

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В авіації та космонавтиці одним із головних завдань є забезпечення необхідних параметрів газу (повітря) в кабіні (відсіку) літального апарата (ЛА). Було розроблено математичні моделі стаціонарних, докритичних, закритичних режимів течії газу, розгерметизації кабіни. Встановлено основні закономірності впливу ударної зміни тиску повітря на організм людини. Незважаючи на досягнуті результати теоретичних і експериментальних досліджень, світовий досвід експлуатації ЛА показує, що є випадки раптової розгерметизації відсіку(ів), які часто призводять до руйнування конструкції відсіку й до людських жертв. Газодинамічні процеси відсіків недостатньо вивчені. Тому встановлення газодинамічних закономірностей процесів раптової розгерметизації відсіків ЛА являє собою важливу наукову проблему, яка є актуальною і затребуваною на практиці.

Опис процесів газу в відсіку наведено в роботах М. Є. Жуковського, С. О. Чаплигіна, М. О. Лаврентьева, Я. Б. Зельдовича, Г. М. Абрамовича, М. П. Вукаловича, Л. Д. Ландау, Л. І. Сєдова, І. А. Чарного, М. Ю. Дейча, С. С. Кутателадзе, Л. Г. Лойцяньського, Д. І. Блохінцева, М. А. Мамонтова, А. М. Гершковича, Л. Т. Бикова, В. С. Івлентієва, І. Є. Ідельчика, Р. Зауера та ін. В опублікованих роботах не наведено математичні моделі і не проведено розрахунки процесів раптової розгерметизації реальних відсіків ЛА.

Актуальність проблеми в теоретичному плані обумовлена тим, що проведені експериментальні та розрахункові дослідження для ізотермічного, адіабатичного й політропного процесів зі змінним показником політропи не дають змоги описати процеси раптової розгерметизації кабіни (відсіку) ЛА. Тому встановлення нових закономірностей газодинамічних процесів у відсіку(ах) та побудова на їх основі функціональних залежностей між параметрами реальних процесів дають підстави провести газодинамічні розрахунки кабіни ЛА. Проведення розрахунків на основі реальних процесів дозволить підвищити точність розрахунків і розширити клас

розв'язуваних задач, що є істотним внеском у розвиток сучасної науки з вивчення раптового розширення і стиснення газу.

Актуальність вирішення наукової проблеми в практичному плані обумовлена недостатністю теоретичних досліджень для опису процесів усередині кабіни ЛА. На підставі встановлених залежностей зміни параметрів газу у відсіках вважаємо за можливе проводити розрахунки параметрів газу процесів раптової розгерметизації відсіків для встановлення відповідності ЛА в Україні вимогам Авіаційних правил (АП), «Нормам летной годности самолетов транспортной категории» (АП-25), європейським вимогам (JAR-25, CS-25) та вимогам у США (FAR-25).

На підприємствах авіаційної промисловості багатьох країн уперше було запроваджено вимоги АП-25, JAR-25, CS-25, FAR-25, відповідно до яких кожна конструкція ЛА, а також її складові компоненти та частини, що знаходяться всередині або зовні відсіку, повинні на будь-якій висоті витримувати вплив раптового зменшення тиску газу через отвір у будь-якому відсіку внаслідок пошкодження відсіку уламками маршових двигунів, появи отвору площею до максимальної величини або в інших випадках розгерметизації відсіку. З запровадженням АП проведення газодинамічних розрахунків параметрів газу у відсіку(ах) за умови раптової розгерметизації відсіку для оцінювання цілісності конструкції стали неодмінною умовою сертифікації ЛА. Дослідження в дисертації спрямовано, зокрема, й на виконання цих вимог.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Результати дисертаційної роботи отримано за тематичними планами науково-дослідних робіт (НДР): НДР НАУ № 990-ДБ15 «Розроблення засобів еколого-економічної оптимізації багатокритеріальної оцінки збалансованого розвитку авіаційної діяльності в Україні» (2015-2017 рр.), номер державної реєстрації 0115U002463, в частині регулювання чинників безпеки польотів та техногенної безпеки цивільної авіації; НДР НАУ «Дослідження акустичних звукопоглинаючих конструкцій і теплоізолюючих матеріалів на інтерферометрі і в звукомірній камері» за договором НАУ № 122 хоз/Д-56, 2004, замовник АНТК ім. О.К. Антонова; НДР «Обобщение экспериментальных данных акустических характеристик агрегатов СКВ», договір

