

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

## ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ СОПЛО, ЩО ЗВУЖУЄТЬСЯ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітньою програмою  
«Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»  
спеціальності*

*141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
та за освітньою програмою  
«Енергетичний менеджмент та інжиніринг  
теплоенергетичних систем»  
спеціальності 144 «Теплоенергетика»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Технічна термодинаміка. Лабораторний практикум: дослідження процесу витікання рідини через сопло, що звужується [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.І. Дешко, В.П. Студенець, І.Ю.Білоус, Н.А. Буяк, М.М. Шовкалюк – Електронні текстові дані (1 файл: 0,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 24с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 4 від 07.04 2022 р.)  
за поданням Вченої ради Навчально наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту (протокол № 7 від 21.02.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

# ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

## ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ЧЕРЕЗ СОПЛО, ЩО ЗВУЖУЄТЬСЯ

Укладач: *Дешко Валерій Іванович*, д-р техн. наук, проф.  
*Студенець Віктор Петрович*, канд. техн. наук, доцент  
*Білоус Інна Юріївна*, канд. техн. наук, доцент  
*Буяк Надія Андріївна*, канд. техн. наук, доцент  
*Шовкалюк Марина Михайлівна*, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний редактор *Оборонов Тарас Юрійович*, канд. техн. наук, старший викладач

Рецензент *Боженко Михайло Федорович*, канд. техн. наук, доцент кафедри теплоенергетики НН ІАТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Дане видання призначене для виконання лабораторної роботи «Дослідження процесу витікання рідини через сопло, що звужується» кредитного модуля «Технічна термодинаміка 1» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» та 144 «Теплоенергетика» освітньо-професійної програми «Енергетичний менеджмент та інжиніринг теплоенергетичних систем». Студенти після виконання лабораторної роботи мають навчитися будувати залежність витрат і швидкості повітря, що витікає через сопло, яке звужується, від тиску, а також визначити коефіцієнти швидкості та витрати сопла.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	5
2 ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	13
3 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ.....	14
4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРІВ.....	20
5 ЗМІСТ ЗВІТУ.....	23
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	24

## ВСТУП

Метою викладання дисципліни «Технічна термодинаміка 1» є формування системи знань з методів отримання, перетворення і використання теплоти та роботи в такій мірі, щоб вони могли вибирати, розраховувати і аналізувати вказані методи з метою максимальної економії паливноенергетичних ресурсів, виявлення і використання вторинних енергоресурсів, інтенсифікації, оптимізації і здійснення екологічно чистих сучасних енергетичних процесів.

Методичні вказівки створені для виконання лабораторної роботи «Дослідження процесу витікання рідини через сопло, що звужується» з дисципліни «Технічна термодинаміка 1» для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 144 «Теплоенергетика» освітньо-професійної програми «Енергетичний менеджмент та інжиніринг теплоенергетичних систем».

У методичних вказівках наведено схему установки, порядок проведення дослідів, порядок розрахунку і довідкові дані.

Вимоги до оформлення: протокол лабораторної роботи повинен бути виконаний на аркушах А4 з рамкою та містити:

- схему та опис роботи установки,
- заповнені таблиці із результатами проведених вимірів,
- порядок обчислень із результатами,
- графіки,
- висновки.

Режим доступу до лабораторної роботи:

<https://www.youtube.com/watch?v=FKsqflbwg-Q>

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Мета роботи:** дослідити залежність витрати і швидкості повітря, яка витікає через сопло, що звужується, від відношення тисків за соплом і перед ним; визначити коефіцієнти швидкості та витрати сопла.

## Витікання із простих сопл

Існує два типи коротких каналів із змінним перерізом: сопла і дифузори.

Сопла – це короткі канали змінного радіуса перерізу, в яких проходить розширення газу або пари зі зменшенням тиску і збільшенням швидкості руху потоку, тобто, це канали, в яких потенціальна енергія тиску потоку перетворюється в кінетичну. Як правило, в цих каналах протікає адіабатний процес – геометричний вплив на потік.

Дифузори – короткі канали змінного перерізу, в яких проходить стиснення газу зі збільшенням тиску і зменшенням швидкості руху потоку, тобто, в цих каналах кінетична енергія потоку перетворюється у потенціальну енергію.

