

інженерних розрахунків. Похибка результатів розрахунку повного тиску повітря у відсіку не перевищує 6,8 %.

Проведено числові дослідження моделі (2.43); їх результати за підвищення тиску повітря у відсіку наведено на рис. 5.13. Значну похибку на результати моделювання розробленої моделі дає коефіцієнт витрати повітря. Проведені числові дослідження рівняння з коефіцієнтом витрати відповідно до [41] не завжди дають задовільні оцінки тиску повітря у відсіку [293]. Коефіцієнт витрати залежить від тиску повітря у відсіку і середовища, в яке відбувається витікання газу. Значних змін коефіцієнт витрати зазнає в області переходу з докритичної (закритичної) області течії в закритичну (докритичну) область. У цій області розрахунку неможливо інтегрувати функцію зміни тиску повітря у відсіку, адже вона зазнає розриву. У роботі [354] аналогічне моделювання виконано за допомогою методу Гальоркіна з розривними базисними функціями. У даній же роботі для опису газодинамічних процесів у відсіку запропоновано рівняння за умови зміни параметрів газу за політропою зі змінною правою частиною рівняння політропи [301]. Це дає змогу здійснювати безперервне інтегрування процесу у всій області течії. В області малих швидкостей, біля критичних і закритичних течій на процес зміни тиску повітря у відсіку впливає підведення і відведення повітря. Застосування рівнянь (2.43) з урахуванням зміни параметрів підведеного (відведеного) повітря дає змогу отримати рішення задачі по встановленню залежності між параметрами в області розриву, зламу або перегину досліджуваної функції. Результати розрахунку на досліджуваних експлуатаційних висотах польоту літака відповідно до встановленої залежності мали стійкі оцінки. Встановлена залежність описує досліджуваний процес з достатньою для практики точністю.

2.17. Нестационарний процес витікання повітря з відсіку

Розглянемо процес витікання газу (повітря) з відсіку об'ємом V , в якому є газ із параметрами P_0 , T_0 , C_p . Зміну повного тиску (P_0) і температури (T_0) газу у відсіку в часі запишемо відповідно до роботи [263] в такому вигляді:

$$\frac{dP_0}{d\tau} = \frac{RT_0}{V}(G_1 - G_2) - \frac{P_0}{V} \frac{dV}{d\tau} + \frac{P_0}{C_p T_0} \left(\frac{dq}{d\tau} - \frac{dl}{d\tau} \right), \quad \frac{dT_0}{d\tau} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{dq}{d\tau} - \frac{dl}{d\tau} \right). \quad (2.44)$$

Система диференціальних рівнянь (2.44) описує процес витікання газу з відсіку через параметри в загальмованому потоці. Для розширення сфери практичного застосування математичної моделі (2.44) скористаємося рівняннями політропи і стану газу в загальмованому потоці ($P_0 = \rho_0 R T_0$). Диференціюємо рівняння політропи за часом, і після перетворень маємо:

$$\frac{dT_0}{d\tau} \frac{1}{T_0} = \frac{n-1}{n} \frac{dP_0}{d\tau} \frac{1}{P_0}. \quad (2.45)$$

Підставимо рівняння (2.45) в рівняння (2.44). Опускаючи проміжні виводи, отримаємо систему диференціальних рівнянь для визначення тиску і температури газу у відсіку в загальмованому потоці за умови зміни параметрів газу за політропою:

$$\frac{dP_0}{d\tau} = \frac{nRT_0}{V}(G_1 - G_2) - \frac{P_0 n}{V} \frac{dV}{d\tau}, \quad \frac{dT_0}{d\tau} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{dq}{d\tau} - \frac{dl}{d\tau} \right). \quad (2.46)$$

На підставі системи диференціальних рівнянь (2.46) проведемо аналіз впливу температури (T_0) в загальмованому потоці і об'єму (V) на процеси підтримання параметрів газу всередині відсіку і витікання газу з відсіку. Досліджуємо частинні розв'язки системи рівнянь (2.46), які становлять теоретичний і практичний інтерес для розв'язання даного класу задач.

