

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

**ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ТА ІНЖЕНЕРНА МЕХАНІКА**

**методичні вказівки до виконання  
лабораторних робіт**

Запоріжжя 2024



УДК 531/537(072)  
П75

Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 4 від 27.12.2024 р.)

**Укладач**

Козачина В.А., канд. техн. наук, доцент.

П75 Прикладна фізика та інженерна механіка : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт / уклад. В. А. Козачина. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 54 с.

У методичних рекомендаціях наведено тематику лабораторних робіт з дисципліни «Прикладна фізика та інженерна механіка», методичні пояснення щодо порядку виконання, критерії оцінювання, вимоги до оформлення звітів, питання для самоперевірки тощо.

УДК 531/537 (072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024



## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Лабораторна робота №1. «Визначення прискорення вільного падіння за допомогою машини Атвуда» .....	6
1.1 Мета роботи .....	6
1.2 Теоретичні відомості.....	6
1.3 Хід роботи .....	7
1.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звіту .....	8
1.5 Питання для самоперевірки .....	9
1.6 Перелік рекомендованих джерел.....	9
2 Лабораторна робота №2. «Дослідження рівняння бернуллі» .....	10
2.1 Мета роботи .....	10
2.2 Теоретичні відомості.....	10
2.3 Хід роботи .....	17
2.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів .....	19
2.5 Питання для самоперевірки .....	19
2.6 Перелік рекомендованих джерел.....	19
3 Лабораторна робота №3. «Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника».....	20
3.1 Мета роботи .....	20
3.2 Теоретичні відомості.....	20
3.3 Хід роботи .....	21
3.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів .....	23
3.5 Питання для самоперевірки .....	23
3.6 Перелік рекомендованих джерел.....	23
4 Лабораторна робота №4. «Визначення показника адиабати» .....	24
4.1 Мета роботи .....	24
4.2 Теоретичні відомості.....	24
4.3 Хід роботи .....	25
4.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів .....	27
4.5 Питання для самоперевірки .....	28
4.6 Перелік рекомендованих джерел.....	28
5 Лабораторна робота №5. «Дослідження роботи відцентрового насосу» .....	29
5.1 Мета.....	29
5.2 Теоретичні відомості.....	29
5.3 Хід роботи .....	30
5.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів .....	32
5.5 Питання для самоперевірки .....	33
5.6 Перелік рекомендованих джерел.....	33



6 Лабораторна робота №6. «Побудова кривої вільної поверхні у відкритому руслі» .....	34
6.1 Мета.....	34
6.2 Теоретичні відомості.....	34
6.3 Хід роботи .....	36
6.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів .....	38
6.5 Питання для самоперевірки .....	39
6.6 Перелік рекомендованих джерел.....	39
7 Лабораторна робота №7. «Перевірка роботи водобійної стінки» .	40
7.1 Мета роботи .....	40
7.2 Теоретичні відомості.....	40
7.3 Хід роботи .....	43
7.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів .....	44
7.5 Питання для самоперевірки .....	45
7.6 Перелік рекомендованих джерел.....	45
8 Лабораторна робота №8. «Визначення розрідження, що створюється димовою трубою».....	46
8.1 Мета роботи .....	46
8.2 Теоретичні відомості.....	46
8.3 Хід роботи .....	50
8.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів .....	51
8.5 Питання для самоперевірки .....	51
8.6 Перелік рекомендованих джерел.....	52
Додаток А. ....	53



## ВСТУП

Метою виконання лабораторних робіт з дисципліни «Прикладна фізика та інженерна механіка» є ознайомлення студентами з фізичними процесами та явищами, закріплення теоретичних знань, набуття студентами навичок постановки, проведення фізичного експерименту, обробки та інтерпретації результатів експерименту.

Лабораторні роботи дають можливість студентам засвоїти методи експериментального визначення прискорення вільного падіння за допомогою машини Атвуда, дослідження рівняння Бернуллі, визначення показника адіабати, центру ваги, моменту інерції, центрального удару, дослідження загасаючих коливань.

Лабораторні роботи здобувачами виконуються за допомогою сучасних приладів та обладнання, із залученням інтерактивних симуляцій. Результатом виконання лабораторної роботи є оформлений за вимогами та зданий звіт. Максимальна кількість балів, яку здобувач може отримати за виконання кожної лабораторної роботи, – 2.

# 1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. «ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНИ АТВУДА»

## 1.1 Мета роботи

Метою даної лабораторної роботи є визначення прискорення вільного падіння за допомогою машини Атвуда (рис. 1.1). Машина Атвуда – прилад для проведення лабораторних експериментів для перевірки механічних законів руху з незмінним прискоренням. Названа на честь винахідника Джорджа Атвуда. Принцип роботи приладу заснований на використанні законів вільного падіння тіла в повітрі.

