

2.3. Основні етапи проведення досліджень газодинамічних і аероакустичних процесів у відсіках ЛА

У відповідності з поставленими завданнями було виконано такі основні етапи експериментальних, розрахункових, модельних, стендових і натурних досліджень газодинамічних і аероакустичних процесів у відсіках ЛА:

1. Встановити закономірності зміни параметрів газу в кабіні ЛА внаслідок розгерметизації відсіку на підставі отриманих результатів в опублікованій літературі. Розглянути зміну параметрів газу у відсіку для стаціонарних і нестаціонарних, докритичних і закритичних режимів течії газу, під час підведення, відведення, перетікання газу з одного відсіку в інший, під час підведення й відведення енергії, за постійного й змінного протитиску, постійної й змінної площі отвору. Визначити завдання, які недостатньо досліджені.

Обґрунтування. Дослідження процесів розгерметизації відсіку можна проводити шляхом комплексного розгляду газодинамічних і аероакустичних процесів на реальному ЛА. Цей шлях дослідження є найбільш трудомістким, адже для відтворення експерименту необхідно виготовляти кілька фюзеляжів, що призводить до істотного збільшення витрат на дослідження [47, 48]. Тому доцільно дослідження проводити на фізичних моделях відсіків з використанням функціональної залежності між параметрами газу у відсіку. З огляду на специфіку відсіків ЛА за основу взято результати досліджень авторів робіт [20, 21, 38, 39 – 41, 65, 81, 82]. Визначено основні функціональні залежності між параметрами газу у відсіку, які були встановлені, але не дають змоги описати процеси раптової розгерметизації реального відсіку ЛА.

2. Встановити основні положення функціональної залежності між параметрами газу у відсіку з урахуванням встановлених залежностей в опублікованій літературі. Для оцінювання цілісності конструкції розробку моделей процесів газу у відсіку виконувати за параметрами загальмованого газу й за зміни параметрів газу за політропою. Визначити функціональну залежність між параметрами газу, яка задовольняє вимогам адекватності.

Обґрунтування. Аналіз опублікованих робіт показує, що на початку розробки моделей було встановлено залежність тиску газу у відсіку як функція кількох змінних величин (наприклад, швидкість, густина, температура, тензор напружень, підведення й відведення енергії тощо). Подальше визначення цієї функції і її диференціювання в частинних похідних привело до розробки в одновимірному й тривимірному вигляді такої моделі, як Нав'є-Стокса [1, 9, 24, 36]. На підставі цієї моделі було розроблено модель Лайтхілла турбулентного вільного струменя [173, 203, 205]. Модель Лайтхілла не враховує вплив твердих меж, змішання потоків. Унаслідок збільшення швидкості потоку модель Лайтхілла «стає занадто грубою» [173, с. 49]. Використання таких моделей для розрахунку відсіків ЛА утруднене. Реальний відсік включає величини, наприклад, витоку газу, які впливають на життєдіяльність людей. Різні моделі Нав'є-Стокса не містять цієї величини. Крім того, моделі містять параметри (наприклад, швидкість рухомого повітря, тензор напруги), які на серійних підприємствах виміряти неможливо. Тому розробниками ЛА було створено моделі розрахунку параметрів газу у відсіку (надалі – метод відсіку), які було використано на всіх етапах проектування ЛА [40, 41, 81, 82]. Незважаючи на те, що результати досліджень не було узагальнено, розробку таких моделей можна представити у вигляді методу відсіків [98]. Відповідно до розроблених моделей, тиск газу у відсіку (P) є функцією від маси газу (m), температури (T), об'єму (V), показника політропи (n), масової витрати підведеного $\left(\sum_{i=1}^z G_i\right)$ й відведеного $\left(\sum_{j=1}^p G_j\right)$ газу, висоти польоту (H), тиску ($P_{атм}$), густини ($\rho_{атм}$), температури ($T_{атм}$) атмосферного повітря або суміжного відсіку, часу (τ):

$$P = f\left(m, T_0, V, n, \sum_{i=1}^z G_i, \sum_{j=1}^p G_j, H, P_{атм}, T_{атм}, \rho_{атм}, \tau\right), \text{ де } z, p - \text{кількість джерел};$$

$G_i = f_1(\mu, F, P_0, T_0, P_{атм})$; $G_j = f_2(\mu, F, P_0, T_0, P_{атм})$; G – масова витрата газу; μ – коефіцієнт витрати; F – площа вихідного отвору. Досліджувану функцію задано параметрично, де параметром є час. Дослідження функції проведено переважно за постійним значенням площі вихідного отвору ($F = const$). За основу досліджень

