевому шарі газу, має хвилову структуру, яка з точки зору її впливу на газовий потік виступає як рухома шорсткість. Побудова розрахункового методу таких течій виконана на базі простих аналітичних співвідношень – для водяної плівки та ефективного інтегрального методу Хеда, модифікованого Ф.А. Дворакон з метою врахування шорсткості поверхні та адаптованого автором на конкретні розрахункові умови – для визначення характеристик повітряного примежевого шару. Формули для визначення характеристик водяної плівки, що одержані на підставі аналогії з течією Куетта, привели до наступних розподілів $\tau_L(y) = const_0$ та $u_L(y) = u_{HL}(y/h) = \tau_L y / \mu_L$, де $u_{HL} = \tau_w y / \mu_L$ – швидкість зовнішньої поверхні плівки, $\mu_L = \nu_L \rho_L$ – динамічний коефіцієнт в'язкості. Інтегрування профілю швидкості уздовж y дозволило отримати вираз $h = \sqrt{2Q\nu_L/\tau_w}$, який визначає товщину плівки h як функцію витрати маси рідини через поперечний переріз плівки Q та τ_w . Враховуючи визначення масової витрати через середню швидкість $v_{cp} = u_{HL}/2$ за формулою $Q = \rho_L v_{cp} h$ та зв'язок між Q і числом Рейнольдса в плівці $Re_L = Q/\mu_L$, можна стверджувати, що наведені вище вирази встановлюють функціональну залежність $h = f(Re_L, \mu_L, \tau_w)$. З метою визначення напруження тертя τ_w , яке, внаслідок незмінності τ в поперечному перерізі плівки, дорівнює дотичному напруженню на її зовнішній поверхні τ_H , що формується повітряним потоком, використано модифікований інтегральний метод Хеда, в якому τ_H розраховується згідно з законом опору, що був запропонований Ф.А. Дворакон $\tau_H = C_{fG} (\rho u_H^2/2)_G$, де $C_{fG} = 2/(\frac{1}{\xi} \ln Re_{\delta_G}^* + C_G + \Delta u_{G2}^*)^2$ – місцевий коефіцієнт опору тертя в газовому потоці; $Re_{\delta_G}^* = (u_H \delta_G^*/\nu)_G$ – число Рейнольдса для потоку газу, що розраховано по товщині відтіснення δ_G^* ; C_G – стала логарифмічного закону; u_{HG} – наперед задана швидкість повітря зовні його пограничного шару; $\Delta u_{G2}^* = f(H_G, C_{fG})$ – поправка на вплив градієнту тиску; $H_G = \delta_G^*/\delta_G^{*2}$ – формпараметр; δ_G^* – товщина

втрачає імпульс. Величини інтегральних товщин δ_G^* , δ_G^{**} знаходяться шляхом чисельного інтегрування (методом Рунге-Кутта 4-го порядку) звичайних диференціальних рівнянь, що виражають інтегральні закони збереження імпульсу (співвідношення Кармана) та маси (рівняння захвату маси Хеда), причому рівняння захвату маси, виходячи з його фізичної природи, стосується лише газової фази потоку, внаслідок чого його емпіричні функції залишені в незмінній формі, тоді як співвідношення Кармана записано з урахуванням як газової, так і водяної фаз, завдяки чому моделюються не лише ефекти, пов'язані з двофазністю, а й з рухомістю поверхні розподілу фаз. Для опису характеристик "хвильової шорсткості" зовнішньої поверхні водяної плівки використані результати експериментальних досліджень М.Є. Дейча з співавторами, які були проведені в умовах, що досить наближені до умов обтікання поверхонь ЛА на олітно-посадочних режимах. Ці результати дозволили визначити сталу $C_G = 75.4 Re_{xG}^{-0.2} - \frac{1}{k} \ln h^+$, де $h^+ = a Re_G^b Re_{LG}^c$, a, b, c – емпіричні коефіцієнти, що залежать від величин Re_L та Re_G . Стала Кармана згідно цих експериментальних досліджень дорівнює $k = 0.64$.

