

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. М. ПАТЛАЙЧУК, Т. Є. ЗІНОВ'ЄВА

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для проведення лабораторних робіт з дисципліни
«ТЕОРІЯ ТУРБІН»**

Рекомендовано Методичною радою НУК



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2025

УДК 621.125
П20

Автори: В. М. Патлайчук, канд. техн. наук, доцент;
Т. Є. Зінов'єва, фахівець 1-ї категорії

Рецензент С. О. Моргун, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування НУК

Рекомендовано Методичною радою НУК

Патлайчук В. М.

П20 Методичні вказівки для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теорія турбін» / В. М. Патлайчук, Т. Є. Зінов'єва. – Миколаїв : НУК, 2025. – 46 с.

Вміщено опис лабораторних робіт, які виконуються студентами Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова під час вивчення дисципліни «Теорія турбін». До кожної роботи додаються теоретичні передумови її проведення, опис експериментальної установки, порядок виконання роботи та вимоги до оформлення звіту.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» освітньої програми «Газотурбінні установки і компресорні станції» денної та заочної форм навчання.

УДК 621.125

© В. М. Патлайчук, Т. Є. Зінов'єва, 2025
© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2025

ЗМІСТ

Передмова.....	4
<i>Лабораторна робота № 1</i>	
Дослідження плоского потенційного обтікання нестисливою рідиною одиничного крилового профілю.....	5
<i>Лабораторна робота № 2</i>	
Дослідження динаміки потоку газу у плоскій турбінній решітці.....	19
<i>Лабораторна робота № 3</i>	
Визначення втрат у плоскій турбінній решітці та кута виходу потоку.....	31
<i>Лабораторна робота № 4</i>	
Дослідження лабіринтного ущільнення.....	38

ПЕРЕДМОВА

У даних методичних вказівках дається опис лабораторних робіт, які виконуються студентами в лабораторіях кафедри турбін Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова під час вивчення дисципліни «Теорія турбін».

Лабораторні роботи носять характер дослідження окремих процесів або явищ і мають за мету виявити їх закономірності або зробити кількісну чи якісну їх оцінку.

У кожному описі наводяться теоретичні передумови, з яких походить методика експериментального дослідження. Успішне виконання роботи вимагає попереднього повного ознайомлення з обсягом, змістом та методикою дослідження, а також з експериментальною установкою та формою надання результатів.

Перед виконанням лабораторної роботи студенти проходять інструктаж з правил техніки безпеки під час роботи з експериментальною установкою.

Готовність установки до дії перевіряється спільно із завідувачем лабораторії. Увімкнення установки виконується з дозволу викладача, який проводить заняття.

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛОСКОГО ПОТЕНЦІЙНОГО ОБТІКАННЯ НЕСТИСЛИВОЮ РІДИНОЮ ОДИНИЧНОГО КРИЛОВОГО ПРОФІЛЮ

Мета роботи: дослідити обтікання одиничного крилового профілю плоским потенційним потоком нестисливої рідини методом електрогідродинамічної аналогії (ЕГДА) і побудувати криві розподілу швидкості та тиску по профілю.

Теоретичні основи методу ЕГДА

Метод електрогідродинамічної аналогії заснований на тотожності математичних рівнянь, що описують потік нев'язкої рідини та течію електричного струму в електропровідному матеріалі. Так, зокрема, розподіл потенціалів швидкості φ у плоскому потоці нестисливої рідини та електричних потенціалів φ_e у плоскому електричному полі провідника з постійною електропровідністю підпорядковуються рівнянню Лапласа відповідно у вигляді:

для потоку рідини

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0; \quad (1.1)$$

для електричного поля

$$\frac{\partial^2 \phi_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_e}{\partial y^2} = 0. \quad (1.2)$$

Аналогічними рівняннями описуються і розподіли функцій струму ψ у потоці рідини та функцій електричного струму ϕ_e у провіднику. До того ж ізопотенційні лінії та лінії струму утворюють взаємноортогональну сітку.

Указана обставина дозволяє проводити експериментальні дослідження потенційних течій рідини на відповідних електричних моделях, де значення електричного потенціалу можуть бути заміряні легко та, завдяки досконалості електричних приборів, з високою точністю.

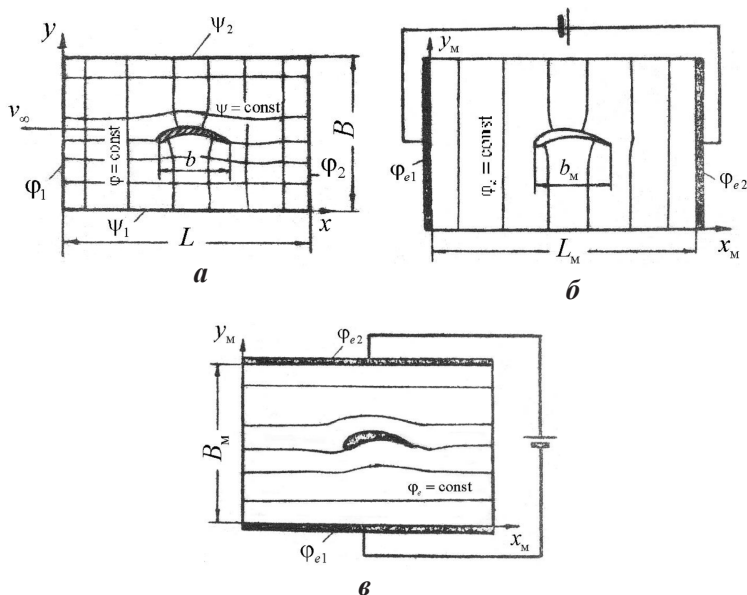


Рис. 1.1. Моделювання потоку з використанням ЕГДА:

a – область у потоці; **б** – модель за аналогією «А»;

в – модель за аналогією «В»

На рис. 1.1,*а* показана деяка обмежена двома ізопотенційними лініями ϕ_1 і ϕ_1 та двома лініями струму ψ_1 і ψ_2 область плоского потоку, який обтікає криловий профіль. Границі її обираються на такій відстані від профілю, де впливом останнього на потік можна знехтувати, і тому виокремлена область має форму прямокутника, розташованого довгою стороною в напрямку швидкості незхвильованого потоку. Модель розглядаємої області потоку (рис. 1.1,*б* або *в*) виконується з електропровідного паперу або станіолу. У ролі електропровідного матеріалу може бути використаний також шар електроліту у ванні. Модель повинна задовольняти умовам геометричної подоби моделюємої області потоку, тобто повинна виконуватися рівність:

$$\frac{L_M}{L} = \frac{B_M}{B} = \frac{b_M}{b} = \frac{x_M}{x} = \frac{y_M}{y} = m,$$

де m – масштаб моделювання.

Для створення в моделі електричного поля на неї накладаються струмопідвідні шини, які підключаються до джерела живлення.

Унаслідок взаємної ортогональності ізопотенційних ліній та ліній струму під час моделювання є можливим використовувати аналогію двох видів.

За аналогією «А» (рис. 1.1,*б*) шини накладаються вздовж вертикальних боків моделі. Ізопотенційним лініям $\phi = \text{const}$ у потоці рідини відповідають лінії рівних електричних потенціалів $\phi_e = \text{const}$ в моделі, а лініям струму $\psi = \text{const}$ – лінії $\psi_e = \text{const}$. Оскільки контур профілю, утворюваний лініями струму, повинен бути непроникним для електричного струму, то модель профілю виготовляється з неелектропровідного матеріалу. У разі використання електропровідного паперу або станіолу в моделі просто

робиться виріз за формою профілю. Рівняння (1.1) та (1.2) у разі переходу до безрозмірних величин можна переписати у вигляді:

$$\frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial \bar{y}^2} = 0, \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\Phi}_e}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\Phi}_e}{\partial \bar{y}^2} = 0. \quad (1.4)$$

За граничних умов:

$$1) \quad \bar{x} = 0 \quad \bar{\Phi} = \bar{\Phi}_e = 0;$$

$$2) \quad \bar{x} = 1 \quad \bar{\Phi} = \bar{\Phi}_e = 1;$$

$$3) \quad \left(\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \bar{n}} \right)_{\bar{n}=0} = \left(\frac{\partial \bar{\Phi}_e}{\partial \bar{n}} \right)_{\bar{n}=0} = 0 \quad (\text{на контурі профілю по нормалі до нього});$$

$$4) \quad \left(\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \bar{y}} \right)_{\bar{y}=0, \bar{y}=1} = \left(\frac{\partial \bar{\Phi}_e}{\partial \bar{y}} \right)_{\bar{y}=0, \bar{y}=1} = 0,$$

де $\bar{x} = \frac{x}{L} = \frac{x_m}{L_m} = \text{idem}$, $\bar{y} = \frac{y}{L} = \frac{y_m}{L_m} = \text{idem}$ – безрозмірні координати подібних точок у потоці та на моделі;

$\bar{\Phi} = \frac{\Phi - \Phi_1}{\Phi_2 - \Phi_1}$,
 $\bar{\Phi}_e = \frac{\Phi_e - \Phi_{e1}}{\Phi_{e2} - \Phi_{e1}}$ – безрозмірні значення потенціалів.

