

Лабораторна робота № 4

Дослідження процесу адиабатного витікання повітря через сопло, що звужується

Зміст роботи. Дослідження залежності швидкості і витрати повітря, витікаючого з сопла, що звужується, від відношення тиску β і експериментальне визначення коефіцієнтів швидкості φ і витрати μ .

Опис експериментальної установки. Робоча ділянка (мал. 4.4) є соплом, що звужується, внутрішня поверхня якого відполірована. На вході в робочу ділянку встановлений сітчастий фільтр, що оберігає внутрішню поверхню робочої ділянки від забруднення. Конструкція фільтра знімна, що дає можливість періодичного його очищення. Перепад тиску в соплі створюється вакуумним насосом 4 (РВН-20). Повітря з приміщення поступає через фільтр і діафрагму 1а до сопла 3, що звужується. Зміна витрати повітря, що проходить через сопло, здійснюється за допомогою замочного вентиля 3а шляхом зміни його прохідного перетину.

Схема вимірювань показана на рис.4.5. Для вимірювання витрати повітря використовується нестандартна діафрагма 1а з внутрішнім діаметром 3 мм. Перепад тиску на діафрагмі вимірюється диференціальним манометром 1б (ДМ-Є2) і перетворюється в електричний сигнал, котрий через підсилювач УП-20 поступає на блок контролю витрати 1в (міліамперметр М17-30). Підсилювач УП-20 і міліамперметр змонтовані в одному корпусі.

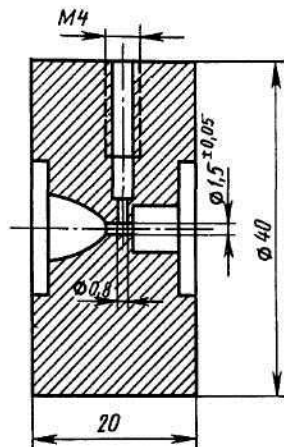


Рис. 4.4. Робоча ділянка (сопло) установки ТД-4

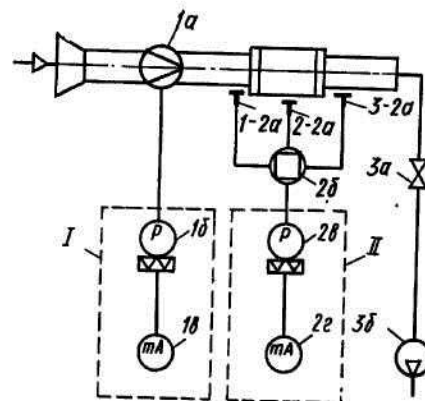


Рис. 4.5. Схема вимірювань

Вимірювання тиску проводиться перед соплом, на зрізі сопла і за соплом з допомогою відводів, що приєднані через кран 2б (КП-6) до вакуумметра 2в (ВС-Е1), який перетворює перепад тиску в електричний сигнал. Підсилений в УП-20 сигнал подається на вхід блоку контролю тиску 2г (міліамперметр М17-30).

Температура повітря t_1 , що поступає в установку, вимірюється за допомогою лабораторного термометра.

Порядок проведення досліду . Перед початком роботи необхідно заміряти тиск p_1 і температуру t_1 навколишнього середовища лабораторним барометром і термометром.

При повністю закритому вентилі $3a$ (мал. 4.6) включити електричне живлення тумблером 5 і кнопкою 6 «Обдув» на блоці контролю витрати — вакуумний насос. Потім плавно відкрити вентиль $3a$ і встановити на блоці контролю тиску II значення тиску за соплом $p_3=0,1$ атм.

Після встановлення стаціонарного режиму, яке характеризується постійністю тиску p_2 і p_3 на блоці контролю тиску II, зміряти дійсну витрату повітря M_D через діафрагму $1a$, прочитуючи покази з міліамперметра $1b$ блоку контролю витрати I.