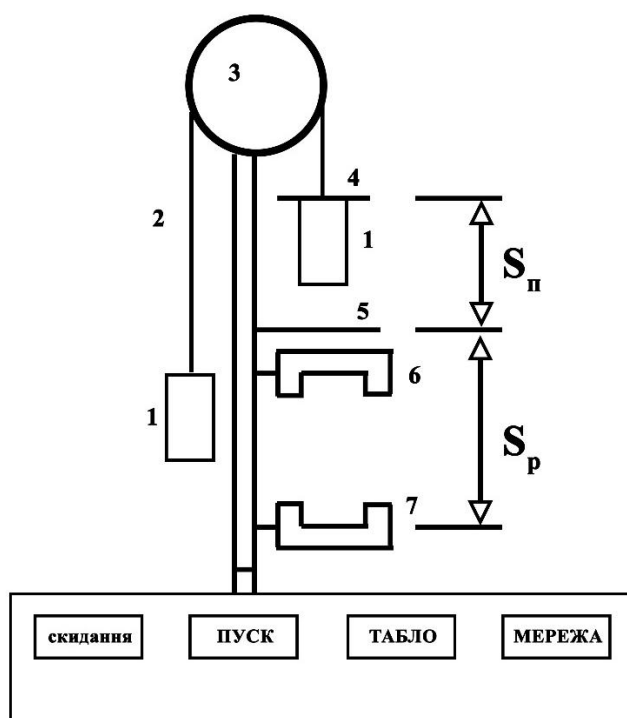


Рисунок 1.1 – Машина Атвуда

Визначення прискорення вільного падіння носить наближений характер через наявність сил тертя, сили опору повітря, ненульову масу нитки, що зв'язує навантаження з роликом.

## 1.2 Теоретичні відомості

Через ролик 3, змонтований на підшипнику таким чином, щоб він міг обертатися з якомога меншим опором, проходить нитка 2 з однаковими вантажами 1 масою  $M$  кожен.

Система знаходиться в рівновазі. Якщо на правий вантаж 1 додати вантаж-насадку 4 масою  $m$ , система одержить прискорення  $a$ , долаючи з



ним шлях  $S_n$ . Записавши 2-й закон Ньютона для руху на цій ділянці, отримаємо вираз для прискорення вільного падіння:

$$g = \frac{2M + m}{m} a. \quad (1.1)$$

На кільці 5 додатковий вантаж-насадка 4 буде відчеплений і система з двох вантажів 1 пройде рівномірно прямолінійно шлях  $S_p$ . Для прямолінійного рівноприскореного руху вираз для прискорення має вигляд:

$$a = \frac{v^2}{2S_n}, \quad (1.2)$$

де  $v$  – швидкість в момент відчеплення 4, з якою буде рухатись система на шляху  $S_p$  протягом часу  $t$ :

$$v = \frac{S}{t}. \quad (1.3)$$

Враховуючи (1.2) та (1.3), (1.1) прийме вигляд:

$$g = \frac{2M + m}{m} \frac{S^2}{2S_n t^2}. \quad (1.4)$$

### 1.3 Хід роботи

1. Ввімкнути електронний блок управління.
2. Перекинути через шків нитку з двома тягарцями та переконатися, що система знаходиться в положенні рівноваги.
3. Провести регулювання положення рівноваги за допомогою опір що регулюються, за допомогою рівня на корпусі приладу.
4. Встановити кронштейн з фотодатчиком в нижній частині шкали вертикальної стійки таким чином, щоб його площина була на рівні з однією з рисок шкали, а правий тягарець при русі вниз проходив по центру фотодатчика (нижнє положення тягарця співпадає з положенням фотодатчика). Підключити фотодатчик та електромагніт до електронного блоку.
5. Встановити середній рухомий кронштейн на вертикальному стовпчику так, щоб ділянка шляху  $S_n$  була у 2-3 рази менше ділянки шляху  $S_p$ . Довжини цих ділянок вимірюються за шкалою.
6. Встановити правий тягарець в верхньому положенні. Натиснути кнопку «Мережа». При цьому вмикається табло та фрикціон



електромагнітних гальм. На правий вантаж (1) покласти насадку (4). Натиснути кнопку «Пуск». Правий тягарець починати рухатися донизу. Коли правий тягарець досягає низу, фотодатчик спрацьовує та підрахунок часу припиняється, потрібно записати час руху тягарців.

7. Кнопкою «Скидання» привести установку до готовності для чергового виміру.

8. Дані занести у таблицю Табл. 1.1.

9. Дослід повторити п'ять разів.

10. З використанням (4) визначити прискорення вільного падіння за дослідом.

11. Визначити відносну похибку:

$$\delta = \frac{|g - g_T|}{g_T} \cdot 100\%, \quad g_T = 9,81 \frac{m}{c^2}$$

Таблиця 1.1

№ з/п	$M, г$	$m, г$	$S_p, м$	$S_n, м$	$t, с$	$g, м/с^2$	$\delta, \%$
1							
2							
3							
4							
5							
ср.							

#### 1.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звіту

Робота здобувачами виконується на лабораторних заняттях за допомогою сучасних приладів та обладнання, із залученням інтерактивних симуляцій.

До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
4. Розрахунки.
5. Висновки.



Кількість балів	Критерій оцінювання
2	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
1	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, не приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт в Moodle

### 1.5 Питання для самоперевірки

1. У чому полягає основна задача механіки?
2. Що таке матеріальна точка?
3. Чим відрізняється поступальний рух від обертального?
4. Поступальний та прямолінійний рух – це одне й теж саме чи ні?

Наведіть приклади.

5. Намалювати графіки залежності переміщення тіла від часу при рівномірному та рівноприскореному прямолінійному русі.

6. Як визначається миттєва швидкість?

7. Запишіть формули для обчислення переміщення тіла при рівноприскореному русі.

### 1.6 Перелік рекомендованих джерел

1. Фелінський Г. С. Загальна фізика : підручник. Київ : Каравела, 2020. 656 с.