процесів газу у відсіку взято рівняння стану. У розроблених моделях найчастіше використано параметри рухомого газу, що обмежує сферу їх застосування і викликає складності щодо перевірки таких моделей. Контроль параметрів газу на багатьох виробничих підприємствах проводиться за параметрами загальмованого потоку. Оцінювання впливу газу на конструкцію необхідно проводити тільки за параметрами газу в загальмованому потоці. Тому встановлення функціональної залежності між параметрами необхідно проводити за параметрами загальмованого газу, а в деяких випадках з урахуванням параметрів рухомого газу. В опублікованих роботах [39 - 41, 81, 91, 157] представлені математичні моделі, які розроблені переважно за параметрами рухомого газу. Розроблювана ж модель має встановлювати залежність між параметрами газу у відсіку, які контролюються стандартним обладнанням на стенді і на борту ЛА. Такими параметрами найчастіше є параметри в загальмованому потоці (наприклад, тиск, температура). Для розглянутого політропного процесу висунуто гіпотезу про сталість показника політропи. Відповідно до цієї гіпотези, весь термодинамічний процес необхідно розділити на ділянки й на кожній із них зробити припущення щодо сталості показника політропи. Безперервна крива виду (1.2) буде замінена на ділянки, в яких буде постійне значення показника політропи ($n = const$). Задача істотно спрощується і під час опису реальної термодинамічної системи (ТДС) за конкретний проміжок часу може виявитися, що таке рівняння описує процес із достатньою для практики точністю за постійному значенні показника політропи ($n = const$). Гіпотеза підтверджується, якщо встановлена функціональна залежність з постійним показником політропи адекватно описує реальний процес у відсіку.

Аналогічні дослідження проведено для визначення витрати газу. Так як витрата газу є функцією від коефіцієнта витрати, який залежить від відношення тисків газу між відсіками, то диференціювати таку функцію не вважається за можливим в ділянці розриву й під час переходу через критичний режим течії. Замість коефіцієнту витрати визначається показник політропи, який у розробленій моделі витрати газу адекватно описує досліджуваний процес.

З огляду на досягнуті результати в моделюванні процесів у відсіку необхідно узагальнити ці результати і на їх підставі встановити основні положення встановлення функціональної залежності між параметрами газу. Такий підхід дасть змогу використовувати досягнуті результати, істотно скоротити обсяги досліджень, а проведені знову дослідження стануть доповненням. Тому необхідно напрацювати методику розробки таких моделей. Причому, розробку моделей проводити відповідно до законів газодинаміки і аероакустики. Так як ці процеси підпорядковуються різним законам, то доцільніше на початковому етапі встановити окремо основні закономірності газодинамічних і аероакустичних процесів. Послідовне уточнення й ускладнення структури функціональної залежності між параметрами газодинамічного процесу й перевірка її адекватності дасть можливість у кінцевому рахунку розширити коло розв'язуваних задач. Після встановлення функціональної залежності між параметрами газодинамічних процесів у відсіку вважається за можливим перейти до розробки рівняння з урахуванням пульсацій тиску газу. Таке рівняння дасть змогу описати весь спектр пульсацій тиску газу, включаючи пульсації звукового тиску. Частотний аналіз спектра пульсацій тиску газу дасть підстави виділити РЗТ в необхідних смугах частот. Під час встановлення функціональної залежності між параметрами газодинамічних і аероакустичних процесів необхідно враховувати той факт, що не будь-яке рівняння зміни тиску газу у відсіку може призводити до утворення аеродинамічного шуму. Нормативні документи висувають вимоги до газодинамічних параметрів під час раптової розгерметизації відсіку, тому дослідження спрямовані насамперед на встановлення закономірностей газодинамічних процесів, а аероакустичні процеси розглянуто як одну зі складових процесів, що протікають у відсіку.