про НТС № Л-36-с-81 між КМЗ і КПЦА від 10.07.81 г.; план науково-технічного прогресу виробництва на 1987 рік за темою «Разработка и внедрение стенда устройств для снижения аэродинамического шума в элементах и агрегатах КСКВ изделия 400», номер державної реєстрації У38790; план науково-технічного прогресу виробництва на 1990 рік за темою «Разработка и внедрение шумоглушающих устройств для улучшения условий труда в кабинах экипажа и сопровождающих изделия 400», номер державної реєстрації Г21221; наказ № 164 від 14.03.1994 р. по АНТК ім. О.К. Антонова про введення АП-25; наказ № 908 від 29 грудня 1999 р. по АНТК ім. О.К.Антонова щодо проведення робіт з раптової розгерметизації відсіків літаків; наказ № 122 від 18.02.2005 р. по Державному підприємству (ДП) «АНТОНОВ» про сертифікацію літака Ан-148-100 моделі Ан-148-100А, Ан-148-100В, Ан-148-100Е.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розрахункове та експериментальне дослідження газодинамічних закономірностей процесів раптової розгерметизації відсіків літального апарата. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Провести аналіз стану проблеми газодинамічних закономірностей процесів розгерметизації відсіку;
2. Розробити основні положення встановлення функціональної залежності між параметрами процесу раптової розгерметизації відсіків ЛА;
3. Провести стендові дослідження зі встановлення газодинамічних і аероакустичних закономірностей процесів розгерметизації на моделях і натурних відсіках ЛА в наземних і льотних умовах;
4. Встановити функціональну залежність між параметрами газодинамічного процесу для визначення параметрів рухомого повітря і в загальмованому потоці відсіку, швидкості й витрати повітря;
5. Встановити закономірності газодинамічних і аероакустичних процесів усередині відсіку за умови його раптової розгерметизації;
6. Встановити функціональну залежність між параметрами газодинамічного процесу для визначення силового впливу рухомого повітря на конструкцію відсіку;

7. Розробити методику проведення газодинамічних розрахунків відсіків за умови раптової розгерметизації відсіків ЛА;

8. Запровадити в практику результати розрахункових та експериментальних досліджень газодинамічних процесів модельних та натурних відсіків ЛА.

**Об'єкт дослідження** – процеси розгерметизації відсіків ЛА.

**Предмет дослідження** – закономірності процесів раптової розгерметизації відсіків ЛА.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети в роботі застосовано методи математичного та функціонального аналізу. Отримано розв'язання розроблених диференційних рівнянь першого та другого порядків відповідно до методів математичного аналізу. Розробку критеріїв для підтримання постійного тиску й температури газу у відсіку здійснено відповідно до теорії розмірності і подібності. За умови проведення експериментальних досліджень і визначення адекватності встановлених функціональних залежностей між параметрами газу в відсіку використано методи планування та обробки результатів експерименту. Представлення результатів експерименту й числового розв'язання диференційних рівнянь здійснено методами комп'ютерної технології.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, результатів та висновків** базується на використанні основних законів, положень газодинаміки й аероакустики стосовно розглядуваного процесу у відсіку ЛА. Для встановлення закономірностей протікання процесів було проведено дослідження на моделі, натурному відсіку в наземних і льотних умовах. Вимірювання тиску, температури повітря, рівнів звукового тиску на стенді й літаку було проведено за єдиною методикою, яка забезпечувала якісне визначення параметрів повітря. У процесі випробувань було використано обладнання й методи обробки результатів вимірювання, які пройшли метрологічну експертизу. Для визначення витрати повітря через досліджувані пристрої було застосовано таровані звужуючі пристрої. Якісного визначення витрати повітря було досягнуто шляхом порівняння витрат, отриманих за еталонним пристроєм. Точність і достовірність результатів розрахунку відповідно до розроблених рівнянь перевірено за результатами зіставлення з

