

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ, ПОСТАНОВКА МЕТИ ТА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

В даному розділі буде проведено аналіз сучасного стану проблеми в установленні газодинамічних закономірностей процесів раптової розгерметизації відсіків ЛА. На підставі аналізу досягнутих результатів і розвитку розрахункових та експериментальних методів досліджень газодинамічних і аероакустичних процесів реальних відсіків ЛА представляється можливим визначити основні проблеми та завдання, які необхідно вирішити за умови раптової зміни тиску повітря у відсіку. Представлений аналіз статей і монографій, в яких досліджені процеси раптової розгерметизації відсіку.

Кабіна ЛА містить герметичну і негерметичну кабіни. Кабіна може складатися з одного або декількох відсіків. У ГК за допомогою системи підготовки повітря (СПП), СКП та САРТ підтримуються умови життєдіяльності членів екіпажу і пасажирів, функціонування обладнання, для перевезення багажу, вантажу тощо. Кабіна ЛА, що складається з декількох відсіків, розділена перегородками з отворами для перетікання повітря. У найзагальнішому випадку кабіна ЛА являє собою посудину (відсік або відсіки) з надлишковим тиском газу по відношенню до навколишнього простору або атмосфери. Особливості розрахунку та опис роботи систем відсіків і їх агрегатів представлено в роботах [1 – 7].

Основні фундаментальні закономірності процесів рухомого середовища представлені в дослідженнях О. Рейнольдса [8], Е. Ейлера [9], Л. Прандтля [10], А. Пуанкаре [11, 12], Е. Ферми [13, 14], Г. Лоренца [15], М. Планка [16], Р. Фейнмана [17, 320], М.И. Лайтхілла [18], Д.І. Менделєєва [19], Б. Клапейрона [19], Г. Гельмгольца [9], С. Карно [321] та ін.

Важливе місце в дослідженні течії стисливих і нестисливих рідин посідають роботи М. Є. Жуковського [20], С. О. Чаплигіна [21], М.О. Лаврентьєва [61], Я. Б. Зельдовича [22, 23], Г. М. Абрамовича [25, 74], М. П. Вукаловича [26], Л. Д. Ландау [27], Л. І. Седова [28, 29], І. А. Чарного [30, 31], М. Є. Дейча [32, 33,

34], С. С. Кутателадзе [35], Л. Г. Лойцяньського [36], Д. І. Блохінцева [37], М. А. Мамонтова [38], А. М. Гершковича [39], Л. Т. Бикова [40], В. С. Івлентієва [41], І. Є. Ідельчика [42, 43], Р. Зауера [44] та ін.

1.1. Аналіз стану проблеми встановлення газодинамічних закономірностей процесів раптової розгерметизації відсіків ЛА

Історія розвитку авіації свідчить, що виникають умови експлуатації ЛА, коли відбувається вибух або самочинне відчинення дверей, люків, руйнування лобового скла кабіни екіпажа, руйнування ділянок фюзеляжу, порушення цілісності конструкції кабіни або герметичності, вибух пневматика. За даними Федерального управління цивільної авіації (FAA) США, за період з 1959 по 1976 р. зафіксовано понад 300 випадків розгерметизації кабін пасажирських літаків. Мали місце катастрофи літаків «Комета» у 1954 р., DC-10 та L-1011 з людськими жертвами. За даними ЦА СРСР в Аерофлоті протягом 1970–1972 рр. зареєстровано 13 випадків розгерметизації кабін різних типів літаків. У 1995 р. над Гавайськими островами сталася розгерметизація літака Боїнг-737, частину обшивки було зірвано, загинула одна стюардеса. Раптова зміна тиску газу має місце під час руйнування шасі літака. Так, 25 липня 2000 р. в Парижі (Франція) під час злету літака «Конкорд» внаслідок руйнування пневматика було пошкоджено паливний бак, що спричинило займання двигуна [45]. Падіння літака сталося на етапі злету, загинули всі пасажирки й члени екіпажу (109 осіб) і 4 особи на землі. 9 квітня 2010 р. в аеропорту Воронежа здійснив аварійну посадку літак Ан-24 з 30 пасажирками на борту. Постраждалих не було. Причиною аварійної посадки став сигнал про розгерметизацію салону. У кабіні пілотів тріснуло скло, утворилася щілина, через яку відбувалися витoki повітря з герметичної кабіни. Аналогічні випадки розгерметизації мали місце і в космонавтиці, що спричинювало загибель людей (30 червня 1971 р. корабля «Союз-11», 29 січня 1986 р. космічного шатла «Челленджер» [17], 1 лютого 2003 р. космічного корабля багаторазового використання «Колумбія»). Збирання відомостей про катастрофи з усіх країн світу здійснює Міжнародна організація цивільної авіації

ICAO [46].

Для забезпечення цілісності конструкції в разі раптової розгерметизації за кордоном авіаційні компанії розробили комплекс заходів з перепуску повітря між відсіками [47]. Проведено дослідження, які охоплювали безпеку експлуатації наявних літаків, оцінювання максимальних розмірів отвору, терміни модифікацій і збитки. Для визначення основних закономірностей усередині кабіни літака DC-6 було здійснено стендові випробування натурального відсіку [48]. Аналіз експериментальних досліджень натурального відсіку під час раптової розгерметизації з додатнім надлишковим тиском та від'ємним надлишковим тиском у відсіку свідчить про те, що витік газу з відсіку часто відбувається через отвір довільної конфігурації з рваними краями. Тому необхідно визначити основні закономірності витікання повітря з відсіку за наявності такого виду отворів.

Для забезпечення цілісності відсіків літака А-300 було здійснено дослідження газодинамічних процесів за умови розгерметизації одного з вантажних відсіків. За результатами здійснених досліджень один із авторів, У. Хаукс, зазначив: «Через велику актуальність цієї проблеми результати випробувань широкофюзеляжних літаків або ще не опубліковані, або й не будуть опубліковані». На підставі здобутих результатів було проведено модифікацію літака А-300 з урахування зміни конструкції пристроїв для протікання повітря між відсіками. Здійснені дослідження дали змогу забезпечити сертифікацію літаків А-300, А-310 за умови розгерметизації відсіку [47, 49].

Для військово-транспортної авіації можливість розгерметизації залишається «ахіллесовою п'ятою» [50]. Порушення герметичності кабіни може потягти за собою найнебезпечніші для людини наслідки: падіння загального тиску й парціального тиску кисню. У процесі тривалих досліджень встановлено, що зниження атмосферного тиску суттєво впливає на живий організм [4, 51]. Під час розгерметизації кабіни ЛА відбувається падіння тиску повітря, що зазвичай називають декомпресією, а під час раптового падіння тиску повітря в мікроінтервалі часу до 1 секунди – вибуховою декомпресією. У людини під впливом декомпресії відбуваються декомпресійні розлади [40].

Терористичні акти з використанням літаків 11 вересня 2001 р. у США висвітили важливість і необхідність здійснення комплексу робіт з перетікання повітря між відсіками кабіни літака й конструктивними особливостями виконання перегородок, дверей, замків, люків тощо. З метою запобігання або затримання сторонніх осіб під час спроби насильницького проникнення в кабіну екіпажу FAA розробило низку спеціальних правил, поправок і законів цивільної авіації. Зазначено, що відмова в роботі пристроїв може спричинити катастрофічні наслідки.

У роботі [52] проведено аналіз роботи Центрального аерогідродинамічного інституту імені професора М.Е. Жуковського (ЦАГІ) по дослідженню міцності авіаційних конструкцій. Показано, що в авіабудуванні склалися три напрямки досліджень:

1. Фундаментальні та пошукові дослідження в галузі авіаційних конструкцій, розробка розрахункових і експериментальних методів вирішення різних проблем.
2. Прикладні дослідження, проведення розрахункових та експериментальних досліджень зі створення конкретних типів ЛА.
3. Сертифікаційні дослідження з підтвердження необхідних характеристик конкретних виробів авіаційної техніки.

Стучалкін Ю.О. робить висновок, що роботи із забезпечення безпеки авіаційної техніки з кожним роком будуть ускладнюватися, а досягнення високого рівня розробки конструкції може бути отримано при проведенні багатопланових і комплексних досліджень по встановленню закономірностей досліджуваних процесів.

У багатьох технологічних процесах посудина з надлишковим тиском справляє істотний вплив на рівень досконалості об'єкта й на безпеку людей. Тому кожен крок у створенні й експлуатації посудин із новими, на перший погляд, навіть незначними характеристиками супроводжується здійсненням науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт з удосконалення конструкції посудини та її систем [2, 36, 40, 41].

На підставі числових досліджень визначено основні нормативні вимоги до проектування та експлуатації кабін ЛА, де як такі виступають “Нормы летной

годности гражданских самолетов СССР (НЛГС)” [53], НЛГС-1 [54], НЛГС-2 [55], НЛГС-3 [56], “Единые нормы летной годности гражданских транспортных самолетов стран-членов СЭВ (ЕНЛГ-С)” [57], АП-25 [58]. Названі норми є державними вимогами з безпеки польоту та обов'язковими для виконання підприємствами на всіх етапах створення і експлуатації ЛА.

