

носно малий проміжок часу. У процесі руйнування мембрани відбувається подальше збільшення отвору з досягненням досліджуваної площі отвору в перегородці з наперед заданими властивостями. Таким чином, можна вважати, що для досліджуваної конструкції вирівнювання тиску газу у відсіку з атмосферою відбувається через досліджуваний тип отвору.

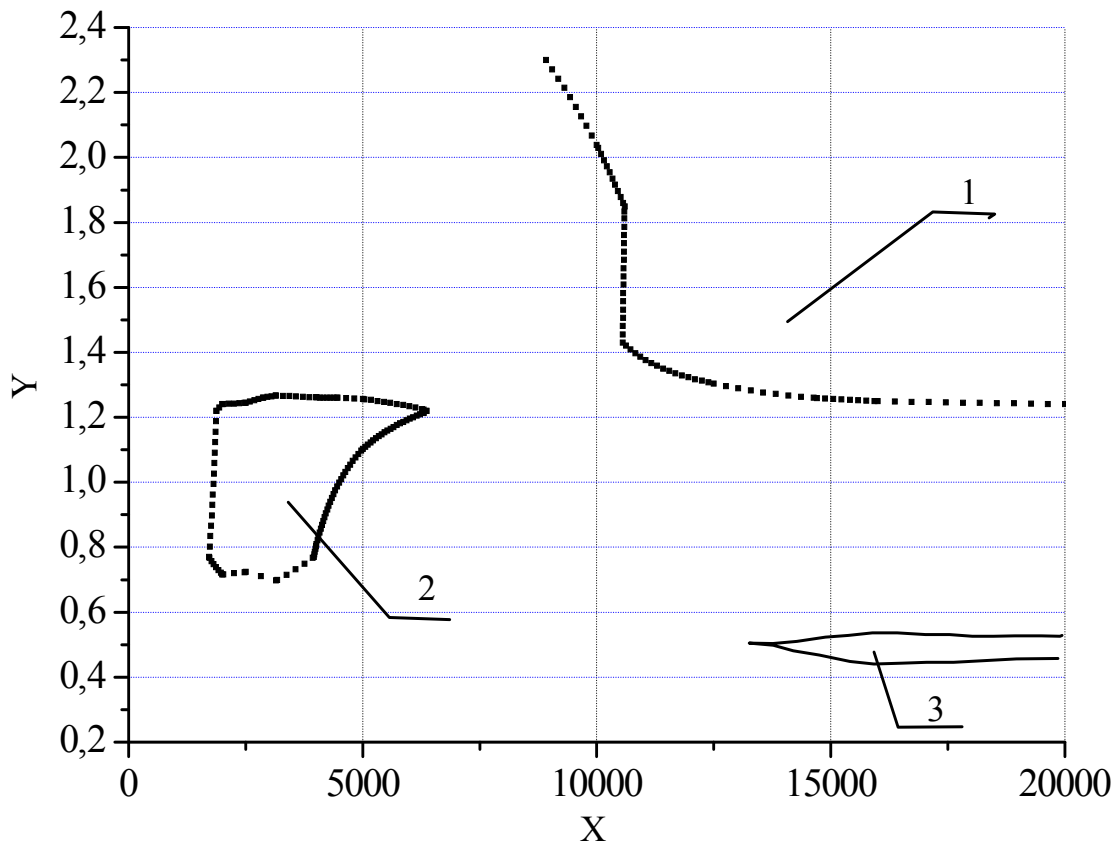


Рисунок 4.18. Залежність частоти (X , Гц) від надлишкового тиску у відсіку ($Y \times 10^5$, Па) для лінії перетину поверхонь спектрів РЗТ круглого і «рваного» отворів з $F_{\text{від}} = (0,486 \dots 0,497)$: 1, 2, 3 — області перетину поверхонь

4.5. Встановлення функціональної залежності між параметрами газодинамічного політропного процесу з урахуванням пульсацій газу за умови раптової розгерметизації відсіку

На підставі методу визначення параметрів повітря в кабіні за умови розгерметизації відсіку ЛА, основних положень встановлення функціональної

залежності між параметрами політропного процесу раптової розгерметизації відсіку ЛА, методу встановлення функціональної залежності між параметрами газодинамічного процесу у відсіку з урахуванням моделі за апріорною інформацією, визначення параметрів газу за змінного значення правої частини рівняння політропи запишемо зміну параметрів газу у відсіку з урахуванням пульсацій газу у разі раптової розгерметизації відсіку в такому вигляді:

$$\frac{d^2 P'_{01}}{d\tau^2} = n(A - B + C) - \frac{d^2 P'_e}{d\tau^2}, \quad (4.3)$$