експериментом або отриманими рішеннями на основі строгих математичних перетворень. Достовірність отриманих наукових результатів та висновків підтверджується практикою експлуатації герметичних кабін ЛА.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в установленні газодинамічних закономірностей процесів раптової розгерметизації відсіків ЛА на підставі використання досягнутих результатів і розвитку розрахункових та експериментальних методів досліджень газодинамічних і аероакустичних процесів реальних відсіків. Сформульовано основні положення встановлення функціональної залежності між параметрами газодинамічних процесів з урахуванням пульсацій газу у відсіку за умови його раптової розгерметизації, встановлено закономірності газодинамічних і аероакустичних процесів у відсіку за умови раптової зміни параметрів газу і витікання газу з відсіку всередину суміжного відсіку і в необмежений об'єм. Шляхом висування і перевірки гіпотез за результатами досліджень на моделях і натурних відсіках ЛА в наземних і льотних умовах у роботі отримано такі наукові результати.

*Вперше досліджено і встановлено:*

1. Проведено комплексні стендові, льотні, функціональні, розрахунково-експериментальні газодинамічні та аероакустичні дослідження у відсіках важкого транспортного літака (ВТЛ), надважкого транспортного літака (НТЛ), легкого транспортного літака (ЛТЛ), регіонального реактивного літака (РРЛ), турбогвинтового регіонального вантажно-пасажирського літака (ТРВПЛ), регіонального пасажирського літака (РПЛ), що дало змогу встановити вплив факторів (наприклад, тиск, об'єм, форма отвору, постійна і змінна прохідна площа отвору, за наявності витоку) на процеси розгерметизації відсіку. За параметрами загальмованого потоку, які вимірюються стандартним устаткуванням на стенді і ЛА, визначено основні положення встановлення функціональної залежності між параметрами процесу раптової розгерметизації відсіку;

2. Встановлено закономірності газодинамічних процесів за умови раптової розгерметизації відсіку всередину суміжного відсіку. У відсіках утворюються перехідні процеси за проміжок часу  $\tau = (0,0066 \dots 0,0216)$  с і затухаючі в протифазі

коливальні процеси з логарифмічним декрементом затухання  $\Delta = (0,01 \dots 0,11)$ . На підставі досягнутих результатів розрахунку відсіків і встановленої закономірності запропоновано метод визначення параметрів повітря в кабіні ЛА за умови розгерметизації відсіку (метод відсіку). Метод ґрунтується на описі процесів у відсіку, представлених у вигляді закритої (відкритої) термодинамічної системи (ТДС) за умови підведення (відведення) газу (енергії) у відсік і змішування (розділення) газів;

3. Проведено дослідження натурних герметичних кабін ЛА і встановлено експонентний характер витоків в часі через нещільності фюзеляжу, що дозволило розробити числовий метод визначення витоків з герметичної кабіни (ГК) за експериментальними даними. Отримано функціональні залежності витоків із кабіни ЛА від об'єму, компонування кабіни і умов експлуатації ЛА (за відсутності обладнання, за встановлення обладнання на землі після викочування літака зі складального цеху, за встановлення обладнання на землі після льотної експлуатації);

4. Встановлено закономірності зміни параметрів повітря у відсіку за умови аварійного покидання та скидання дверей у герметичній кабіні РПЛ на висоті польоту  $H \approx 4087$  м. Встановлено нові режими течії газу, що призвело до розробки метода встановлення функціональної залежності між параметрами газодинамічного процесу у відсіку з урахуванням моделі за апріорною інформацією. Проведено розрахунки газодинамічних процесів витікання газу через отвір змінної прохідної площі. Підтверджено гіпотезу про встановлення функціональної залежності між параметрами повітря у відсіку щодо тиску повітря і часу аварійної розгерметизації за зміни параметрів повітря в ГК за політропою з постійним показником політропи в діапазоні  $0,2 \leq n \leq 15,6$  з максимальною похибкою 3,1%;