Канали (сопла і дифузори) бувають трьох конфігурацій:

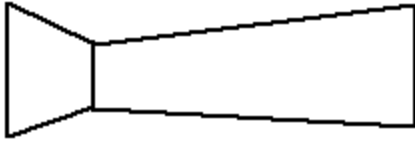
- такі, що звужуються (звужуючі, прості):



- такі, що розширюються:

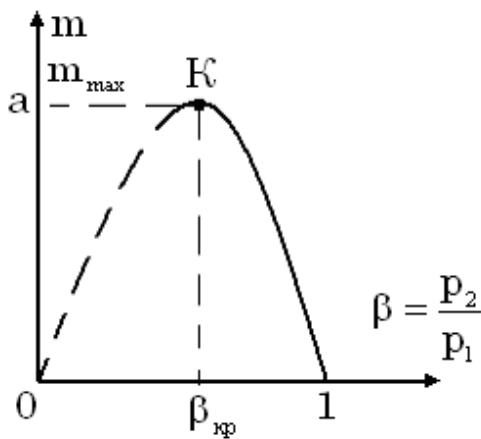


- комбіновані (спочатку звужуються, потім розширюються) – сопла Лавалля, використовуються у ракетних двигунах:



Масова витрата через сопло залежить від відношення  $\frac{p_2}{p_1} = \beta$ , яке називається коефіцієнтом відношення тисків:

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



Експеримент показує, що наростання маси речовини при зменшенні  $\beta$  буде протікати тільки до максимального значення маси  $m_{max}$ . Після цього маса речовини, яка протікає через сопло, буде незмінною. Зміна витрати іде по кривій 1-К-а. Значення  $\beta$  в точці К називається критичним.

При  $p_2 = p_{2кр}$   $\frac{dm}{dp_2} = 0$ .

$$\beta_{кр} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad \beta_{кр} \text{ залежить від природи робочого тіла.}$$

Французький вчений Сен-Венан висловив гіпотезу, згідно з якою робоче тіло в соплах розширюється тільки до  $P_{кр}$ , яке відповідає  $m_{max}$ , що протікає через сопло:  $\beta_{кр} = \frac{P_{кр}}{P_1}$ .

Якщо в рівняння для витрати підставити це значення, то отримаємо:

$$m_{max} = f_{\min} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \cdot \frac{p_1}{v_1}}$$

$$W_{2кр} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \left(\frac{p_{2кр}}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}, \quad \beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$W_{2кр} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \frac{2}{k+1}\right)}, \quad W_{2кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 v_1},$$

$$W_{2кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 v_1}, \quad p_1 v_1 v_1^{k-1} = p_{2кр} v_{2кр} v_{2кр}^{k-1},$$

$$W_{2кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_{2кр} v_{2кр} \left(\frac{v_{2кр}}{v_1}\right)^{k-1}},$$

$$\frac{v_{2кр}}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_{2кр}}\right)^{\frac{1}{k}} = \beta_{кр}^{-\frac{1}{k}} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{-1}{k-1}}$$

$$W_{2кр} = \sqrt{k p_{2кр} v_{2кр}} = W_{36}.$$

Швидкість на виході з простого сопла у критичному режимі дорівнює місцевій швидкості звуку. Тиск  $p_2 < p_{2кр}$  не досягає вихідного перерізу і перстає керувати процесом у соплі.

Форма сопла вибирається в залежності від значення  $\beta$ .

Тип газу	$k = c_p / c_v$	$\beta_{кр}$
Одноатомний	1,66	0,49
Двохатомний	1,4	0,528
Трьохатомний	1,29	0,546
Перегріта пара	1,3	0,546
Суша насичена пара	1,135	0,577

Якщо  $\frac{p_2}{p_1} > \beta_{кр}$ , використовується сопло, що звужується:

Якщо  $\frac{p_2}{p_1} < \beta_{кр}$ , – комбіноване сопло.

Робочі процеси під час руху газів реалізуються у багатьох машинах і апаратах. Термодинамічний аналіз відкритих потокових систем стосовно руху газів у каналах проводиться за наступних умов.