З набуттям чинності АП-25, які близькі до норм льотної придатності Європи (JAR-25, CS-25) та США (FAR-25) [319], необхідно розглядати виникнення отвору в будь-якому відсіку й виконувати розрахунки під час раптового зменшення тиску через отвір, мінімальна площа якого визначається розрахунком відповідно до пункту 25.365(y) АП-25. Під час раптової розгерметизації кабіни навантаження, які виникають, не повинні перешкоджати продовженню безпечного польоту та здійсненню посадки (пункт 25.365(f) АП-25). Перегородки, підлога і відсіки повинні витримувати вплив раптового зменшення тиску та повинні прийматися заходи по зведенню до мінімуму впливу полумок частин літака, які можуть уразити пасажирів і членів екіпажу (пункт 25.365 (g) АП-25). Слід здійснювати розрахунки, щоб люди, які перебувають у кабіні, не були піддані впливу тиску в кабіні після розгерметизації внаслідок будь-якої відмови (наприклад, пошкодження фюзеляжу уламками маршових двигунів), для якого не показано, що він має бути практично неймовірним (пункти 25.841(a)(2)(i), 25.841(a)(3) АП-25). Було розроблено вимоги щодо захисту обладнання й ніші шасі від вибуху пневматика (пункт 25.729(f) АП-25).

Для забезпечення умов життєдіяльності людей у кабіні ЛА здійснюється комплекс газодинамічних, теплових, акустичних розрахунків, проектно-конструкторських робіт [2, 6, 40, 59 – 61]. Підтримання умов життєдіяльності людей багато в чому визначається СПП, СКП, САРТ, кисневою системою (КС). Ці системи забезпечують також безпеку членів екіпажу та пасажирів під час штатних та нештатних (відмов систем, агрегатів, силової установки, руйнувань, пошкоджень) умов експлуатації кабіни ЛА.

Вибухова декомпресія може відбуватися внаслідок руйнування ліхтаря кабіни екіпажу, ілюмінатора в пасажирському салоні, порушення цілісності або

герметичності кабіни ЛА. Раптова зміна тиску повітря в кабіні (раптова розгерметизація) супроводжується больовими явищами в організмі людини [40, 41]. Наведено дані про зміну тиску повітря в легенях під час раптової зміни тиску газу й встановлено граничні норми для перебування людей. Отриманий один із важливих висновків, що вибухова декомпресія в кабіні й декомпресія в легенях людини підпорядковані одному закону. У роботі [62] наведено методи щодо зниження впливу декомпресії на людину.

Спочатку в дослідженнях кабіну розглядали як один відсік (об'єм) [33, 63]. Аналіз робіт [64, 65] свідчить, що газодинамічні процеси для кабін із кількома сполученими відсіками мають теоретичне й практичне значення. Необхідно продовжити дослідження і встановити закономірності зміни параметрів газу в суміжних відсіках

Прикладні дослідження льотних характеристик із використанням теорії подібності для опису реальних ЛА наведено в роботі [66]. Для підвищення точності результатів льотних випробувань літака запропоновано не використовувати розрахункові методи визначення приведеної тяги, а отримувати їх експериментальним шляхом.

Через складність і значні матеріальні затрати з виготовлення натурних зразків початкові теоретичні дослідження з вивчення газодинамічних процесів у кабінах ЛА часто проводили на моделях. В якості моделі широко використовували різноманітні ударні труби [36, 67 – 71]. У роботі [58] наведено методику й формулу визначення швидкості руху ударної хвилі. У процесі здійснених досліджень не встановлено залежність між хвилями стиснення й розширення у суміжних відсіках.

Одним із важливих параметрів під час проведення досліджень на моделі є визначення параметрів спектра пульсацій тиску газу рухомого потоку. У роботі [68] представлені результати вимірювань середньоквадратичних значень та частотні спектри пульсацій тиску в робочих частинах двох надзвукових аеродинамічних труб: в ударній трубі та в трубі змінної дії. Степінь впливу акустичних збурень на теплообмін авторами не встановлено.

Експериментальне вивчення властивостей ударної хвилі (УХ) у воді під час установавання плоских екранів із різних матеріалів та різних розмірів наведено в роботі [72]. Авторами не показано ступінь поширення здобутих результатів на інші середовища (наприклад, повітря) й граничні умови проведення випробувань.

Натурні дослідження з визначення живучості конструкцій літака за умови раптової розгерметизації викладено в роботі [73]. Незважаючи на отримані результати, авторами не наведені газодинамічні закономірності процесів усередині фюзеляжу ЛА.

1.2. Аналіз процесів у відсіку за умови підведення, відведення й перетікання газу

Уперше теоретичні дослідження під час розгляду задачі протікання повітря через отвір у каналі, яким рухається повітря, здійснив М. Є. Жуковський [20]. У цій роботі розглянуто течія газу в нескінченно довгому каналі через отвір у його стінці. Розглянуто також задачу про витікання повітря через отвір біля заглушеного торця. Ураховуючи важливість розв'язання цих задач, роботи в цій галузі було продовжено учнями та однодумцями М. Є. Жуковського. Продовжив роботи М. Є. Жуковського його учень і соратник С. О. Чаплигін, який у докторській дисертації «Про газові струмені» [21] розглянув задачу про витікання газу через отвір із нескінченної посудини й дослідив обтікання пластини, установленної перпендикулярно до потоку, що набігає. С. О. Чаплигін провів розрахункові й експериментальні дослідження з визначення коефіцієнта стиснення струменя й сили опору пластини. Роботи М. Є. Жуковського та С. О. Чаплигіна можна по праву віднести до основних і фундаментальних робіт із розгляду газодинамічних процесів витікання газу з відсіків.

Подальші дослідження газодинамічних процесів витікання газу через отвір із гострою кромкою, з радіусом r для дозвукової, звукової та надзвукової швидкості було здійснено іншими авторами [25, 26, 36, 40, 41, 74].

Відсік з надлишковим тиском широко використовують у різних галузях народного господарства. У кожній галузі промисловості розробляють спеціальні методи моделювання, проектування, виготовлення, випробувань та експлуатації посудин із надлишковим тиском [25, 74 – 78]. Розробка кабін ЛА здійснюється відповідно до основ проектування ЛА [283, 284].

Деякі спеціальні випадки навантаження замкненої оболонки під час вибуху скупченого заряду розглянуто в працях [79, 80]. Автори розв'язують комплексну задачу з урахуванням теплових процесів усередині оболонки й деформацію оболонки, визначення критерію подібності між моделлю й натурним зразком.

Основні закономірності на прямому стрибку ущільнення наведено в праці [304]. Установлено, що процес стиснення газу на стрибку ущільнення є адіабатним, проте він не є квазістатичним. Отже, цей процес незворотний. У процесі ударного стиснення газу відбувається збільшення ентропії. Зазначено, що неможливо отримати стрибок розрідження. Під час ударного розширення має відбуватися спадання ентропії, що суперечило б другому закону термодинаміки. Показано, що «если газ ударно сжать, то его обратное расширение происходит не по ударной адиабате, а по адиабате Пуассона». По завершенні процесу розширення газ у первісний стан не повертається, тиск і температура відрізняться від вихідного стану. Для загального випадку під час ударного стиснення потік газу характеризується порушенням квазістаціонарності. З огляду на ці особливості течії газу необхідно встановити закономірності зміни параметрів газу в одному або декількох відсіках за умови раптової розгерметизації відсіку.

У роботах [38, 65, 81, 82] показано, що зміна параметрів повітря у відсіку відповідно до термодинаміки тіла змінної маси підпорядковується умові квазістаціонарності. Наскільки виконується ця закономірність для інших випадків зміни параметрів повітря, наприклад, у відсіку при раптовому розширенні і подальшому стисненні повітря, авторами не розглянуто. Суперечливість теоретичних передбачень цього складного фізичного явища призводить до необхідності продовжити теоретичні та експериментальні дослідження з

установлення основних закономірностей процесу «раптове розширення - стиснення».

1.3. Аналіз функціональної залежності між параметрами гідродинамічних, газодинамічних та аероакустичних процесів у відсіку

1.3.1. Аналіз математичних моделей гідродинамічних та газодинамічних процесів у відсіку

Задача про дослідження процесів за умови стиснення й розширення потоку є однією з основних задач у газодинаміці та гідродинаміці [1, 9, 12, 14, 19, 23, 26, 28, 32, 36, 40, 43, 83 – 90]. Вивчення руху рідини й газу здійснюється відповідно до методів Лагранжа та Ейлера [30, 83, 91]. У методі Лагранжа вивчається рух кожної окремої частинки або виділеного об'єму. Рух газу може бути визначено, якщо відомі рівняння траєкторії руху кожної частинки у часі. Значного поширення набув метод Ейлера, відповідно до якого вивчаються параметри у точках вздовж лінії течії. На підставі цього методу у рухомій рідині виділяють два перерізи (елементарні перерізи). Через усі точки перерізу проводять лінії течії. Об'ємний пучок ліній течії утворює елементарний струмінь, а його бічна поверхня трубку течії. «Важнейшим свойством трубки тока является непроницаемость ее боковой поверхности для движущихся частиц жидкости» [9, с. 34]. Для опису зміни параметрів рідини між перерізами використовують контрольні об'єм і поверхню. Відповідно до [91, с. 65], «...внутренние ее части не рассматриваются – они были выделены лишь для обоснования метода». Для нестационарних потоків «...траектории жидких частиц не совпадают с линией тока» [9, с. 29]. Під час виведення рівняння Бернуллі в кожному перерізі розглядаються параметри об'єму (наприклад, густина рідини) [43, с. 22–23]. Переріз являє собою плоску фігуру, а розглядаються параметри, які включають три просторові координати (об'єм). Незважаючи на здійснені дослідження функції Бернуллі й установлений принцип максимуму [285], вплив прийнятих припущень на

результати моделювання за умови використання методу Ейлера недостатньо вивчений.