На рис. 10 наведені результати розрахунків товщини вимушено-конвективної водяної плівки h в залежності від довжини формування течії x уздовж поверхні (суцільна лінія), що відтворюють умови експериментів С.В. Рижкова ($u_{HG} = 20$ м/с, $Re_L = 198$) – крапки. Штриховою лінією показані результати розрахунків, що виконані С.Є. Агеевим, В.Т. Мовчаном, А.М. Мхітаряном, Є.О. Шкваром на базі чисельного скінченно-різницевого методу, в якому "хвильова шорсткість" поверхні розподілу фаз також моделюється з використанням тих самих емпіричних результатів школи М.Є. Дейча. Рис. 11 ілюструє результати обігу розрахунків $h = f(u_{HG})$ при різних числах Рейнольдса плівки ($1 - Re_L = 100$, $2 - Re_L = 200$, $3 - Re_L = 400$) (суцільні лінії) з експериментальними даними Є.Г. Васильченко (крапки) та з розрахунками скінченно-різницевою методом згаданого вище колективу авторів (штрихові лінії). Представлені на рис. 10 та 11 результати дозволяють зробити висновок про те, що розроблений метод розрахунку розшарованої газо-рідинної течії в наведених вище умовах забезпечує задовільний для практичних потреб обіг з даними експериментів, який є дещо кращим, ніж при використанні методу скінчених різниць. Крім того, запропонований метод є в 15-20 разів більш вискоєфективним з точки зору потреб часу ЕОМ відносно скінченно-різницевого методу.

В заключенні наведено основні результати та висновки по роботі.

Додатки містять в собі копії документів, які підтверджують практичне використання розроблених моделей, алгоритмів та програмного ва-

безпечення, авторських свідоцтв на розроблене експериментальне устаткування, акту експериментальних випробувань, а також графічні ілюстрації результатів проведеного експериментального дослідження.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Розроблена математична модель руху ЛА по ЗПС, що враховує її поперечний ухил, наявність опадів, вплив бокового вітру, а також масові та аеродинамічні характеристики ЛА. Виконане на базі цієї моделі дослідження показало, що поперечний ухил поверхні ЗПС, як її геометрична особливість, в межах величин, що практично вастосовуються, не впливає суттєво на траєкторію руху літака, отже, не оменьшує рівня безпеки олітно-посадочних операцій. Результати цього дослідження показали, що негативний вплив дощу виявляється виключно через виникнення на поверхнях ЛА та ЗПС тонких плівок води.

2. З метою одержання інформації про кількісні закономірності, що відповідають вільноконвективній гравітаційній течії води в шарі стоку дощових опадів на похилій шорсткій поверхні, яка імітує поверхню ЗПС, виконано багатофакторний фізичний експеримент, обробка результатів якого методом найменших квадратів дозволила одержати просте рівняння регресії, яке апроксимує одержані дані в діапазоні оміни інтенсивності опадів $a = 0.47 - 2.656$ мм/хв, ухилу поверхні $i = 0.005 - 0.025$, довжини стоку $L = 0.25 - 4$ м (при середній висоті шорсткості поверхні, що обтікається, $\Delta = 1.7$ мм) та є адекватним цьому статистичному матеріалу. Здобуті експериментальні результати були використані для тестування та обґрунтування адекватності теоретичних результатів даної роботи.

3. В дисертаційній роботі:

- розроблена математична модель вільноконвективної турбулентної течії воданої плівки удовж похилої плоскої поверхні, середня висота шорсткості якої того ж порядку, що й товщина шару стоку;

- виконано узагальнення цієї моделі на випадок урахування впливу вітру, що співнаправлений або направлений протилежно відносно ухилу;

- побудована математична модель вимушеноконвективної двофазної розшарованої течії (газ - рідина), яка складається з ламінарної воданої плівки, що розвивається на гладкій поверхні та турбулентного супутнього повітряного потоку.

4. Випробування цих моделей при ріономанітних співвідношеннях умов, що характеризують дощ, повітряний потік, характеристики обтікаємої поверхні та параметри зовнішньої поверхні плівки, проде-

