

$$\frac{d(P_0 - P)}{dW} \approx 295 \text{ Па/(м/с)}.$$

Порівняльний аналіз здобутих результатів свідчить, що за умови збільшення швидкості потоку у відсіку швидкість наростання тиску повітря істотно перевищує швидкість наростання температури. За швидкості потоку до  $W = 45 \text{ м/с}$  різниця між повним і статичним тиском не перевищує 1,2 % від статичного тиску. У ГК пасажирських і транспортних літаків середня швидкість руху потоку повітря на експлуатаційних режимах роботи СКП не перевищує  $\sim (1 \dots 3) \text{ м/с}$ . Для таких відсіків і таких параметрів повітря можна застосовувати рівняння витікання газу з відсіку «великого» об'єму.

На підставі системи рівнянь (2.24) здійснено розрахунки зміни тиску повітря у відсіку. Порівняльний аналіз результатів розрахунку і експерименту свідчить, що оцінки параметрів повітря відповідно до розробленого рівняння відображають характер зміни тиску газу у відсіку, а похибка результатів розрахунку тиску повітря у відсіку не перевищує 7 %.

### 2.15. Витікання газу з відсіку через отвір змінної площі

Витікання газу (повітря) з відсіку може відбуватися через отвір постійної ( $F = \text{const}$ ) або змінної ( $F = \text{var}$ ) площі [294]. Розробимо математичну модель зміни параметрів газу у відсіку за параметрами рухомого газу за умови витікання через отвір змінної площі. Дослідимо область розв'язання отриманих рівнянь. Відповідно до [294] запишемо рівняння зміни параметрів газу у відсіку за параметрами рухомого газу:

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{RT}{V}(G_1 - G_2) - \frac{P}{V} \frac{dV}{d\tau} + \frac{P}{TC_p} \left( \frac{dq}{d\tau} - \frac{dl}{d\tau} \right), \quad dT = \frac{1}{C_p} (dq - dl). \quad (2.27)$$

Система диференціальних рівнянь (2.27) описує зміну параметрів газу у відсіку в процесі витікання газу з відсіку і включає площу отвору для перетікання

газу в суміжний відсік або атмосферу. Величина площі входить до формули для розрахунку витрати підведеного ( $G_1$ ) або відведеного ( $G_2$ ) з відсіку повітря. Якщо площа отвору є змінною величиною і залежить від часу або інших параметрів, то підставивши цю функцію ( $F = f(\tau)$ ) в рівняння (2.27) отримаємо узагальнене рівняння витікання повітря з відсіку через отвір змінного перерізу. Для перервної функції  $F$  інтегрування рівняння (2.27) необхідно проводити частинами з використанням рівняння політропи зі змінною правою частиною. Розв'язання такої задачі виконують одним із числових методів [6, 152, 159, 298].

У порівнянні з роботами [36, 41, 65, 74, 87] система рівнянь (2.27) додатково враховує зміну об'єму ( $dV$ ) відсіку, температури повітря ( $dT$ ) у відсіку, кількість підведеної (відведеної) енергії ( $dq$ ) і виконаної роботи ( $dl$ ).

Припустимо, що витікання повітря відбувається з відсіку з параметрами  $P = P_{01}$ ,  $T = T_{01}$ ,  $G_1 = 0$  в атмосферу з тиском повітря  $P_2$  [295]. Рівняння (2.27) з урахуванням рівняння витрати повітря через отвір для політропного процесу (в докритичній ділянці течії) запишемо в такому вигляді:

$$\frac{S}{P_{01} \left(\frac{P_2}{P_{01}}\right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_2}{P_{01}}\right)^{\frac{n-1}{n}}}} dP_{01} = -F d\tau, \quad \text{де} \quad S = \frac{V}{\sqrt{2C_p T_{01}}}. \quad (2.28)$$

Перетворюємо рівняння (2.28) і, пропустивши проміжні викладки, отримаємо рівняння:

$$S \frac{n}{n-1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} Z^m (Z^N + 1)^p dZ = - \int_{\tau_1}^{\tau_2} F d\tau, \quad (2.29)$$

де

$$m = -\frac{1}{2}, \quad p = \frac{3-n}{2(n-1)}, \quad Z = \left(\frac{P_{01}}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1, \quad N = 1.$$

Вираз у лівій частині рівняння (2.29) являє собою інтеграл від диференціального бінома з раціональним показником ступеня, який виражений через елементарні функції в трьох випадках [296, с. 351–354]. Досліджуємо сферу практичного застосування елементарних функцій інтеграла від диференціального бінома [297]. Для першого випадку ( $p$  є ціле число (додатне, від’ємне або нуль)) результати розрахунку наведено на рис. В 3. Залежність  $p$  від  $n$  в ділянці  $p \geq 0$  за зменшення монотонно спадає. За  $p \leq -1$  залежність  $p$  від  $n$  обернена опуклістю вгору і зі збільшенням  $n$  монотонно спадає. Залежність  $p$  від  $n$  має горизонтальну асимптоту  $n=1$ . В області  $1 < p < 0$  визначити характер залежності  $p$  від  $n$  неможливо. У цій області можна припустити, що залежність  $p$  від  $n$  зазнає розриву або має вертикальну асимптоту. Для значень  $n=1$  і  $-1 < p < 0$  неможливо отримати елементарну функцію.