В авіаційній та космічній промисловості колишнього СРСР були розроблені й експлуатуються до сьогодні відсіки з заданими технічними вимогами [92 – 95]. Високого рівня розробок досягнуто завдяки використанню різноманітних методів моделювання параметрів газу у відсіках [4, 20, 21, 38 – 41, 65, 81, 82, 84]. Основними перевагами розроблених моделей є такі: математичні моделі описують широке коло розв'язуваних задач зміни тиску газу у відсіку залежно від однієї або кількох змінних величин, які було задано нормативними документами та конструктором, математичні моделі надавали допомогу конструкторові на всіх етапах проектування та експлуатації ЛА, за визначених вихідних даних та граничних умов (наприклад, повний тиск газу у відсіку дорівнює статичному) немає потреби інтегрувати параметри газу за об'ємом, що істотно скорочує обсяги обчислень. Незважаючи на досягнуті результати, не було сформульовано основні положення щодо вивчення процесів газу у відсіку. Тому необхідно продовжити дослідження щодо встановлення основних положень та закономірностей течії газу на підставі загальних уявлень про відсік(и).

Для теоретичного дослідження авіаційних крилових профілів використовують метод конформних відображень [91, с. 56–59]. Використовують метод конформних відображень складних профілів на інший контур, потенціал швидкості якого відомий. Метод ґрунтується на теорії функції комплексного змінного, і всі обчислення здійснюються в комплексних змінних. Метод має обмеження щодо розв'язання реальних гідродинамічних задач.

При розв'язанні багатьох наукових і практичних задач важливу роль відіграє вибір системи координат [17, 75, 88, 96, 97, 99], а деякі закони (наприклад, другий закон Ньютона) можуть виконуватися лише в інерційній системі відліку. Деякі дослідники використовують дві й більше систем координат [97]. Загальної теорії й методу вибору кращої системи координат під час опису досліджуваного фізичного явища не існує.

Енергетичні аспекти фізичних явищ і методи розв'язання задач теплотехніч-

них процесів викладено в роботах під час розгляду теорії та практики теплообміну енергетичних пристроїв [35], під час дискретно-імпульсного введення енергії [100 – 102], систем із поверхневими генераторами вихорів і закручених потоків [103, 104], під час обтікання лопаток газових турбін [105 – 112], під час перенесення тепла, маси речовини та енергії в твердих і рідких середовищах [87, 113 – 117], при розв’язанні обернених задач тепломасоперенесення [61, 118, 119]. У порівнянні з роботами [28, 120, 121], авторами запропоновано використовувати визначальні й невизначальні критерії подібності. Використання апріорної інформації під час моделювання аероакустичних процесів наведено в [122]. В опублікованих роботах не розглянуто задачу про встановлення функціональної залежності між параметрами газодинамічних та аероакустичних процесів у відсіку з урахуванням апріорної інформації.

Одне з важливих фізичних явищ досліджене в Інституті технічної теплофізики НАН України. Розроблено новий науковий напрям, який ґрунтується на дискретно-імпульсному введенні енергії (ДІВЕ) у досліджувану систему [90, 123, 124]. Результати аналізу процесів перетворення енергії парових бульбашок можуть бути використані під час дослідження процесів розгерметизації відсіку.

У роботах [90, 123, 124] здійснено систематизацію результатів дослідження теплообміну та гідродинаміки біля поверхні різноманітних пристроїв. Проведено теоретичні й експериментальні дослідження закручених потоків за наявності різних варіантів заглиблень, які можуть бути затребувані на практиці.

Для розв’язання задач теплообміну та динаміки рідини в праці [125] наведено один із чисельних методів – метод контрольного об’єму. Незважаючи на простоту і ефективність методу автором не представлено обґрунтування методу з вивчення процесів рухомого середовища, наприклад, у відсіку. У роботі не представлені основні положення опису процесів у контрольному об’ємі, що не дозволяє його використовувати як метод при описі фізичних явищ.

Для розв’язання одного класу рівнянь гідродинаміки та теплообміну напівобмеженого струменя на ввігнутій поверхні вжито метод інтегрованих еліптичних рівнянь – метод контрольного об’єму Патанкара–Сполдінга [86].

Наведено узагальнене диференційне рівняння гідродинаміки й теплообміну нестационарного, статично усередненого турбулентного потоку нестисливої рідини. Необхідно продовжити дослідження з обґрунтуванням і практичного використання розробленого методу з урахуванням матеріального об'єкту.

Відмінні особливості розрахунку турбулізованого потоку в проточній частині турбіни наведено в роботах [105 – 112]. Встановлено залежності для підвищення ефективності процесів тепломасообміну.

У працях [87, 113, 114, 115, 116, 117] розглянуто основні рівняння термопружності. Проведено дослідження залежності нелінійної області деформацій від напружень, що являє собою одну зі складних задач проектування систем.

Під час розв'язання багатьох наукових і практичних задач виникає потреба розв'язувати обернені задачі теплопровідності. Особливості й методи розв'язання обернених задач тепломасоперенесення, теплопровідності викладено в монографіях і статтях [61, 118, 119].

Імпульсне й динамічне навантаження конструкції розглянуто в роботах [44, 76, 126 – 135]. Здійснено дослідження з вивчення властивостей гідропружності оболонок [128], двокомпонентного середовища [129], випинання ортотропних оболонок обертання [126], перехідних процесів у пружному циліндрі [133], температурних напружень у деталях під час імпульсного нагрівання, нестационарних процесів у конструкції під час імпульсного й динамічного навантаження [76, 127, 131, 134], резонансу в гідропружних системах [132]. Вплив пульсуючого газу на відновлення властивостей речовини розглянуто в праці [67]. Необхідно продовжити дослідження з визначення закономірностей за умови імпульсного розширення газу.

Основні положення теорії ударного стиснення й утворення УХ розглянуто в працях [22, 23, 36, 74, 121, 304]. Встановлено закономірності поширення слабких і УХ у газі. Отримано одну з основних залежностей між густиною, тиском і температурою до і після ударного стиснення, яка дістала назву «ударна адіабата», або «адіабата Гюгонію». Установлено, що відповідно до законів збереження маси, імпульсу і енергії представляється можливим здійснити УХ як стиснення, так і розрідження. Відповідно до другого закону термодинаміки можливі тільки УХ, в

яких ентропія збільшується. Цій вимозі задовольняють УХ стиснення і не задовольняють УХ розрідження. Показано, що в ідеальному газі з постійною теплоємністю «возникновение ударной волны разрежения невозможно как с термодинамической точки зрения, так и с точки зрения устойчивости...» [22, с. 59]. Порушення цих основних закономірностей отримано для ударної адіабати при наявності зламу або перегину. Математичної моделі при наявності зламу або перегину не представлено. Тому для вирішення практичних задач в авіабудуванні потрібно продовжити вивчення процесів раптової розгерметизації відсіку(ів) ЛА.

Комплексно розглянуто проблеми опору матеріалів при деформації й руйнуванні з урахуванням основних факторів [136, 137]. Досліджено випадки деформації й руйнування матеріалів авіаційної й космічної техніки.

У праці [138] розглянуто модель плинності рідини на підставі рівняння Нав'є–Стокса. Зазначено, що метод розрахунку осереднених за числом Рейнольдса рівнянь Нав'є–Стокса має найдосконалішу модель плинності, за винятком представлення крупних вихорів або під час моделювання точкового джерела [276]. Проте використання цієї моделі для розв'язання пов'язаних із аеропружністю проблем потребує значних затрат, які лежать поза межами можливостей на етапі попереднього проектування. Додатково існують складності у формуванні постановки завдання й швидкості роботи алгоритмів нестационарних процесів [350].

Методологія розробки й використання математичних моделей процесів і систем механіки наведено у праці [139]. Викладено моделі реальних технічних систем і процесів, але не відсіків ЛА.

Теоретичні засади й приклади розв'язання задач у гідродинаміці й термодинаміці наведено в працях [9, 19, 140 – 142, 364]. Розглянуто статику, кінематику, динаміку рідини, ідеального газу. Записано основні рівняння руху рідини й приклади розв'язання задач термодинаміки й теплопередачі.

Основні математичні моделі сигналів акустичного випромінювання за стрибкоподібного розвитку процесів руйнування матеріалу розглянуто в роботі [143]. Зазначено переваги й недоліки моделей, галузі використання.

У працях [144, 145] наведено нелінійні математичні моделі, отримані з урахуванням корегування низки параметрів з експериментальних замірів. Для розробки моделі використано метод декомпозиції, що дало змогу більш обґрунтовано прийняти рішення й повно описати стаціонарні й нестаціонарні процеси, які протікають.