де

$$A = R \left\{ \left[V \left(\frac{dT'_{01}}{d\tau} + \frac{dT'_e}{d\tau} \right) - (T'_{01} + T'_e) \frac{dV}{d\tau} \right] \frac{G_1 - G_2}{V^2} + \frac{T'_{01} + T'_e}{V} \left(\frac{dG_1}{d\tau} - \frac{dG_2}{d\tau} \right) \right\};$$

$$B = \left[V \left(\frac{dP'_{01}}{d\tau} + \frac{dP'_e}{d\tau} \right) - (P'_{01} + P'_e) \frac{dV}{d\tau} \right] \frac{1}{V^2} \frac{dV}{d\tau} + \frac{P'_{01} + P'_e}{V} \frac{d^2 V}{d\tau^2};$$

$$C = \left[(T'_{01} + T'_e) \left(\frac{dP'_{01}}{d\tau} + \frac{dP'_e}{d\tau} \right) - (P'_{01} + P'_e) \left(\frac{dT'_{01}}{d\tau} + \frac{dT'_e}{d\tau} \right) \right] \frac{1}{R(T'_{01} + T'_e)^2} \left(\frac{dq}{d\tau} - \frac{dl}{d\tau} \right) + CC;$$

$$CC = \frac{P'_{01} + P'_e}{R(T'_{01} + T'_e)} \left(\frac{d^2 q}{d\tau^2} - \frac{d^2 l}{d\tau^2} \right); \quad G_j = F_2^{(j)} \frac{P'_{01} + P'_e}{RT'_{01}} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{P'_2 + P'_{e2}}{P'_{01} + P'_e} \right)^{\frac{1}{n}} w_2;$$

$$w_2 = \sqrt{(w_1 + w_e)^2 + GG_2 - 2C_p \left[(T'_{01} + T'_e) \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{P'_2 + P'_{e2}}{P'_{01} + P'_e} \right)^{\frac{n-1}{n}} - (T'_{02} + T'_{e2}) \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{P'_1 + P'_e}{P'_{02} + P'_{e2}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]};$$

$$GG_2 = \frac{2Rn}{n-1} [T'_{02} + T'_{e2} - (T'_{01} + T'_e)]; \quad G_2 = \sum_{j=1}^p G_j, \quad \frac{dT'_{01}}{d\tau} = -\frac{dT'_e}{d\tau} + \frac{n-1}{n} \left(\frac{dP'_{01}}{d\tau} + \frac{dP'_e}{d\tau} \right) \frac{T'_{01} + T'_e}{P'_{01} + P'_e};$$

w_e – швидкість хвилі в початковий момент розгерметизації відсіку; індекси для тиску і температури газу вказано для відсіків 1 і 2.

Підведене повітря $\left(G_1 = \sum_{i=1}^z G_i \right)$ до відсіку визначають аналогічно до

відведеного повітря (G_2) відповідно до рівнянь (2.11), (2.13). Крім того, підведене повітря (наприклад, подача повітря від СКП) і відведене повітря (наприклад, витік)

можуть бути задані. За умови підведення (відведення) повітря до відсіку, коли є підведення (відведення) енергії, витрату повітря для рівняння (4.3) визначають з урахуванням пульсацій параметрів повітря на підставі рівняння (2.11).

Відповідно до рівняння (4.3) встановлено залежність між тиском (P'_{01}, P'_{02}), температурою (T'_{01}, T'_{02}) в загальмованому потоці відповідних відсіків, пульсаціями тиску (P_g), пульсаціями температури (T_g) в залежності від витрати підведеного (G_1) і відведеного (G_2) газу, зміни витрати (dG_1, dG_2), об'єму відсіку (V), зміни об'єму (dV, d^2V) підведеної (q) і відведеної (l) енергії, зміни енергії (dq, dl, d^2q, d^2l), статичного тиску газу в суміжному відсіку (P'_2), пульсацій тиску газу в суміжному відсіку (P_{g2}) в часі (τ). Параметри газу у відсіку змінюються за політропою (n) зі сталим значенням питомої теплоємності (C_p). Величина показника політропи задана або її визначають відповідно до експериментальних даних із застосуванням завадостійкого методу [201, 202]. Дослідження рівняння свідчать, що масообмінні процеси описують рівнянням з одним показником політропи, а процеси, пов'язані з пульсаціями параметрів газу, можуть мати інше значення показника політропи (наприклад, для звукових пульсацій $n = k = 1,4$).