Розглядається стаціонарний рух одновимірного потоку, тобто параметри змінюються у напрямку осі каналу. За відсутності масового впливу рівняння суцільності (нерозривності) відповідає сталості масової витрати:

$$\frac{fw}{v} = \frac{V}{v} = m = const, \quad (1)$$

де

$f$  – площа перерізу каналу, м<sup>2</sup>;

$w$  – швидкість робочого тіла м/с;

$v$  – питомий об'єм робочого тіла, м<sup>3</sup>/кг;

$V$  – об'ємна витрата робочого тіла в даному перерізі каналу, м<sup>3</sup>/с;

$m$  – масова витрата робочого тіла, кг/с.

Рівняння першого закону термодинаміки для потоку в цьому випадку має вигляд:

$$\delta q = dh + \frac{dw^2}{2} + \delta l_T + g dz, \quad (2)$$

де

$q$  – зовнішня питома теплота процесу, Дж/кг;

$l_T$  – питома технічна робота, Дж/кг;

$h$  – питома ентальпія, Дж/кг;

$gz$  – потенційна енергія робочого тіла у даному перерізі, Дж/кг.

Крім рівнянь нерозривності та першого закону, до основних рівнянь термодинаміки потоку відносяться рівняння процесу та рівняння стану. Для реальних газів (парів) замість рівняння стану через його складності при практичних розрахунках користуються діаграмами або таблицями термодинамічних властивостей. Для повітря з достатньою для практичних

цілей точністю допустиме використання рівняння стану ідеальних газів:

$$pv = RT, \quad (3)$$

де

$p$  – абсолютний тиск, Па,

$v$  – питомий об'єм, м<sup>3</sup>/кг;

$T$  – абсолютна температура, К;

$R = \frac{R\mu}{\mu}$  – питома газова стала даного газу, Дж/(кг К).

При аналізі витоку газу з сопла процес вважається енергетично ізольованим ( $\delta q = 0$ ,  $\delta l_T = 0$ ), а зміною потенційної енергії положення нехтують ( $g\Delta\epsilon=0$ ). Тоді для будь-якого перерізу каналу з формули (2) випливає, що:

$$h + \frac{w^2}{2} = h_0 = const, \quad (4)$$

тобто збільшення кінетичної енергії під час витікання з сопла відбувається за рахунок зменшення ентальпії. При розгляді процесу витоку ідеального газу як оборотного з постійною теплоємністю використовується рівняння адіабатного процесу:

$$pv = p_0 v_0^k = const, \\ T p^{\frac{1-k}{k}} = T_0 p_0^{\frac{1-k}{k}} = const. \quad (5)$$

У (4), (5):

$h_0 = c_p T_0$ ,  $p_0$ ;  $T_0$ ;  $v_0$  – параметри оборотного адіабатного гальмування,

$k = \frac{c_p}{c_v}$  – показник адіабати.

Таким чином, збільшення швидкості газу відбувається при зменшенні його тиску та температури.

Завдання аналізу витікання з простого сопла або сопла, що звужується полягає у визначенні швидкості  $w_2$  на виході з сопла і витрати газу при заданих

вхідних параметрах  $h_0; p_0; v_0$  (або  $h_1; p_1; v_1, w_1$ ), тиску середовища за соплом  $p_c$  та площі вихідного перерізу сопла  $f_2 = f_{min}$ .

Для швидкості витікання з (4) у загальному випадку отримаємо:

$$w_2 = \sqrt{2(h_0 - h_2)}, \quad (6)$$

зокрема, під час оборотного процесу з ідеальним газом, використовуючи (1.3), (1.5):

$$w_2 = \sqrt{2C_p(T_0 - T_2)} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 v_0 (1 - \beta^{\frac{k+1}{k}})}. \quad (7)$$

Витрати газу в загальному випадку можна визначити з рівняння нерозривності (1.1) для вихідного перерізу:

$$m = \frac{f_2 w_2}{v_2}, \quad (8)$$

при оборотному процесі ідеального газу з урахуванням (7), (5):

$$m = f_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{v_0} \left( \beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)}, \quad (9)$$

де

$\beta = p_c/p_0$  – відношення тисків.