У праці [77] наведено математичні моделі й розв'язано задачі, які належать до гідродинаміки, теплообміну та горіння в паровому котлі. Розглянуто статистичні й динамічні процеси. Для опису динамічних процесів використано модель зосереджених параметрів. Замість рівнянь одномірної течії використано простіші рівняння, у яких параметри залежать лише від часу.

Для забезпечення функціонування деяких відсіків необхідно розв'язувати комплексну задачу, яка включає вивчення газодинамічних процесів і навантаження конструкції відсіку під час вибуху вибухової речовини [79, 80]. У праці [80] розглянуто задачу про нестаціонарну динамічну поведінку замкненої оболонки обертання під час вибуху зосередженого заряду вибухової речовини, яка містить систему рівнянь газової динаміки для опису хвильового руху продуктів детонації та рівняння теорії оболонок типу Тимошенко. Інтегрування рівнянь газової динаміки здійснено методом С. К. Годунова. За результатами розрахунку наведено навантаження на оболонку, максимальні значення деформацій оболонки в характерних точках.

Основні закономірності й математичні моделі за усталених і неусталених режимів течії рідини розглянуто в гідравлічних системах [85, 146]. Однією з основних робіт у галузі гідравліки є праця М. Гійона [85], у якій викладено основні методи розрахунку та проектування гідравлічних систем. Досліджено режими течії в торцевому зазорі і в пристрої типу «сопло–заслонка». Особливості течії в гідравлічних системах на деяких режимах наведено в працях [147, 148]. Широке використання мають методи розрахунку параметрів рухомого середовища з використанням електронно-обчислювальних машин [146, 149 – 152]. Використовуються такі високоефективні програмні засоби, як MATLAB, STAR-CD, FlowVision та інші. Попри це, розробити універсальну математичну модель для

всіх практичних задач (наприклад, ураховувати витік газу з реального відсіку) не є можливим. Зростаючі вимоги до створюваної продукції й специфіка розв'язання прикладних наукових завдань диктують необхідність модифікації, уточнення існуючих моделей, програм і розробку нових програмних засобів [287]. Дослідження процесів зміни параметрів газу для однооб'ємних або багатооб'ємних ГК під час втікання, перетікання й витікання газу розглянуто у працях [38 – 41, 65, 82]. За умови розгерметизації, особливо за раптової розгерметизації кабіни ЛА, не встановлено залежність між тиском, температурою, густиною газу в загальмованому потоці реального відсіку. Масові й енергетичні взаємодії газу у відсіку досліджено в монографії М. О. Мамонтова [38]. У роботі наведено математичні моделі й розглянуто рівняння для постійної й змінної маси, визначено енергетичні рівняння стану, досліджено умови стаціонарності процесу взаємодії газу із зовнішнім середовищем, нестаціонарні процеси недостатньо досліджено. У працях [40, 41] витікання повітря з об'єму описано на підставі укладення рівнянь нерозривності, стану повітря й термодинамічних процесів (ізотермічний та адіабатичний), записано основні моделі витікання повітря з об'єму для стаціонарних процесів. У працях [65, 81, 82] розроблено моделі для ізотермічного, адіабатичного й політропного процесів витікання повітря з відсіку. Відповідно до роботи [81] запропоновано модель для політропного процесу зі змінним показником політропи, значення якого визначають відповідно до рівняння:

$$n = k + (k - 1) \frac{\frac{dQ}{d\tau} + (\Pi - i)G_1}{RT_k(G_1 - G_2)}. \quad (1.1)$$

Показник політропи (n) залежить від показника адіабати (k), зовнішнього підведеного тепла (Q), питомого надходження енергії з повітрям від джерела надлишкового тиску (Π), питомої ентальпії повітря в кабіні (i), вагової витрати повітря, яке надходить до об'єму (G_1), температури повітря в кабіні (T_k), газової сталої (R), вагової витрати повітря через отвір розгерметизації (G_2). Під час виведення рівняння (1.1) використано показник термодинамічного процесу

відповідно до монографії М.О. Мамонтова [38]. У процесі течії газу з відсіку, коли змінюються величини Q , Π , i , T_k , G_1 , G_2 , показник політропи є змінною величиною. Незважаючи на універсальність такої моделі, її практичне використання обмежене. Для багатьох практичних задач досліджувана термодинамічна система є неізольованою (відкритою). У такій системі відбувається обмін енергією з навколишнім простором, і визначити показник політропи відповідно до (1.1) практично не є можливим. Одним із недоліків розробленої моделі є те, що така модель не враховує вплив статичних і динамічних параметрів потоку, деформацію відсіку. У найзагальнішому випадку процес витікання газу з відсіку є нестационарним і потребує додаткового вивчення, особливо щодо визначення показника політропи.

У роботі [82] вперше досліджено проблеми забезпечення життєдіяльності й безпеки під час розгерметизації кабіни ЛА з урахуванням фізіологічних вимог і міцності конструкції. Уперше витікання газу з відсіку розглянуто з урахуванням термодинаміки тіла змінної маси під час розв'язання задачі екстреного зниження ЛА на безпечну висоту із зовнішнім протитиском. Під час проведення таких розрахунків використано рівняння (1.1) і отримані аналітичні залежності показника політропи під час інтегрування рівняння витрат. Здійснено дослідження перебування людей в умовах зниженого тиску в кабіні й питання декомпресії. Задачу з визначення параметрів газу у відсіках під час раптової розгерметизації практично не розглянуто.

Для встановлення залежності між тиском (P), густини (ρ), температурою (T) повітря у відсіку значного поширення набули рівняння стану і політропи ідеального газу:

$$P = \rho RT , \quad \frac{P}{\rho^n} = const . \quad (1.2)$$

Відповідно до рівнянь (1.2.) описано ізотермічний ($n=1$), адіабатичний ($n=k=1,4$), політропний ($-\infty < n < \infty$) та інші процеси [65, 141]. Під час опису ізотермічного та адіабатного процесів використано сталий показник політропи ($n = const$). Під час опису політропного процесу відповідно до [81] для всього

термодинамічного процесу (ТДП) вважається, що показник політропи є змінною величиною ($n = \text{var}$). Використання такої моделі через складність розрахунків не набуло практичного використання. Дослідження рівняння політропи в диференційному вигляді наведено в [153]. Для політропного процесу можна визначити розв'язання задачі іншим шляхом. Для цього весь ТДП необхідно поділити на ділянки й на кожній із них припустити щодо сталості показника політропи. Безперервну криву політропи буде замінено на ділянки, у яких показник політропи є сталою величиною ($n = \text{const}$). Задача суттєво спрощується й при описі реальних ТДП, і за конкретний проміжок часу може виявитися, що така модель описує процес із достатньою для практики точністю за сталим показником політропи ($n = \text{const}$). Висунуту гіпотезу потрібно перевірити на реальних відсіках.

Для визначення масообмінних взаємодій у відсіку під час підведення, відведення й перетікання газу здійснено дослідження щодо квазістаціонарності процесу, зміни параметрів у відсіку й отворі, розподілу тиску й температури у фіксований момент часу, стану повітря у відсіку, питомої теплоємності повітря, коефіцієнту витрати, припущень, які докладно викладено у працях [38, 39, 41, 154, 155]. У роботі [81] за умови витока повітря із відсіку зроблено припущення про виконання умови квазістаціонарності, але воно не перевірялося і не доводилося.

Однією із задач при визначенні параметрів газу у відсіку є розгляд процесів під час витікання газу з відсіку через отвір постійного й змінного перерізу. Відповідно до робіт [41, 156 – 158] аналітичні залежності між параметрами газу у відсіку при його розгерметизації не отримані. Так, наприклад, у роботі [158] розглянуто задачу витікання газу через отвір змінного перерізу. Відповідно до робіт [41, 156 – 158] не отримано аналітичних залежностей між параметрами газу у відсіку при його розгерметизації. Так, наприклад, у роботі [158] розглянуто задачу витікання газу через отвір змінного перерізу. Запропоновано провести інтегрування графічним методом для докритичного режиму течії газу. Автор припускає, що отримати аналітичне розв'язання задачі не є можливим. Попри це, деякі аналітичні залежності отримано в роботі [156]. Розв'язання цієї задачі в цілому зведено до використання аналітичних виразів і графічного методу. Саме такий шлях

розв'язання цієї задачі було остаточно сформульовано й наведено у праці [157]. Крім того, під час виведення основних залежностей прийнято допущення щодо сталості ентальпії в загальмованому потоці й коефіцієнта витрати. Тим часом, у роботі [41] показано, що коефіцієнт витрати залежить від відношення тиску газу у відсіку й навколишньому просторі. Аналіз опублікованих робіт свідчить, що процеси витікання повітря з відсіку через отвір змінного в часі перерізу недостатньо вивчені, а форму отвору при раптовій розгерметизації відсіку практично не розглянуто.

Розроблені математичні моделі витікання газу з відсіку [96] мають значне практичне застосування. Попри це, моделі не враховують індивідуальні особливості відсіку (наприклад, підведення й відведення енергії тощо), що істотно обмежує сферу застосування.

У роботі [38] процес витікання газу з відсіку описано на підставі термодинаміки тіла змінної маси з виконанням закону збереження енергії. Опис процесів, що відбуваються, здійснено за параметрами рухомого повітря. Степінь впливу статичної й динамічної складових на процес витікання повітря з відсіку авторами не досліджено. Аналогічні моделі й припущення прийнято в роботах [36, 40, 41, 74]. Методи розробки моделей з урахуванням апріорної інформації для даного класу задач практично відсутні.