Оскільки граничні умови однакових за формою рівнянь (1.3) та (1.4) чисельно однакові, то і рішення цих рівнянь будуть співпадати як за формою функціональних залежностей, так і за числовим значенням, тобто

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_e = f(\bar{x}; \bar{y}).$$

Іншими словами, безрозмірні значення потенціалу швидкості в потоці та електричного потенціалу в моделі в подібних точках однакові.

На практиці завдання дослідження обтікання профілю зводиться до побудови на моделі за даними безпосередніх вимірювань ліній рівних потенціалів і графіка розподілу безрозмірних потенціалів по контуру профілю. Швидкість потоку в будь-якій точці контуру в напрямку дотичної за потенційного обтікання

$$v_s = \frac{\partial \varphi}{\partial S} = \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{S}} \cdot \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{L} \approx \frac{\Delta \bar{\varphi}}{\Delta \bar{S}} \cdot v_\infty$$

або

$$\bar{v}_s = \frac{v_s}{v_\infty} \approx \frac{\frac{\Delta \bar{\varphi}_e}{\Delta S_M}}{\left(\frac{\Delta \bar{\varphi}_e}{\Delta x_M} \right)_\infty}, \quad (1.5)$$

де ΔS_M – ділянка контуру на моделі біля точки, для якої визначається швидкість ($\Delta \bar{S} = \frac{\Delta S_M}{L_M} = \frac{\Delta S}{L}$ – відносна протяжність ділянки); Δx_M – відстань між двома довільними ізопотенційними лініями на достатньому віддаленні від профілю (попереду); $\Delta \bar{\varphi}_e$ – різниця безрозмірних потенціалів на границях ділянки контуру ΔS_M (у чисельнику) та відрізка Δx_M (у знаменнику); v_∞ – задана швидкість набігаючого потоку.

Тут ΔS_M та Δx_M – абсолютні значення, які вимірюються з моделі.

За аналогією «В» (рис. 1.1,б) шини накладаються вздовж горизонтальних боків моделі. У цьому випадку ізопотенційним лініям $\bar{\varphi} = \text{const}$ у потоці рідини відповідають лінії постійних функцій електричного струму $\psi_e = \text{const}$ у моделі, а лініям струму $\psi = \text{const}$ у потоці – лінії рівних

електричних потенціалів $\varphi_e = \text{const}$ у моделі. Контур профілю на моделі повинен бути утворений ізопотенційною лінією, тому в разі такого способу моделювання модель профілю виконується із гарного провідника. Рівняння ліній струму в потоці в диференціальній формі, приведене до безрозмірних величин, має наступний вигляд:

$$\frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial \bar{y}^2} = 0, \quad (1.6)$$

а відповідних ним ізопотенційних ліній у моделі –

$$\frac{\partial^2 \bar{\Phi}_e}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\Phi}_e}{\partial \bar{y}^2} = 0. \quad (1.7)$$

Граничні умови для задачі, що розглядається:

$$1) \quad \bar{y} = 0 \quad \bar{\Psi} = \bar{\Phi}_e = 0;$$

$$2) \quad \bar{y} = 1 \quad \bar{\Psi} = \bar{\Phi}_e = 1;$$

$$3) \quad \left(\frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \bar{S}} \right)_{\bar{n}=0} = \left(\frac{\partial \bar{\Phi}_e}{\partial \bar{S}} \right)_{\bar{n}=0} = 0 \quad (\text{на контурі профілю по дотичній до нього});$$

$$4) \quad \left(\frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \bar{x}} \right)_{\bar{x}=0, \bar{x}=1} = \left(\frac{\partial \bar{\Phi}_e}{\partial \bar{x}} \right)_{\bar{x}=0, \bar{x}=1} = 0.$$

Безрозмірне значення функції струму тут визначається співвідношенням:

$$\bar{\Psi} = \frac{\Psi - \Psi_1}{\Psi_2 - \Psi_1}.$$

Граничні умови однакових за формою рівнянь (1.6) та (1.7) чисельно однакові. Отже, рішення цих рівнянь будуть співпадати як за формою функціональних залежностей, так і за чисельним значенням, тобто

$$\bar{\Psi} = \bar{\Phi}_e = f(\bar{x}; \bar{y}).$$

Таким чином, у подібних точках безрозмірні значення функції струму в потоці та електричного потенціалу в моделі рівні.

Під час дослідження обтікання профілю за результатами вимірів будуються лінії струму як лінії рівних електричних потенціалів на моделі. За відомим розподілом у потоці функції струму може бути знайдена швидкість у будь-якій точці, у тому числі і на контурі профілю.

У довільній точці контуру швидкість потоку

$$v_s = \frac{\partial \psi}{\partial n} = \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{n}} \cdot \frac{\psi_2 - \psi_1}{B} \approx \frac{\Delta \bar{\psi}}{\Delta \bar{n}} \cdot v_\infty$$

або

$$\bar{v}_s = \frac{v_s}{v_\infty} \approx \frac{\frac{\Delta \bar{\varphi}_e}{\Delta n_M}}{\left(\frac{\Delta \bar{\varphi}_e}{\Delta y_M} \right)_\infty}. \quad (1.8)$$

Тут Δn_M – відрізок нормалі до контуру профілю на моделі в точці, для якої визначається швидкість; $\Delta \bar{n} = \frac{\Delta n_M}{B_M} = \frac{\Delta n}{B}$ – відносна протяжність відрізка; Δy_M – відстань між двома довільними лініями рівних електричних потенціалів моделі на достатньому віддаленні від профілю; $\Delta \bar{\varphi}_e$ – різниця безрозмірних значень електричних потенціалів на границях відрізка Δn_M нормалі до контуру профілю (у чисельнику) та відрізка Δy_M (у знаменнику); v_∞ – швидкість набігаючого потоку.

Визначивши відносну швидкість $\bar{v}_s$ для низки точок на контурі, можна побудувати графік (рис. 1.2) розподілу швидкостей потоку по профілю $\bar{v}_s = f(S_M)$ та тиску $\bar{p} = f(S_M)$, маючи на увазі, що безрозмірний коефіцієнт тиску:

$$\bar{p} = \frac{p - p_\infty}{\rho \frac{v_\infty^2}{2}} = 1 - \left(\frac{v_s}{v_\infty} \right)^2 = 1 - \bar{v}_s^2. \quad (1.9)$$

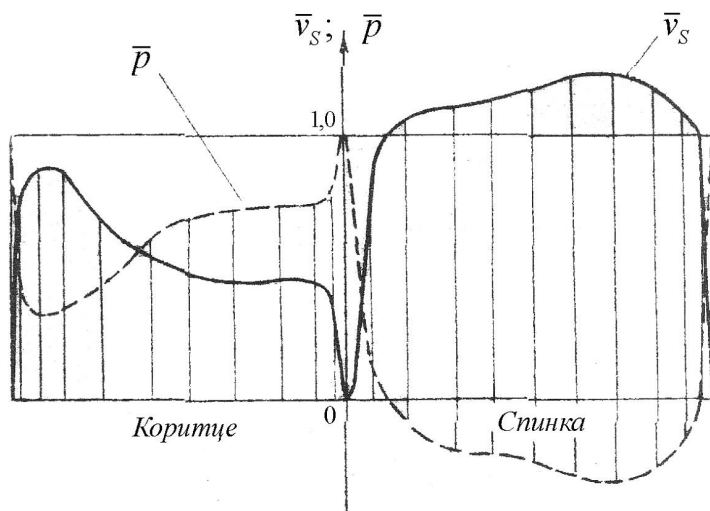


Рис. 1.2. Графіки розподілу $\bar{v}_s$ та $\bar{p}$ по контуру профілю

Циркуляція швидкості по контуру профілю визначається наступним рівнянням:

$$\Gamma = \oint v_s dS = \frac{v_\infty}{m} \oint \bar{v}_s dS_M \quad (1.10)$$

і, відповідно, може бути знайдена через відповідну площу на графіку залежності $\bar{v}_s = f(S_M)$, побудованої на розгортці профілю.

Картина обтікання профілю, одержана за допомогою електричної моделі, відповідає реальному випадку безвідривного обтікання, якщо задовольняється постулат

Жуковського-Чаплигіна про сход ліній струму із задньої (вихідної) кромки (рис. 1.3,*a*).