2. Скіцько І. Ф., Скіцько О. І Фізика (Фізика для інженерів) : підручник. Київ : НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 513 с.

3. Кармазін В. В., Семенець В. В. Курс загальної фізики : навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ : Кондор, 2016. 786 с.



## 2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. «ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ»

### 2.1 Мета роботи

Метою роботи є дослідна перевірка рівняння Бернуллі, побудова п'єзометричної та напірної лінії для трубопроводу змінного перерізу (рис. 2.1).

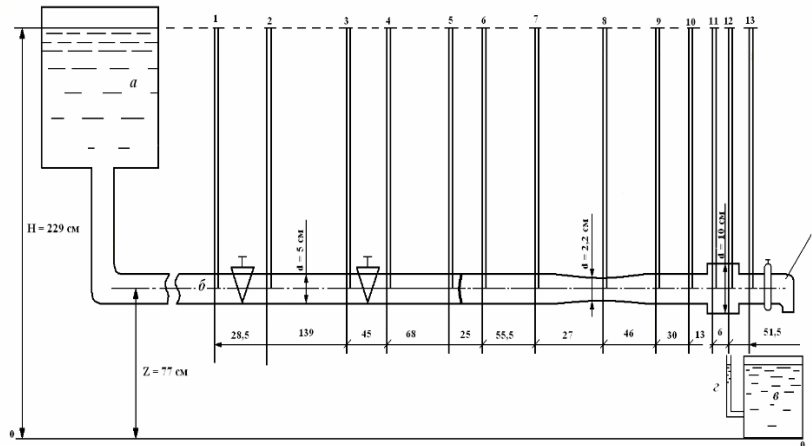


Рисунок 2.1 – трубопровід змінного перерізу

### 2.2 Теоретичні відомості

В потоці впорядкованого руху ідеальної рідини, яка знаходиться під дією лише однієї масової сили – сили тяжіння, виділимо одну з елементарних струминок (рис. 2.2).

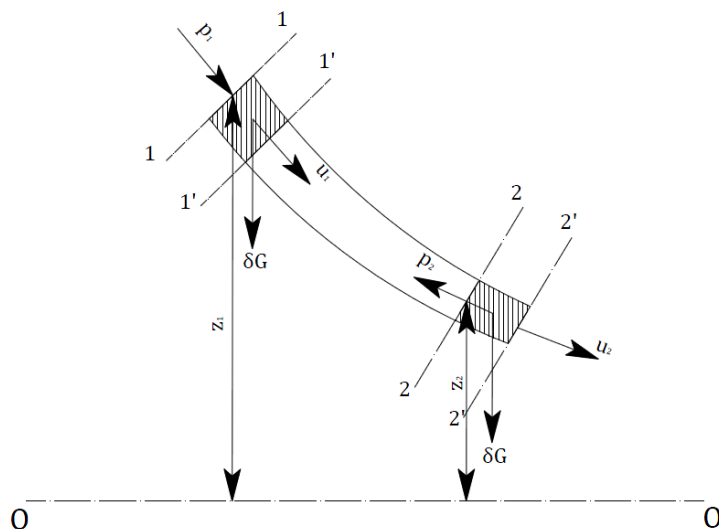


Рисунок 2.2 – Елементарна струминка



Будемо розглядати ділянку цієї струминки між перерізами 1–1 та 2–2. Нехай площа першого перерізу дорівнює  $d\omega_1$ , швидкість в ньому  $u_1$ , гідродинамічний тиск  $p_1$ , а висота розташування центра ваги перерізу, яка відрахована від довільної горизонтальної площини  $O - O$ ,  $z_1$ .

Застосуємо до виділеної ділянки елементарної струминки ідеальної рідини закон кінетичної енергії: приріст кінетичної енергії системи елементарних частинок, які рухаються, за деякий проміжок часу дорівнює сумі роботи всіх сил, діючих на систему на протязі того ж часу. Цей закон може бути записаний таким чином:

$$\Delta_t \left( \frac{mu^2}{2} \right) = \sum_t^{t+\Delta t} Fs. \quad (2.1)$$

Визначимо роботу сил тиску, сили тяжіння та зміну кінетичної енергії ділянки струминки за час  $\Delta t$ . Робота сил тиску в першому перерізі буде додатна, так як напрямок сили співпадає з напрямком руху, та виразиться як добуток сили  $p_1 d\omega_1$  на шлях  $u_1 \Delta t$ :

$$p_1 d\omega_1 u_1 \Delta t.$$

Робота сил тиску в другому перерізі буде мати знак мінус, оскільки напрямок сили прямо протилежний напрямку переміщення, і визначається виразом:

$$-p_2 d\omega_2 u_2 \Delta t.$$

Робота сил тиску на всій ділянці буде дорівнювати

$$p_1 d\omega_1 u_1 \Delta t - p_2 d\omega_2 u_2 \Delta t \quad (2.2)$$

Робота сил тяжіння дорівнює зміні потенціальної енергії положення ділянки струминки. Тому ми з енергії положення рідини в об'ємі 1–1 віднімаємо енергію положення рідини в об'ємі 2–2. Враховуючи рівняння неперервності, можемо записати, що:

$$\delta G = \rho g u_1 d\omega_1 \Delta t = \rho g u_2 d\omega_2 \Delta t \quad (2.3)$$

Таким чином, робота сил тяжіння виразиться як добуток різниці висот на вагу, тобто:

$$(z_1 - z_2) \delta G. \quad (2.4)$$



Щоб отримати приріст кінетичної енергії ділянки струминки, що розглядається, за час  $\Delta t$ , необхідно з кінетичної енергії об'єму струминки 2–2 відняти кінетичну енергію об'єму 1–1, вага кожного з яких дорівнює  $\delta G$ .