Однією зі складних задач під час моделювання є задача з вільними границями [159]. У праці недостатньо повно наведено й описано фізичні явища, які можуть виникати під час протікання газодинамічних процесів із вільними границями.

Для виконання гідравлічних розрахунків складних авіаційних систем в Інституті проблем моделювання в енергетиці імені Г. Є. Пухова НАН України було розроблено ефективні методи й алгоритми. У монографії [6] розглянуто методи моделювання газових і рідинних систем енергетичних і холодильних установок. Представлений алгоритм розрахунку складної розподільчої мережі в області критичних параметрів газу. Отримано рішення задачі ітераційним шляхом. Розроблені моделі й програми було запроваджено на підприємствах авіаційної промисловості колишнього СРСР, зокрема, і на АНТК імені О. К. Антонова. На

підставі комплексного методу розроблено алгоритм розрахунку дросельних шайб із урахуванням гідравлічного опору й акустики [7]. Порівняно з іншими методами розрахунку [5], розрахунок шайби здійснено чисельним методом за критерієм мінімуму гідравлічного опору та шуму.

У процесі експлуатації конструкція кабіни ЛА піддається, крім статичного навантаження, ударним та імпульсним впливам [130, 135, 160, 161], коливальним впливам [162 – 164]. В авіації одним із нетрадиційних видів навантаження фюзеляжу є зіткнення з птахом [165 – 167, 291], яке може спричинювати руйнування лобового скла та розгерметизацію кабіни.

В авіації існують випадки руйнування шини, різних елементів конструкції шасі. Дослідження газодинамічних процесів під час розриву шини розглянуто в роботах [168, 169]. Авторами отримано залежності за позитивного впливу струменя газу на диск. Враховуючи суперечливість одержаних результатів, відповідно до роботи [42], необхідно продовжити дослідження з визначення силового впливу струменя повітря на диск. У роботі [168] наведено методику для розрахунку впливу реактивного струменя на стінки ніші шасі літака й агрегатів, які розташовані у відсіку шасі. Автором показано, що існуючі випадки руйнування пневматика в авіації потягли за собою загибель людей. На ступки шасі літака важливий вплив чинять аеродинамічні навантаження [170]. Здійснено аналіз навантаження для різних схем розташування ступок на цивільних літаках. Наведено деякі довідкові матеріали про максимальні експлуатаційні навантаження на ступки шасі й вантажних люків, отримані за матеріалами льотних і трубних випробувань літаків і моделей АНТК ім. О. К. Антонова та С. В. Ілюшіна.

Останніми роками на світовому ринку збільшуються потреби в новій авіаційній техніці [171]. Проблеми сертифікації пасажирських літаків розглянуто в роботі [172]. Однією з проблем є забезпечення життєдіяльності людей при розгерметизації кабін.

Під час створення й проведення випробувань агрегатів, пристроїв, систем авіаційної техніки важливими величинами рухомого середовища є швидкість звуку [71, 173 – 179,] й витрати [174, 180 – 190]. Для визначення швидкості звуку

розроблено методи й засоби. За допомогою або відносно цих величин вважається можливим визначити режим течії, степінь стисливості середовища, швидкість поширення пружних хвиль, галузь практичного застосування пристрою.

Швидкість звуку в нерухомому середовищі (швидкість поширення нескінченно малого збурення в газі) визначається відповідно до [74]. Відповідно до рівняння Лапласа визначається швидкість звуку в нерухомому середовищі при зміні параметрів газу по адіабаті. Дане рівняння не враховує перетворення параметрів течії, що призводить до необхідності встановлення залежності швидкості поширення пульсацій газу при раптовій розгерметизації відсіку.

Існують різноманітні методи визначення витрати [6, 36, 41, 74, 191 – 193], які відрізняються одне від одного, насамперед, структурою моделі витрати повітря, параметрами повітря, що входять у модель, коефіцієнтами, методами вимірювання параметрів повітря, методами одержання адекватності моделі реальному процесу. Структура моделі витрати повітря в багатьох випадках визначає галузь застосування та ефективність методу. У роботі [74] виведено формулу для розрахунку витрати повітря за параметрами гальмування повітря на вході у звужуючий пристрій та газодинамічними функціями. Значного поширення набув такий метод розрахунку витрати повітря під час проведення газодинамічних розрахунків газотурбінних двигунів [191]. У зв'язку зі складністю цього методу розрахунку виникла потреба у створенні простіших інженерних методів розрахунку витрати повітря. У праці [41] наведено модель визначення витрати повітря за параметрами гальмування повітря всередині відсіку й навколишнього середовища, в яке затікає повітря. Аналогічну модель розрахунку витрати повітря наведено в роботі [36], в якій подано виведення формули розрахунку повітря через сопло, здійснено дослідження деяких властивостей такої моделі й визначено галузь використання моделі. При розрахунку різних авіаційних систем використовують моделі визначення витрати повітря за перепадом тиску на розглядуваному елементі, температурою повітря й змінними коефіцієнтами, які залежать від режиму течії й конструктивного виконання розглядуваного елемента [6]. У роботах [192, 193] формування моделі витрати повітря наведено за параметрами рухомого потоку. Методи вимірювання таких

параметрів виявилися доволі трудомісткими й не доведені до широкого практичного застосування.

В основі багатьох розроблених моделей і методів моделювання лежить припущення, що параметри газу у відсіку змінюються по адіабаті або ізотермі [39 – 41, 85, 194]. Створення таких методів здійснюється на підставі експериментальних стендових конкретних відсіків із визначенням різноманітних коефіцієнтів (наприклад, коефіцієнту витрати), які в багатьох випадках є функцією від режиму течії повітря. Для визначення таких коефіцієнтів конкретних літаків необхідно виконати велику кількість експериментальних досліджень; у багатьох випадках це практично дуже складно. Тому пошук ефективних методів визначення витрат повітря за параметрами, які описують реальний процес витікання повітря з відсіку й контролюються штатним обладнанням таких об'єктів, має практичне значення і являє собою предмет наукових досліджень.

Характерні особливості розробки математичних моделей в авіації наведено в роботах [88, 92 – 94, 99, 195 – 197]. У монографії [195] розглянуто математичні моделі та методи формування моделей польоту ЛА. Розглянуто різні моделі згладжування при готівки між вимірюваними величинами апріорних аналітичних зв'язків. Аналізуються умови, при яких «учёт связей приводит к повышению точности сглаживания». Залежно від розв'язуваних задач розглянуто детермінований і статистичний підходи до моделювання польоту. Автор аналізує один із класів задач, який розглядає побудову математичної моделі за наявності різних відхилень у конструкції від потрібних величин. Вплив неточностей виготовлення конструкцій на результати моделювання розглянуто в роботах [195, 198, 199]. Загальної методики розробки моделі з урахуванням апріорної інформації не представлено.

Для оцінювання параметрів математичної моделі широко використовують метод найменших квадратів (МНК) [200]. Одним із недоліків МНК є його чутливість до похибок у вимірюваних величинах. Математичні моделі, одержані за результатами експериментальних досліджень, часто-густо мають зміщені оцінки. Для усунення впливу похибок на результати моделювання розроблено й широко

використовуються перешкодостійкі методи [195, 201, 202]. Під час проведення робіт зі зниження аеродинамічного шуму в СКП було розроблено й використано на практиці алгоритм перешкодостійкого методу для поліноміальних моделей із вільним коефіцієнтом [201], алгоритм евристичного перешкодостійкого методу згладжування експериментальних даних із мінімізацією залишків [202]. З урахуванням одержаних математичних моделей розроблено принципово нові пристрої зі зниження аеродинамічного шуму в СКП. Одним із пристроїв є шумопоглинаюче сопло [122]. Розроблено математичну модель і проведено дослідження моделі з урахуванням апріорних зв'язків, критеріальних залежностей. Загальної методики розробки таких моделей не представлено. Необхідно узагальнити отримані результати і сформулювати загальні принципи встановлення функціональної залежності між параметрами з урахуванням апріорної інформації.

Високий рівень конкуренції на світовому ринку авіації [171, 172] стимулює неперервне зростання вимог до ЛА й спонукає постійно здійснювати вдосконалення встановлених залежностей із визначення параметрів газу (повітря) всередині відсіків. Тому встановлення функціональної залежності між параметрами реальних об'єктів має теоретичне і практичне значення.

1.3.2. Аналіз функціональної залежності між параметрами хвильових процесів у відсіку

Зміна параметрів газу у відсіках відбувається за умови підведення, відведення, перетікання газу й супроводжується змінами аеродинамічних сил або утворенням збурень, які призводять до виникнення аеродинамічного шуму. Дослідження й встановлення основних закономірностей рухомого потоку з урахуванням газодинаміки й акустики є одним із складних і важливих завдань аероакустики [37, 203, 204]. У праці [204] вказано, що модель Лайтхілла [205] описує лише вільний турбулентний струмінь і не враховує обмеження поверхні. М. Дж. Лайтхілл перетворив рівняння Нав'є–Стокса до неоднорідного хвильового рівняння, яке пов'язує зміну густини в навколишньому нерухомому середовищі з

характеристиками турбулентного струменя. Загальні рівняння Блохінцева–Хоу мають обмеження щодо використання й можуть бути використані для деяких модельних задач [204]. Тому використовують розрахунково-експериментальні методи дослідження акустичних та ударно-хвильових, термодинамічних процесів [203, 204, 206, 207].