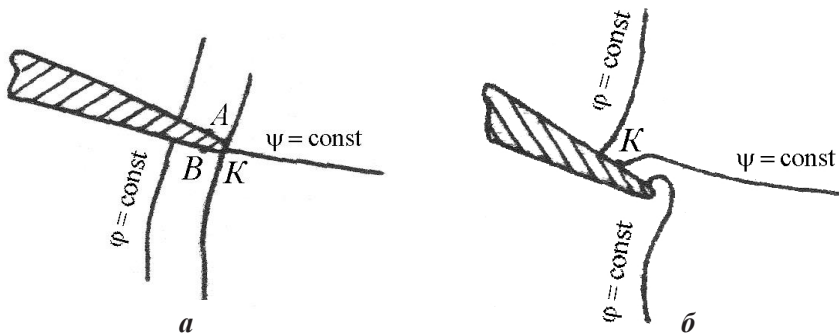


Рис. 1.3. Сход ліній струму:

a – із задньої кромки профілю; *б* – зміщений на спинку профілю

Під час безциркуляційного обтікання зазначений постулат задовольняється лише при одному куті натікання потоку, який називається *кутом безциркуляційного обтікання*. За інших кутів натікання точка сходу лінії струму (задня критична точка) зміщується із задньої кромки на спинку (наприклад, точка *K* на рис. 1.3,*б*) або на коритце крилового профілю. Це свідчить про те, що реальне безвідривне обтікання профілю за таких кутів натікання без циркуляції неможливе. Наявність циркуляції імітується накладенням додаткового електричного поля, який забезпечує сходження лінії струму із задньої кромки профілю або, що те ж саме, забезпечує рівність потенціалів швидкості в точках *A* та *B*, розташованих симетрично поблизу цієї кромки.

Більш зручною для дослідження обтікання профілю потоком з циркуляцією є аналогія «В», яка і використовується в даній роботі.

Опис установки

Експериментальна установка (рис. 1.4) складається з універсального інтегратора ЕГДА-9/60 та моделі потоку, що виготовляється із спеціального електропровідного паперу.

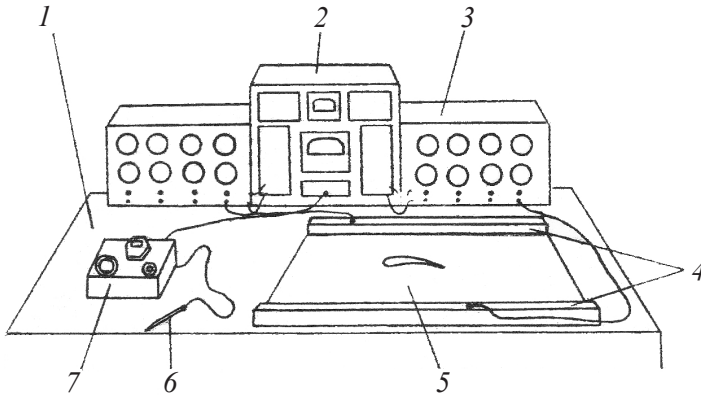


Рис. 1.4. Схема експериментальної установки:

1 – стеновий стіл; 2 – блок пристрою живлення; 3 – блоки потенціометричних роздільників напруги; 4 – шини-затискачі; 5 – модель; 6 – вимірювальна голка; 7 – блок вимірювального пристрою

Інтегратор містить:

- стенд (стіл) 1, на якому розміщена апаратура;
- блок пристрою живлення (ПЖ) 2, який забезпечує живлення постійним струмом напругою 26 ± 2 В;
- блоки потенціометричних роздільників напруги (ПРН) 3, призначених для завдання потенціалів на границях моделі;
- блок вимірювального пристрою (ВП) 7, який під'єднується до пристрою живлення;
- вимірювальну голку 6, приєднану до вимірювального пристрою;

– шини-затискачі 4, для підведення потенціалів до моделі;

– дроти та перемички, для з'єднання шин з потенціометричними роздільниками напруги та підключення їх до пристрою живлення.

Модель 5 розміщується на столі інтегратора. Шини-затискачі слугують одночасно і для кріплення моделі до столу.

Модель виконується у вигляді суцільного прямокутного листа електропровідного паперу з розміщенням у середній частині профілем. Профіль, геометрично подібний до досліджуваного, у масштабі виготовляється з листової латуні та притискається до паперу для забезпечення надійного контакту по всій площині.

Для зручності роботи на інтеграторі хорду профілю (у масштабі) бажано мати приблизно $b_M = 120...150$ мм. Розміри моделі, щоб унеможливити вплив профілю на периферійні області, беруть: у напрямку течії рідини – $L_M = (4...5)b_M$, у поперечному напрямку – $B_M = (2...3)b_M$.

Варіанти включення моделі в електричну схему установки наведені на рис. 1.5. Варіант *a* являє собою просту схему чотириплечового електровимірювального моста. Плечі однієї гілки утворені опорами R_1 та R_2 роздільника напруги, плечі другої гілки – опорами ділянок моделі між точкою дотику c вимірювальної голки моделі та шинами Φ_{e1} і Φ_{e2} . Відсутність струму в перемичці мосту $c-d$, що визначається як відсутність відхилення стрілки нуль-гальванометра вимірювального пристрою, свідчить про рівність потенціалів у точках c та d . До того ж

$$\bar{\Phi}_{ec} = \frac{\Phi_{ec} - \Phi_{e1}}{\Phi_{e2} - \Phi_{e1}} = \frac{R_1}{R + R_2} = \bar{R}_1.$$

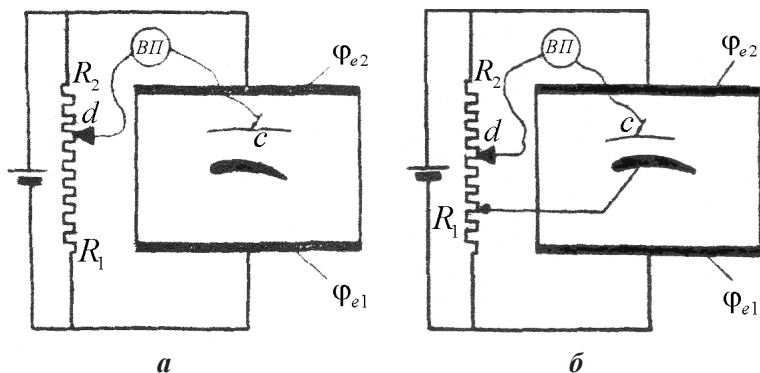


Рис. 1.5. Електрична схема для дослідження моделі:
а – за безциркуляційного обтікання; **б** – за обтікання з циркуляцією

Переміщуючись по полю моделі та відмітивши низку точок рівних потенціалів за незмінного значення $\bar{R}_1$, а потім з'єднавши їх плавною лінією, можна отримати ізопотенційну лінію $\bar{\varphi}_e = \text{const}$, яка відповідає лінії струму в потоці $\bar{\psi} = \bar{\varphi}_e$. Задаючись різними значеннями $\bar{R}_1$ (шляхом переміщення точки d), можна побудувати сімейство ліній струму, у тому числі й лінію струму, що відповідає контуру досліджуваного профілю. Для побудови цієї лінії попередньо потрібно визначити потенціал, що встановлюється на профілі. Цей процес зводиться до підбору $\bar{R}_1$, який забезпечуватиме відсутність струму в перемичці моста під час торкання голкою профілю.

У схемі на рис. 1.5,**а** електричний потенціал на профілі встановлюється залежно від його форми та розміщення на моделі. На відміну від цього у схемі на рис. 1.5,**б** за рахунок додаткової шини, яка накладається на профіль, потенціал на профілі може бути змінений. Це призведе до перерозподілу потенціалів у полі моделі та зміни форми ізопотенційних ліній поблизу профілю. Таким чином, можна змінити положення

точки сходу лінії струму з профілю в потоці, поєднавши її з вихідною кромкою, і цим урахувати циркуляційну течію.

Виконання роботи

1. За заданими формою профілю та кутом натікання виготовляється модель потоку та встановлюється на столі інтегратора.

2. Під'єднується модель за схемою на рис. 1.5,*а* та визначається точка сходу лінії струму з профілю за безциркуляційного обтікання. Для цього визначається потенціал на профілі та будується ізопотенційна лінія, що відповідає цьому потенціалу¹.

3. Якщо точка сходу не співпадає із задньою кромкою, що свідчить про наявність циркуляції під час обтікання профілю, модель під'єднується за схемою (рис. 1.5,*б*) та шляхом проб підбирається потенціал додаткової шини на профілі, який забезпечить збіг точки сходу лінії струму із задньою кромкою.

4. Будуються повністю лінія струму, що відповідає контуру профілю, і кілька (5...8) ліній струму з кожного його боку з інтервалом у 2...5 % поблизу і до 10 % удаліні від профілю.

5. З використанням властивості ортогональності для вже побудованих ліній струму будуються кілька ліній рівних потенціалів швидкості в потоці.

6. На контурі профілю обирається низка точок (по 10...15 на спинці та коритці) і за допомогою формул (1.8) та (1.9) визначаються відносні швидкості потоку $\bar{v}_s$ та безрозмірні коефіцієнти тиску $\bar{p}$ у цих точках. Результати вимірювань та обчислень заносяться до таблиці.