Порівняння параметрів у вихідному перерізі в залежності від значення  $\beta$  при зменшенні  $p_c$ , розрахованих по (1.7), (1.9) і отриманих з дослідних даних, показує ряд особливостей витікання із сопла, що звужується (рис. 1)

Неможливо отримати тиск газу у вихідному перерізі  $p_2$  нижче значення  $p_{кр}$ . При  $\beta = p_c/p_0 \leq \beta_{кр} = p_{кр}/p_0$  швидкість витікання із зменшенням  $p_0$  не збільшується, це критичне значення дорівнює місцевій швидкості звуку.

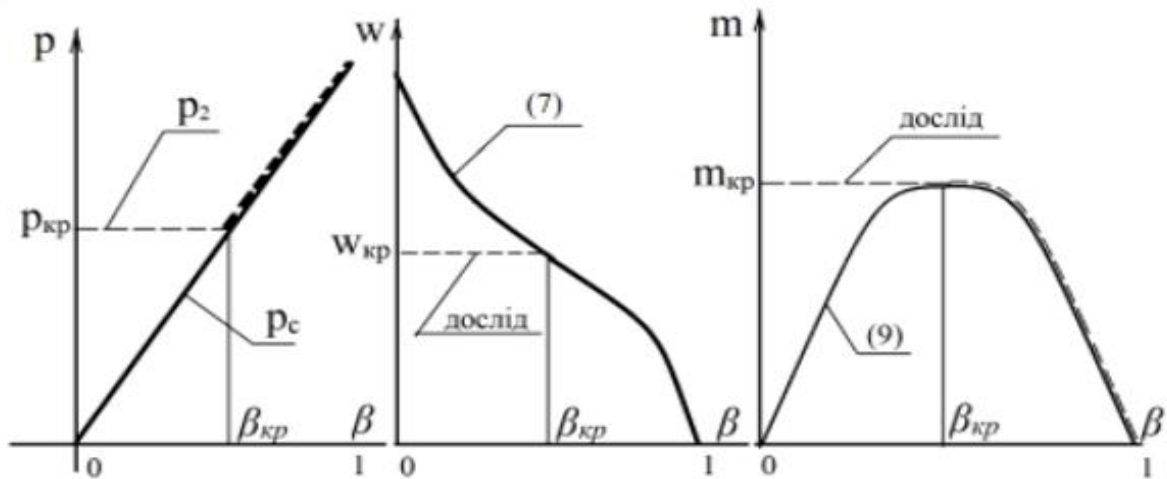


Рис. 1 – Залежності витікання повітря із сопла, що звужується

При  $\beta \leq \beta_{кр}$  витрата газу через сопло встановлюється на рівні максимального значення. Розмір  $p_c = p_{кр}$  визначається з аналізу на максимум функції (9):

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_0} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (10)$$

Таким чином, при  $\beta > \beta_{кр}$  швидкість витікання з сопла, що звужується, визначається по (6), (7), витрата робочого тіла – по (8), (9).

При  $\beta \leq \beta_{кр}$  в (7), (9) замість  $\beta$  підставляється значення  $\beta_{кр}$ , в (6), (8) параметри  $w_2$ ,  $v_2$ ,  $h_2$  замінюються на  $w_{кр}$ ,  $v_{кр}$ ,  $h_{кр}$ , тобто визначаються за формулою

$$p_{кр} = p_0 \beta_{кр}$$

Реальний процес адіабатного витікання завжди супроводжується тертям і є необоротним. Втрати на тертя призводять до зменшення швидкості витікання та збільшення ентропії робочого тіла (рис.2).