У процесі зміни теплообміну у відсіку ЛА відбувається, з одного боку, зміна термодинамічних властивостей газу у відсіку, а з іншого боку, відбувається вплив газу на конструкцію відсіку та людей [4, 208]. Залежно від характеру процесів, які протікають, відсік може бути підданий статичному, динамічному або спільному їх впливу. Дослідження стаціонарних і нестаціонарних газодинамічних процесів у відсіку з урахуванням пружних властивостей конструкції відсіку є однією зі складних і наукоємних задач [209]. Розв'язання цієї задачі суттєво ускладнюється, якщо кабіна ЛА містить кілька сполучених відсіків і накладаються експлуатаційні обмеження [82].

Найхарактерніші режими та явища несталого руху рідини в гідросистемах викладено у працях [30, 31, 83, 189, 210 – 213]. Одним із основних і фундаментальних явищ у гідравліці є гідравлічний удар. Уперше теоретичні й експериментальні дослідження гідравлічного удару здійснив М. Є. Жуковський [189, 210]. Встановлено основні залежності для коливального процесу, який виникає в пружному трубопроводі, заповненому рідиною, унаслідок швидкого закривання або відкривання крану на торці трубопроводу. Для газових процесів такі процеси недостатньо вивчені, що призводить до необхідності продовжити дослідження за умови раптової розгерметизації відсіку.

У роботі [31] наведено диференційні рівняння неусталеного руху рідини в трубопроводах. Розглянуто поширення збурень, які описані хвильовим рівнянням другого порядку. За допомогою методу характеристик одержано розв'язання хвильового рівняння. У праці [30] наведено результати розв'язання кількох задач неусталеного руху рідини в трубах із лінеаризованим тертям. За допомогою відносно простих рівнянь вважається можливим адекватно описати досліджуваний процес.

Розрахунок основних параметрів хвилі, утворення, поширення й поглинання пульсацій тиску газу наведено в роботах [36, 70, 71]. Відповідно до роботи [71], температура газу за хвилею розрідження визначається відповідно до рівняння ізоентропійності, а за ударною хвилею – рівнянням Ренкіна–Гюгоніо.

Лінеаризований рух газу з постійною швидкістю поширення збурень розглянуто в роботі [36]. Інтегрування кінцевих збурень здійснено за допомогою графоаналітичного методу. Під час поширення збурень використано інваріант Рімана. Графічно показано механізм утворення хвиль збурення (стиснення й розрідження). Наведено елементарну теорію ударної труби. У праці [70] показано, що для суміші газів водень–аргон елементарна теорія ударної труби дає задовільні оцінки відповідно до результатів експерименту. Недостатньо досліджені процеси в одному або декількох відсіках.

Особливості поширення хвиль у насичених пористих середовищах (НПС) досліджено у праці [214]. У порах НПС міститься неньютонівська рідина. Одержано швидкість і затухання поверхневої хвилі Релея, яка поширюється вздовж границі НПС. Розв’язання задачі в загальному вигляді не наведено.

У роботах [214 – 220, 265] здійснено дослідження взаємодії акустичних хвиль із різними елементами конструкції. Розглянуто задачі поширення хвиль у пружному середовищі. Теоретичне й практичне значення мають дослідження з вивчення нестационарних процесів аеропружних оболонок. Приклади розв’язання такого класу задач викладено в монографії [75], проте не розглянуто газодинамічні процеси в оболонці.

Однією з важливих і актуальних задач є вивчення поширення пружних хвиль у тілах з початковими напруженнями [209]. Наведено теорію поширення пружних хвиль у тілах, яка має практичне значення для розробників авіаційної техніки. Докладніше ці питання досліджено в оглядовій статті [221]. Автором широко використано лінеаризовану теорію для непорушної та стисливої в’язкої рідини. При розгляді задачі проведено ототожнення лагранжевих та ейлерових координат. Враховуючи важливість цього припущення, автор окремо розглянув цю задачу в статті [222]. Автором виділено три напрями досліджень, які наведено в [8, 209].

Одержані результати можуть бути затребувані на практиці, якщо буде розв'язано кілька прикладних наукових задач при переході від теорії до практики. Попри це, проведені дослідження можна по праву віднести до основних і фундаментальних праць для даного класу задач.

Було проведено дослідження з вивчення деформації конструкції під впливом зовнішніх і внутрішніх сил, які можуть бути викликані пульсаціями тиску газу в СКП і силової установки (СУ) [97, 223, 224, 288, 357]. Аероакустичні процеси у СКП мають також подразнюючий вплив на людей. На підставі енергетичного методу проведено дослідження процесів перетворення енергії при деформації основних елементів конструкції, які застосовуються в авіабудуванні (оболонка, шпангоут, стрінгер) [97, 98]. Розглянуто напруження в конструкції, коли деформація оболонки задовольняє закону Гука. У роботі [311] розглянуто характеристики відмови й руйнування ступок СУ. Запропоновано методика оцінювання втрат повного тиску, але не наведено модель пульсацій рухомого газу.

При русі турбулентного потоку повітря всередині каналу відбувається випромінювання вузькосмугових випадкових коливань на частотах, близьких до власних частот коливань конструкції [223]. Визначено розрахункову найменшу власну частоту коливань каналу, яка становить 174 Гц. Проведено експериментальні дослідження, які дали змогу визначити частоту власних коливань досліджуваної конструкції. Розбіжність між розрахунком і експериментом становила 11 Гц, що, на думку авторів, є прийнятним для даного класу задач. У роботі не представлені результати досліджень, які могли б поширити отримані результати на інші пристрої.

У роботі [224] наведено результати досліджень акустичних характеристик деяких агрегатів СКП. Розглянуто модель акустичної потужності шуму, що генерується шайбою в трубопроводі. Проведено дослідження пристрою типу «сопло–заслінка», лише на зворотний рух повітря. За деяких витратах клапан працює в автоколивальному режимі й випромінює дискретну складову шуму. Автор не розглядає фізичну природу таких коливань. Запропоновано пристрої редукторного типу для усунення автоколивальних режимів випускного клапана. Загальної теорії коливань таких процесів не представлено.

Вперше розроблено експериментально-статистичний метод формування критеріїв і критеріальної моделі аеродинамічного шуму [225]. Розроблено моделі простих джерел аеродинамічного шуму. Для отримання стійких оцінок критеріальної моделі за наявності похибок у вимірюваних параметрах використано перешкодостійкі методи [201, 202]. На підставі розробленої математичної моделі було проведено роботи зі зниження аеродинамічного шуму у СКП з урахуванням внеску розглянутих факторів у загальний рівень шуму. Результати досліджень у цілому не узагальнено й не наведено методик у зниження шуму у відсіку ЛА.

Основні джерела акустичного шуму, процеси утворення й поширення хвиль у відкритих і закритих приміщеннях викладено в роботі [206]. Для дослідження хвильових процесів під час руху середовища використано модель з параметрами середовища у вигляді двох складових, які включають початковий стан параметрів газу (тиск, температуру, густину та хвильову складову пульсацій газу. Цей підхід широко використано в інших роботах [25, 36, 37, 176, 226].

Експериментальні дослідження розвитку автоколивань під час обтікання тіла з внутрішньою порожниною, сполученою із зовнішнім потоком через отвори в обтічній поверхні, було проведено в повітряному й водному середовищах [227]. Визначено спектри потужності звукового тиску в режимі розвинених автоколивань і за їх відсутності. На підставі проведених експериментальних досліджень автори доходять висновку, що відпрацювання форми отвору з метою зниження звуковипромінення і вібрації тіл з відкритими порожнинами слід проводити стосовно конкретної конструкції порожнини. Таким чином, при розробці нових об'єктів актуальними є завдання щодо зменшення пульсацій тиску середовища для тіл з відкритими порожнинами.

Нестационарні гідродинамічні пристінкові пульсації тиску в проточних каналах складної геометричної форми розглянуто в роботі [228]. Проведено експериментальні дослідження типових моделей енергетичного обладнання та проведено аналіз впливу числа Рейнольдса на спектри пульсацій тиску. Проведені дослідження показали, що пульсації тиску визначаються переважно індивідуальними особливостями конструкції каналу.

Для встановлення основних закономірностей рухомого потоку було проведено експериментальні дослідження аеродинамічних і акустичних характеристик дозвукового струменя, що дало змогу виявити явище акустичного ослаблення турбулентності в дозвукових струменях [229]. Це явище зареєстровано у вигляді відкриття № 212 з пріоритетом від 31 березня 1967 р. Дослідження з вивчення структури струменя продовжені в роботі [230]. Показано, що введення неоднорідностей у примежовий шар на виході з сопла призводить до порушення азимутальної однорідності струменя і тим самим послаблює великомасштабні структури. Використання цього відкриття для практики недостатньо вивчено. Отримані результати вказують на те, що необхідно продовжити дослідження по встановленню залежності швидкості звуку від зміни параметрів газу.