Розглянемо процес витікання газу з відсіку за однакової кількості підведеної і відведеної енергії з відсіку. У такому разі $\frac{dq}{d\tau} = \frac{dl}{d\tau}$ і витікання газу з відсіку

відбувається за $\frac{dT_0}{d\tau} = 0$, коли $T_0 = const$. Деякі процеси зміни тиску повітря у відсіку

за $T_0 = const$ розглянуто в роботах [46, 116]. Витікання газу з відсіку за постійної

температури в відсіку може відбуватися і за відсутності підведеної і відведеної енергії $\left(\frac{dl}{d\tau} = \frac{dq}{d\tau} = 0\right)$.

Умови підтримання параметрів газу всередині відсіку розглянуто в роботі [263], визначено залежності між параметрами газу всередині відсіку і об'ємом відсіку в часі за постійного тиску газу всередині відсіку. Для закритичного і докритичного режимів течії газу зміна об'єму відсіку (V) пропорційна $\sqrt{T_0}$. Отже, за інших рівних умов збільшення об'єму відсіку може відбуватися тільки за умови збільшення температури в загальмованому потоці.

Розглянемо енергетичні аспекти процесів стиснення і розширення газу у відсіку. У порівнянні з роботами [26, 41, 260, 274] проведемо додатковий аналіз зміни параметрів газу всередині відсіку з урахуванням пружних властивостей конструкції відсіку. Визначимо питому роботу l_k , яку необхідно витратити (без урахування втрат перетворення енергії), для зміни параметрів газу у відсіку від початкового стану (T_{01}, P_{01}) до кінцевого стану (T_{02}, P_{02}) (або навпаки) за політропного процесу зміни параметрів газу:

$$l_k = \frac{n}{n-1}(P_{01}v_{01} - P_{02}v_{02}). \quad (2.47)$$

Припустимо, що процеси перетворення енергії відбуваються без втрат або вони мізерно малі, тому ними можна знехтувати. Підведена енергія від джерела стисненого газу витрачається на зміну параметрів газу всередині відсіку. У процесі зміни цих параметрів сили тиску газу деформують відсік і таким чином виконують зовнішню роботу. Робота сил тиску газу перетворюється на потенційну енергію деформації відсіку. Відповідно до закону збереження енергії питома потенційна енергія деформації відсіку (l_d) дорівнюватиме $l_d = l_k$. За умови зменшення тиску газу у відсіку накопичена потенційна енергія деформації перетворюється на кінетичну енергію пружного відсіку, а потім на роботу сил тиску газу.

Для наочності проведемо аналіз процесів перетворення енергії у відсіку за діаграмою залежності тиску газу ($P = P_0$) від питомого об'єму (ν). Як приклад оберемо один із циклів зміни параметрів газу у відсіку за умови перевірки відсіку на герметичність (рис. 2.9).

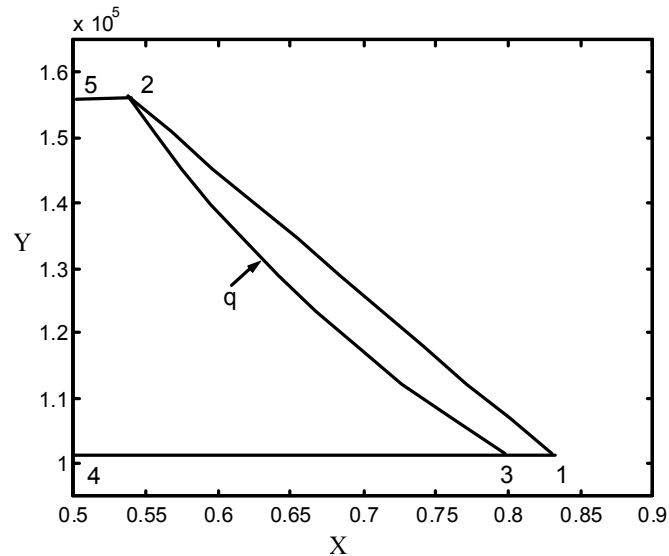


Рисунок 2.9. Залежність повного тиску газу у відсіку (Y, P_0) від питомого об'єму (X, ν_0)

