

Лабораторна робота № 4

Тема: Дослідження процесу витікання повітря з резервуару необмеженої місткості через циліндричний отвір

Мета: 1. Визначення експериментальним шляхом залежності витрати $G=f(p_2/p_1)$ і швидкості витікання повітря $G=f(p_2/p_1)$ від співвідношення тисків (p_2/p_1) , встановлюваних перед отвором і після нього.

2. Визначення коефіцієнтів витрати μ і коефіцієнта швидкості ϕ .

Теоретичні основи процесу витікання

Витіканням газоподібних і краплинних рідин з сопел і отворів називається перетік робочого тіла із зони з великим тиском в зону з меншим тиском через канали різноманітних конструкцій і геометричних розмірів.

Найбільш простим і зручним для дослідження являється випадок витікання при постійних початкових параметрах (витікання з резервуару необмеженої місткості) витікаючого робочого тіла.

Основними параметрами, що характеризують процес витікання, являються швидкість витікання c , м/с і витрата витікаючого робочого тіла G , кг/с, а у разі витікання з резервуару обмеженої місткості також час пониження тиску в посудині.

При витіканні з сопел і отворів при постійних початкових параметрах теоретична швидкість витікання c_m , м/с і масова витрата G_m , кг/с залежать від форми сопла (що сужається або що розширюється) і області, в якій відбувається витікання (дозвукова і надзвукова).

Як відомо, соплом називається канал, в якому відбувається розширення витікаючого тіла і збільшення швидкості його руху.

Такі сопла називаються інакше ще конфузорами. Канали, призначені для гальмування потоку і підвищення тиску, називаються дифузорами.

Область витікання характеризується критерієм Маха

$$Ma = \frac{c}{a},$$

де c - швидкість витікання рідини з сопла, м/с;

a - місцева швидкість поширення звуку в рідині у вихідному перерізі сопла, м/с.

Якщо $Ma > 1$, то $c > a$ і витікання рідини відбувається в надзвуковій області. Якщо $Ma < 1$, то $c < a$ і витікання, отже, происхоит в дозвуковій області.

Позначимо відношення тисків

$$\frac{p_2}{p_1} = \beta,$$

де p_2, p_1 - абсолютний тиск робочого тіла (газу, рідини) відповідно середовища, в яке відбувається витікання, і перед соплом, Н/м² (Па).

Максимальне значення витрати рідини G і швидкості витікання c досягається при певному значенні β , яке називається критичним $\beta_{кр}$.

Тоді для дозвукової швидкості витікання маємо $\beta_{кр} \leq \frac{p_2}{p_1} \leq 1,0$, а для надзвукової - $\beta_{кр} > \frac{p_2}{p_1} > 0$.

Як відомо, $\beta_{кр}$ залежить тільки від природи рідини, що витікає через сопло, і може бути визначене по наступній формулі

$$\beta_{кр} = \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

де k - показник адіабати ($k = \frac{C_p}{C_v}$).

Значення $\beta_{кр}$, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Газ	1-атомний	2-атомний	3-атомний, багатоатомний, перегріта пара
$k = \frac{C_p}{C_v}$	1,66	1,4	1,3
$\beta_{кр}$	0,49	0,528	0,546

Як бачимо, зміна $\beta_{кр}$ незначна, тому для оцінних розрахунків можна приймати $\beta_{кр} \approx 0,5$.

Теоретичну швидкість витікання ідеального газу з сопла, що звужується, в дозвуковій області можна розрахувати з наступного вираження

$$C_m = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot p_1 v_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Теоретичну витрату ідеального газу можна визначити таким чином

$$G_m = F \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

де F - площа вихідного перерізу сопла, м²

$$F = \pi \cdot d_c^2 / 4$$

d_c - діаметр вихідного перерізу сопла, м.

Досягнення максимальної (критичною) швидкості $C_{кр}$ витікання із звужуючого сопла (конфузора) можливо тільки при встановленні в його вихідному перерізі критичного тиску $p_{кр}$, яке вище за тиск середовища, в яке здійснюється витікання.

Тому критичному тиску $p_{кр}$ завжди відповідає критична швидкість, і, як наслідок, максимальна витрата

$$C_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot p_1 v_1} = \sqrt{k \cdot p_{кр} \cdot v_{кр}},$$

тобто величина критичної швидкості визначається фізичними властивостями і початковими параметрами витікаючої рідини.

Таким чином, $v_{кр}$ при витіканні через сопло, що звужується, дорівнює місцевій швидкості звуку у вихідному перерізі сопла. Це пояснює ту обставину, чому в соплі, що звужується, газ не може розширитися до тиску, менше критичного, а швидкість не може перевищувати $v_{кр}$.