¹ Під час виконання роботи зручно $\varphi_{e2} - \varphi_{e1}$ взяти за 100 %, і, відраховуючи від $\varphi_{e1} = 0$ %, усі проміжні потенціали виражати у відсотках.

Під час обчислення $\bar{v}_s$ використовується найближча до профілю лінія струму, а в місцях її значного віддалення можуть знадобитися додаткові вимірювання $\Delta\bar{\phi}_e$ при Δn_m , які забезпечать прийнятну точність розрахунку. Під час вираження $\Delta\bar{\phi}_e$ у відсотках знаменник правої частини (1.8), який є деякою характеристикою моделі, становить

$$\left(\frac{\Delta\bar{\phi}_e}{\Delta y_m} \right)_{\infty} = \frac{100}{B_m}.$$

7. За даними таблиці на розгортці профілю будуються графіки розподілу $\bar{v}_s$ та $\bar{p}$. Початок координат на графіку поєднується з передньою критичною точкою.

8. Визначається величина $\oint \bar{v}_s dS_m$, що характеризує циркуляцію швидкості по контуру профілю за відомої швидкості набігаючого потоку і прийнятому масштабі геометричної подібності моделі й натурального потоку. Ця величина дорівнює різниці площ, обмежених правої та лівої гілками кривої $\bar{v}_s = f(S_m)$.

Зміст звіту

У звіті з лабораторної роботи мають бути наведені:

- мета й короткий зміст роботи;
- електрична схема для дослідження моделі;
- сітка ліній струму та ізопотенційних ліній у потоці;
- таблиця вимірів та обробки дослідних даних;
- графік розподілу $\bar{v}_s$ та $\bar{p}$ по контуру профілю;
- визначення величини $\oint \bar{v}_s dS_m$ та циркуляції швидкості $\Gamma = \frac{v_{\infty}}{m} \oint \bar{v}_s dS_m$ по контуру профілю за заданих v_s та m ;
- висновки щодо роботи.

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПОТОКУ ГАЗУ У ПЛОСКІЙ ТУРБІННІЙ РЕШІТЦІ

Мета роботи: експериментально дослідити взаємодії потоку з лопатками у плоскій решітці за різних кутів їх установа.

Теоретичні передумови та основи методу дослідження

Під час обтікання потоком газу на лопатки діє зазвичай деяка результуюча аеродинамічна сила та аеродинамічний момент.

Результуюча аеродинамічна сила P може бути замінена складовими: коловою силою P_u та осьовою силою P_a . У рухомій (робочій) решітці лопаток колова сила є корисною силою, що викликає обертання диска (або барабана) з лопатками. Осьова сила прагне зрушити ротор в осьовому напрямку і сприймається упорним підшипником. У той же час колова й осьова сили (тобто результуюча сила загалом) у робочій решітці так само, як і в нерухомій сопловій решітці, викликають деформації згину в лопатках та елементах їхнього кріплення.

Аеродинамічний момент, що виникає на лопатках, прагне повернути їх навколо поздовжньої осі, викликаючи деформацію скручування. Однак унаслідок значних моментів опору скручування профілів лопаток і незначної через замалі плечі

величини аеродинамічних моментів, останні в розрахунках міцності турбінних решіток зазвичай не враховуються.

Результуюча аеродинамічна сила у плоскій решітці може бути знайдена з таких міркувань.

На кожний елемент поверхні лопатки діє сила, спрямована по нормалі до нього і рівна добутку тиску на площу даного елемента поверхні (рис. 2.1), тобто

$$dP = p dF = pl dS,$$

де l – довжина лопатки; dS – елемент контуру профілю.

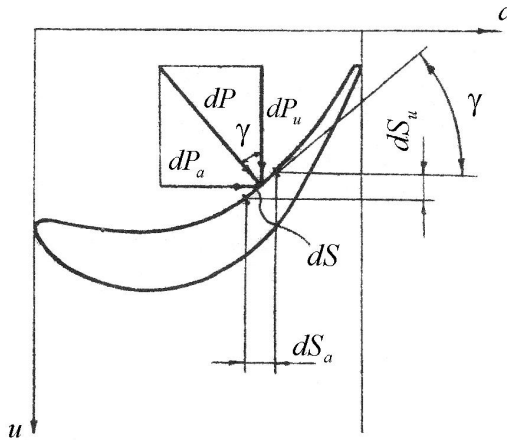


Рис. 2.1. Сили, що діють на елемент поверхні лопатки

Проекції сили dP на взаємно перпендикулярні осі u та a становлять:

$$dP_u = dP \cdot \cos \gamma = pl dS \cdot \cos \gamma = pl dS_a;$$

$$dP_a = dP \cdot \sin \gamma = pl dS \cdot \sin \gamma = pl dS_u,$$

де dS_a та dS_u – проекції на відповідні осі елемента контуру профілю dS .

Повні сили P_u та P_a , що діють на лопатку у плоскому потоці,

$$P_u = l \int_S p dS_a; \quad P_a = l \int_S p dS_u. \quad (2.1)$$

Інтегрування у формулах (2.1) проводиться по всьому контуру профілю, тому тиски можуть бути обрані як абсолютні, так і надмірні.

Таким чином, для визначення сил P_u та P_a під час плоского обтікання решітки достатньо мати розподіл надмірних тисків по контуру профілю в одному з перерізів лопатки. Значення інтегралів у формулах (2.1) можуть бути знайдені як сумарні площі епюр розподілу тиску на відповідних проєкціях контуру.

Результуюча аеродинамічна сила, що діє на лопатку,

$$P = \sqrt{P_u^2 + P_a^2}. \quad (2.2)$$

Знайдена таким чином сила P не враховує вплив тертя газу об поверхню лопатки. Унаслідок тертя на кожен елемент поверхні лопатки діє додаткова дотична сила τdF . Тертя в турбінних решітках зазвичай дещо знижує P_u та підвищує P_a .

Опис установки

Експериментальна установка являє собою аеродинамічну трубу розімкнутого типу, на нагнітальному боці якої розміщена робоча ділянка (рис. 2.2).

Вхідна ділянка 3 аеродинамічної труби має круглий переріз із внутрішнім діаметром 200 мм, нагнітальна ділянка 9 – прямокутний переріз зі сторонами 220 на 150 мм. Перед вхідною ділянкою встановлено нормальну торцеву діафрагму 1 з кільцевою камерою для вимірювання витрати повітря. Внутрішній діаметр діафрагми – 140 мм.

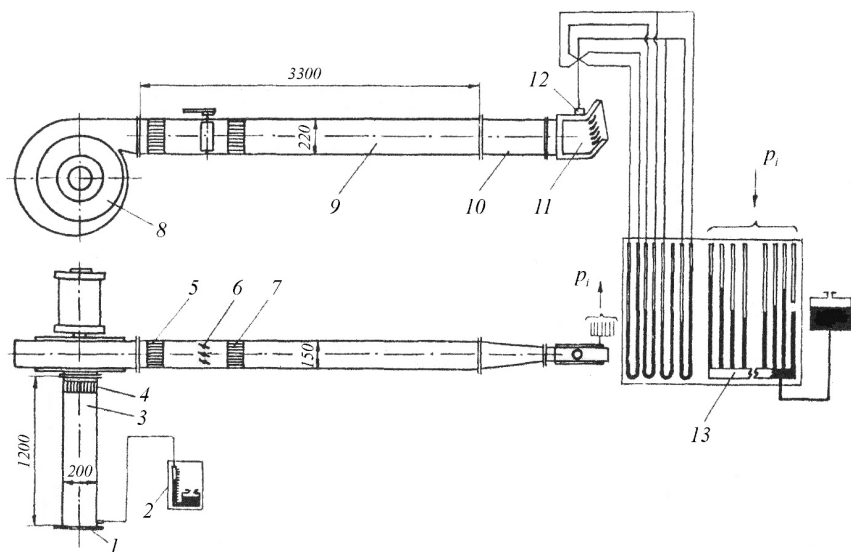


Рис. 2.2. Схема експериментальної установки:

- 1 – торцева діафрагма; 2 – вертикальний тягонапомір; 3 – вхідна ділянка; 4, 5, 7 – решітки; 6 – тристулкова заслінка; 8 – відцентровий вентилятор; 9 – нагнітальна ділянка; 10 – перехідний патрубок; 11 – робоча ділянка; 12 – п'ятиканальний кульовий зонд; 13 – водяний батарейний манометр

Перепад тиску на витратомірній діафрагмі вимірюється вертикальним тягонапоміром 2 типу ТНВ зі шкалою 400 мм вод. ст. Між ділянкою труби 9 і робочою ділянкою 11 розташований перехідний патрубок 10 зі звуженням по вузькій стороні до 75 мм.

Для запобігання зворотного впливу закрутки потоку у вентиляторі на течію повітря у вхідній ділянці і випрямлення потоку в нагнітальній ділянці передбачені решітки 4, 5 та 7 з листової сталі з комірками 20 на 20 мм. Вирівнюванню поля швидкостей перед робочою ділянкою сприяє також перехідний патрубок 10, у якому відбувається підтискання потоку.