3. Розробити стенди, провести випробування і встановити закономірності зміни параметрів повітря у відсіку для різних моделей відсіків:

- стенд для проведення газодинамічних і аероакустичних випробувань дросельних пристроїв (визначити характеристики (перепади тиску, витрати повітря тощо)) різних варіантів виконання отворів, визначити параметри рухомого газу в зазорі між відсіком і екраном, визначити силову дію газу на екран);

- стенд для перевірки працездатності датчиків тиску;
- в натурних відсіках літаків РРЛ, ВТЛ, НТЛ, СВЛ, ТРВПЛ, РПЛ та інших ЛА провести вимірювання параметрів повітря (випробування ЛА проводити відповідно до керівництва з льотної експлуатації (КЛЕ), визначити витoki повітря з кабіни в наземних умовах і на деяких режимах польоту ЛА, визначити параметри повітря у відсіках на експлуатаційних режимах польоту і в різних випадках розгерметизації відсіку, визначити РЗТ за наявності ШПП впускного клапана САРТ на вході і виході з відсіку, провести порівняльні випробування датчиків тиску повітря в герметичній кабіні ЛА);
- натурні канали продувної магістралі теплообмінника СПП в пілоні двигуна ВТЛ, які було встановлено на стенді натурального двигуна (визначити газодинамічні, аероакустичні характеристики каналів з різними варіантами виконання вхідного повітрязабірника й силову дію рухомого газу на конструктивні елементи двигуна);
- стенд для визначення газодинамічних і аероакустичних характеристик газу у відсіку й на виході з відсіку унаслідок раптової розгерметизації відсіку (визначити характеристики різних варіантів виконання отворів між відсіками).

Обґрунтування. Для встановлення закономірностей зміни параметрів газу і визначення адекватності встановленої функціональної залежності між параметрами необхідно розробити моделі відсіків. У процесі випробувань використовувати стандартне обладнання, яке пройшло метрологічну експертизу. Необхідно провести дослідження відсіків у наземних і льотних умовах за докритичних і закритичних режимів течії газу. Для підвищення ефективності проведення досліджень необхідно використовувати прямі методи вимірювання параметрів газу в загальмованому потоці й силовій дії газу на екран. Для підвищення точності показників датчиків проводиться перевірка показників датчиків тиску газу в наземних і льотних умовах. Оцінювання працездатності датчиків тиску у всьому робочому діапазоні тисків унаслідок повільної і раптової зміни тиску газу проводиться на стенді, що дає змогу істотно скоротити обсяги льотних досліджень. Необхідно провести випробування двох типів відсіків, у яких виконуються такі умови: $P \neq P_0, T \neq T_0$ та $P = P_0, T = T_0$. На підставі проведених таких досліджень вважається за можливим перекрити весь

діапазон зміни параметрів газу й оцінити вплив статичної та динамічної складових на зміну параметрів газу у відсіку.

Аналіз випадків розгерметизації відсіків реальних ЛА вказує на наявність різної конфігурації вихідних отворів [48]. Тому необхідно розробити стенди для перевірки впливу конфігурації отвору на зміну температури, повного і статичного тиску в загальмованому потоці й витрати газу. Так як рух газу супроводжується газодинамічними і аероакустичними процесами, необхідно проводити комплексні дослідження. Тому слід розробити стенди для дослідження газодинамічних і аероакустичних процесів витікання газу з відсіку, течії газу в зазорі й силової дії газу на екран.

На характер зміни параметрів повітря впливають об'єм відсіку і його конструктивне виконання [65]. Тому необхідно провести дослідження щодо встановлення реальних процесів у відсіку на ЛА і для різних випадків розгерметизації кабін. Для кабін ЛА визначити витоки повітря. Вплив витоків особливо проявляється у разі зниження ЛА з максимальної експлуатаційної висоти на безпечну висоту. У такому разі витоки повітря мають істотний вплив на безпеку членів екіпажу і пасажирів. Перевірка на герметичність кабіни ЛА є невід'ємною складовою частиною проектування й експлуатації ЛА [254]. Крім того, в широко застосовуваних програмах (наприклад, STAR-CD, MATLAB, NASTRAN з різними пакетами прикладних програм) витоки повітря не враховуються.

Підтримання потрібного закону зміни тиску газу на ЛА проводиться за допомогою САРТ. Установка пристроїв на вході або виході з ВК може призводити до зміни тиску повітря у відсіках ЛА. Тому необхідно провести комплексні дослідження в кабіні ЛА щодо оцінювання впливу ШПП на вході й виході з ВК на режим течії газу з відсіку і на РЗТ у відсіку. Для визначення впливу швидкісного напору на зміни параметрів газу у відсіку за різних варіантів виконання вхідного пристрою з урахуванням пульсацій тиску повітря для реальної конструкції має теоретичне й практичне значення. Під час експлуатації таких відсіків відомі випадки руйнування конструкції СПП. Тому необхідно провести такі дослідження на натурному стенді у продувній магістралі СПП двигуна ВТЛ і встановити

закономірності силової дії газу на елементи конструкції на вході й усередині відсіку ЛА.