5. Проведено дослідження і встановлено вплив факторів (наприклад, показник політропи, підведена(відведена) енергія, підведене(відведене) повітря, початкова площа отвору, змінне значення правої частини політропи, початкове значення похідної тиску повітря за часом) на зміну параметрів газу в відсіку на підставі встановленої функціональної залежності між параметрами газодинамічного політропного процесу раптової розгерметизації відсіку з постійним показником

політропи з урахуванням пульсацій газу. Підтверджено гіпотези про встановлення функціональної залежності між параметрами політропного процесу з постійним показником політропи та виконання умови квазістаціонарності;

6. Встановлено газодинамічні і аероакустичні закономірності процесів у відсіку за умови його розгерметизації (включаючи раптову розгерметизацію) і витікання газу з відсіку через дросельні або шумопоглинаючі (ШПП) пристрої, отвір (круглий, «рваний», щілину, утворений за ефектом «корок», постійної і змінної прохідної площі) в суміжний відсік або необмежений об'єм, які ґрунтуються на результатах досліджень параметрів газу у відсіках на стендах і в кабінах ЛА. Здобуті результати дозволили визначити витрати газу, встановити закономірності зміни параметрів газу у відсіку, «великому» відсіку, суміжних відсіках з постійним і змінним тисками газу, герметичних кабінах ЛА за наявності витіку і підтвердити висунуті гіпотези про встановлення функціональної залежності між параметрами політропного процесу з постійним показником політропи за умови аварійного покидання літака і раптової розгерметизації відсіку;

7. Встановлено газодинамічні і аероакустичні закономірності процесів у відсіку і на виході газу з відсіку на екран, що дало змогу встановити функціональну залежність між параметрами знакозмінного і силового впливу газу на екран (відсік).

8. Встановлено залежність між параметрами газу у відсіку за умови розриву, зламу, перегину рівняння політропи, що дало підстави для отримання рівняння і критерію для виконання залежності між тиском і густиною газу у відсіку відповідно до рівняння політропи за змінного значення правої частини рівняння політропи;

9. Встановлено газодинамічні закономірності процесів у відсіках ЛА за умови раптової розгерметизації відсіку в залежності від об'єму, параметрів газу у відсіку (тиск, температура), висоти, площі отвору, відсіку, в якому утворюється раптова розгерметизація, параметрів зовнішнього повітря на поверхні фюзеляжу в місці отвору на підставі розробленої методики проведення газодинамічних розрахунків відсіків.

**Практична цінність дисертаційної роботи** полягає в тому, що на підставі проведених розрахункових та експериментальних досліджень газодинамічних

процесів у відсіку за умови розгерметизації відсіків ЛА і встановлених нових закономірностей газу у відсіку вперше отримано такі результати:

1. Проведено розрахунки параметрів газу в відсіках ЛА за умови раптової розгерметизації відсіку (багажно-вантажного відсіку (БВВ), вибуху пневматичної шини шасі) з урахуванням витоку з ГК, за відмови системи автоматичного регулювання тиску (САРТ), системи кондиціонування повітря (СКП), пошкодження фюзеляжу уламками маршових двигунів, несанкціонованого відкриття дверей і люків, виривання лобового скла в кабіні екіпажу, пошкоджувальної дії вибуху пневматичної шини на конструкцію відсіку шасі; аварійного покидання ЛА, що дало змогу забезпечити виконання вимог авіаційних правил (АП-25);