Як відомо з фізики, імпульс тиску (пружні коливання) поширюються в стискуваному середовищі із швидкістю звуку, тому коли швидкість витікання менше швидкості звуку $c < a$, зменшення тиску p_2 за соплом передається уздовж сопла в напрямі, зворотному руху потоку, з швидкістю $a - c$. При цьому відбувається перерозподіл тисків і швидкостей по усій довжині сопла: в кожному проміжному перерізі встановлюється нова більш велика швидкість витікання, якій відповідає більша витрата. При зниженні p_2 до $p_{кр}$

швидкість витікання c досягне швидкості звуку a (критичній швидкості) і подальше пониження p_2 вже не зможе поширюватися уздовж сопла, оскільки швидкість його поширення назустріч потоку знизиться до нуля ($a - c_{кр} = 0$).

Тому в проміжних перерізах сопла витрата газу не зміниться. Не зміниться він і у вихідному перерізі, тобто швидкість витікання залишиться постійною і рівною $c_{кр}$.

Критичній швидкості, що є максимальною для цього сопла, відповідає максимальна витрата газу, яка розраховується з наступного вираження

$$G_m = F \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}$$

Дійсна швидкість витікання газу з сопла і дійсна його витрата завжди менші за теоретичне. Це пов'язано з втратами енергії потоку при течії його по каналах за рахунок тертя, стискування витікаючого струменя.

Співвідношення між теоретичними G_m і c_m і дійсними G_q і c_q встановлюють коефіцієнтами швидкості φ і витрати μ

$$\frac{c_q}{c_m} = \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi}},$$

де ξ - коефіцієнт місцевого опору, що є функцією геометричних параметрів місцевого опору

$$\frac{G_q}{G_m} = \mu = \varphi \cdot \varepsilon,$$

де ε - коефіцієнт стискування струменя ($\varepsilon = \frac{F_c}{F}$);

F_c, F - відповідно площа перерізу струменя і сопла, м

$$G_q = v_q \cdot \rho_\varepsilon,$$

де v_q - експериментально визначена об'ємна витрата витікаючої рідини, м³/с;

ρ_ε - щільність витікаючої рідини при температурі довкілля, кг/м³

$$\rho_\varepsilon = \frac{p_\varepsilon}{(R_\varepsilon \cdot T_0)},$$

де p_0 - барометричний тиск, Па;
 R_g - газова постійна повітря, кДж/(кг·К).

Тоді

$$C_q = \frac{G_q}{(\rho_r \cdot F)} ,$$

де ρ_r - щільність повітря на виході з сопла, кг/м³;
 F - площа вихідного перерізу сопла, м.

Опис установки

Схема лабораторної установки наведена на рисунку 1. Установка включає: резервуар 1 з двома відсіками, розділений пластиною з круглим отвором 2; манометри 3 і 4; компресор 5, ресивер 6; регулювальні вентилі 7, 8 і 9; ротаметр 10.

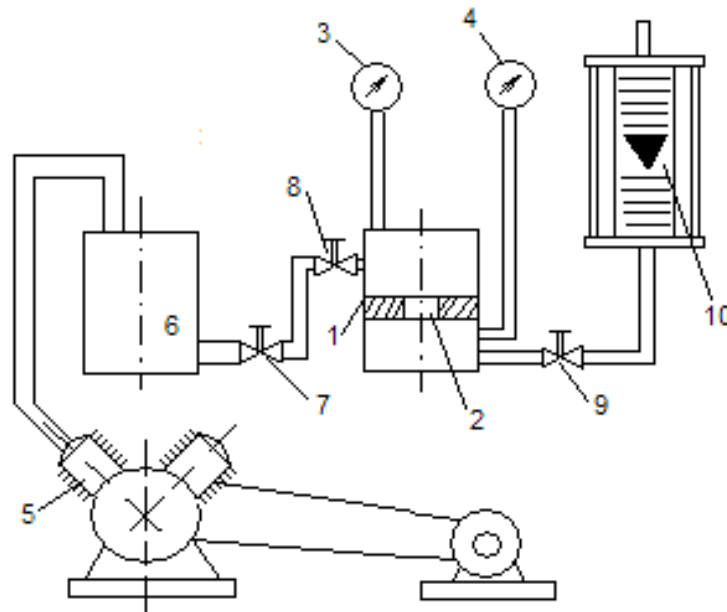


Рисунок 1

Порядок проведення експерименту

Порядок проведения эксперимента следующий: провести внешний осмотр компрессора. Проверить уровень масла. Присоединить при помощи шланга ресивер 6 к резервуару 1. Вентили 7 и 8 закрыть. Включить компрессор 5. Заполнить ресивер 6 сжатым воздухом до давления $p_{из}=0,4...0,45$ МПа. Остановить компрессор 5. Полностью открыть вентиль 7.

Регулируя вентилем 8, по манометру 3 установить давление p_1 , равное 0,3 МПа по шкале манометра 3. Затем плавно открывая вентиль 9, устанавливают расход воздуха таким образом, чтобы поплавков ротаметра 10 показывал 10 делений. При этом зафиксировать показания манометра 4. Далее, регулируя вентилем 8, поддерживаем начальное давление p_1 и при этом постепенно увеличиваем расход газа через отверстие 2, медленно открывая вентиль 9. При показаниях ротаметра 10 соответственно 20, 30, 40, 50, 60 делений фиксируем соответствующие показания манометра 4, т.е. p_2 . После измерений снять показания барометра p_6 , МПа, а также определить температуру воздуха T_6 , К.