Збільшення тиску газу у відсіку здійснюється від зовнішнього джерела стисненого газу по лінії 1–2 за $\frac{dP_0}{d\nu_0} = const$. Питома робота (l_1), витрачена на стиснення газу у відсіку, дорівнює площі 1–2–5–4. Після деяких перетворень питому роботу визначимо за формулою:

$$l_1 = \int_1^2 \nu_0 dP_0 = \nu_{02} (P_{02} - P_{01}) - \frac{(P_{02} - P_{01})^2}{2 \frac{dP_0}{d\nu_0}}.$$

За умови виконання рівності $\frac{dq}{d\tau} = \frac{dl}{d\tau}$ зменшення тиску газу у відсіку відбувається за лінією 2–1. Накопичена потенційна енергія деформації відсіку

перетворюється пропорційно спадній енергії газу у відсіку. Реальні процеси витікання газу з відсіку найчастіше протікають за умови $\frac{dq}{d\tau} \neq \frac{dl}{d\tau}$. Параметри газу у відсіку змінюються за політропою 1–3. Лінія 3–1 відповідає вирівнюванню параметрів газу за ізобаричним процесом. Під час політропного процесу розширення газу питому роботу визначають за рівнянням (2.47). На рис. 2.9 ця робота відповідає площі 5–2–3–4. Різниця між l_l і l_k чисельно дорівнює питомій роботі, яка дорівнює площі 1–2–3–1 і обумовлена різною природою процесів деформації відсіку і зміни параметрів газу всередині відсіку. Для оборотних процесів робота l витрачається на зміну параметрів газу всередині відсіку відповідно до рівнянь (2.46) і деформацію відсіку. Розглянемо деякі граничні випадки витікання газу і випадки, за яких робота змінює знак.

Аналіз залежності l від l_k і l_l свідчить, що питома робота досягає максимального значення за $n \rightarrow +\infty$. Для цього випадку питома робота розширення газу в відсіку дорівнюватиме $l_k = \nu_{02}(P_{02} - P_{01})$. Максимальне значення питомої роботи визначається за такою формулою:

$$l = \frac{(P_{02} - P_{01})^2}{2 \frac{dP_0}{d\nu_0}}. \quad (2.48)$$

Таким чином, у разі деформації відсіку сили пружності не можуть виконати питому роботу, що перевищує значення, які визначаються за формулою (2.48) у відповідності до зміни тиску і питомого об'єму.

Відповідно до закону збереження енергії повне розширення газу (лінія 1–3) у відсіку може протікати тільки за значень $l \geq 0$. За деяких режимів течії газу сила, яка здійснює питому роботу l , може змінювати знак. Конструкція відсіку піддається знакозмінному навантаженню. Для цього випадку витікання газу рівняння політропа 1–3 перетинається з лінією 1–2. Визначимо точку перетину цих залежностей. Запишемо рівняння лінії 1–2:

$$v_0 = M + bP_0, \quad M = v_{02} - \frac{P_{02}}{\frac{dP_0}{dv_0}}, \quad b = \frac{1}{\frac{dP_0}{dv_0}}. \quad (2.49)$$

Розв'язання рівнянь політропи і (2.49) дає змогу отримати рівняння:

$$P_{02}^{\frac{1}{n}} v_{02} = P_0^{\frac{1}{n}} (M + bP_0). \quad (2.50)$$

На підставі рівняння (2.50) визначаємо одним з числових методів значення P_0 перетину політропи і прямої (2.49). Для ізотермічного процесу витікання газу ($n = 1$) рівняння (2.50) матиме розв'язок:

$$P_0 = \frac{-M \pm \sqrt{M^2 + 4bP_{02}v_{02}}}{2b}. \quad (2.51)$$

Якщо отримане значення P_0 за рівняннями (2.50) або (2.51) виходить за інтервал досліджуваного процесу, то відсік не піддається знакозмінному навантаженню.