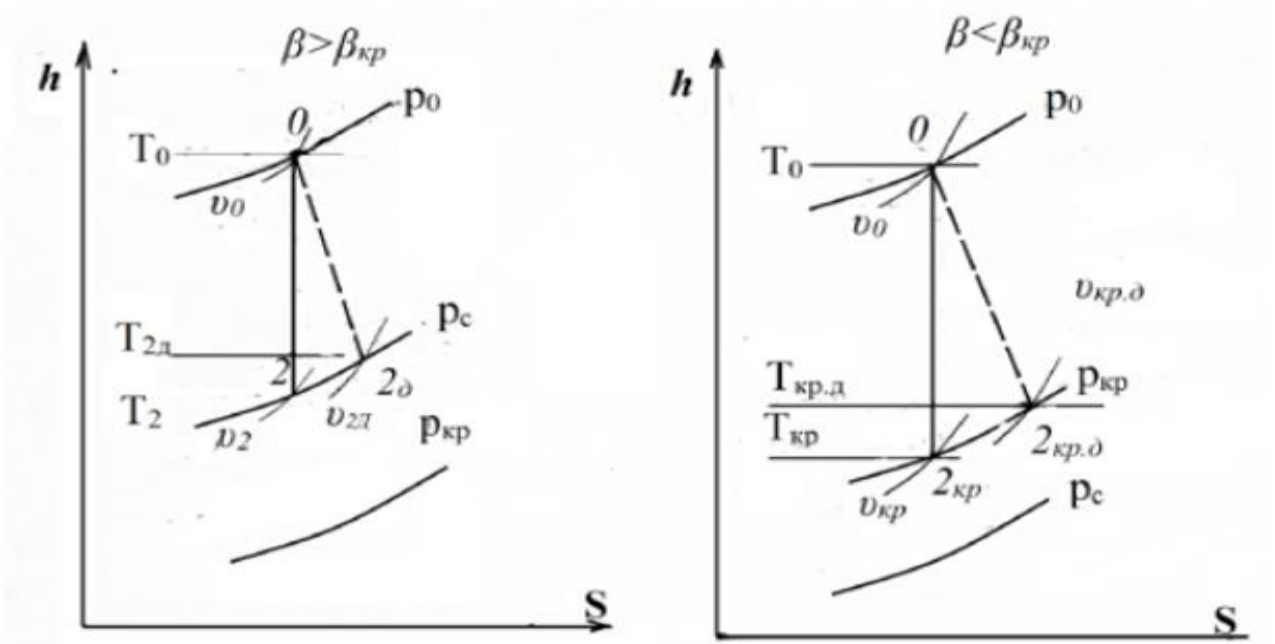


Рис. 2 - Реальний процес адиабатного витікання через сопло

Дійсна швидкість витікання:

$$w_{2д} = \sqrt{2(h_0 - h_{2г})}, \quad (11)$$

витрата:

$$m_{2д} = \frac{f_2 w_{2д}}{v_{2д}} \quad (12)$$

Ступінь наближення дійсного процесу витікання до теоретичного характеризує коефіцієнт швидкості сопла:

$$\varphi = \frac{w_{2д}}{w_2} \quad (13)$$

та коефіцієнт витрати:

$$\mu = \frac{m_д}{m} \quad (14)$$

Значення цих коефіцієнтів залежать від конструкції сопла, чистоти обробки його робочої поверхні та визначаються дослідним шляхом.

## 2 ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Схему установки показано на рис. 3. Потік повітря через сопло 7, що звужується, створюється за допомогою вакуумного насоса 11.