Початковими умовами для рівняння (4.3) є: $\tau = 0$, $P'_{01(\tau=0)} = P_{ноч}$, $(dP'_{01}/d\tau)_{(\tau=0)} = (dP'_{01}/d\tau)_{ноч}$, $T'_{01(\tau=0)} = T_{ноч}$, $V_{(\tau=0)} = V_{ноч}$, $(dV/d\tau)_{(\tau=0)} = (dV/d\tau)_{ноч}$, $G_{1(\tau=0)} = G_{1ноч}$, $G_{2(\tau=0)} = G_{2ноч}$, $q_{(\tau=0)} = q_{ноч}$, $(dq/d\tau)_{(\tau=0)} = (dq/d\tau)_{ноч}$, $l_{(\tau=0)} = l_{ноч}$, $(dl/d\tau)_{(\tau=0)} = (dl/d\tau)_{ноч}$, $P_{g(\tau=0)} = P_{ноч}$, $(dP_g/d\tau)_{(\tau=0)} = (dP_g/d\tau)_{ноч}$, $T_{g(\tau=0)} = T_{ноч}$.

Відповідно до рівняння (4.3) проводиться розрахунок тиску газу в відсіку (P'_{01}) в часі (τ) за умови зміни параметрів $dP'_{01}, d^2P'_{01}, dT'_{01}, dG_1, dG_2, dV, d^2V, dq, d^2q, dl, d^2l$ і складових пульсацій газу. На підставі отриманих залежностей визначається температура газу в відсіку відповідно до рівняння:

$$\frac{P'_{01} + P_g}{R(T'_{01} + T_g)} \left(\frac{d^2T'_{01}}{d\tau^2} + \frac{d^2T_g}{d\tau^2} \right) + 2 \frac{G}{V} \left(\frac{dT'_{01}}{d\tau} + \frac{dT_g}{d\tau} \right) + \frac{T'_{01} + T_g}{V} \frac{dG}{d\tau} = \frac{1}{R} \left(\frac{d^2P'_{01}}{d\tau^2} + \frac{d^2P_g}{d\tau^2} \right) \quad (4.4)$$

Отримати рішення рівняння (4.4) можливо при наступних початкових умовах:
 $\tau = 0, \quad T'_{01(\tau=0)} = T_{noch}, \quad (dT'_{01} / d\tau)_{(\tau=0)} = (dT'_{01} / d\tau)_{noch}, \quad P'_{01(\tau=0)} = P_{noch}, \quad (dP'_{01} / d\tau)_{(\tau=0)} = (dP'_{01} / d\tau)_{noch}.$
 Аналогічні початкові умови задаються і для параметрів пульсацій газу.

Таким чином, за умови раптової розгерметизації відсіку на підставі рівнянь (4.3), (4.4) і стану газу в найзагальнішому вигляді визначаються параметри газу в відсіку (тиск, температура, щільність) у часі з урахуванням пульсацій газу. На підставі рівнянь можуть проводитися окремо газодинамічні процеси і пульсації газу. За результатами розрахунку пульсацій газу може проводитися спектральний аналіз пульсацій газу, наприклад, відповідно до роботи [279].

Частинними розв'язками рівняння (4.4) є рівняння без урахування пульсацій газу. У цьому випадку зміна температури газу в відсіку визначається відповідно до рівняння:

$$\frac{d^2 T'_{01}}{d\tau^2} + 2 \frac{RT'_{01} G}{VP'_{01}} \frac{dT'_{01}}{d\tau} + \frac{R(T'_{01})^2}{VP'_{01}} \frac{dG}{d\tau} = \frac{T'_{01}}{P'_{01}} \frac{d^2 P'_{01}}{d\tau^2}.$$

Частинними розв'язками рівняння (4.3) є рівняння, які встановлюють залежність між газодинамічними параметрами газу у відсіку (P'_{01}, T'_{01}) за $P'_e = const, T'_e = const$ або між пульсаціями параметрів газу у відсіку (P'_e, T'_e) за $P'_0 = const, T'_0 = const$. Розглянемо деякі частинні розв'язки, які впливають із рівняння (4.3). За відсутності пульсацій тиску повітря, підведення і відведення енергії до відсіку, постійного об'єму відсіку і закритичного відношення тисків між відсіком і навколишнім середовищем, в яке відбувається витікання газу, тиск газу у відсіку визначається за рівнянням:

$$\frac{d^2 P'_{01}}{d\tau^2} = \frac{B}{P'_{01}} \frac{dP'_{01}}{d\tau},$$

де $B = 137,7792 \frac{1}{V} G_1$, G_1 – критична витрата повітря. Пропускаючи проміжні розрахунки, отримаємо рішення рівняння в такому вигляді:

$$\tau = \frac{a}{C_1^a} \int \frac{e^{aS}}{S} dS + C_2 = \frac{a}{C_1^a} \left[\ln |S| + \sum \frac{(aS)^i}{i \times i!} \right] + C_2,$$

де $a = \frac{1}{B}$; $S = \ln(P_0^B C_1)$; C_1, C_2 – сталі величини.