Таким чином, приріст кінетичної енергії дорівнює:

$$(u_2^2 - u_1^2) \frac{\delta G}{2g} \quad (2.5)$$

Враховуючи рівняння (2.1), запишемо:

$$(u_2^2 - u_1^2) \frac{\delta G}{2g} = p_1 d\omega_1 u_1 \Delta t - p_2 d\omega_2 u_2 \Delta t + (z_1 - z_2) \delta G \quad (2.6)$$

Розділивши всі члени на рівняння на вагу  $\delta G = \rho g u_1 d\omega_1 \Delta t = \rho g u_2 d\omega_2 \Delta t$  (після скорочення), отримаємо:

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} + z_1 - z_2 = \frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g}.$$

Згрупуємо члени, які відносяться до першого перерізу, в лівій частині перерізу, а до другого – в правій частині:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g}. \quad (2.7)$$

Це рівняння називається рівнянням Бернуллі для елементарної струминки ідеальної (нев'язкої) рідини. Воно було отримано Данилом Бернуллі в 1738 році. Рівняння (2.7) часто записують в такій формі:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = \text{Const} \quad (2.8)$$

Ми бачимо, що рівняння Бернуллі встановлює зв'язок між швидкістю руху, тиском та геометричним положенням точки живого перерізу, для якого воно написано. Кожна з трьох величин може змінюватись, але сума їх завжди постійна. Члени, які входять в рівняння Бернуллі, називають напорами та висотами:

$z$  – геометричний напір (геометрична висота); перевищення положення точки, що розглядається, з тиском  $p$  даного живого перерізу над довільно вибраною горизонтальною площиною  $0 - 0$ ;



$\frac{p}{\rho g}$  – напір тиску (п'езометрична висота); перевищення рівня рідини

в п'езометричній трубці над точкою, яка має координату  $z$ ;

$\frac{u^2}{2g}$  – швидкісний напір (швидкісна висота); перевищення рівня

рідини в трубці Піто над рівнем в п'езометрі.

Тричлен у вигляді:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = H$$

називають повним, або гідродинамічним напором. Для ідеальної рідини сума трьох напорів – геометричного, тиску та швидкісного – вздовж елементарної струминки є величина постійна, тобто:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = H = Const \quad (2.9)$$

Суму  $z + \frac{p}{\rho g} = H_p$  називають п'езометричним напором.

З'єднавши кривою (рис. 2.3) кінці відрізків  $H_p$ , отримаємо лінію, яка називається п'езометричною. З'єднавши між собою кінці відрізків  $H$ , отримаємо пряму, розташовану в горизонтальній площині; ця площина та пряма на ній називається площиною і лінією повного напору. Відповідно, для ідеальної рідини напірна площина є площиною горизонтальною.



Рисунок 2.3 – До побудови п'езометричної лінії та напірної лінії



Члени, які входять у рівняння Бернуллі, називаються також питомою енергією, при цьому:

$z$  – питома енергія розташування, так як частинка рідини вагою  $\delta G$ , знаходячись на висоті  $z$ , має енергію розташування, яка дорівнює  $\delta Gz$ , а на одиницю ваги рідини припадає  $\frac{\delta Gz}{\delta G} = z$ . Енергія, віднесена до одиниці ваги рідини, називається питомою енергією. Отже,  $z$  – міра впливу на потік сили тяжіння або питома потенціальна енергія розташування відносно землі, тобто потенціальна енергія поля земного притяжіння;

$\frac{p}{\rho g}$  – питома потенціальна енергія тиску;

$\frac{u^2}{2g}$  – питома кінетична енергія.

Сума  $z + \frac{p}{\rho g}$  являє собою питому потенціальну енергію рідини, а

сума  $H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}$  є повною питомою енергією елементарної струминки

ідеальної рідини. Таким чином, рівняння Бернуллі виражає відомий закон збереження енергії, застосований у випадку руху рідини.

#### Рівняння Бернуллі для елементарної струминки реальної (в'язкої) рідини

При виводі рівняння Бернуллі для ідеальної рідини ми не враховували роботу сил тертя, яка не може бути опущена при розгляді реальної рідини, оскільки в цьому випадку енергія струминки буде витрачена на подолання сил тертя.

Закон кінетичної енергії для одиниці ваги рідини елементарної струминки з урахуванням работ сил тертя можна представити так:

$$\frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} + z_1 - z_2 - h_w \quad (2.10)$$

де  $h_w$  – робота сил тертя для одиниці ваги рідини (вона направлена проти напрямку руху рідини).

Перетворюючи рівняння (2.10), отримаємо:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h_w \quad (2.11)$$

Це і є рівняння Бернуллі для елементарної струминки реальної рідини. Воно відрізняється від (2.7) наявністю додаткового члена  $h_w$ , який



являє втрату енергії на подолання сил тертя, віднесена до одиниці ваги рідини. Іншими словами,  $h_w$  – це питома механічна енергія, яка перейшла в теплову на ділянці, яка розглядається, внаслідок роботи сил тертя.