2. На підставі проведених досліджень пульсацій тиску повітря в пілоні двигуна і кабінах ВТЛ встановлено експонентний характер зміни напружень в деталях рухомого корпусу реверсивного пристрою (РП) двигуна. Розроблено ефективні способи і засоби зменшення пульсацій тиску повітря в джерелі їх утворення, що дозволило знизити напруження в РП з  $\sigma = \pm 5,4 \times 10^7$  Па до  $\sigma = \pm 0,6 \times 10^7$  Па, а установка ШПП на вході випускного клапана САРТ привела до зменшення рівня звукового тиску (РЗТ) в польоті в кабіні відпочинку та технічному відсіку до (7 ... 11) дБ в октавних смугах частот вище 500 Гц. Максимальна похибка розрахунків пульсацій газу в області РП становить 10,1%;

3. Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено на Державному підприємстві «АНТОНОВ» при сертифікації літаків Ан-70, Ан-140, Ан-74ТК-100, Ан-74ТК-200, Ан-74ТК-300, Ан-148-100, Ан-158, Ан-178, Ан-124, Ан-225, Ан-26 і їх модифікацій.

**Особистий внесок автора.** Усі винесені на захист наукові положення і практичні результати роботи отримані особисто автором. У роботах, виконаних разом зі співавторами, автору належать: ідеї, теоретичні розробки, рівняння, обчислювальні алгоритми, обробка експериментальних даних; аналіз отриманих результатів, методи й засоби, встановлені основні залежності. Стендові й натурні дослідження відсіків проведено спільно з виконавцями кафедри безпеки життєдіяльності Інституту екологічної безпеки Національного авіаційного



університету, Державного підприємства «АНТОНОВ», Запорізького машинобудівного конструкторського бюро (ЗМКБ) «Прогрес» (м. Запоріжжя), Науково-виробничого об'єднання (НПО) «Наука» (м. Москва, РФ),

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися на IV, V міжнародних науково-технічних конференціях «АВІА» (м. Київ, 2002, 2003 рр.), Міжнародній конференції з моделювання й стійкості динамічних систем (DSMSI) (м. Київ, 2003, 2005, 2007, 2009, 2013, 2015 рр.), 10, 11, 13, 14 Міжнародних наукових конференціях імені академіка М. Кравчука (м. Київ, 2004, 2006, 2010, 2012 рр.), Міжнародній науково-технічній конференції «Промышленная гидравлика и пневматика», присвяченій 100-річчю від дня народження професора Т. М. Башти (м. Київ, 2004 р.), VII, VIII, IX, X, XI Міжнародних науково-технічних конференціях АС ПГП «Промышленная гидравлика и пневматика» (м. Вінниця, 2006 р., м. Мелітополь, 2007 р., м. Кременчук, 2008 р., м. Львів, 2009 р., м. Мелітополь, 2010 р.), VII Міжнародній науково-технічній конференції «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки» (м. Київ, 2009 р.), II, III, IV, VI, VII, VIII Міжнародних наукових школах-конференціях «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (м. Алушта, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009, 2010 рр.), V, VI, VII, VIII, IX, X Міжнародних конференціях «Прогрессивная техника и технология» (м. Севастополь, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 рр.), XXIV щорічній науково-технічній конференції (м. Київ, ІПМЕ НАН України, 2005 р.), Ювілейній науково-технічній конференції, присвяченій 60-річчю з дня утворення відділень аеродинаміки літальних апаратів і міцності авіаційних конструкцій СибНДІ (РФ, м. Новосибірськ, 2004 р.).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковані в 54 наукових статтях, зокрема: 24 статтях в журналах, що належать до переліку фахових видань України (18 – написана особисто здобувачем і 6 – у співавторстві); 4 статтях у іноземних спеціалізованих виданнях; 5 винаходів (5 – представлено у співавторстві), на які отримано 2 авторських свідоцтва, 1 патент України, 3 патенти Російської

Федерації; у тезах 20 міжнародних конференціях (16 представлено без співавторів і 4 – у співавторстві).

**Обсяг і структура роботи.** Дисертаційна робота складається з титульного аркуша, анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основну частину дисертації викладено на 307 сторінках, вона включає 86 рисунків і 3 таблиці. Кількість окремих сторінок з рисунками – 5. Список використаних джерел (365 назв) викладено на 34 сторінках. 15 додатків оформлено на 82 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 455 сторінок.