Значення параметрів C_1, C_2 визначають за початковими умовами. Таким чином, отримане рівняння встановлює залежність між тиском повітря у відсіку і часом раптової розгерметизації відсіку за критичного режиму течії повітря без пульсацій тиску газу.

На підставі отриманих аналітичних залежностей зміни тиску повітря у відсіку і результатів числового розрахунку за рівнянням (4.3) було здійснено перевірку точності розрахунку. Максимальна похибка результатів числового розрахунку не перевищувала 0,4 %. За умови витікання газу з відсіку в необмежений об'єм результати числового розрахунку тиску газу сходилися до атмосферного тиску.

Проведено числові дослідження рівняння (4.3), на підставі яких встановлено закономірності зміни параметрів повітря у відсіку у разі раптової його розгерметизації [261, 262, 264, 266, 269, 317, 341, 345, 346, 347, 348]. У процесі досліджень було підтверджено гіпотезу про квазістаціонарність. За умови раптової розгерметизації в кожен момент часу параметри повітря у відсіку задовольняють рівняння стану і політропи. Зміна станів повітря у відсіку являє собою безперервну зміну рівноважних станів зі зміною температури, густини і тиску повітря. Аналіз зіставлення результатів розрахунку і експерименту свідчить про виконання цієї умови. За виконання умови квазістаціонарності результати розрахунку параметрів повітря у відсіку змінюються безперервно і відображають коливальний, затухаючий, оборотний процес і прямують до свого рівноважного стану, тобто до вирівнювання тиску повітря у відсіку до атмосферного.

Відповідно до рівнянь (4.3) визначають інтегральні значення параметрів газу за об'ємом відсіку. Під час проектування ЛА визначення інтегральних параметрів газу за об'ємом і за умови виконання вихідних даних є переважним. Визначення локальних параметрів у відсіку відповідно до нормативних документів (АП-25) не встановлено. Ці параметри остаточно визначають лише після завершення розробки

відсіків. На підставі газодинамічних розрахунків відсіків проводять розробку і виготовлення кабіни ЛА. Перевірку адекватності встановленої залежності і її уточнення можна здійснювати на етапах стендових випробувань або приймально-здавальних випробувань натурних відсіків (кабіни) ЛА. Для натурних відсіків ЛА проводять перевірку адекватності рівняння в наземних або льотних умовах. Якщо рівняння адекватно описує зміну параметрів повітря у відсіках ЛА, то подальше уточнення рівняння не проводять.

В іншому ж разі проводять пошук локальних значень параметрів газу у відсіку відповідно до алгоритму, який наведено в додатку Л. Встановлення таким чином рівняння може бути використане на всіх етапах проектування, виготовлення і випробувань відсіків ЛА.

Для рівняння (4.3) з урахуванням зміни параметрів повітря за змінного значення правої частини рівняння політропи проведено дослідження процесів витікання повітря з відсіку. Числові дослідження свідчать, що рівняння (4.3) описує широке коло розв'язуваних задач за умови зміни параметрів повітря у відсіку за політропою. У разі раптової розгерметизації частинний розв'язок рівняння (4.3) з $n = 1,4$ і $D = A_2 / A_1 = 1$ є адіабата Гюгоніо (рис. 4.19, крива 2). У разі розгерметизації відсіку з відсіку з $n = 1,4$ і $D = 1$ частинний розв'язок рівняння (4.3) є рівняння Пуассона (крива 1).