Аеродинамічна труба обслуговується відцентровим вентилятором 8 типу ЦС. Специфікаційна продуктивність вентилятора становить $3000 \text{ м}^3/\text{год}$ за напору 630 мм вод. ст. Вентилятор оснащений електродвигуном змінного струму потужністю 8 кВт.

Для регулювання витрати повітря слугує тристулкова заслінка 6.

Робоча ділянка (рис. 2.3) складається зі зварного сталевго корпусу 1 та двох зйомних щік 2 з органічного скла, забезпечених по трьом сторонам дерев'яними накладками для кріплення до корпусу. Між щоками розташовані п'ять лопаток 3, що утворюють плоску турбінну решітку. Характеристики решітки становлять: хорда профілю лопаток $b = 80 \text{ мм}$, довжина лопаток $l = 75 \text{ мм}$, крок решітки (відстань між лопатками) $t = 50 \text{ мм}$, кути встановлення лопаток $\alpha_0 = 7^\circ$ та $\delta_e = 40 \dots 55^\circ$.

Дві лопатки в решітці по сторонам, що утворюють одиничний канал, дренавані в середньому по довжині перерізу: одна по увігнутій поверхні (9 точок), друга по спинці (10 точок). Дренування здійснюється сталевими трубками зовнішнім діаметром 1 мм, впаяними врівень зі стінками лопаток. Кінці трубок виведені через цапфи лопаток і за допомогою гумових шлангів підключені до водяного батареїного манометра 13 (рис. 2.2).

Кут установлення лопаток у решітці може бути змінений у деяких межах, що одночасно призводить і до зміни кута атаки. Відлік кутів установлення провадиться по лімбу на щіці робочої ділянки.

Для визначення повного та статичного тиску перед решіткою передбачений п'ятиканальний кульовий зонд 12 (рис. 2.2) з чотирма U -подібними манометрами, винесеними на щит, спільний з батареїним манометром.

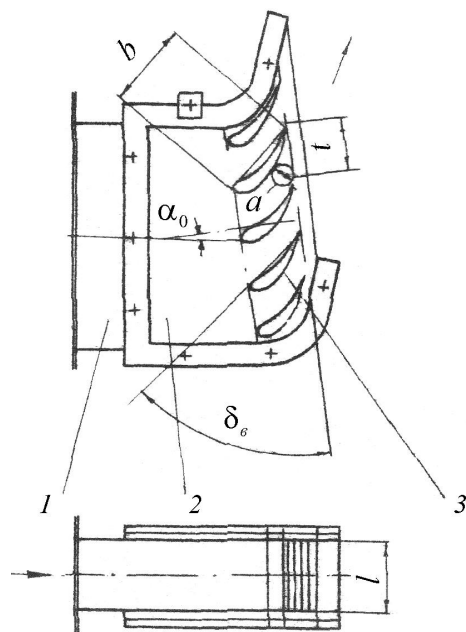


Рис. 2.3. Робоча ділянка з експериментальною решіткою:
 $b = 80 \text{ мм}$; $l = 75 \text{ мм}$; $t = 50 \text{ мм}$; $\alpha_0 = 7^\circ$; $\delta_6 = 40 \dots 55^\circ$

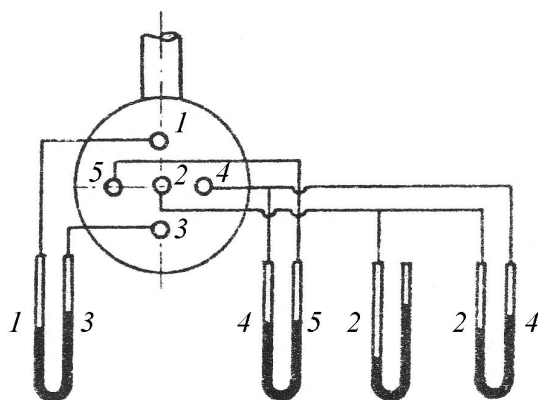


Рис. 2.4. Схема підключення кульового зонда до манометрів

Кульовий зонд являє собою кульку з п'ятьма отворами, просвердленими у двох взаємно перпендикулярних діаметральних площинах (рис. 2.4).

Кулька укріплена на циліндричній державці. Кут між осями центрального та кожного з бічних отворів кульки становить 40° . Кожен отвір з'єднаний тонкими трубками, що проходять усередині державки, зі штуцерами, які розташовані на протилежному кінці зонда. До штуцерів приєднуються шланги для підключення до манометрів. Зонд установлений у координатнику, що забезпечує обертання його навколо осі державки та переміщення вздовж кроку решітки у середньому перерізі.

Обертаючи зонд, завжди можна знайти таке положення кульки, за якого тиски в отворах 4 і 5 будуть однакові, цьому відповідає рівність рівнів рідини у трубках відповідного манометра ($h_4 - h_5 = 0$). До того ж вектор швидкості потоку буде перебувати у площині, що проходить через отвори 1, 2 та 3. За тисками в цих отворах за допомогою тарувальних графіків зонда визначають повний і динамічний тиск у потоці та кут швидкості у площині отворів 1, 2 та 3.

Виконання роботи

1. Лопатки в решітці встановлюються під необхідним кутом і вмикається вентилятор.

2. На сталому режимі роботи установки проводяться виміри:

а) надмірних тисків на профілі в середньому перерізі дренажних лопаток;

б) складових надмірного повного тиску перед решіткою за допомогою кульового зонда;

в) перепаду тисків на витратомірній діафрагмі (контрольне вимірювання, що характеризує режим роботи установки).

Значення величин, які вимірялися, заносяться до таблиці.

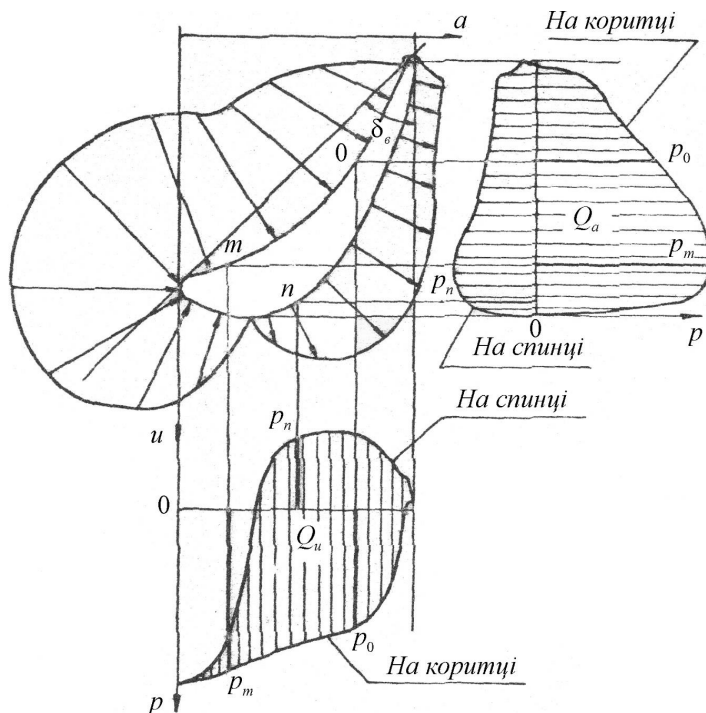


Рис. 2.5. Векторна діаграма та епюри тисків на проєкціях контуру профілю

3. Будуються векторна діаграма тисків на профілі та епюри тисків на проєкціях контуру на осі u та a (рис. 2.5).

Під час побудови векторної діаграми позитивний надмірний тиск зображується векторами, спрямованими до профілю, а негативний (розрідження) – від профілю.

Під час побудови епюр на проєкціях контуру зручно позитивні значення надмірного тиску відкладати вниз від нульового рівня (тобто в напрямку осей u та a), негативні – угору.

4. Визначаються колова та осьова сили, що діють на лопатку, H :

$$P_u = 9,81 \cdot 10^{-4} \frac{l}{m_s m_p} \cdot Q_u; \quad (2.3)$$

$$P_a = 9,81 \cdot 10^{-4} \frac{l}{m_s m_p} \cdot Q_a, \quad (2.4)$$

де Q_u та Q_a – площі між епюрами тисків з обох боків лопатки (заштриховані площі на рис. 2.5), см^2 ; m_s – масштаб довжин під час побудови епюр, см/см ; m_p – масштаб тиску, $\text{см}/(\text{мм вод. ст.})$; l – довжина лопатки, см .

Під час обчислення Q_u та Q_a як різниці площ епюр тисків на увігнутій поверхні та спинці профілю мають бути враховані знаки окремих ділянок площ.