Для того, щоб встановити основні закономірності зміни параметрів газу у відсіку унаслідок його раптової розгерметизації з урахуванням статичної та динамічної складових, необхідно розробити стенд. Дослідження процесів газу на стенді дають змогу провести комплексні дослідження газодинамічних і аероакустичних процесів в одному або декількох відсіках. Проведення таких досліджень на ЛА практично не вважається за можливим. Урахування результатів випробувань на стенді одного або двох відсіків і аналіз процесів витікання газу з відсіку в атмосферу і в суміжний відсік дадуть змогу остаточно визначити закономірності зміни параметрів газу у відсіку й адекватність розробленої математичної моделі під час раптової розгерметизації відсіку.

4. Встановити закономірності зміни параметрів газу у відсіку на моделях з використанням стендів, встановити функціональні залежності між параметрами газу досліджуваних процесів. Провести розрахунки параметрів повітря в натурних відсіках ЛА в наземних і льотних умовах на стаціонарних режимах течії повітря відповідно до КРЕ, у разі аварійної розгерметизації герметичній кабіни ЛА, під час екстреного зниження ЛА на безпечну висоту. За результатами проведених досліджень уточнити встановлені залежності, які використовувати для встановлення функціональної залежності між параметрами газу за умови раптової розгерметизації відсіку ЛА.

Обґрунтування. Відповідно до розроблених фізичних моделей відсіків необхідно провести стендові й льотні випробування відсіків і герметичних кабін ЛА. Проведення таких досліджень дасть можливість встановити реальні процеси у відсіку. На підставі отриманих експериментальних даних вважається за можливим провести зіставлення результатів розрахунку й експерименту за стаціонарних і нестаціонарних режимів течії, у разі підведення й відведення повітря, у разі аварійної розгерметизації кабіни ЛА, екстреного зниження тощо. Буде визначено залежності зміни параметрів повітря у відсіку й сфери використання таких моделей, а за необхідності – уточнено.

5. Провести стендові випробування в Національному авіаційному університеті у ревербераційній камері і встановити залежності зміни параметрів повітря в моделях відсіків унаслідок раптової розгерметизації. Розробити універсальну функціональну залежність між параметрами газу процесів раптової розгерметизації відсіку для оцінювання цілісності конструкції ЛА з урахуванням раніше отриманих залежностей за різних випадків розгерметизації. Провести порівняння результатів розрахунку й експерименту, визначити адекватність функціональної залежності.

Обґрунтування. Після того, як проведено окремо газодинамічні і аероакустичні дослідження, вважається можливим провести комплексні дослідження на стенді під час раптової розгерметизації відсіку. Якщо в опублікованих роботах [48, 52] дослідження проведено на стендах з натурними відсіками, де переважно виконуються умови $P = P_0, T = T_0$, то в розробленому стенді проводяться дослідження за виконання умов $P \neq P_0, T \neq T_0$. На підставі аналізу результатів досліджень за необхідності здійснюється уточнення встановлених раніше залежностей і розробляється універсальна модель зміни газодинамічних процесів повітря і пульсацій тиску повітря у відсіку під час його раптової розгерметизації. Визначається адекватність розробленої моделі. Відповідно до математичної моделі проводяться числові розрахунки за різних граничних умов і початкових даних. На підставі проведених досліджень газодинамічних і аероакустичних процесів у відсіку під час його раптової розгерметизації вважається можливим встановити нові закономірності з різними вихідними отворами і витіканням повітря з відсіку в атмосферу і суміжний відсік. Проведено перевірку прийнятої гіпотези про сталість показника політропи й прийнятих припущень. Завдяки зіставленню результатів числових розрахунків та отриманих аналітичним шляхом, інших авторів (наприклад, адіабата Гюгонію, рівняння Пуассона), визначено наукову новизну встановлених залежностей та отриманих результатів досліджуваних процесів у відсіку.

6. Провести газодинамічні розрахунки відсіків за умови раптової розгерметизації відсіку для сертифікації літаків розробки Державного підприємства «АНТОНОВ» відповідно до вимог AP-25, FAR-25, JAR-25, CS-25.