У процесі витікання повітря конструкція відсіку піддається як додатним, так і від'ємним тискам повітря. Для відсіків, які переважно піддані максимальним надлишковим тискам, істотну дію на конструкцію чинить від'ємний тиск газу. Максимальне від'ємне значення відношення тисків для адіабати Гюгоніо (крива 2) становить $P_2/P_1 = -0,1667$, для рівняння (4.3) у разі раптової розгерметизації з $D=0,5$ – $P_2/P_1 = -0,268$ (крива 5), з $D=1,2$ – $P_2/P_1 = -0,1339$ (крива 3), з $D=1,5$ – $P_2/P_1 = -0,091$ (крива 4). За результатами проведених числових і експериментальних досліджень рівняння (4.3) отримано такі результати:

1. Проведено зіставлення результатів експерименту і розрахунку параметрів повітря у відсіку відповідно до рівняння (4.3) і моделі в роботі [81]. Встановлено, що

рівняння (4.3) в порівнянні з роботою [81] адекватно відображає коливальні зміни параметрів повітря у відсіку;

2. У процесі зіставлення результатів розрахунку і експерименту підтверджено гіпотези про встановлення функціональної залежності між параметрами газу з постійним показником політропи і виконання умови квазістаціонарності процесів у відсіку;

3. В результаті зіставлення результатів розрахунку тиску повітря у відсіку відповідно до рівняння (4.3) встановлено, що залежність описує широкий клас розв'язуваних задач за умови зміни параметрів повітря з постійним показником політропи. Частинними розв'язками рівняння (4.3) є рівняння адиабати Гюгоніо і Пуассона.

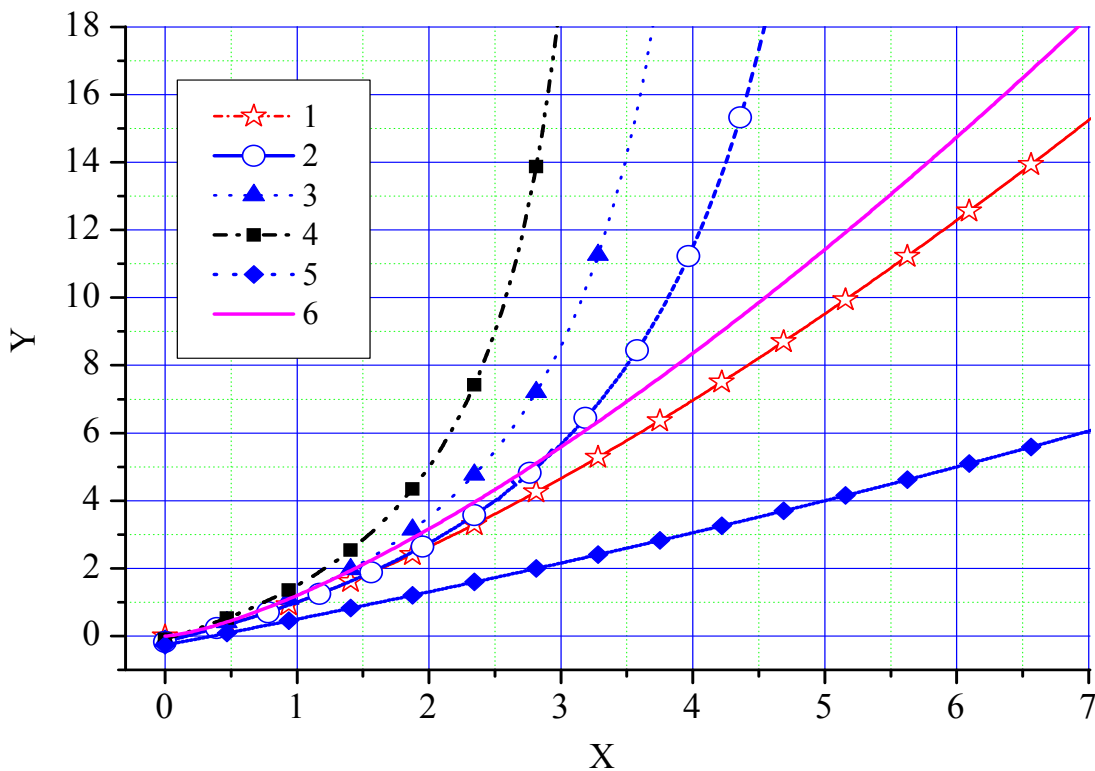


Рисунок 4.19. Залежність відносного тиску повітря у відсіку ($Y, P_2/P_1$) від відносної густини повітря ($X, \rho_2/\rho_1$) для різних рівнянь течії повітря з відсіку: 1 – рівняння Пуассона; 2 – адиабата Гюгоніо; 3 – відповідно до рівняння (4.3) з коефіцієнтом $D = 1,2$ за рівнянням (2.4) [301]; 4 – відповідно до рівняння (4.3) з коефіцієнтом $D = 1,5$ за рівнянням (2.4) [301]; 5 – відповідно до рівняння (4.3) з коефіцієнтом $D = 0,5$ за рівнянням (2.4) [301]; 6 – адиабата з коефіцієнтом $D = 1,2$ за рівнянням (2.4) [301]