

(відведеного) газу і того, що знаходиться у відсіку.

7. Відсік розглядають у вигляді закритої і відкритої ТДС.

8. Для кожного розрахункового випадку проводять розрахунок і аналіз зміни тиску газу у відсіках у часі і за висотою польоту ЛА, що дає змогу визначити максимальні (граничні) перепади тиску на досліджувану конструкцію відсіку.

У порівнянні з роботами [39, 40, 41, 65, 81, 82] розроблений метод містить:

1. Газодинамічні процеси у відсіку розглянуто з урахуванням вирівнювання параметрів газу в часі в досліджуваному відсіку.

2. Проводиться розрахунок інтегральних і локальних параметрів газу у відсіку.

3. Розробку математичної моделі процесу у відсіку здійснено за параметрами загальмованого потоку з урахуванням здійснення внутрішньої (зовнішньої) роботи.

4. Визначення режиму течії газу виконано шляхом зіставлення параметрів газу, що підводиться (відводиться), і знаходиться у відсіку.

5. Відсік розглянуто у вигляді закритої і відкритої ТДС.

6. Для кожного розрахункового випадку виконано розрахунок і аналіз зміни тиску газу у відсіках у часі і за висотою польоту ЛА, що дає змогу визначити максимальні тиски й перепади тиску на досліджуваній конструкції відсіку.

## **2.5. Основні положення встановлення функціональної залежності між параметрами політропного процесу раптової розгерметизації відсіку ЛА**

Одним із основних завдань під час дослідження процесів газу у відсіку є встановлення залежності зміни параметрів повітря всередині відсіку в часі від параметрів підведеного, відведеного газу (повітря), енергії, під час витікання газу з відсіку(ів) в атмосферу або суміжний відсік. Таку залежність встановимо у вигляді функціональної залежності відповідно до методу визначення параметрів повітря в кабіні ЛА за умови розгерметизації відсіку. Встановлення залежності процесів раптової розгерметизації газу у відсіку проведемо за дотримання таких умов [273]:

1. Кабіна (відсік) ЛА заповнений газом (повітрям). У відсіку протікають досліджувані термодинамічні процеси. Всередину відсіку може втікати, витікати або

перетікати повітря з одного відсіку в інший. Відсіки можуть бути розділені між собою перегородками, в яких є площі ( $F$ ) для перетікання повітря, виконані у вигляді перфорованих панелей, відкидних панелей або дверей, які відчиняються, за заданого надлишкового тиску, щілин, кранів з регульованою прохідною площею тощо. Витікання повітря з відсіку відбуватися за  $F = \text{const}$  або  $F = \text{var}$ .

**Обґрунтування.** Для кабіни ЛА, яка містить кілька відсіків, початково розглянуто процеси газу в одному відсіку за умови втікання й витікання газу, за підведення й відведення енергії. Здобуті результати для одного відсіку поширюють на кілька відсіків, а потім усі процеси у відсіках розглядають у взаємозв'язку. Вибір площі отвору для витікання газу з відсіку або перетікання газу між відсіками проводять відповідно до конструктивного виконання кабіни ЛА і нормативних документів (наприклад, АП-25, пункт 25.365 (е) – максимальна площа отвору). Здано модель площі отвору у вигляді залежності між площею отвору, часом, параметрами газу у відсіку й навколишньому просторі. Дослідження процесів витікання газу з відсіку зі змінною площею вихідного отвору дає змогу глибше вивчити закономірності у відсіку, але при цьому ускладнюється механізм перевірки зміни площі отвору (наприклад, унаслідок руйнування конструкції). Параметри відсіку й газу, розміри отвору й місця їх розташування, форма отвору задає розробник ЛА. Вибір цих параметрів має істотний вплив на розробку й структуру математичної моделі, обсяг виконуваних розрахунків. На початку проектування відсіків місця розташування вихідних отворів невідомі. Методологію такого інтегрованого проектування ЛА наведено в [94]. Тому модель має враховувати інтегральну величину зміни параметрів газу у відсіку без прив'язки місця установки вихідного пристрою до розмірів відсіку. Це припущення є прийнятним для всіх етапів проектування ЛА; його перевіряють під час оцінювання адекватності встановленої залежності між параметрами реального процесу в кабіні.

2. У середині відсіку виконуються основні закони газодинаміки і аероакустики.