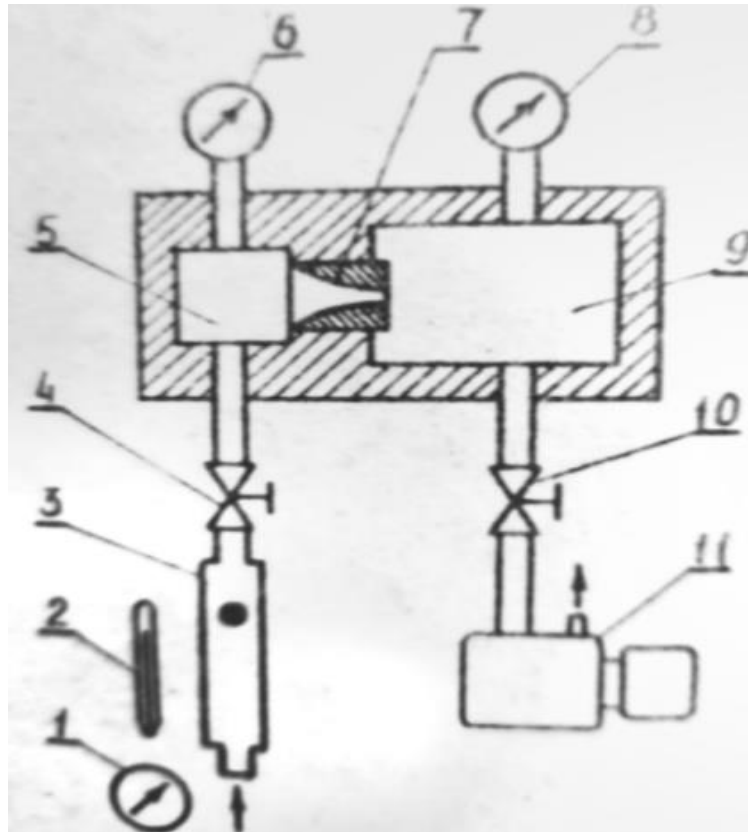


Рис. 3 – Схема лабораторної установки

Діаметр мінімального перерізу сопла наведено у паспорті лабораторного стенду. Повітря з приміщення надходить в установку через ротаметр 3, який служить для вимірювання об'ємної витрати. Градуовальний графік ротаметра є у паспорті установки. Температура навколишнього повітря визначається рідинним термометром 2, тиск - барометром 1. Вентиль 4 призначений для регулювання тиску в камері 5 перед соплом, розрідження в камері 5 вимірюється вакууметром 6.

Тиск за соплом у камері 9 регулюються за допомогою вентилля 10, розрідження в камері 9 вимірюється вакууметром 8.

Режим доступу до лабораторної роботи:

<https://www.youtube.com/watch?v=FKsqflbwg-Q>

### 3 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ

Проведення дослідів на установці полягає у вимірі витрати повітря при заданому тиску  $p_0$  перед соплом та зменшення тиску  $p_0$  у камері за соплом. Попередньо необхідно заготовити форму протоколу випробувань відповідно до таблиці 1. Значення тиску  $p_0$  задає викладач. Рекомендовані значення відношення тиску  $\beta$  для кожного дослідів наведено в таблиці. За погодженням з викладачем можна вибрати інший порядок зміни тиску у процесі дослідів.

Вакуумний насос 11 вмикає персонал лабораторії. При цьому вентиля 4 та 10 закриті. Визначається ціна поділки шкали вимірювальних приладів 1, 2, 6, 8. Насамперед вимірюється барометричний тиск  $p_6$  барометром 1 та температура навколишнього повітря  $t_{н.пов.}$  термометром 2.

Значення вакууму  $p_v$ , що відповідає заданій величині  $p_0$ , розраховується з урахуванням ціни поділки шкали:

$$p_v = p_6 - p_0 \quad (15)$$

У першому досліді для  $\beta = 1$  розраховане значення вакууму в камерах до і після сопла встановлюється вентилям 10. При  $\beta = 1$  об'ємний витрата повітря дорівнює нулю. Значення тисків, температури та витрати заносяться до протоколу випробувань. У другому досліді розраховується значення вакууму в камері за соплом для  $\beta = 0,9$ , необхідний вакуум у камерах встановлюється регулюванням вентилів 4 і 10:

$$p_c = p_0 \cdot \beta; \quad (16)$$

$$p_v = p_6 - p_c$$

Покази ротаметра 3 вимірюються по верхній кромці кульки-поплавка. За даними вимірювання об'ємна витрата через ротаметр визначається за градуовальним графіком ротаметра. Потім досліді проводяться для інших значень відношення тиску, включаючи критичну область витікання.

Експериментальна частина лабораторної роботи закінчується після узгодження результатів вимірів із викладачем.