5. За формулою (2.2) або графічною побудовою визначається результуюча сила, що діє на лопатку, та кут, що утворюється нею з віссю u :

$$\vartheta = \arcsin \frac{P_a}{P}. \quad (2.5)$$

6. Досліди проводяться для кількох значень кута встановлення лопаток δ_e за тих самих параметрів потоку перед решіткою. Контроль режимів ведеться за показаннями кульового зонда, а регулювання здійснюється повітряною заслінкою. За результатами обчислень будуються залежності $P_u = f(\delta_e)$ та $P_a = f(\delta_e)$.

7. За вимірюваннями кульовим зондом (рис. 2.4) визначаються динамічний, статичний, а потім і повний тиск у потоці перед решіткою в наступній послідовності:

визначається функція:

$$K_{\delta} = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_4};$$

за допомогою тарувального графіка зонда (рис. 2.6) за функцією K_{δ} знаходяться коефіцієнти $K_2 - K_4$, $K_3 - K_1$ та K_2 ;

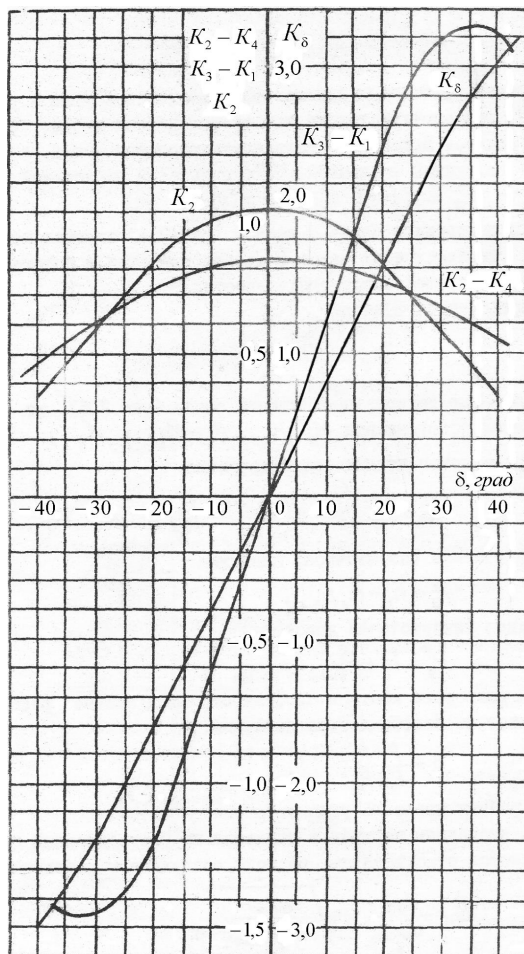


Рис. 2.6. Тарувальні графіки кульового зонда

визначається динамічний тиск:

$$p_{\text{дин}} = \frac{1}{2} \left(\frac{h_2 - h_4}{K_2 - K_4} + \frac{h_3 - h_1}{K_3 - K_1} \right); \quad (2.6)$$

статичний (надмірний) тиск:

$$p_0 = h_2 - K_2 p_{\text{дин}};$$

повний (надмірний) тиск:

$$p_0^* = p_0 + p_{\text{дин}}.$$

8. На розгортці контуру профілю будуються графіки розподілу безрозмірних коефіцієнтів тиску:

$$\bar{p} = \frac{p - p_0}{p_0^* - p_0} \quad (2.7)$$

для двох крайніх значень кута встановлення лопаток.

9. За значеннями перепадів тиску на витратомірній діафрагмі визначаються відносні витрати повітря за різних δ_e :

$$\bar{G} = \frac{G_{\delta_e}}{G_{\delta_{e\min}}} = \sqrt{\frac{\Delta h_g}{\Delta h_{g\delta_{e\min}}}} \quad (2.8)$$

та будується графік

$$\bar{G} = f(\delta_e),$$

який характеризує пропускну здатність решітки залежно від кута встановлення лопаток за постійного повного тиску на вході.

Зміст звіту

У звіті з лабораторної роботи мають бути наведені:

- мета й короткий зміст роботи;
- схема експериментальної установки та робочої ділянки;
- таблиці вимірів та обробки дослідних даних;
- епюри тиску на проєкціях контуру;
- визначення складових сил P_u і P_a та результуючої сили P ;
- графіки залежностей $P_u = f(\delta_\epsilon)$, $P_a = f(\delta_\epsilon)$ та $\bar{G} = f(\delta_\epsilon)$;
- розподіл по профілю безрозмірних коефіцієнтів тиску $\bar{p}$;
- висновки щодо роботи.

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ У ПЛОСКІЙ ТУРБІННІЙ РЕШІТЦІ ТА КУТА ВИХОДУ ПОТОКУ

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт утрат у плоскій турбінній решітці та дійсного кута виходу потоку.

Теоретичні передумови та основи експериментального методу визначення втрат та кута виходу

Під втратами енергії в турбінній решітці розуміють різницю кінетичних енергій потоку за решіткою в теоретичному і дійсному процесах течії, тобто

$$q_c = \frac{c_{1t}^2}{2 \cdot 10^3} - \frac{c_1^2}{2 \cdot 10^3}, \text{ кДж/кг}, \quad (3.1)$$

а під коефіцієнтом утрат – відношення величини втрат до повної наявної енергії потоку в решітці:

$$\zeta_c = \frac{q_c}{\Delta h_{ac}^*} = 2 \cdot 10^3 \frac{q_c}{c_{1t}^2}. \quad (3.2)$$

В аналогічні формули для решіток, що обертаються (тобто для робочих решіток), замість абсолютних швидкостей потоку c_{1t} та c_1 входять відносні швидкості w_{2t} та w_2 .

Для перерізу на виході з решітки, використовуючи поняття загальмованих (повних) параметрів, можна записати:

у теоретичному процесі:

$$p_1 + \rho_{1t} \frac{c_{1t}^2}{2 \cdot 10^3} = p_{1t}^* = p_0^*; \quad (3.3)$$

у дійсному процесі:

$$p_1 + \rho_1 \frac{c_1^2}{2 \cdot 10^3} = p_1^*,$$

звідки

$$\rho_{1t} \frac{c_{1t}^2}{2 \cdot 10^3} - \rho_1 \frac{c_1^2}{2 \cdot 10^3} = p_0^* - p_1^* = \Delta p_n,$$

де p_0^* – повний тиск потоку перед решіткою; Δp_n – втрата повного тиску в решітці.

У разі використання нестисливої рідини $\rho_1 = \rho_{1t} = \rho$. Отже,

$$q_c = \frac{\Delta p_n}{\rho}, \quad (3.4)$$

тобто втрата енергії в решітці пропорційна втраті повного тиску. До того ж коефіцієнт утрат з урахуванням (3.2) та (3.3):

$$\zeta_c = \frac{\Delta p_n}{p_0^* - p_1} = \frac{p_0^* - p_1^*}{p_0^* - p_1}. \quad (3.5)$$

Формули (3.4) і (3.5) застосовні для експериментального визначення втрат у решітці за невеликих перепадів тиску і відповідно $M \leq 0,3$.

З коефіцієнтом утрат енергії однозначно пов'язані ККД решітки:

$$\eta_c = 1 - \zeta_c \quad (3.6)$$

і швидкісний коефіцієнт

$$\phi = \sqrt{1 - \zeta_c} = \sqrt{\eta_c}. \quad (3.7)$$

Таким чином, для експериментального визначення за невеликих числах Маха коефіцієнта втрат у решітці достатньо виміряти повний тиск у потоці перед решіткою та повний і статичний тиск за нею.

Оскільки чисельник і знаменник формули (3.5) є різницями тисків, то під час обчислень підставляти можна безпосередньо виміряні надмірні тиски в мм вод. ст. У цьому випадку, якщо вихід з решітки відбувається в атмосферу, вираз (3.5) спрощується:

$$\zeta_c = \frac{P_0^* - P_1^*}{P_0^*}. \quad (3.8)$$

Коефіцієнт утрат у решітці залежить від форми профілю лопаток, відносного кроку решітки, кута встановлення профілю, кута натікання потоку, режиму течії газу через решітку.

Кут виходу потоку з решітки з деяким наближенням можна визначити з виразу

$$\alpha_1 = \alpha_{1ef} = \arcsin\left(\frac{a}{t}\right),$$

де a – ширина останнього повного перерізу міжлопаткового каналу (рис. 2.3); t – крок решітки.

Справжній кут виходу потоку може бути визначений лише експериментально, шляхом безпосереднього вимірювання під час продування решітки.

Умови експерименту вимагають вирівнювання потоку перед решіткою за кроком, а довжина лопаток повинна виключати вплив їх кінцевих частин на потік у середньому

перерізі, де виконуються виміри. У цьому випадку повний тиск перед решіткою достатньо виміряти в одній точці і вважати його постійним за кроком, а здійснивши необхідні вимірювання в деякій точці за решіткою, можна отримати локальні характеристики решітки для струмка, що проходить через дану точку вихідного перерізу. Середні за кроком характеристики решітки визначаються за формулами (без урахування зміни витратних складових вихідної швидкості за кроком)

$$\zeta_c = \frac{1}{t} \int_t \zeta_{ci} dt = \frac{F_\zeta}{t}; \quad (3.9)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{t} \int_t \alpha_{1i} dt = \frac{F_\alpha}{t}; \quad (3.10)$$

де F_ζ та F_α – площі, обмежені відповідними графіками розподілу ζ_{ci} та α_{1i} за кроком, побудованими за їх локальними значеннями.