Проведено експериментальні дослідження з перевірки встановленої залежності для політропного процесу зміни параметрів газу у відповідності з рівняннями (2.46). На підставі рівняння було проведено числові дослідження з оцінювання впливу деформації відсіку на зміни тиску газу у відсіку. Збільшення тиску повітря у відсіку здійснювалося за постійного значення $\frac{dP_0}{dv_0} \approx -181605 \text{ Па}/(\text{м}^3/\text{кг})$. Питома робота, витрачена на стиснення повітря, становила $l_1 \approx 34076 \text{ Дж}/\text{кг}$. Після досягнення заданого надлишкового тиску повітря відключали джерело стисненого газу, і витікання газу з відсіку відбувалося через отвір з питомою роботою $l_1 \approx 34076 \text{ Дж}/\text{кг}$ (щодо об'єму відсіку). Відсік було піддано знакозмінному навантаженню. Під час деформації відсіку було

використано модель відповідно до закону Гука. Результати розрахунку (крива 1) і експерименту (крива 2) відповідно до рівнянь (2.46) наведено на рис. 2.10. Зіставлення результатів розрахунку і експерименту свідчить, що розроблена математична модель (2.46) унаслідок зміни параметрів газу за політропою з постійним показником політропи i з урахуванням пружних властивостей відсіку описує з достатньою для практики точністю процес витікання газу з відсіку. Деформація відсіку призводить до спотворення результатів розрахунку параметрів газу до 17 %.

Аналіз отриманих результатів показує, що актуальними є встановлення залежності між параметрами за умови деформації відсіків на всіх етапах експлуатації ЛА в наземних і льотних умовах. Розробка таких рівнянь дозволить підвищити точність проведення газодинамічних розрахунків ГК.

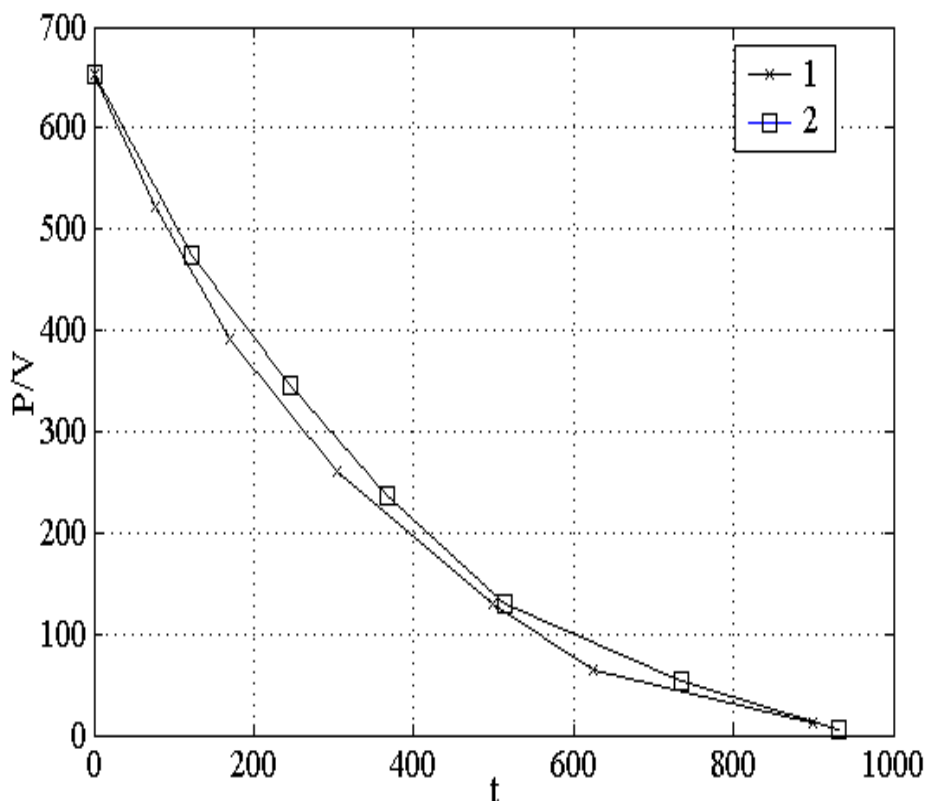


Рисунок 2.10. Зміна питомого надлишкового тиску газу $\left(\frac{P}{V}, \frac{\text{Па}}{\text{м}^3}\right)$ в часі (t, с): 1 – експеримент; 2 – розрахунок