Параметри, за яких здійснювалося градування ротаметра, (часто  $p_r = 1,013 \cdot 10^5$  Па,  $T_r = 293$  К), відрізняються від умов  $t_0$ ,  $p_0$  вимірювань витрати. Тому для визначення дійсної об'ємної витрати  $V_d$  через ротаметр у значення об'ємної витрати  $V$  необхідно внести поправку:

$$V_d = V \sqrt{\frac{p_r \cdot T_0}{p_0 \cdot T_r}} \quad (17)$$

Дійсна масова витрата повітря, кг/с, через установку з урахуванням (1), (3):

$$m_d = \frac{V_d \cdot p_0}{R \cdot T_0} \quad (18)$$

Для отримання результату розрахунку  $m_d$  в [кг/с] необхідно, щоб усі величини у (18) були в системі СІ:

$$V_d - \text{м}^3/\text{с}; p_0 - \text{Па}; R - \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); T_0 - \text{К}.$$

Теоретична масова витрата повітря  $m$  у кожному досліді розраховується за (9), а теоретична швидкість витікання  $w_2$  - за (7). При цьому площа вихідного перерізу  $f_2$  визначається за паспортними даними стенду, питомий об'єм  $v_0$  - за тиском  $p_0$  та температурою  $T_0 = t_0 + 273$  за допомогою (3). Для критичних режимів витікання  $\beta \leq \beta_{\text{кр}}$  відношення тисків знаходять за (10) і в (7), (9) замість  $\beta$  підставляють  $\beta_{\text{кр}}$ .

Щоб знайти дійсну швидкість витікання  $w_{2d}$  за (11) необхідно визначити стан у точці 2<sub>д</sub> (2<sub>кр,д</sub>), для якої відомий тільки тиск  $p_c$  ( $p_{\text{кр}}$ ) (див. рис.2). Для розрахунку другого параметру  $T_{2d}$  ( $T_{\text{кр,д}}$ ) в цій точці використовується (19), отримана з сумісного вирішення (11), (12) та (3):

$$T_{2д} = \frac{\sqrt{1 + 4T_0 B^2} - 1}{2B^2}, \quad (19)$$

де

$B$  – коефіцієнт,  $[K^{-1}]$ , що розраховується наступним чином:

$$B = \frac{m_d R}{f_2 \rho_c \sqrt{2c_p}}. \quad (20)$$

Дійсна швидкість витікання, м/с:

$$w_{2д} = \sqrt{2c_p(T_0 - T_{2д})}. \quad (21)$$

Якщо режим витікання критичний  $\beta \leq \beta_{кр}$ , (19), (20), (21) замість  $T_{2д}$ ,  $\rho_c$  використовують  $T_{кр,д}$ ,  $\rho_{кр} = \rho_0 \beta_{кр}$ .

Під час розрахунків (7), (9), (19), (20), (21) вихідні величини необхідно підставляти в основних одиницях СІ.

Значення коефіцієнтів швидкості  $\phi$  і витрати  $\mu$  визначають за (13), (14).

Після обробки дослідних даних заповнюють протокол випробувань.

Режим доступу до лабораторної роботи:

<https://www.youtube.com/watch?v=FKsqflbwg-Q>

## Експериментальна частина

Таблиця 3.1 - Протокол випробувань: попередні розрахунки

p <sub>б</sub> , кПа	t <sub>о</sub>		p <sub>г</sub> , кПа	T <sub>г</sub> , К	d, мм	R Дж/(кг·К)	β <sub>кр</sub>	f <sub>2</sub> м <sup>2</sup>	v <sub>о</sub>	k	c <sub>p</sub> Дж/(кг·К)
	°С	К									

В таблиці 1.1 вносимо наступні дані:

1) параметри навколишнього повітря:

- тиск  $p_b = p_o =$  \_\_\_\_\_ Па.

- температура  $t_{н.пов.} = t_o =$  \_\_\_\_\_ °С, або  $T_o = t + 273 =$  \_\_\_\_\_ К ;

2) Параметри, за яких здійснювалося градуювання ротаметра:

$p_r = 1,013 \cdot 10^5$  Па  $T_r = 293$  К;

3) Діаметр сопла  $d = 0,2$  мм

4) Питома газова стала повітря, Дж/(кг·К):

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu} =$$

5) Значення  $\beta_{кр}$ :

$$\beta_{кр} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,528, \quad \text{де}$$

k – коефіцієнт адиабати (Пуасона):  $k = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$

6) Площа перерізу, м<sup>2</sup>:

$$f_2 = \frac{\pi d^2}{4} = 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$$

7) Питомий об'єм повітря, м<sup>3</sup>/кг, через рівняння стану ідеальних газів:

$$v_o = \frac{R \cdot T_o}{p_o} =$$

де  $p_o$  - в [Па].