У роботах [203, 231] наведено акустичні характеристики літаків і вертольотів. Розглянуто основні джерела шуму на місцевості та всередині кабіни, наведено методи оцінювання й нормування шуму, методику розрахунку ближнього акустичного поля реактивного струменя. Авторами запропоновано прийоми розрахунку основних джерел шуму. Розглянуто комплексний підхід до проблеми зниження шуму літака з урахуванням охорони навколишнього середовища та економії авіаційного палива. Необхідно продовжити дослідження по встановленню методів і засобів зниження шуму від СКП і САРТ.

У роботі [229] розглянуто різні випадки утворення шумів аерогідромеханічного походження. Наведено норми шуму в США, розглянуто методи й засоби зниження шуму на конкретних виробничих процесах. Розглянуто нормативні вимоги щодо шуму на транспорті, зокрема, в авіації. Автори праці виклали основні загальнонаукові питання аерогідромеханічного шуму, що дає змогу розширити сферу практичного застосування результатів досліджень. У роботі не розглянуто механізм утворення й поширення шуму рід час раптової зміни тиску газу в об'ємі і не представлена математична модель пульсації газу.

У роботі [232] описана експериментальна установка по дослідженню властивостей тонкостінних циліндричних конструкцій при турбулентному впливі пульсації тиску. Проведено порівняння результатів розрахунку та експерименту.

Наведена в роботі математична модель адекватно описує акустичні процеси до частоти 4 кГц. Використання математичної моделі в сфері високих частот ускладнено. Необхідно продовжити розробку моделі пульсацій газу.

У роботі [72] наведено дослідження склопластикової пластини під час нормального падіння на неї ступінчастої ударної хвилі. У середній частині пластини було зроблено надріз. Досліди проведено в повітряній ударній трубі; було визначено швидкість ударної хвилі. У роботі наведено механізм руйнування пластини, що дає змогу підвищити рівень знання про досліджуваний процес. Авторами роботи не надано рекомендації щодо поширення одержаних результатів для вирішення практичних завдань.

Дослідження газодинамічних процесів витікання газу з відсіку через отвір наведено в роботі [41]. Механізм утворення, поширення аеродинамічного шуму під час раптової зміни тиску газу практично не розглянуто. Тому необхідно встановити закономірності зміни параметрів газу у відсіку при раптових процесах.

У вивченні аероакустичних процесів одне з важливих місць посідають методи вимірювання, обробки, запису вібрації і коливальних процесів [233]. У роботі особливу увагу приділено фізичним засадам тих чи інших методів вимірювання, можливостям, які є в нових приладах і пристроях акустичних вимірювань. Розглянуто методи моделювання під час акустичних вимірювань. Недостатньо повно розглянуто методи обробки хвилеподібних і випадкових процесів.

Під час обробки експериментальних даних часто використовують різні спектральні й кореляційні методи. Особливості застосування таких методів до вирішення різних завдань наведено в роботі [234]. Широко проаналізовано методи оцінювання спектрів, функцій когерентності й фазових характеристик, що дає змогу підвищити рівень виділення корисних сигналів при аналізі складних процесів. Одним із суттєвих недоліків є те, що в праці відсутні робочі програми та рекомендації щодо практичного застосування методів фільтрації.

На підставі накопиченого теоретичного [37, 139, 173, 204 – 206, 235 – 237, 299, 359] і експериментального [238 – 243] досвіду з урахуванням особливостей течії газу в реальних відсіках необхідно продовжити дослідження аероакустичних

характеристик рухомого газу у відсіках ЛА за різних випадків розгерметизації, що має як теоретичне, так і практичне значення.

1.3.3. Аналіз процесів течії рідини і газу в зазорі

Витікання газу з герметичної частини фюзеляжу ЛА в атмосферу відбувається через випускний клапан (ВК) САРТ. За допомогою ВК проводиться регулювання прохідної площі і дроселювання потоку, що забезпечує необхідний тиск газу у відсіку. ВК найчастіше являє собою пристрій у вигляді регульованого зазору. Конструкції і принципи роботи ВК наведено в роботах [40, 41].

Під час витікання газу з відсіку застосовують пристрої, в яких струмінь газу набігає на екран (заслінку). У процесі руху газу в зазорі відбувається силова дія газу на екран, що супроводжується зміною параметрів потоку, який рухається в зазорі й відсіку. Встановлення основних закономірностей силової дії газу на екран є однією з важливих задач з визначення параметрів газу у відсіку. Дослідження процесів взаємодії газу і екрану, сфери застосування таких процесів і основні математичні моделі наведено в роботах [20, 21, 24, 29, 85, 210, 244, 245].

Чаплигін С.О. розглянув задачу обтікання вільним струменем газу [21] пластини, поставленої перпендикулярно до напрямку потоку. Обчислено коефіцієнт стиснення струменя, силу опору пластини й зіставлено результати розрахунку й експерименту. Широке практичне застосування має формула $P_n = C_x S \frac{\rho W^2}{2}$ визначення сили лобового опору пластини (P_n) в залежності від коефіцієнта лобового опору пластини (C_x), площі пластини (S), густини (ρ) та швидкості потоку (W).

У роботі [29] описано процеси обтікання струменем газу (рідини) плоского екрану (стінки). Розглянуто процеси руху усталеного ідеального газу і силовий вплив вільного струменя на екран. Отримано математичну модель силової дії вільного струменя газу на екран. Формула $P = QW$ (Q – масова витрата газу) визначає динамічну силу впливу струменя газу на плоску стінку, встановлену

перпендикулярно до потоку. Для ідеальної і нестисливої рідини визначена сила і точка її докладання на екрані.

У роботі [24] отримана формула $R = S_c p_h + \frac{\rho Q^2}{2S_c}$ (S_c – площа сопла, p_h – тиск

рідини перед соплом, ρ – густина рідини, Q – секундна витрата об'єму рідини) для визначення сили впливу струменя (R) на заслінку в пристрої типу сопло–заслінка. На базі отриманого рівняння описано механізм управління розглянутого пристрою.

У роботах [43, 244] наведено експериментальні дані взаємодії струменя повітря між екраном і вихідним отвором. Для вільного струменя досліджено параметри течії. На підставі гідравлічного розрахунку з використанням отриманих коефіцієнтів гідравлічного опору визначити області відштовхування і притягання струменя газу на екран не представляється можливим. Тому необхідно розробити модель силового впливу газу на екран.

У роботі [85] розглянуто гідродинамічні сили, що діють на різні гідравлічні органи. На підставі рівнянь механіки рухомого тіла проведено аналіз витікання однорідної рідини із замкнутої посудини зі швидкістю (V) через отвір поперечного перерізу (S) на екран. При цьому, на екрані виникає сила (F), що дорівнює $F = MW + (P_1 - P_0)S$ (M – масова витрата рідини, P_1 – статичний тиск рідини на виході з отвору, P_0 – тиск навколишнього простору, в який відбувається витікання рідини). Напрямок цієї сили збігається з напрямком швидкості (W). Досліджено деякі окремі випадки течії рідини і реакції потоку, які викликані зміною кількості руху.

У роботі [245] наведено результати експериментальних досліджень вихрових клапанів з осьовим, осерадіальним і щілинним дифузорами. Максимальну пропускну здатність має вихровий підсилювач зі щілинним дифузором з коефіцієнтом витрати $\mu = 1,91$. Робоча характеристика дифузора має дві гістерезисні зони ступеневої зміни витрати.

У роботі [134] для гідравлічних систем проведено теоретичні та експериментальні дослідження дросельного керуючого елемента типу сопло–

заслінка. Визначено силу впливу вільного струменя, що витікає з отвору або насадка, на нерухомий екран. Значення цієї сили на плоску стінку, встановлену перпендикулярно до потоку, визначається за формулою аналогічно роботі [29]. У роботах [29, 210] отримано рівняння тільки при позитивній дії струменя рідини на екран.

Так як силова дія рідини та газу на екран описується різноманітними рівняннями, необхідно продовжити дослідження щодо встановлення закономірностей процесів під час витікання повітря з відсіку на екран.

Розглянуто цікаві ефекти й парадокси в аеродинаміці і гідравліці [42, 246]. Здійснено аналіз руху газу на підставі закону Бернуллі. Струмінь газу при виході з каналу з диском у процесі обтікання тіла на далекій відстані чинить відштовхувальну дію, а на близькій – притягувальну. Пояснюється це явище тим, що на далекій відстані струмінь впливає на тіло ударом. При невеликих відстанях має місце радіальний потік газу, в якому швидкість потоку падає, а тиск збільшується, від центру до периферії диска. У середній частині диска тиск може бути меншим за атмосферний. Тому зовнішній атмосферний тиск притягує тіло до диска. Отримано тільки якісну оцінку, а кількісну оцінку силової дії газу на екран не наведено. Тому необхідно продовжити дослідження щодо визначення основних закономірностей взаємодії струменя газу і екрану.

Особливості течії рідини в золотниковому розподільнику з циліндричним золотником наведено в [247]. При відкритій щілині золотника витрату рідини через розподільник розраховують за формулою Торічеллі, в закритому положенні – за формулою Пуазейля. Наведено витратна характеристика золотника. Витоки рідини через кромку золотника становлять кілька кубічних сантиметрів за хвилину. Необхідно продовжити дослідження по застосуванню розроблених моделей при визначенні витоку з фюзеляжу літака.