Так як по ходу руху реальної рідини частина енергії втрачається (переходить в теплову енергію, розсіюється), напірна площина та напірна лінія тут нахилені в бік руху рідини (рис. 2.4). Член  $h_w$  називають ще втраченим напором. Повний напір в другому перерізі (рис. 2.4)  $H_2$  менше повного напору в першому перерізі  $H_1$  на величину  $h_w$ :

$$H_2 = H_1 - h_w \quad (2.12)$$

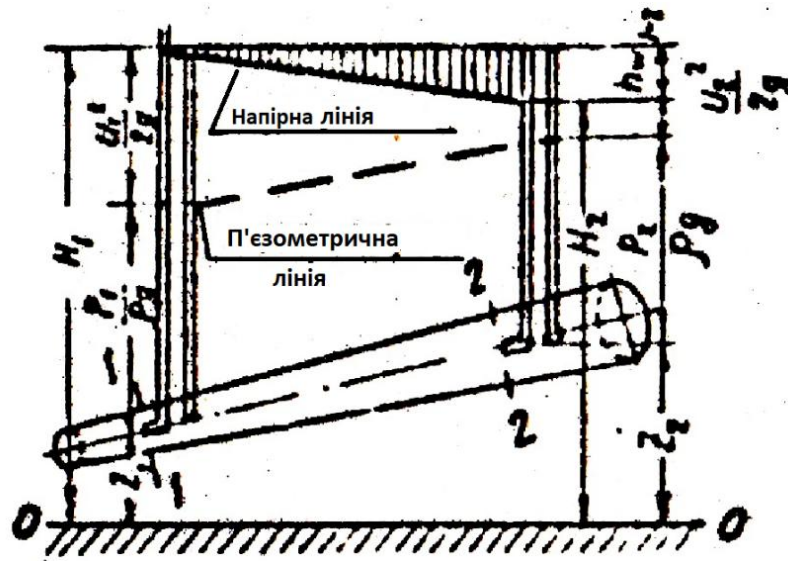


Рисунок 2.4 – До визначення втрат напору

З рис. 2.4 видно, що втрачений напір являє собою висоту, обмежену між горизонтальною лінією, проведеною на рівні повного напору початкового перерізу, та нахиленою напірною лінією.

*Рівняння Бернуллі для цілого потоку реальної рідини*

Це рівняння записується так:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 u_2^2}{2g} + h_w \quad (2.13)$$

В (2.13) необхідно враховувати, що:

- для різних точок даного живого перерізу члени  $z$  та  $\frac{p}{\rho g}$  мають

різне значення, але сума їх при паралельно-струмковому та плавно змінному русі для всіх точок даного живого перерізу постійна:



$$z + \frac{p}{\rho g} = Const.$$

- при розрахунку потоків реальний потік з нерівномірним розподілом усереднених місцевих швидкостей (рис. 2.5а) замінюють розрахунковим потоком, який має одну швидкість, яку називають середньою (рис. 2.5б).

У зв'язку з цією заміною вводиться коефіцієнт  $\alpha$ , який представляє відношення дійсної кінетичної енергії потоку  $\int_{\omega} \frac{u^2 dm}{2}$  до кінетичної енергії, розрахованої за середньою швидкістю  $\frac{mv^2}{2}$ :

$$\alpha = \frac{\int_{\omega} \frac{u^2 dm}{2}}{\frac{mv^2}{2}}. \quad (2.15)$$

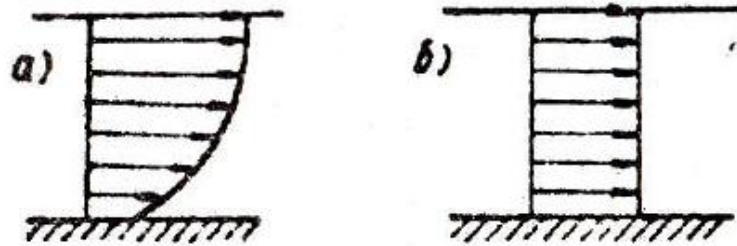


Рисунок 2.5 – Потік: а) з нерівномірним розподілом швидкості; б) з постійною в перерізі швидкістю

Величину  $\alpha$  називають коефіцієнтом кінетичної енергії потоку (коефіцієнтом Коріоліса). Для рівномірного турбулентного потоку  $\alpha = 1 \div 1,13$ , а для рівномірного ламінарного потоку  $\alpha = 2$ . На ділянках нерівномірного руху, внаслідок спотворення поля швидкості, коефіцієнт  $\alpha$  може мати різні значення, які досягають 5 одиниць та більше. Зазвичай,  $\alpha_1 \approx \alpha_2 = \alpha$ .

Якщо члени, які входять в рівняння Бернуллі, розглядають як напори, то їх виражають в одиницях довжини (метр в СІ); при розгляді їх як питомих енергій – виражають в одиницях роботи (енергії) (в СІ Дж/Н). Напір в метрах виражає енергію одиниці ваги (в СІ маси) рідини.