Опыт следует повторить 4 раза. Результаты опыта свести в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	Параметры окружающей среды				Давление воздуха перед соплом		Давление воздуха после сопла		Расход воздуха	
	T_6		P_6		Показания манометра 3	P_1 МПа	Показания манометра 4	P_2 , МПа	Показания ротаметра 10	V м ³ /с
	°С	К	мм рт. ст.	МПа						

Обработка экспериментальных данных

1. Необходимо определить область истечения по соответствующему уравнению и сравнить результат с действительным значением из соотношения $p_2/p_1 = \beta$.

При $\beta > \beta_{кр}$ для расчета теоретической скорости истечения использовать зависимость (5.3). При $\beta < \beta_{кр}$ для расчета скорости истечения необходимо использовать уравнение (5.5).

Для расчетов необходимо иметь значение удельного объема воздуха v_1 в состоянии перед соплом, которое можно определить согласно следующей зависимости

$$v_1 = \frac{R_g \cdot T_g}{p_1},$$

где R_g - газовая постоянная воздуха ($R_g = 287$ Дж/(кг К));

T_g - температура окружающего воздуха, К;

p_1 - давление воздуха перед соплом, определяемое по манометру 3, Па.

Расчет теоретического расхода G_m , кг/с осуществляется в зависимости от области истечения. Площадь сечения сопла F для нашего случая задана $F = 415 \cdot 10^{-6}$ м². Действительный расход воздуха v_q , м³/с определяют ротаметром 10 при помощи графика, изображенного на рисунке 2.

Массовый расход воздуха рассчитываем после определения плотности воздуха.

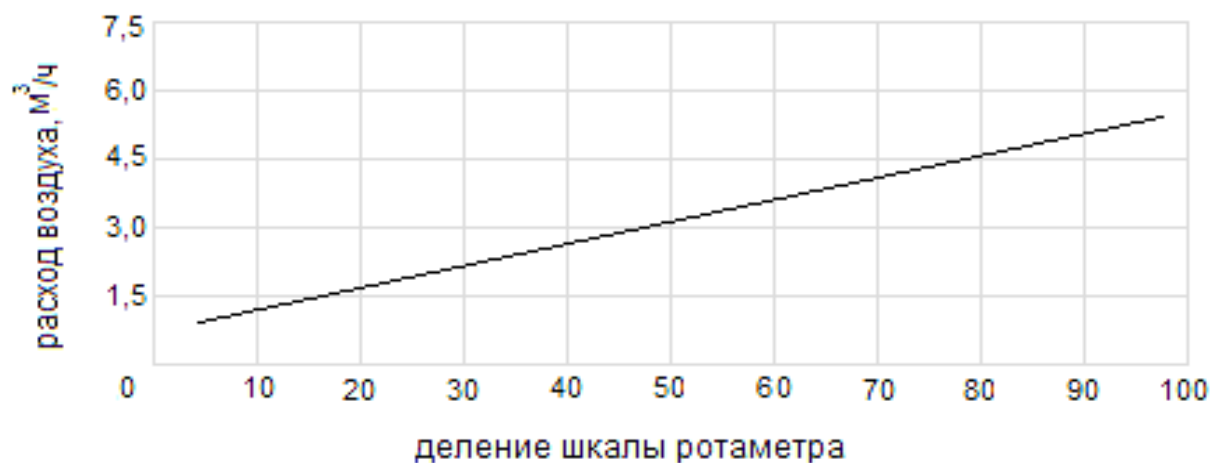


Рисунок 2 - График для определения расхода воздуха

Действительную скорость истечения определяем после расчета плотности воздуха, истекающего из сопла. Используя соответствующие формулы, находим коэффициенты скорости φ и расхода μ .

Результаты свести в таблицу 3.

Таблица 3

№ п/п	p_2/p_1	ρ , кг/м ³	Расход воздуха, G , кг/с		Скорость истечения, c , м/с		μ	φ
			G_m	G_q	c_m	c_q		

По результатам таблицы 3 построить графики

$$C_m = f(\beta) = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right); \quad C_q = f(\beta) = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$G_m = f(\beta) = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right); \quad G_q = f(\beta) = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\mu = f(\beta) = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right); \quad \varphi = f(\beta) = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right).$$

Контрольные вопросы

1. Напишите уравнение 1-го закона ТТД для потока. Дайте объяснение каждого члена уравнения.
2. Что такое работа проталкивания? Проиллюстрируйте ее для политропного процесса.
3. На что расходуется работа расширения газа в потоке?

4. Что такое располагаемая работа потока?
5. Каков физический смысл критических параметров истечения?
6. Что такое сопло, дивертор, сопло Лаваля? Назначение критерия Маха.
7. Физическая сущность закона геометрического обращения воздействия, его практическое значение.
8. Сущность коэффициентов скорости и расхода газа при его истечении из сопел и отверстий.
9. Что такое дросселирование газов и пара?
10. Физический смысл дифференциального дроссельного эффекта. Кривая инверсии.