монструвало достатню для практичного використання точність результатів розрахунків. В усьому розглянутому діапазоні умов (інтенсивність опадів $a = 0.212 - 2.656$ мм/хв; ухил поверхні $i = 0.005 - 0.025$; довжина стоку $L = 0.25 - 42$ м; швидкість вітру $W = 0 - (-9) - (-12)$ м/с (остання цифра залежить від інтенсивності опадів); товщина водяної плівки $h = 0 - 9$ мм; середня висота шорсткості поверхні $\Delta = 0.3 - 2$ мм - для течій в парі стоку) та (число Рейнольдсу для водяної плівки $Re_L = 100 - 400$; товщина плівки $h = 0.13 - 0.6$ мм; швидкість повітряного потоку $u_{HG} = 15 - 40$ м/с - для течій плівки води в супутньому газовому потоці) був досягнутий задовільний обіг розрахованих товщин водяних плівок з результатами різних авторів, в тому числі й автора цієї роботи. В усіх випадках, для яких була можливість співставити розрахунки за розробленими моделями з даними не лише експериментів, а й з розрахунками на базі моделей інших авторів, була продемонстрована перевага математичних моделей цієї роботи.

5. Розроблена математична модель стоку дощових опадів з похилої плоскої шорсткої поверхні, яка враховує вплив вітру, дозволила не лише забезпечити задовільний обіг експериментальним даним, але й фізично достовірно пояснити особливості формування структури шару стоку, а також обґрунтувати на цій підставі принципи, що були закладені при побудові моделі. Крім того, ця модель дала змогу отримати фізично достовірні результати при позитивних швидкостях вітру $W = 0 - 14$ м/с, що дозволило побудувати фізичну модель стоку дощових опадів з ЗПС з двускатним поперечним профілем.

6. В дисертаційній роботі на базі виконаних досліджень встановлені фізичні та математичні закономірності, що стосуються течій водяних плівок, які формуються на ЗПС в умовах дощових опадів як при відсутності, так і в разі наявності вітру. Розроблені ефективні методи розрахунку характеристик цих течій, а також течій плівок на поверхнях ЛА, що обтікаються.

7. Всі розроблені в роботі математичні моделі реалізовані в формі пакету програм для IBM-сумісних ЕОМ, який має модульний принцип побудови. Одержані результати та їх програмна реалізація можуть бути ефективно використані як теоретичний апарат для розв'язків різноманітних практичних задач, пов'язаних з необхідністю розрахунків характеристик плівок рідини, в тому числі й задач авіаційного та аеродромного профілю.

ПУБЛІКАЦІЇ ПО РОБОТІ

Основні наукові результати, положення та висновки дисертації опубліковані в наступних роботах:

1. Коолова Т.В. Гидродинамический стенд для исследования величины поперечного уклона взлетно-посадочных полос аэродромов ГА.- К.: КИИГА, 1988.- Деп. в ЦНТИ ГА 16.01.1989, N 703 - га 89.- 6 с.
2. Коолова Т.В. Датчик глубины слоя стока дождевых осадков с ВПП.- К.: КИИГА, 1988.- Деп. в ЦНТИ ГА 16.01.1989, N 704 - га 89.- 5 с.
3. Коолова Т.В. Оценка влияния поперечного уклона ИВПШ на величину дополнительной нагрузки шасси самолета // Проектирование, строительство, эксплуатация и механизация аэропортов. - Киев: КИИГА, 1989. - С.52-57.
4. Коолова Т.В., Агеев С.Е., Шквар Е.А. Моделирование обтекания крылового профиля в условиях сильного дождя. - Деп. в ГНТБ Украины 21.11.1995. N 2416-Уж 95. - 8 с.
5. Коолова Т.В. Моделирование течения водной пленки по наклонной шероховатой поверхности.- К.:КМУГА, 1995.- Деп. 21.11.95, N 2415 УК 95.- 17 с.
6. Мовчан В.Т., Коолова Т.В., Шквар Е.А. Интегральный метод расчета двухфазного турбулентного пограничного слоя с границей раздела фаз. - Деп. в ГНТБ Украины 21.11.1995. N 2417-Уж 95. - 10 с.
7. Коолова Т.В. Устройство для измерения глубины слоя дождевых осадков. А.С. N 1654666 (СССР),- заяв. N 4402093 / 10, 1.04.1988. Бюл. N 21, 8.02.1991, G 01 F 23/24.
8. Кирилюк (Коолова) Т.В. Устройство для гидродинамических испытаний дорожных и аэродромных покрытий. А.С. N 1606939 (СССР), - заяв. 1.04.1988 N 4401563 / 31-33. Бюл. N 42, 15.07.1990. G 01 N 33/42, G 01 M 10/00.