Таблиця 3.2 - Протокол випробувань: вимірювання

№	p <sub>вс</sub>			V		
	поділок	кгс/см <sup>2</sup>	кПа	поділок	м <sup>3</sup> /год	м <sup>3</sup> /с
1	10					
2	20					
3	30					
4	40					
5	50					
	60					
	70					
	80					
	90					
	100					
	110					
	120					
	130					
	140					
	150					
	....					
	220					

Шкала приладу: 250 поділок = 1 кгс/см<sup>2</sup>

1 ат=98 кПа

При зміні тиску p<sub>вс</sub> необхідно виміряти об'ємну витрату повітря. Об'ємна витрата повітря вимірюється у поділках ротаметра, які переводяться у м<sup>3</sup>/год за допомогою градуовальної таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Градувальний графік ротаметра

поділ.	м <sup>3</sup> /ГОД
0	0,005
10	0,009
20	0,014
30	
40	0,024
50	
60	0,035
70	
80	0,049
90	
100	0,064

температура середовища: 293 К

тиск: 101,3 кПа (760 мм. рт. ст)

## 4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРІВ

Результати кожного досвіду обробляються в такий спосіб.

1) Дійсна об'ємна витрата

$$V_d = V \sqrt{\frac{p_r \cdot T_0}{p_b \cdot T_r}} \quad (17)$$

де  $p_r = 1,013 \cdot 10^5$  Па,  $T_r = 293$  К

2) Абсолютний тиск в камері за соплом, кПа

$$p_c = p_b - p_{вс} =$$

3) Відношення тисків:

$$\beta = \frac{p_c}{p_b} =$$

4) Дійсна масова витрата повітря, кг/с:

$$m_d = \frac{V_d \cdot p_0}{R \cdot T_0}$$

де усі величини в системі СІ:  $V_d$  – м<sup>3</sup>/с;  $p_0$  – Па;  $R$  – Дж/(кг·К);  $T_0$  – К.

5) Теоретична масова витрата в кожному досліді, кг/с:

$$m = f_2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_0}{v_0} \left( \beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)} =$$

6) Коефіцієнт, К<sup>-1</sup>:

$$B = \frac{m_d \cdot R}{f_2 p_c \sqrt{2 \cdot c_p}}$$

7) Температура в точці  $T_{2д}$ :

$$T_{2д} = \frac{\sqrt{1 + 4 \cdot T_0 \cdot B^2} - 1}{2 \cdot B^2}$$

8) Дійсна швидкість витікання, м/с:

$$w_{2д} = \sqrt{2c_p(T_0 - T_{2д})}$$

9) Теоретична швидкість витікання, м/с:

$$w_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot p_0 \cdot v_0 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right) =}$$

10) Коефіцієнт швидкості сопла:

$$\varphi = \frac{\omega_{2д}}{\omega_2}$$

11) Коефіцієнт витрати сопла:

$$\mu = \frac{m_{д}}{m}$$



## 5 ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Принципова схема лабораторної установки та короткий опис її роботи
2. Обробка дослідних даних
3. Протокол випробувань.
4. Графіки залежності:
  - витрати  $m$  і  $m_d$  від  $\beta$ ;
  - швидкостей  $w_2$  і  $w_{2d}$  від  $\beta$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Константинов С.М. Технічна термодинаміка. Київ, „політехніка”, 2001,- 377с.
2. Константинов С.М. Теоретичні основи теплотехніки. – К.: Золоті ворота, 2012. – 592 с.
3. Дубровська, В.В. Термодинаміка та теплообмін: Навч. посіб. / В.В.Дубровська, В.І. Шкляр – К.: НТУУ «КПІ», Вид-во “Політехніка», 2016. – 152 с.
4. Кириллін В.А., Сичов В.В., Шейндлін А.Е. Технічна термодинаміка. — М.: Наука, 1979. — 512 с.
5. Гуржий А.А., Огородников П.И. Теплотехника: Курс лекцій – К.: Издательский дом «Слово», 2003. – 254 с.