**Обґрунтування.** Параметри газу у відсіку визначають відповідно до рівняння стану. Для встановлення залежності між параметрами газу записують основні рівняння відповідно до законів нерозривності, збереження кількості руху,

збереження енергії [10, 36, 74, 87, 91, 117, 130, 161, 274]. Для відкритої ТДС встановлюють залежність між параметрами гальмування  $(P_0, \rho_0, T_0)$  за змінним значенням повного тиску ( $P_0 = \text{var}$ ), а для закритої ТДС – між параметрами рухомого газу  $(P, \rho, T)$  за  $P_0 = \text{const}$ . Встановлена залежність за параметрами гальмування є більш загальною, адже вона включає статичну і динамічну складові, потенційну й кінетичну енергію.

Пульсації тиску газу у відсіку підпорядковано основним законам поширення, заломлення й відображення коливальних процесів [37, 71, 173, 206, 235, 236, 237, 275]. На підставі встановленої залежності й відповідно до цих законів є можливим проводити дослідження пульсацій газу в одному або декількох відсіках з урахуванням їх взаємного впливу.

3. Термодинамічні процеси всередині відсіку підпорядковані умові квазістаціонарності.

**Обґрунтування.** Досліджуваний процес зміни параметрів газу у відсіку можна уявити у вигляді безперервної зміни рівноважних станів, в яких виконуються рівняння стану. У разі не виконання умови квазістаціонарності неможливо встановити зв'язок між змінними величинами, які входять до рівняння стану. Тому передбачено виконання цієї умови, що перевіряється шляхом зіставлення результатів розрахунку і експерименту [266].

4. Зміну стану повітря у відсіку в загальному вигляді підпорядковано політропному закону зі змінним показником політропи. Залежність між тиском і густиною повітря визначають відповідно до рівняння  $P / \rho^n = \text{var}$ .

**Обґрунтування.** Процеси газу у відсіку протікають за умови підведення й відведення енергії. Тому параметри газу змінюються за політропним законом зі змінним показником політропи [81]. За досліджуваний проміжок часу передбачено виконання умови постійного показника політропи. У процесі зміни режиму течії газу, а також у разі раптового підведення, відведення енергії відбувається відхилення від залежності  $P / \rho^n = \text{const}$ . Для ударної адіабати наявність таких перегинів і зламів зазначено в роботі [22], але не наведено розв'язання цієї задачі.

Диференціювати функцію в точці зламу не можливо, адже вона не може мати похідної. Тому необхідно встановити залежність між тиском і густиною газу у відсіку за змінним значенням правої частини рівняння політропи ( $P/\rho^n = \text{var}$ ).

5. Зміна маси повітря у відсіку ( $m$ ) в часі визначають залежністю

$$\frac{dm}{d\tau} = G_1 - G_2.$$

**Обґрунтування.** Відповідно до закону збереження маси газу у відсіку з об'ємом  $V$  в даний момент часу маса газу залишається незмінною ( $\frac{dm}{d\tau} = 0, m = \text{const}$ ) [31, 36, 74, 87 – 89, 91]. Це рівняння враховує зміну маси газу для закритої ТДС. Для відкритої ТДС під час підведення ( $G_1$ ) й відведення ( $G_2$ ) газу маса газу у відсіку визначатиметься рівнянням  $\frac{dm}{d\tau} = G_1 - G_2$  [38, 40, 41, 81, 82]. Відповідно до рівняння, зміна маси газу може відбуватися за рахунок зміни густини та об'єму відсіку.

6. Зміна параметрів повітря у відсіку підпорядковано законам ідеального газу, рівнянню стану ідеального газу для рухомої і загальмованої течії, хвильових процесів:  $P\rho^{-1} = RT, P_0\rho_0^{-1} = RT_0, P_e\rho_e^{-1} = RT_e$ .

**Обґрунтування.** Для газу, в якому розмірами молекул можна знехтувати в порівнянні з довжиною вільного пробігу, залежність між тиском, густиною і температурою визначають відповідно до рівняння стану [31, 36, 157]. Ця залежність між параметрами може бути виконана для рухомого й загальмованого потоків, що дає змогу забезпечити безперервність зміни параметрів і диференційованість досліджуваної функції. Наявність такої залежності дає змогу забезпечити безперервність зміни параметрів газу у розроблюваній моделі у разі раптової розгерметизації відсіку. Виконання цих рівнянь дозволяє виконати умову квазістаціонарності.