На рис. 2.6 показані п'єзометрична та напірна лінії для цілого потоку реальної рідини з плавно змінним рухом. Напірна лінія нахилена в сторону руху; падіння її характеризує середній гідравлічний ухил:

$$I_{l.cep} = \frac{(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 u_2^2}{2g}) - (z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha_3 u_3^2}{2g})}{S_{2-3}} = \frac{h_{w2-3}}{S_{2-3}} \quad (2.16)$$

де  $S_{2-3}$  – довжина потоку між перерізами 2 – 2 та 3 – 3. При нерівномірному падінні напору використовують поняття гідравлічного ухилу в точці потоку, яка розглядається:

$$I_l = -\frac{dH}{dS} = -\frac{d(z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha u^2}{2g})}{dS} = \frac{dh}{dS}. \quad (2.17)$$

Отже, гідравлічний ухил – це втрата напору, віднесена до одиниці довжини потоку. Падіння п'єзометричної лінії характеризує п'єзометричний ухил, який також поділяють на середній  $I_{P.cep}$  та ухил в точці  $I_P$ :

$$I_{P.cep} = \frac{(z_2 + \frac{p_2}{\rho g}) - (z_3 + \frac{p_3}{\rho g})}{S_{2-3}}, \quad (2.18)$$

$$I_P = -\frac{d(z + \frac{p}{\rho g})}{dS}. \quad (2.19)$$

Знак мінус в (2.19) поставлений для того, щоб величини  $I_P$  для ділянок п'єзометричної лінії, які підіймаються, отримати від'ємними, а для ділянок, які опускаються, – додатними. Отже, п'єзометричний ухил додатний, якщо п'єзометрична лінія знижується за течією потоку.

Гідравлічний ухил при впорядкованому русі завжди являється додатним.

## 2.3 Хід роботи

Установка для дослідної ілюстрації рівняння Бернуллі схематично показана на рис. 2.1.

Для того, щоб рух води в трубопроводі був усталеним, в напірному резервуарі необхідно підтримувати постійний рівень. З цією метою включається насос, який подає воду в напірний резервуар, зайва вода з якого через трубу переливання поступає в нижній резервуар. Рух буде впорядкованим, якщо рівень в кожному п'єзометрі з часом не змінюватиметься (через пульсацію він буде дещо коливатись біля деякого середнього положення).

Порядок проведення дослідів є таким:

- 1) робиться ознайомлення з установкою;
- 2) видаляється повітря з трубопроводу, шлангів і п'єзометрів;
- 3) відкривається кран на кінці трубопроводу і через деякий час включається насос;
- 4) крейдою акуратно відмічаються рівні води в п'єзометрах;
- 5) визначається витрата рідини за допомогою мірної ємності та секундоміру.
- 6) записуються п'єзометричні висоти для кожного перерізу.
- 7) дані вимірювань та розрахунків записуються у Табл. 2.1.

Таблиця 2.1

№	Показники	Одиниця вимірювань	Чисельні величини відносно перерізів												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Позначка площини порівняння (підлоги)	см													
2	Позначка рівня води в напірному резервуарі	см													
3	Геометрична висота	см													
4	Об'єм води, що надійшов у мірний резервуар $W$	см <sup>3</sup>													
5	Час наповнення, $t$	с													
6	Витрата, $Q=W/t$	см <sup>3</sup> /с													
7	Діаметр труби, $d$	см													
8	Площа живого перерізу, $\omega$	см <sup>2</sup>													
9	Середня швидкість, $V$	см/с													
10	Швидкісний напір, $V^2/2g$	см													
11	Відстань між перерізами, $l$	см													
12	Показання п'єзометрів, $p/\gamma$	см													
13	П'єзометричний напір, $z + p/\gamma$	см													
14	Повний напір, $z + p/\gamma + V^2/2g$	см													
15	П'єзометричний ухил														
16	Гідравлічний ухил														



## 2.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Робота здобувачами виконується на лабораторних заняттях за допомогою сучасних приладів та обладнання, із залученням інтерактивних симуляцій.

До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
4. Розрахунки.
5. Висновки.

Кількість балів	Критерій оцінювання
2	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
1	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, не приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт в Moodle

## 2.5 Питання для самоперевірки

1. Що виражає рівняння Бернуллі?
2. За якою формулою визначаються втрати напору по довжині.
3. Якому діапазону чисел Рейнольдса відповідає область гідравлічно гладких труб?
4. Запишіть рівняння нерозривності.

## 2.6 Перелік рекомендованих джерел

1. Фелінський Г. С. Загальна фізика : підручник. Київ : Каравела, 2020. 656 с.
2. Скіцько І. Ф., Скіцько О. І Фізика (Фізика для інженерів) : підручник. Київ : НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 513 с.
3. Кармазін В. В., Семенець В. В. Курс загальної фізики : навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ : Кондор, 2016. 786 с.

### 3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. «ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МАЯТНИКА»

#### 3.1 Мета роботи

Метою роботи є визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника (рис. 3.1).

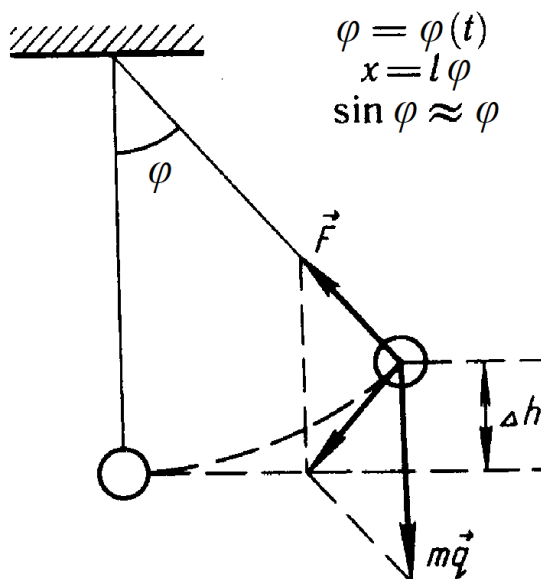


Рисунок 3.1 – Математичний маятник

#### 3.2 Теоретичні відомості

Математичний маятник – це важке тіло, підвішене на невагомій нерозтяжній нитці і може коливатись у вертикальній площині під дією сили тяжіння, при цьому розмірами тіла порівняно з довжиною нитки можна нехтувати.