У гідравлічних системах широко застосовують пристрої, в яких використовується течія рідини в зазорі [189, 248, 249]. При проектуванні гідравлічних систем літака використовується робота [189], в якій наведено довідкові матеріали за елементами гідроприводу. Авторами наведено гідравлічні

характеристики дросельних щілин регулювальних і розподільних пристроїв. У роботі наведено формули розрахунку витрати рідини за коефіцієнтами місцевого опору. Розрахунок основних параметрів гідравлічних струменевих пристроїв розглянуто в роботі [248]. Розглянуто різні режими взаємодії струменя з прийомним каналом. Досліджено режими течії при взаємодії струменя рідини з дефлектором. Для деяких пристроїв наведено наближені формули коефіцієнта витрати, які є нелінійними залежностями щодо чисел Рейнольдса. Використання таких коефіцієнтів на практиці істотно обмежує сферу їх застосування.

Одну зі складних задач тепломасообміну газу під час обертання колеса турбомашини у вузькій циліндричній камері розглянуто в роботі [117]. Відповідно до експериментальних даних [250], на диску і нерухомих стінках екрану утворюються окремі примежові шари, розділені прошарком (ядром), що обертається як тверде тіло з кутовою швидкістю. Вдало обраний метод розв'язання задачі дав змогу описати деякі закономірності масообміну в зазорі між диском і екраном. На підставі отриманих результатів необхідно продовжити дослідження по розробці моделі силового впливу газу на екран, що дозволить здійснювати оцінку силового впливу газу на екран на експлуатаційних режимах течії газу.

Режими течії в зазорі розглянуто за наявності плівки [251], ньютонівської і неньютонівської рідин [252], вібрації [253]. Проведено дослідження обтікання пластини на режимі сильної взаємодії за наявності масообміну з використанням рівняння Ейлера [349]. Математичну модель пульсацій рідини не наведено.

Аналіз робіт свідчить, що течія рідини і газу в зазорі має складну структуру. Недостатньо досліджені процеси силового впливу рідини і газу в зазорі між відсіком і екраном. Тому необхідно продовжити дослідження щодо виявлення залежностей між параметрами повітря у відсіку й зазорі.

1.4. Аналіз функціональної залежності між параметрами і методів оцінювання герметичності відсіку

Невід'ємною складовою частиною при виготовленні, випробуваннях та

експлуатації ЛА є перевірка фюзеляжу на герметичність [254]. Степінь герметичності фюзеляжу, кабіни багато в чому визначається на етапах проектування і виготовлення ЛА.

Реальна кабіна ЛА має місця з'єднання різних агрегатів, стики листів обшивки фюзеляжу, щілини, люки, двері, місця й вузли для проходження електричних джгутів і елементів управління. Наявність цих та інших вузлів конструкції на ЛА за надмірного тиску в кабіні призводить до утворення несанкціонованого витікання повітря. Такий вид течії дістав назву витоку повітря. Дослідження щодо встановлення параметрів повітря у відсіку за наявності витоку є актуальними і до сьогодні. Повністю усунути такий вид течії повітря з відсіку реального ЛА не є можливим. Тому кабіну ЛА можна назвати герметичною лише умовно [40, 41].

У порівнянні з іншими видами перетікання повітря з відсіків витік повітря характеризується відсутністю достовірної інформації про геометрію отвору і параметри течії (зміна повного і статичного тисків повітря, наявність підведення й відведення енергії, виконання механічної роботи тощо). Завдання граничних умов для розв'язання рівнянь газодинаміки утруднено. Математичний опис течії рідини (газу) через щілину є доволі складним, і його можна віднести до окремого класу розв'язуваних задач. Наявність витікання багато в чому ускладнює практичне застосування числових методів розрахунку параметрів повітря у відсіках ЛА в тривимірному просторі.

Витоки повітря впливають на параметри газу всередині відсіку, на розподіл температури по відсіку. Витоки повітря можуть істотно впливати на параметри повітря усередині відсіку, а для деяких об'єктів витоки призводять до катастрофічних наслідків. Наприклад, однією з причин катастрофи космічного шатлу «Челленджер» 28 січня 1986 р. були витоки з герметичного відсіку [17]. Наявність витоків на реальному об'єкті істотно ускладнює методи розрахунку й утруднює перехід від розрахунку параметрів газу у відсіку за моделлю для одновимірного простору до моделі для тривимірного простору. Крім того, нормативні документи (АП-25, FAR-25) на розробку й експлуатацію ЛА не містять

однозначних вимог щодо застосування моделей розрахунку параметрів газу у відсіку для тривимірного простору.

Для літаків витoki повітря впливають на параметри повітря усередині кабіни, режими роботи СКП, САРТ, агрегати й прилади, які встановлені в кабіні. Значний вплив витоків на параметри повітря всередині відсіку має місце у відмовних ситуаціях СУ літака. У такому разі подача повітря від працюючих СУ виявляється недостатньою для компенсації втрат повітря з відсіків і САРТ не забезпечує необхідний закон регулювання тиску повітря. Тому необхідно враховувати вплив витоків на тиск повітря усередині фюзеляжу. Розробка методів і засобів з визначення параметрів витоків повітря й зведення до мінімуму їх впливу на умови життєдіяльності людей усередині відсіків фюзеляжу є одним із основних завдань при розробці та експлуатації літака.

Для визначення придатності літака до експлуатації проводять натурні випробування герметичної кабіни. Визначають витoki повітря з ГК і порівнюють їх із допустимими значеннями [254]. За надмірного максимального тиску повітря у відсіках фюзеляжу витoki повітря не повинні перевищувати допустиму величину. За перевищення отриманих витоків над допустимими проводять додаткові роботи з пошуку місць витоків і їх усунення. Потрібно розробити нові моделі витоку для реальних кабін ЛА.

Пряме визначення кількості повітря, що витікає з відсіку через різні нещільності, зробити практично неможливо. Розроблено різні методи з перевірки герметичності відсіку [41, 254]. Значного поширення набув метод перевірки герметичності відсіку шляхом вимірювання швидкості падіння тиску повітря у відсіку. У роботі [41] запропоновано на підставі випробувань натурального зразка визначати середнє значення витоку повітря за певний проміжок часу при зміні тиску повітря. Розроблений метод не дає змогу описувати різноманіття процесів витікання повітря з відсіку, які мають місце під час розробки та експлуатації нових літаків. Тому необхідно продовжити дослідження з визначення параметрів повітря за наявності негерметичності фюзеляжу і встановити функціональну залежність між параметрами у разі витоку.

Особливості та методи визначення витоків в інших галузях народного господарства наведено в роботах [255, 256, 365]. У роботі [255] обґрунтовано актуальність проблеми визначення витоків рідини при розробці радіальних кулькопоршневих насосів. Авторами роботи проведено дослідження з визначення витоків в парі «кулька–циліндр». Для визначення витоків через кільцеве щільне ущільнення за основу взято формулу Гагена–Пуазейля. У роботі [256] показано, що герметичність еластомірних ущільнень силових гідроциліндрів не може бути визначена ні розрахунковим шляхом, ані методом чисельного моделювання. Це пояснюється відсутністю моделей роботи ущільнень. За результатами експерименту отримано усереднене у часі й миттєве значення витоків. Запропоновано процес вимірювання включити в інтерфейс обчислювальної машини, що дасть змогу забезпечити проведення випробувань в автоматичному режимі.

У гідравлічних системах здійснено аналіз впливу різних ущільнень на герметичність порожнин і швидкість руху рідини [83]. Визначено основні фактори, які впливають на втрату герметичності рухомих елементів. Розглянуто різні способи й пристрої ущільнень для зменшення перетікання рідини між порожнинами з різними тисками. Найважчим є забезпечення герметичності гідроагрегатів і з'єднань трубопроводів в умовах високих тисків і температур. Визначено сферу застосування різних пристроїв для забезпечення необхідної герметичності агрегатів. Моделі досліджуваної витоків не представлено.

У роботі [189] розглянуто різні конструкції ущільнень і розрахункові формули для визначення витоків рідини в елементах гідроприводу. Проведено класифікацію та показана область застосування ущільнень. Наведено залежність контактного тиску від ширини контактної поверхні, за якої забезпечується герметичність гумового ущільнення.

У найзагальнішому випадку витоків повітря можна віднести до класу некоректних задач, загальні алгоритми та методи розв'язання таких задач викладено в роботі [257]. З огляду на індивідуальні особливості витоків і досягнуті підходи в моделюванні потрібно продовжити дослідження з визначення параметрів повітря у відсіку за наявності витоків.

1.5. Мета і завдання дослідження

Аналіз робіт свідчить, що є випадки розгерметизації кабін ЛА, які можуть призводити до людських жертв. Встановлені функціональні залежності між параметрами газу у відсіках не дають змогу описати наявні на практиці випадки розгерметизації відсіків ЛА. Тому необхідно продовжити дослідження щодо виявлення закономірностей зміни параметрів газу у відсіку ЛА.

Метою роботи є розрахункове та експериментальне дослідження газодинамічних закономірностей процесів раптової розгерметизації відсіків ЛА. 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.

Матеріали цього розділу відображені в роботах [98, 258 – 260, 263, 264, 267, 268, 270, 271, 285, 288, 289, 291, 292, 294, 295, 299, 300, 308, 310].