7. Функціональна залежність між параметрами газодинамічного процесу за умови раптової розгерметизації відсіку має вигляд:

$$\frac{d^2 P_0}{d\tau^2} = f(n, P_0, V, T_0, G_1, G_2, \frac{dP_0}{d\tau}, \frac{dV}{d\tau}, \frac{dT_0}{d\tau}, \frac{dG_1}{d\tau}, \frac{dG_2}{d\tau}, \frac{dq}{d\tau}, \frac{dl}{d\tau}, \frac{d^2 V}{d\tau^2}, \frac{d^2 q}{d\tau^2}, \frac{d^2 l}{d\tau^2}),$$

$$\frac{dP_0}{d\tau} = f_1\left(P_0, T_0, V, G_1, G_2, \frac{dT_0}{d\tau}, \frac{dV}{d\tau}\right), \frac{dT_0}{d\tau} = f_2\left(n, P_0, T_0, \frac{dP_0}{d\tau}\right), G_1 = f_3(n, P_0, P, T_0, F, A),$$

$$G_2 = f_4(n, P_0, P, T_0, F, A), n = const.$$

**Обґрунтування.** Зміна тиску газу у відсіку ( $P_0$ ) є функцією від багатьох змінних величин. Дослідження спрямовано на встановлення змінних величин і визначення цієї функції. Як початкове рівняння використано рівняння стану. Записавши основні рівняння газодинаміки до досліджуваного відсіку й послідовно зменшуючи кількість змінних величин, остаточно отримаємо відносно просту залежність тиску газу у вигляді похідної за часом другого порядку як функцію від декількох функцій змінних величин. Невідомою змінною величиною для цих функцій часто є температура газу у відсіку. Невідомими параметрами найчастіше виступають параметри газу, які можуть бути виміряні стандартним обладнанням. Такими параметрами найчастіше є параметри в загальмованому потоці. Інтегруючи це диференціальне рівняння, отримаємо зміну тиску й температури газу у відсіку за часом під час раптової розгерметизації відсіку. Здійснено перевірку адекватності встановленої залежності шляхом зіставлення результатів розрахунку й експерименту. Вихідні рівняння й остаточно здобуті функції включають параметр об'єму відсіку. Отже, розроблена таким чином модель описуватиме зміну параметрів газу в досліджуваному відсіку. Розробку моделі, наприклад, Нав'є–Стокса проводили іншим шляхом. Для розроблюваної моделі визначали незалежні змінні величини (наприклад, тиск, швидкість за осями X і Y, густину). Відповідно до основних законів газодинаміки встановлювали функціональну залежність між незалежними змінними величинами у вигляді диференціального рівняння другого порядку в частинних похідних. Незважаючи на досягнуті результати, розроблена модель до нинішнього часу не дає змогу описати реальні процеси у відсіках ЛА з урахуванням витоків за умови раптової розгерметизації відсіку і не є досконалою, що підтверджено удосконаленнями моделі Нав'є–Стокса [277, 278, 358].

8. Для «великого» відсіку параметри повітря визначають за умовою рівності числа Маха  $M \approx 0$ :  $P_0 \approx P$ ,  $\rho_0 \approx \rho$ ,  $T_0 \approx T$ .

**Обґрунтування.** У відсіку в найзагальнішому випадку параметри рухомого й загальмованого потоків не рівні ( $P_0 \neq P, \rho_0 \neq \rho, T_0 \neq T$ ). За інших рівних умов зі збільшенням об'єму відсіку відбувається зменшення динамічної складової. За умови досягнення мінімального значення динамічної складової у відсіку виконуються умови  $P_0 \approx P, \rho_0 \approx \rho, T_0 \approx T$ , і такий відсік називається «великим» [259]. Для «великих» відсіків не потрібно інтегрувати параметри газу за об'ємом, що дає змогу істотно скоротити обсяги обчислень. Для такого відсіку інтегральне і локальне значення параметрів газу збігаються. Наскільки правильно прийняте припущення про витікання газу з великого відсіку, визначають шляхом числових досліджень і зіставленням результатів розрахунку й експерименту.

9. Для тиску ( $P_0$ ) температури ( $T_0$ ) і густини ( $\rho_0$ ) газу у відсіку запишемо через їх середні значення ( $P'_0, T'_0, \rho'_0$ ) і пульсації ( $P_\varepsilon, T_\varepsilon, \rho_\varepsilon$ ) в такому вигляді:  $P_0 = P'_0 + P_\varepsilon$ ,  $T_0 = T'_0 + T_\varepsilon, \rho_0 = \rho'_0 + \rho_\varepsilon$ .