У розрахунках мають бути враховані масштаби побудови цих графіків.

Опис установки

Експериментальна установка використовується та ж сама, що і в роботі № 2 (рис. 2.2 та 2.3) за відповідних змін у схемі вимірювань у робочій ділянці. Передбачений, як і в попередній роботі, кульовий зонд для визначення параметрів потоку перед решіткою, а замість дренування лопаток проводиться вимірювання повного тиску та напрямку швидкості (кут α_1) за решіткою (рис. 3.1). Для цього застосовується триканальна пневмометрична трубка.

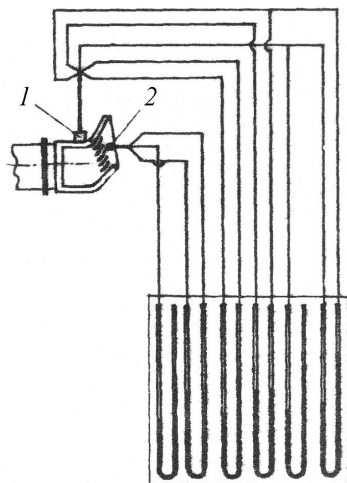


Рис. 3.1. Схема вимірювань у робочій ділянці:
1 – кульовий зонд; 2 – триканальна пневмометрична трубка

У разі розташування приймача трубки суворо проти напрямку руху потоку тиски, що вимірюються бічними отворами, будуть однакові, що і дозволяє визначити напрямки швидкості та повний тиск, що сприймається середнім отвором.

Пневмометрична трубка встановлена в координатнику, який забезпечує можливість обертання її приймача у площині потоку й переміщення вздовж кроку решітки.

Виконання роботи

1. Проводиться дві серії дослідів:
 - а) за незмінних параметрів перед і за решіткою та різних кутах установлення лопаток δ_e ;
 - б) за постійного кута встановлення лопаток та різних режимах течії.

2. Перша серія дослідів починається з продування решітки з найбільшим кутом встановлення лопаток за повністю відкритої повітряної заслінки. У наступних дослідях у разі зменшення кута встановлення лопаток заслінка прикривається до досягнення одних і тих самих показань манометрів кульового зонда.

3. Друга серія дослідів проводиться за одного зі значень кута встановлення. Зміна режимів проводиться повітряною заслінкою, а контролюється перепадом тиску у витратомірній діафрагмі.

4. У кожному досліді на сталому режимі фіксуються:
- складові надмірного повного тиску перед решіткою за допомогою кульового зонда;
 - кути виходу потоку та повні тиски за решіткою у 8...10 точках на довжині одного кроку;
 - перепад тиску на діафрагмі.

Значення вимірних величин заносяться до відповідних таблиць.

5. За показаннями манометрів кульового зонда відповідно до методики, описаної в лабораторній роботі № 2, визначаються повні тиски перед решіткою.

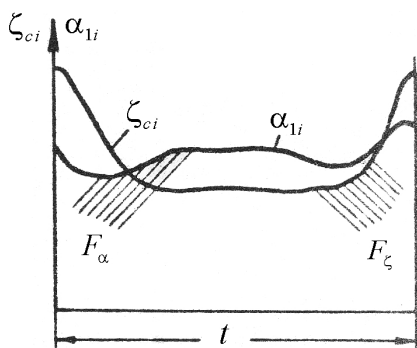


Рис. 3.2. Розподіл за кроком коефіцієнтів утрат та кутів виходу потоку

6. За формулою (3.8) обчислюються локальні значення коефіцієнтів утрат і будуються графіки розподілу ζ_{ci} та α_{1i} за кроком решітки в кожному з дослідів (рис. 3.2).

7. За графіками розподілу ζ_{ci} та α_{1i} обчислюються середні їх значення.

8. За дослідом першої серії будуються графіки залежностей:

$$\zeta_c = f(\delta_s) \text{ та } \alpha_1 = f(\delta_s)$$

за умови $\frac{p_0^*}{p_1} = \text{idem}$, і за дослідом другої серії –

$$\zeta_c = f\left(\frac{p_0^*}{p_1}\right) \text{ та } \alpha_1 = f\left(\frac{p_0^*}{p_1}\right)$$

за умови $\delta = \text{idem}$.

Зміст звіту

У звіті з лабораторної роботи мають бути наведені:

- мета й короткий зміст роботи;
- таблиці вимірів та обробки дослідних даних;
- графіки розподілу ζ_{ci} та α_{1i} за кроком решітки;
- графіки залежностей ζ_c та α_1 від δ_b та $\frac{p_0^*}{p_1}$;
- висновки щодо роботи.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАБІРИНТНОГО УЩІЛЬНЕННЯ

Мета роботи: експериментально визначити витрати газу через лабіринтне ущільнення та зіставити дослідні дані з теоретичними розрахунковими формулами; виявити характер розподілу тиску вздовж ущільнення та вплив обертання вала на витрату газу.

Теоретичні передумови

Лабіринтні ущільнення, що застосовуються як зовнішні та внутрішні ущільнення в турбомашинах, є безконтактними і, отже, не забезпечують повної герметизації ущільнюваних порожнин. Кількість газу, що проходить через ущільнення, залежить від його параметрів (тиску та питомого об'єму) p_1 та v_1 перед ущільненням, тиску за ним p_2 , площі прохідного перерізу в зазорах f , конструктивного виконання та кількості щілин z .

Для визначення витрати газу через ущільнення широко використовуються формули А. Стодоли, одержані теоретичним шляхом. Зокрема, для повітря (показник ізоентропи $k = 1,4$) формули мають наступний вигляд:

за докритичної течії в ущільненні:

$$G = 44,7 \mu f \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{2z p_1 v_1}}; \quad (4.1)$$

за критичної течії в останній щілині:

$$G = 44,7 \mu f \sqrt{\frac{p_1}{2(z+1,1)v_1}}. \quad (4.2)$$

Критична течія в останній щілині виникає, якщо тиск за ущільненням

$$p_2 \leq p_{2\text{кр}} = \frac{0,77 p_1}{\sqrt{z+1,1}}. \quad (4.3)$$

У наведених формулах тиски виражені в кПа, питомий об'єм – у м³/кг, площа перерізу – у м². Коефіцієнт витрати μ , який зазвичай береться для двостороннього ущільнення рівним одиниці, фактично повинен ураховувати конструктивні особливості ущільнення, режимні фактори і специфічні властивості середовища, що протікає через ущільнення. Справжнє значення μ може бути визначено лише експериментальним шляхом.

За сталої течії, якщо знехтувати відмінністю у площі f , для всіх щілин ущільнення повинно виконуватися наступне співвідношення:

$$\frac{G}{f} = \frac{c}{v} = \text{idem}.$$

Оскільки питомий об'єм газу від щілини до щілини зростає, то для збереження величини відношення $\frac{G}{f}$ має збільшуватися швидкість газу в щілині c , досягаючи найбільшого значення в останній щілині ущільнення. Оскільки ж швидкість у щілині неспроможна перевищити критичну швидкість, то критична течія в ущільненні, якщо й виникає, то лише в останній щілині.

Цим визначається і розподіл тиску вздовж ущільнення. Оскільки течія в ущільненні є, зрештою, процесом дроселювання і, отже, температура загальмованого потоку перед щілинами залишається постійною, то зі зростанням швидкості має збільшуватися відношення тисків перед і за щілиною p' / p'' , досягаючи максимального значення в останній щілині.

Теоретичний аналіз не дозволяє оцінити вплив обертання вала на роботу лабіринтного ущільнення.

Опис установки

Схема експериментальної установки наведена на рис. 4.1.

Досліджуване ущільнення утворене зовнішньою поверхнею барабана 3, яка виконана у вигляді виступів і западин, що чергуються, і внутрішньою циліндричною поверхнею корпусу 6. Барабан укріплений на валу, установленому в кулькових підшипниках опорного вузла 17. На протилежному кінці вала консольно закріплене робоче колесо 12 повітряної турбіни, яка приводить у рух вал разом з барабаном.

Випробування лабіринтного ущільнення здійснюються на повітрі, яке підводиться через патрубок 7 у кільцеву порожнину 8. Повітря, що пройшло через ущільнення, відводиться по трубі 1. Для зменшення витоків повітря з корпусу в атмосферу з боку, протилежного випробовуваному ущільненню, і для розвантаження вала від осьових зусиль слугує барабан 10, що має, як і барабан 3, гребінчасту зовнішню поверхню.