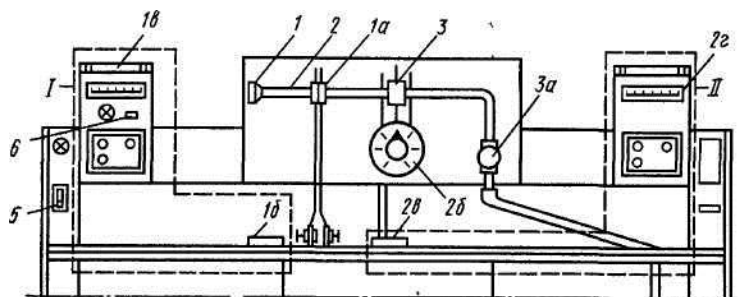
Перейти до дослідів на інших режимах. У кожному подальшому досліді тиск за соплом p_3 слід зменшувати вентилем $3a$ на $0,1$ атм за шкалою блоку контролю тиску $2g$.

Результати вимірювань записати в журнал спостережень формою:

Барометричний тиск $B = \dots$ мм рт. ст.

Температура на вході в робочу ділянку $tt = \dots$ °C

№ досліду	Абсолютний тиск, кг/см ²		$\beta = p_3 / p_1$	Витрата повітря в поділках шкали приладу
	p_1	p_2		



Мал. 4.6. Загальний вид установки ТД-4

Вимкнути установку, відключивши вакуумний насос кнопкою 6 і електроживлення установки тумблером 5 ; приступити до обробки одержаних результатів.

Обробка результатів вимірювань. Використовуючи одержані дані, обчислити відношення тиску $\beta = p_3 / p_1$ і побудувати на міліметровій залежність дійсної витрати повітря M_D від β . Проаналізувати одержану експериментальну залежність, звернувши увагу на те, що при зменшенні тиску p_3 витрата поступово зростає і досягає максимуму при $p_3 = p_{кр}$. Подальше пониження тиску p_3 не впливає на витрату повітря, яка для всіх подальших значень $\beta < \beta_{ед}$ залишається постійним. По графіку $M_D = f(\beta)$ визначити критичне відношення тиску $\beta_{ед} = p_{ед} / p_1$.

Для двох значень $\beta < \beta_{ед}$ і $\beta > \beta_{ед}$ обчислити теоретичну витрату повітря за формулою (4.2).

За відсутності тертя, теоретична швидкість адіабатного витікання повітря з сопла розраховується за формулою (4.1).

Вважаючи, що повітря по своїх властивостях при параметрах досліджу близьке до ідеального газу, різницю ентальпій в рівнянні (8.1) можна визначити за формулою

$$i_1 - i_2 = c_p (T_1 - T_2)$$

Тут c_p — ізобарна теплоємність повітря, яку для даного інтервалу зміни температур можна прийняти постійною і рівною 1,006 кДж/(Кг·К). В цьому випадку рівняння (4.1) набуде вигляду

$$w_2 = 44,85 \sqrt{T_1 - T_2}, \quad (4.19)$$

де температуру T_2 на зрізі сопла можна знайти по відомому співвідношенню між параметрами адіабатного процесу

$$T_2 = T_1 (p_2 / p_1)^{(k-1)/k} \quad (4.20)$$

Питомий об'єм повітря на зрізі сопла визначається за рівнянням стану ідеального газу

$$v_2 = RT_2 / p_2, \quad (4.21)$$

де $R = 287$ Дж/(кг·К) — газова постійна повітря.

За наявності тертя частина перепаду тиску витрачається на його подолання, тому дійсна швидкість витікання повітря менше за теоретичну.

З розгляду мал. 4.2 видно, що точки 2 і 2д знаходяться на одній і тій же ізобарі p_2 , але точне положення точки 2д невідоме, тому дійсна швидкість витікання $w_{2\bar{A}}$ визначається методом послідовних наближень шляхом сумісного рішення рівнянь

$$w_{2\bar{A}} = 44,85 \sqrt{T_1 - T_{2\bar{A}}}; \quad (4.22)$$

$$w_{2\bar{A}} = M_{\bar{A}} v_{2\bar{A}} / f_2, \quad (4.23)$$

де $v_{2\bar{A}} = RT_{2\bar{A}} / \delta_2$ — дійсний питомий об'єм повітря на виході з сопла, м³/кг; $T_{2д}$ — дійсна температура повітря, К; $f_2 = 1,77$ — площа вихідного перетину сопла, мм².