**Обґрунтування.** Зміна параметрів газу у відсіку супроводжується газодинамічними процесами й пульсаціями параметрів газу. Відповідно до розроблених методів, які викладено в роботах [1, 36, 74, 89, 173], складний фізичний процес може бути розподілений на декілька відносно простих процесів. Тому подамо миттєве значення параметрів газу ( $P_0, T_0, \rho_0$ ) у вигляді суми середнього значення параметрів ( $P'_0, T'_0, \rho'_0$ ) і пульсацій ( $P_\varepsilon, T_\varepsilon, \rho_\varepsilon$ ):  $P_0 = P'_0 + P_\varepsilon, T_0 = T'_0 + T_\varepsilon, \rho_0 = \rho'_0 + \rho_\varepsilon$ . Відповідно до цих умов вважається можливим уточнити рівняння газодинамічних процесів з урахуванням пульсацій газу. Підставивши середні значення параметрів газу в установлену залежність газодинамічних процесів отримаємо узагальнене рівняння з урахуванням пульсацій газу.

10. За умови нерівномірності розподілу параметрів повітря у відсіку (тиску, температури, швидкості, густини тощо) виконують послідовний поділ відсіку на підвідсіки (підоб'єми) доти, доки не буде досягнуто рівномірності параметрів газу за об'ємом.

**Обґрунтування.** Для відсіку, в якому виконуються умови  $P_0 \neq P, \rho_0 \neq \rho,$

$T_0 \neq T$ , необхідно перевіряти рівномірність розподілу параметрів газу за об'ємом відсіку. У разі розбіжності результатів розрахунку й експерименту поділяють відсік на підвідсіки. Поділ підвідсіків здійснюють доти, доки не буде досягнуто рівномірності розподілу параметрів газу в досліджуваному об'ємі, що підтверджується результатами розрахунку й експерименту. Алгоритм поділу відсіку на підвідсіки залежить від нерівномірності розподілу параметрів газу за об'ємом. Один із алгоритмів поділу відсіку на підвідсіки наведено в додатку Л.

11. Функціональна залежність між параметрами газодинамічних процесів з урахуванням пульсацій газу за умови раптової розгерметизації відсіку має вигляд:

$$\frac{d^2 P_0'}{d\tau^2} = f(n, P_0', P_{\theta}', V, T_0', T_{\theta}', G_1, G_2, \frac{dP_0'}{d\tau}, \frac{dP_{\theta}'}{d\tau}, \frac{dV}{d\tau}, \frac{dT_0'}{d\tau}, \frac{dT_{\theta}'}{d\tau}, \frac{dG_1}{d\tau}, \frac{dG_2}{d\tau}, \frac{dq}{d\tau},$$

$$\frac{dl}{d\tau}, \frac{d^2 P_{\theta}'}{d\tau^2}, \frac{d^2 V}{d\tau^2}, \frac{d^2 q}{d\tau^2}, \frac{d^2 l}{d\tau^2}), \quad \frac{dP_0'}{d\tau} = f_1\left(P_0', P_{\theta}', T_0', T_{\theta}', V, G_1, G_2, \frac{dT_0'}{d\tau}, \frac{dT_{\theta}'}{d\tau}, \frac{dV}{d\tau}\right),$$

$$\frac{dT_0'}{d\tau} = f_2(n, P_0', P_{\theta}', T_0', T_{\theta}', \frac{dP_0'}{d\tau}, \frac{dP_{\theta}'}{d\tau}), \quad G_1 = f_3(n, P_0', P_{\theta}', T_0', T_{\theta}', F, A),$$

$$G_2 = f_4(n, P_0', P_{\theta}', T_0', T_{\theta}', F, A), \quad \frac{dT_{\theta}'}{d\tau} = f_5(n, P_{\theta}', T_{\theta}', \frac{dP_{\theta}'}{d\tau}), \quad n = const.$$

**Обґрунтування.** Для дослідження аероакустичних процесів у відсіку дуже важливе значення має процес утворення пульсацій газу. На підставі встановленої функціональної залежності між параметрами газодинамічних процесів параметри газу у відсіку вважається можливим перейти до встановлення залежності між параметрами газодинамічних і хвильових процесів. Для цього параметри газу наводять у вигляді середнього значення і хвильової складової пульсацій газу. Підставивши здобуті вирази параметрів газу в рівняння газодинамічних процесів і виконавши деякі перетворення, отримуємо узагальнене рівняння газодинамічних процесів і пульсацій тиску газу у відсіку. Однією з відмінних рис розроблюваного рівняння є те, що функціональну залежність між газодинамічними параметрами