Рівняння для малих гармонічних коливань має вигляд:

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l}\varphi = 0.$$

Тоді період малих гармонічних коливань визначається за формулою:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (3.1)$$

звідки прискорення вільного падіння буде дорівнювати:



$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

Однак ця формула є незручною для практичного використання через складність безпосереднього вимірювання довжини маятника. Тому діятимемо інакше. Необхідно заміряти період  $T_1$  при  $l_1$ ,  $T_2$  при  $l_2$ . Тоді маємо два рівняння:

$$T_1^2 = 4\pi^2 \frac{l_1}{g},$$

$$T_2^2 = 4\pi^2 \frac{l_2}{g},$$

віднявши які отримаємо вираз для прискорення вільного падіння:

$$g = 4\pi^2 \frac{l_1 - l_2}{T_1^2 - T_2^2}.$$

Різницю довжин маятника  $l_1 - l_2$  можна замінити різницею положень нижніх точок маятника  $a_1$  та  $a_2$ , тоді вираз для прискорення вільного падіння прийме вигляд:

$$g = 4\pi^2 \frac{a_1 - a_2}{T_1^2 - T_2^2}. \quad (3.2)$$

### 3.3 Хід роботи

Схема математичного маятника показана на рис. 3.2.

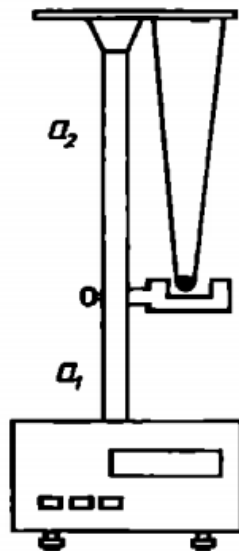


Рисунок 3.2 – Математичний маятник



Порядок проведення дослідів є таким:

- 1) відмічаються положення нижніх кінців маятника  $a_1$  та  $a_2$ ;
- 2) для кожного положення маятника визначається час 30 коливань при відхиленні на кут  $3-5^\circ$ ;
- 3) результат вимірювань заносяться у Табл. 3.1;

Таблиця 3.1

№	$a_1$ , м	$N_1$	$t_1$ , с	$T_1$ , с	$a_2$ , м	$N_2$	$t_2$ , с	$T_2$ , с	$g_i$ , м/с <sup>2</sup>	$\Delta g_i$ , м/с <sup>2</sup>	$(\Delta g_i)^2$ , м/с <sup>2</sup>	$S_g$ , м/с <sup>2</sup>	$\varepsilon_g$ , м/с <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$(g \pm \varepsilon_g)$ м/с <sup>2</sup>
1															
2															
3															
сеп															

- 4) визначається середнє значення:

$$g_{\text{сеп}} = \frac{g_1 + g_2 + g_3}{3};$$

- 5) визначається відхилення від середнього значення:

$$\Delta g_i = |g_{\text{сеп}} - g_i|;$$

- 6) визначається дисперсія:

$$S_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta g_i^2}{n(n-1)}};$$

- 7) визначається абсолютна похибка:

$$\varepsilon_g = S_g \cdot t_{p,n}, \text{ де } t_{p,n} = 4,3;$$

- 8) визначається відносна похибка

$$\delta = \frac{\varepsilon_g}{g_{\text{сеп}}} \cdot 100\%;$$

- 9) результат записується у вигляді:

$$g = g_{\text{сеп}} \pm \varepsilon_g$$

- 10) результати розрахунків заносяться у Табл. 3.1.

### 3.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Робота здобувачами виконується на лабораторних заняттях за допомогою сучасних приладів та обладнання, із залученням інтерактивних симуляцій.

До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
4. Розрахунки.
5. Висновки.

Кількість балів	Критерій оцінювання
2	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
1	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, не приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт в Moodle

### 3.5 Питання для самоперевірки

1. Що таке математичний маятник?
2. Запишіть рівняння гармонічних коливань.
3. Запишіть формулу для періоду гармонічних коливань фізичного маятника?
4. За яких умов справедливою є формула періоду гармонічних коливань математичного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

### 3.6 Перелік рекомендованих джерел

1. Фелінський Г. С. Загальна фізика : підручник. Київ : Каравела, 2020. 656 с.
2. Скіцько І. Ф., Скіцько О. І Фізика (Фізика для інженерів) : підручник. Київ : НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 513 с.
3. Кармазін В. В., Семенець В. В. Курс загальної фізики : навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ : Кондор, 2016. 786 с.

## 4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. «ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА АДІАБАТИ»

### 4.1 Мета роботи

Метою роботи є дослідження адіабатного та ізохорного процесів.

### 4.2 Теоретичні відомості

Адіабатним називається процес, який протікає без теплообміну з навколишнім середовищем і описується рівнянням Пуассона:

$$pV^\gamma = \text{Const} \quad (4.1)$$

де  $\gamma$  – показник адіабати.