Для другого випадку ( $\frac{m+1}{N}$  є ціле число (додатне, від’ємне або нуль))  $\frac{m+1}{N} = \frac{1}{2}$  і інтеграл від диференціального бінома неможливо виразити через елементарну функцію.

Для третього випадку ( $\frac{m+1}{N} + p = pp$  є ціле число (додатне, від’ємне або нуль)) інтеграл від диференціального бінома виражають через елементарну функцію для випадків, наведених на рис. В 4. Залежність  $pp$  від  $n$  має горизонтальну асимптоту  $n=1$ . В області  $-1 < pp < 1$  залежність  $n$  від  $pp$  може зазнавати розриву або може мати вертикальну асимптоту. Для значень  $n=1$  і  $-1 < pp < 1$  інтеграл від досліджуваного диференціального бінома не має елементарної функції.

На підставі отриманих даних можна запропонувати один із методів розв’язання даного класу задач. Припустимо, що значення елементарних функцій між двома суміжними значеннями  $p$  ( $pp$ ) змінюється за лінійним законом. За заданого значення  $n$  визначаємо суміжні значення  $p$ , для яких інтеграл від диференціального бінома виражається через елементарні функції. На підставі

лінійної залежності визначаємо значення елементарної функції для заданого  $n$ . Переваги такого методу очевидні в області лінійної залежності  $n$  від  $p$  ( $pp$ ). В області розривів функцій  $n$  від  $p$  ( $pp$ ) отримати таким методом елементарну функцію неможливо. В інших випадках можна застосовувати стандартні числові методи інтегрування диференціальних рівнянь [298].

Дослідимо процес витікання повітря з отвору для адіабатного процесу [294]. Для цього процесу  $n = k = 1,4$  показник дорівнює  $p = 2$ . Отже, інтеграл від диференціального бінома відповідно до табл. В.1 виражається через елементарну функцію:

$$S \frac{k}{k-1} \left\langle \frac{2}{5} Z^{\frac{5}{2}} + \frac{4}{3} Z^{\frac{3}{2}} + 2Z^{\frac{1}{2}} \right\rangle \Big|_{\tau_1}^{\tau_2} = - \int_{\tau_1}^{\tau_2} F d\tau. \quad (2.30)$$

Для закритичної області витікання повітря залежність між параметрами газу у відсіку і площею отвору, через який відбувається витікання газу з відсіку, визначаються відповідно до рівняння:

$$\frac{V}{mR\sqrt{T_{01}}} \ln|P_{01}| \Big|_{\tau_1}^{\tau_2} = - \int_{\tau_1}^{\tau_2} F d\tau, \quad \text{где } m = \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1+k}{(k-1)^2}}}. \quad (2.31)$$

На підставі рівнянь (2.30) і (2.31) за заданого значення  $F = f(\tau)$  в найзагальнішому випадку можливо визначити зміну тиску повітря у відсіку. Розглянемо деякі випадки, які впливають з рівнянь (2.30) і (2.31). Для  $F = const$  маємо:

$$\tau_2 - \tau_1 = - \frac{S}{F} \frac{k}{k-1} \left\langle \frac{2}{5} Z^{\frac{5}{2}} + \frac{4}{3} Z^{\frac{3}{2}} + 2Z^{\frac{1}{2}} \right\rangle \Big|_{\tau_1}^{\tau_2}, \quad (2.32)$$

$$\tau_2 - \tau_1 = - \frac{V}{FmR\sqrt{T_{01}}} \ln|P_{01}| \Big|_{\tau_1}^{\tau_2}. \quad (2.33)$$

На підставі рівнянь можна отримати час витікання повітря з відсіку в докритичній (2.32) і закритичній (2.33) областях за адіабатного режиму течії повітря.