встановлено й перевірено відповідно до експерименту. У разі використання числового методу розв'язання диференціальних рівнянь газодинамічного процесу на кожному кроці зміни газодинамічних параметрів визначають хвильові складові пульсацій газу. Виникнення шуму визначають за частотним аналізом спектра пульсацій тиску газу. Відповідно до розробленого рівняння описують весь спектр пульсацій газу, з якого за допомогою частотного аналізу може бути виділено спектр РЗТ [279]. У порівнянні з роботами [36, 37, 173, 176, 205, 214, 229] необхідно розробити рівняння для визначення зміни швидкості звуку в залежності від зміни статичного й повного тиску, швидкісного напору, що дасть можливість враховувати перетворення енергії потоку. Оцінювання адекватності встановленої залежності проводять за зміною пульсацій тиску газу в часі, адже елементи конструкції відсіку піддають впливу пульсацій тиску газу. Під час дослідження аероакустичних процесів оцінювання рівняння проводять за спектром РЗТ або СРЗТ. На підставі встановленої залежності у відповідності з основними законами хвильових процесів вважається можливим проводити дослідження з оцінювання впливу пульсацій газу на конструкцію. Аналіз отриманого рівняння показує, що за допомогою встановленої залежності можливо описати зміну газодинамічних параметрів і пульсацій газу в кожному відсіку, підвідсіках окремо. Тому немає необхідності в установленій залежності диференціювати об'єм за часом, що істотно спрощує опис процесу і дозволяє описати реальні газодинамічні процеси в відсіку.

12. Для встановленої функціональної залежності між параметрами (у вигляді системи рівнянь), яка описує процеси всередині відсіку й містить більшу кількість невідомих параметрів, ніж кількість рівнянь, розв'язання рівнянь проводять числовим методом.

**Обґрунтування.** Відповідно до встановленої функціональної залежності між параметрами газодинамічних процесів у відсіку можливо описати зміну параметрів газу у відсіку без урахування витоків газу. Реальний же відсік включає витоки газу, які характеризує відсутність інформації про площу перетікання газу з відсіку і показника політропи. Без цих величин не можливо визначити модель витоку. Аналогічні задачі розглянуто відповідно до загальної теорії некоректно



поставленого завдання [257]. Пошук невідомих параметрів у разі витікання газу з відсіку здійснюють чисельним методом [261]. За допомогою генератора випадкових чисел визначаємо значення невідомих параметрів шуканої залежності. Для багатоекстремальної функції такий підхід дає змогу отримати значення шуканих параметрів в ділянці глобального оптимуму. На завершальному етапі пошук рішення проводять числовим методом з використанням симплексного методу зі змінною стратегією.

13. Для відсіку, з якого відбувається витікання повітря в навколишній простір (атмосферу), параметри повітря на виході з відсіку задано у вигляді початкових умов.

**Обґрунтування.** Витікання газу з відсіку в атмосферу під час польоту ЛА має складну структуру взаємодії газового струменя, що виходить із відсіку, й потоку повітря, який обтікає фюзеляж. Нормативні документи висувають вимоги тільки в частині наявності розподілу зовнішнього тиску по фюзеляжу в польоті (пункт 25.365 (в) АП-25). Тому під час проведення газодинамічних розрахунків відсіків параметри повітря на виході з відсіку в атмосферу задають у вигляді початкових умов відповідно до роботи [280].

14. Оцінювання адекватності встановленої функціональної залежності між параметрами проводять відповідно до МНК. Підвищення стійкості оцінок МНК досягають за допомогою перешкодо-стійких методів.

**Обґрунтування.** Під час проведення зіставлення результатів розрахунку і експерименту передбачено, що експериментальні дані містять випадкові величини, які мають нормальний закон розподілу. Оцінювання адекватності встановленої залежності проводиться за МНК. Перевірку прийнятих припущень необхідно проводити з використанням статистичних критеріїв, таких як коефіцієнт множинної кореляції, критерій Фішера, критерій Кохрена. Для підвищення стійкості оцінок математичної моделі необхідно використовувати перешкодостійкі методи, які досліджені й практично використовуються під час розробки ШПП [195, 201, 202]. Використання перевірених на практиці перешкодостійких методів при описі аероакустичних процесів в СКП дозволить підвищити рівень опису пульсацій газу в відсіку ЛА при наявності похибок у вимірюваних величинах.