Повітря до ущільнення і робоче повітря до турбіни подається поршневым компресором 11 через ресивер 4, який згладжує пульсації тиску у витратній магістралі.

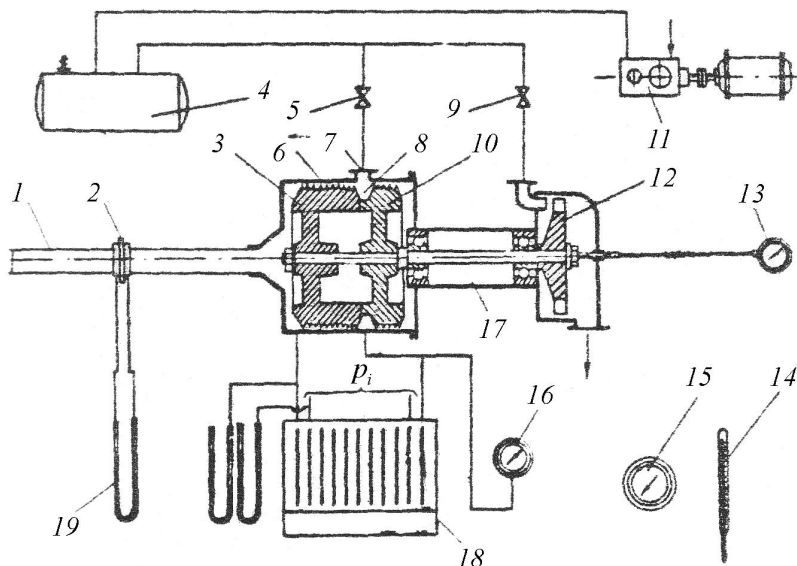


Рис. 4.1. Схема експериментальної установки:

- 1 – труба; 2 – витратомірна діафрагма; 3 – барабан; 4 – ресивер;
 5 – клапан; 6 – корпус; 7 – патрубок; 8 – кільцева порожнина;
 9 – клапан; 10 – барабан; 11 – поршневий компресор; 12 – робоче
 колесо повітряної турбіни; 13 – електричний тахометр;
 14 – ртутний термометр; 15 – барометр; 16 – пружинний манометр;
 17 – опорний вузол; 18 – реєструючий манометр

Частота обертання вала регулюється клапаном 9, а тиск повітря перед ущільненням – клапаном 5.

Витрата повітря через досліджуване ущільнення вимірюється за допомогою діафрагми 2, установленій на повітровідвідному трубопроводі. Внутрішній діаметр діафрагми – 16 мм, трубопроводу – 32 мм. Перепад тисків на діафрагмі вимірюється U-подібним водяним манометром 19.

Тиск повітря перед та за ущільненням, а також у проміжних камерах вимірюють за допомогою групового реєструючого манометра ГРМ-2 18. За малих тисків за ущільненням

та в кількох останніх камерах з метою підвищення точності вимірювань, передбачена можливість підключення паралельно відповідним входам у ГРМ U -подібних водяних манометрів. Тиск перед ущільненням під час налаштування режиму контролюється пружинним манометром 16.

Частота обертання барабана вимірюється дистанційним електричним тахометром 13 типу ТФ-15М. Під час дослідів вимірюються також атмосферний тиск барометром 15 та температура навколишнього середовища ртутним термометром 14.

На рис. 4.2 показана конструктивна будова досліджуваного ущільнення. Число щілин в ущільненні $z = 10$.

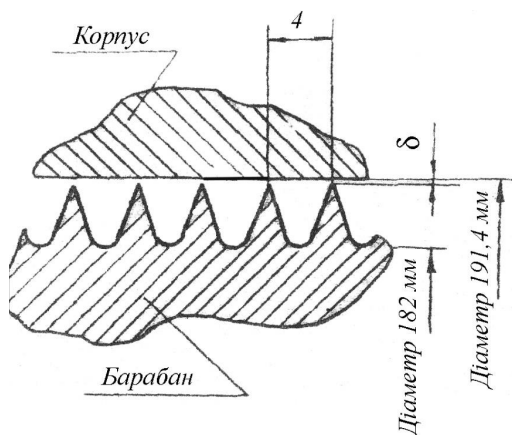


Рис. 4.2. Конструкція лабіринтного ущільнення

Виконання роботи

1. У першій серії дослідів за нерухомого барабана (клапан 9 закритий), проводиться дослідження на 4–5-ох режимах тиску перед ущільненням. Тиск (надмірний) установлюється

в межах 0,1...0,3 МПа (1,0...3,0 кгс/см²) з інтервалом у разі переходу від одного режиму до іншого близько 0,05 МПа.

На сталих режимах проводяться вимірювання:

- тисків повітря перед та за ущільненням;
- перепаду тисків на діафрагмі;
- тисків у проміжних камерах ущільнення;
- барометричного тиску;
- температури навколишнього середовища.

Значення виміряних величин заносяться до таблиці.

2. Під час обертання барабана проводиться три серії дослідів (для трьох значень частоти обертання в області $n = 3000...7000$ об/хв). Кожна серія при $n = \text{const}$ включає в себе 4–5 режимів тиску, аналогічно п. 1, з тими ж вимірами, крім тисків у проміжних камерах. Цей замір при $n \neq 0$ проводиться тільки в одній із серій за найбільшого тиску перед ущільненням.

3. За результатами вимірювань визначається дійсна витрата повітря через ущільнення, кг/с:

$$G = 4,43 \alpha f_d \sqrt{\rho \Delta h_d}, \quad (4.4)$$

де $\alpha = 0,62$ – коефіцієнт витрати діафрагми; f_d – площа прохідного перерізу діафрагми, м²; ρ – густина повітря перед діафрагмою, кг/м³; Δh_d – перепад тиску на діафрагмі, мм вод. ст.

Густина повітря визначається з рівняння стану за параметрами перед діафрагмою (за ущільненням). До того ж температура повітря за ущільненням, оскільки в ущільненні відбувається процес дроселювання, дорівнює температурі перед ущільненням, а остання, як показали досліди налагодження, з достатнім ступенем точності може бути взята рівною температурі навколишнього середовища.

Таким чином,

$$\rho = \frac{p_2}{R(t + 273)}, \quad (4.5)$$

де p_2 виражено в кПа; $R = 0,287$ кДж/(кг·К) – газова стала повітря.

4. Визначається критичний тиск за ущільненням, а потім за формулою (4.1) або (4.2), вважаючи, що $\mu = 1,0$, обчислюється теоретична витрата повітря через ущільнення. До того ж питомий об'єм повітря перед ущільненням:

$$v_1 = \frac{R(t + 273)}{p_1} \quad (4.6)$$

з урахуванням зауважень до формули (4.5).

5. Зіставленням дійсної витрати з теоретичною знаходиться для всіх дослідів коефіцієнт витрати:

$$\mu = \frac{G}{G_T}.$$

6. Будується графік залежності коефіцієнта витрати від частоти обертання:

$$\mu = f(n).$$

7. Будується графік зміни тиску за щілинами ущільнення (рис. 4.3). Виміряні тиски в камерах відповідають тискам у попередніх щілинах. На графіку точки, що визначають тиск у щілинах, умовно з'єднуються плавною кривою лінією. У разі сумісного зображення для кількох режимів будуються лише остаточні криві.

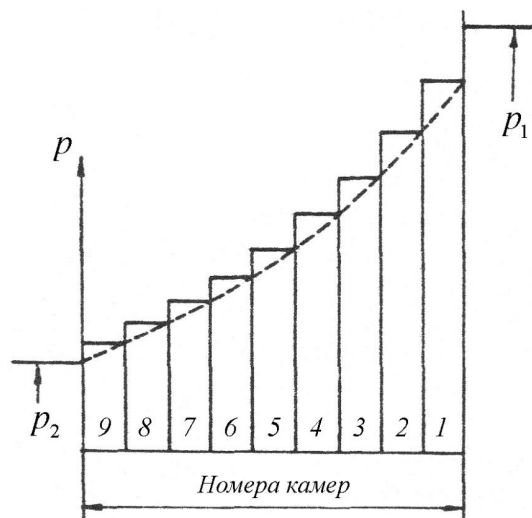


Рис. 4.3. Зміна тиску за рухом газу через ущільнення

Зміст звіту

У звіті з лабораторної роботи мають бути наведені:

- мета й короткий зміст роботи;
- схема експериментальної установки;
- таблиці вимірів та обробки дослідних даних;
- графік залежності $\mu = f(n)$;
- графік зміни тиску за щільностями ущільнення;
- висновки щодо роботи.

Навчальне видання

ПАТЛАЙЧУК Володимир Миколайович

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для проведення лабораторних робіт з дисципліни
«ТЕОРІЯ ТУРБІН»

Комп'ютерна правка й коректура *О. Г. Костенко*
Комп'ютерне верстання *Ю. С. Семенченко*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,67. Вид. № 13. Зам. № 1802-11.
Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007
E-mail : publishing@nuos.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.