Розглянемо витікання газу з відсіку через отвір діаметром  $D_0$ , усередині якого встановлено поворотну заслінку, і через аварійний люк регульованою прохідною площею квадратного перетину зі стороною  $R$ . Площа перетину отвору з максимальною площею отвору  $F_0 = 0.785D_0^2$  в залежності від кута ( $\alpha$ ) відкриття заслінки визначимо за формулою:

$$F_1 = F_0(1 - \cos(\alpha)) \quad (2.34)$$

У найзагальнішому випадку кут  $\alpha$  є функцією від часу ( $\alpha = f(\tau)$ ). Припускаємо, що відкриття заслінки від положення «зачинено» до положення повністю «відчинено» відбувається рівномірно з кутом  $\alpha = \frac{90}{B}\tau$ .  $B$  – повний час відкриття заслінки.

Підставимо рівняння (2.34) в (2.30), (2.31) і отримаємо наступні рівняння:

$$S \frac{k}{k-1} \left\langle \frac{2}{5} Z^{\frac{5}{2}} + \frac{4}{3} Z^{\frac{3}{2}} + 2Z^{\frac{1}{2}} \right\rangle \Big|_{\tau_1}^{\tau_2} = - \int_{\tau_1}^{\tau_2} F_0 \left( 1 - \cos\left(\frac{90}{B}\tau\right) \right) d\tau, \quad (2.35)$$

$$\frac{V}{mR\sqrt{T_{01}}} \ln|P_{01}| \Big|_{\tau_1}^{\tau_2} = - \int_{\tau_1}^{\tau_2} F_0 \left( 1 - \cos\left(\frac{90}{B}\tau\right) \right) d\tau. \quad (2.36)$$

Інтегруючи праві частини рівнянь (2.35) і (2.36), отримаємо рівняння зміни тиску повітря у відсіку в часі за умови витікання газу через отвір змінної площі в докритичній і закритичній області течії:

$$S \frac{k}{k-1} \left\langle \frac{2}{5} Z^{\frac{5}{2}} + \frac{4}{3} Z^{\frac{3}{2}} + 2Z^{\frac{1}{2}} \right\rangle \Big|_{\tau_1}^{\tau_2} = F_0(\tau_1 - \tau_2) - \frac{F_0 B}{90} \left( \sin\left(\frac{90}{B}\tau_1\right) - \sin\left(\frac{90}{B}\tau_2\right) \right), \quad (2.37)$$

$$\frac{V}{mR\sqrt{T_{01}}} \ln|P_{01}|_{\tau_1}^{\tau_2} = F_0(\tau_1 - \tau_2) - \frac{F_0 B}{90} \left( \sin\left(\frac{90}{B} \tau_1\right) - \sin\left(\frac{90}{B} \tau_2\right) \right). \quad (2.38)$$

Зіставлення рівнянь (2.32), (2.33) і (2.37), (2.38) показує, що за  $F = \text{var}$  визначення часу витікання повітря з відсіку відповідно до (2.37) і (2.38) слід виконувати одним із ітераційних методів.

Для аварійного люка запишемо прохідну площу у вигляді залежності:

$$F_2 = R^2 \left( \sin(\alpha) + 2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right). \quad (2.39)$$

Проведемо аналогічні перетворення як для отвору з регульовальною заслінкою і отримаємо основні рівняння зміни тиску повітря у відсіку у часі за умови витікання повітря через аварійний люк з прохідною площею (2.39):

$$S \frac{k}{k-1} \left\langle \frac{2}{5} Z^{\frac{5}{2}} + \frac{4}{3} Z^{\frac{3}{2}} + 2Z^{\frac{1}{2}} \right\rangle_{\tau_1}^{\tau_2} = \frac{R^2 B}{90} \cos\left(\frac{90}{B} \tau\right)_{\tau_1}^{\tau_2} + \frac{2R^2 B}{45} \cos\left(\frac{45}{B} \tau\right)_{\tau_1}^{\tau_2}, \quad (2.40)$$

$$\frac{V}{mR\sqrt{T_{01}}} \ln|P_{01}|_{\tau_1}^{\tau_2} = \frac{R^2 B}{90} \cos\left(\frac{90}{B} \tau\right)_{\tau_1}^{\tau_2} + \frac{2R^2 B}{45} \cos\left(\frac{45}{B} \tau\right)_{\tau_1}^{\tau_2}. \quad (2.41)$$

Рівняння (2.40) описує процес витікання повітря з відсіку через аварійний люк в докритичній області, а рівняння (2.41) – в закритичній області течії повітря.

При спільному витіканні повітря з відсіку через отвір з регульованою заслінкою і аварійний люк з регульованою прохідною площею необхідно числовим методом [298, с. 133–139] розв'язувати диференціальні рівняння (2.27) з урахуванням рівнянь (2.34) і (2.39).

На підставі отриманих аналітичних залежностей можна проводити перевірку точності результатів розрахунку і збіжності числових методів під час розв'язання