АННОТАЦИЯ

Коолова Т.В. Физическое и математическое моделирование течений водных пленок на поверхностях взлетно-посадочных полос и летательных аппаратов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.01 – "Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов". Киевский международный университет гражданской авиации. Киев, 1996.

Разработаны математические модели двумерных течений водных пленок на поверхностях взлетно-посадочных полос и летательных аппаратов, основу которых составляют упрощенные уравнения движения вязкой жидкости и полумпирическая алгебраическая модель турбулентности. Развита подходы для учета динамического и вагромаждающего влияния шероховатости обтекаемой поверхности, высота которой соизмерима с толщиной водной пленки, а также модели взаимодействия внешней

поверхности водной пленки с воздушным потоком, движущимся над ней. Полученные результаты позволили не только удовлетворительно описать характеристики жидких пленок, развивающихся в изучаемых условиях, но и получить новые данные о физической структуре этих течений. Для проверки теоретических результатов и с целью получения необходимой количественной информации об изучаемых течениях выполнен физический эксперимент по установлению зависимости толщины свободноконвективного пленочного течения на плоской шероховатой поверхности от ее длины, уклона и интенсивности дождевых осадков.

ABSTRACT

Kozlova T.V. Physical and mathematical modelling of water films flows on the surfaces of air strips and flying objects. Thesis for the degree "Candidate of Technical Sciences" of speciality code 05.07.01 - "Aerodynamics and processes of heat exchange for flying objects". Kiev International University of Civil Aviation. Kiev, 1996.

The mathematical models of 2D water films flows spreaded on the surfaces of air strips and flying objects have been developed. These models are based on the simplified form of equations of motion of viscous fluid with the use of semiempirical algebraic model of turbulence. The approaches for modelling of dynamical and displacement influences of roughness, height of which is comparable to the thickness of liquid film, have been developed. Also the models of interaction between outer surface of water film and air flow moving above it have been worked out. The results which have been received from the application of above mentioned models, not only satisfactorily describe the characteristics of water films, developed under the examined conditions, but also allow to get new information about physical structure of these flows. For testing the theoretical results and with the aim of getting the required numerical data of investigated flows, the physical experiment has been carried out. The result of the experiment is the dependence between the thickness of free-convective water film, spreaded on the flat rough surface, and parameters such as: length of flow development, angle of inclination of air strip surface with respect to horizontal plane, intensity of rain.

Ключові слова: Водяні плівки, стік дощових опадів, вільна та вимушена конвекція, поверхні влітно-посадочних смуг, поверхні літальних апаратів, що обтікаються, ухил поверхні, шорсткість, турбулентність, інтенсивність дощу, вплив вітру, фізичне та математичне моделювання.

Підписано до друку 18.03.96. Формат 60х84/16. Папір друкарський
Офсетний друк. Ум.фабовідб.6. Ум.друк.арк.1,16. Обл.-вид.арк.1,25.
Тираж 100 прим. Замовлення N 63-1. Вид. N 200/III

Видавництво КМУЦА.