Швидкості витікання $w_{2д}$, розраховані по (8.22) і (8.23), повинні бути однаковими. Оскільки температура невідома, то її задають в першому наближенні на 2—3 К вище за температуру T_2 , обчислену по рівнянню (8.20). Якщо одержані швидкості не рівні, то задають нове значення $T_{2д}$, і так доти поки не вийдуть однакові значення $w_{2д}$ по обох формулах.

Після цього по знайдених теоретичних і дійсних значеннях витрати і швидкості визначити коефіцієнти витрати μ і швидкості φ по формулах $\mu = \frac{M_{\bar{A}}}{\bar{I}}$;

$$\varphi = w_{2\bar{A}} / w_2.$$

При визначенні коефіцієнтів μ і φ для режиму, при якому $\beta < \beta_{\text{ед}}$ необхідно мати на увазі, що при надкритичних перепадах тиску параметри на виході з сопла, що звужується завжди рівні критичним значенням:

$$p_2 = p_{\text{ед}}; \quad T_2 = T_{\text{ед}}; \quad v_2 = v_{\text{ед}}.$$

Оцінка похибок вимірювань. Максимально можлива відносна похибка визначення коефіцієнта швидкості φ рівна сумі відносних похибок теоретичної і дійсної швидкостей витікання:

$$\delta\varphi = \delta w_2 + \delta w_{2\bar{A}}.$$

Теоретична швидкість витікання визначається по рівнянню (4.19), тому без врахування помилки віднесення, яка в даному випадку невелика, відповідно до (1.9) одержимо

$$\delta w_2 = \frac{\Delta(T_1 - T_2)}{2(T_1 - T_2)} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2(T_1 - T_2)}.$$

Маючи на увазі, що T_1 і T_2 зв'язані співвідношенням (4.20), виразимо абсолютну похибку вимірювання температури ΔT_2 через ΔT_1

$$\Delta T = \Delta T_1 \frac{T_2}{T_1} + \frac{k-1}{k} T_2 \delta \beta,$$

де $\delta \beta = \Delta p_2 / p_2 + \Delta p_1 / p_1$ — відносна похибка вимірювання величини $\beta = p_2 / p_1$; $\Delta p_1, \Delta p_2$ — абсолютні максимальні похибки вимірювання тиску p_1 і p_2 відповідно.

Дійсна швидкість витікання визначається за формулою (4.23), тому максимально можлива відносна похибка її визначення буде рівна

$$\delta w_{2A} = \delta M_A + \delta v_{2A} + \delta f_2.$$

Похибка вимірювання дійсної витрати залежить від класу точності вимірювальних приладів, що використовуються, а також похибки тарування витратомірного пристрою (діафрагми) і може бути визначена за формулою (1.21).

Якщо дійсна температура повітря на зрізі сопла визначена методом послідовних наближень з достатньою точністю, то відносна похибка визначення питомого об'єму $v_{2д}$ відповідно до (4.21) може бути знайдена з виразу

$$\delta v_{2A} = \delta T_2 + \delta p_2.$$

Відносна похибка вимірювання площі вихідного перетину сопла f_2 визначається точністю приладів, що використовуються для вимірювання діаметру сопла.

Максимально можлива відносна похибка визначення коефіцієнта витрати

$$\delta \mu = \delta M_A + \delta M.$$

Похибка вимірювання дійсної витрати визначена вище, а відносна похибка визначення теоретичної витрати повітря відповідно до (8.2) знаходиться за формулою

$$\delta M = \delta w_2 + \delta v_2 + \delta f_2.$$