252058. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

1111075

AB 34.305

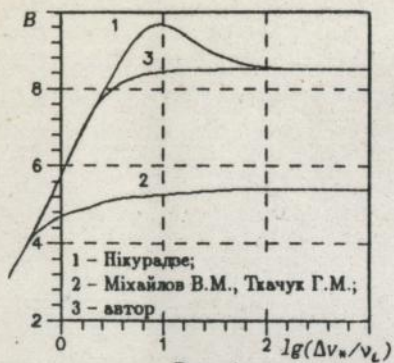


Рис. 1

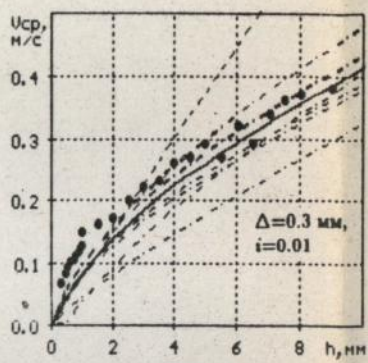


Рис. 2

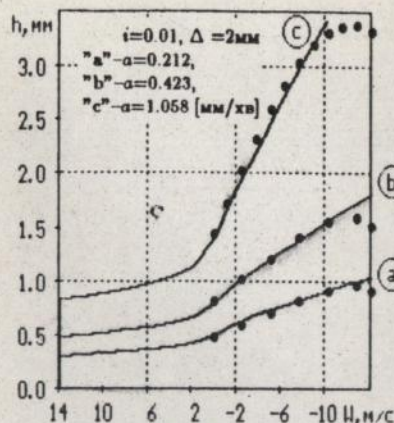


Рис. 7

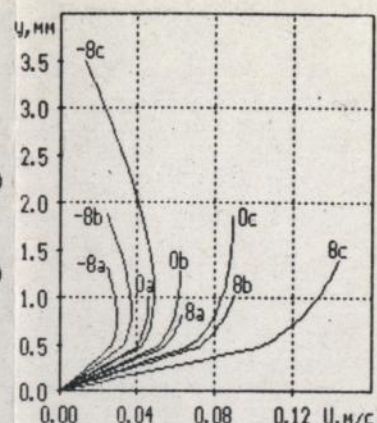


Рис. 8

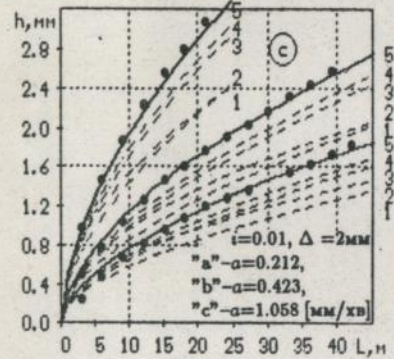


Рис. 3

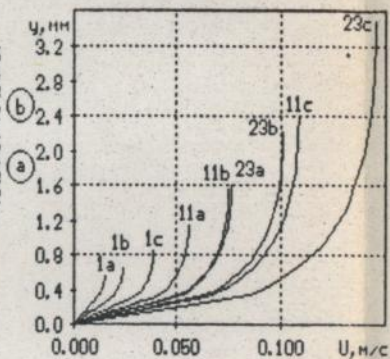


Рис. 4

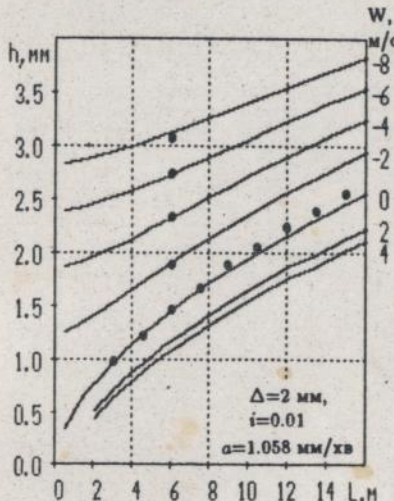


Рис. 9

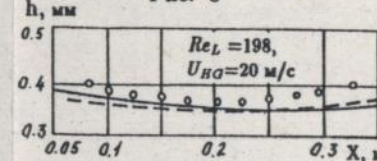


Рис. 10

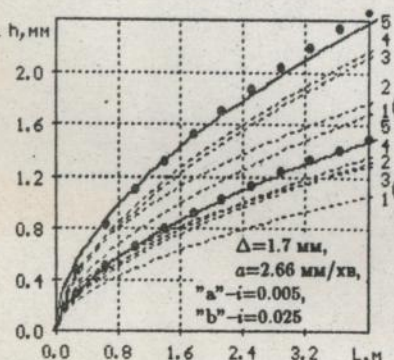


Рис. 5

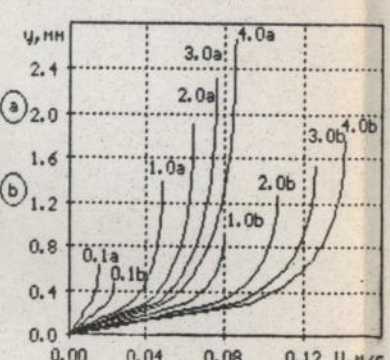


Рис. 6

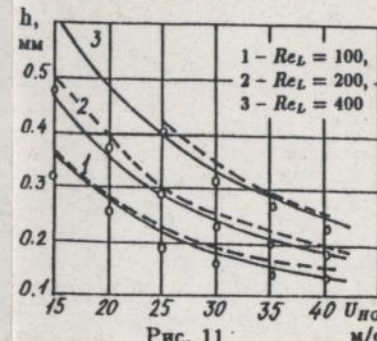


Рис. 11