На практиці адіабатний процес може бути здійснений в системі, яка обмежена теплоізоляційною оболонкою, але, оскільки для теплообміну необхідний деякий час, то адіабатним можна вважати також процес, який протікає настільки швидко, що система не встигає обмінюватися теплом з навколишнім середовищем.

Ізохорним процесом є процес, який протікає при постійному об'ємі і описується рівнянням:

$$\frac{p}{T} = \text{Const} \quad (4.2)$$

Експериментально  $\gamma$  можна знайти за методом Клемана-Дезорма, який базується на вивченні термодинамічних параметрів деякої маси газу, що переходить із одного стану в інший двома послідовними процесами – адіабатним і ізохорним (рис. 4.1).

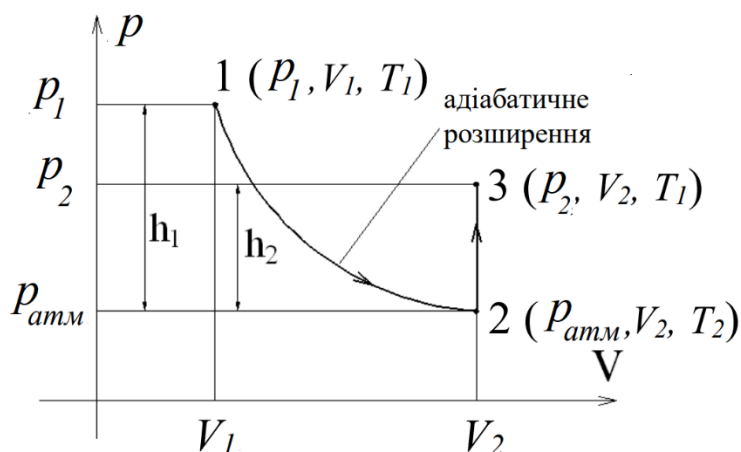


Рисунок 4.1 – адіабатний та ізохорний процеси в методі Клемана-Дезорма



Показник адіабати теоретично можна визначити за формулою:

$$\gamma = \frac{i+2}{i}, \quad (4.3)$$

де  $i$  – кількість ступенів вільності молекули (для повітря, яке в основному складається із двохатомних молекул,  $i = 5$ ).

### 4.3 Хід роботи

Для експериментального визначення показника адіабати, можна скористатись установкою, схема якої зображена на рис. 4.2.

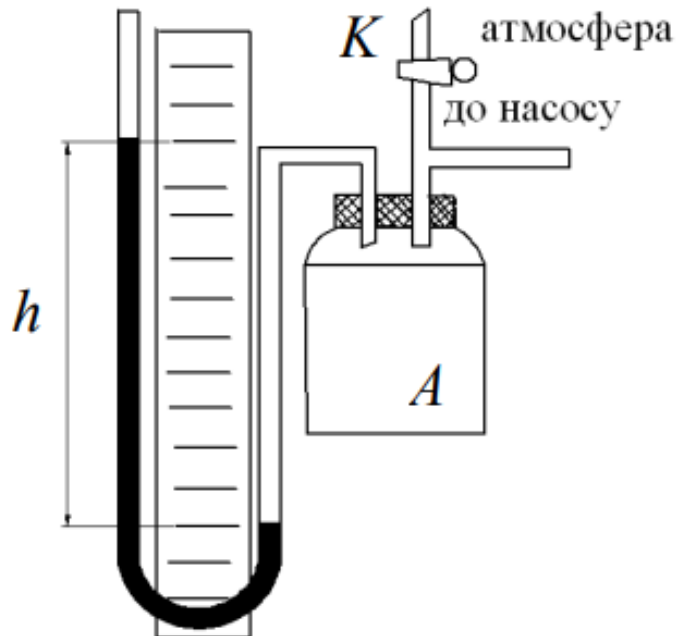


Рисунок 4.2 – Дослідна установка для експериментального визначення показника адіабати

Якщо в колбу  $A$ , яка з'єднана з манометром, накачати насосом повітря і зачекати до встановлення теплової рівноваги з навколишнім середовищем, то повітря буде мати такі параметри:  $p_1$ ,  $V_1$ ,  $T_0$ , де  $T_0$  – температура навколишнього середовища,  $p_1 = p_0 + p'$  – абсолютний тиск у колбі,  $p'$  – надлишковий тиск у колбі,  $p_0$  – атмосферний тиск.

Якщо на короткий час з'єднати колбу з атмосферою, то здійсниться адіабатне розширення повітря. При цьому повітря перейде в стан з параметрами:  $p_2 = p_0$ ,  $V_2$ ,  $T_2$ . З рівняння Пуассона і рівняння Клапейрона-Менделєєва маємо:



$$\left(\frac{p_0 + p'}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^\gamma. \quad (4.4)$$

Після того, як на короткий час колба була з'єднана з атмосферою, повітря в колбі, охолоджене через адіабатне розширення, буде нагріватися до температури навколишнього середовища  $T_0$  при постійному об'ємі  $V_2$ . При цьому тиск в колбі підніметься до  $p_3 = p_0 + p''$ . З рівняння ізохорного процесу (рівняння Шарля), отримаємо:

$$\frac{p_0 + p''}{p_0} = \frac{T_0}{T_2}. \quad (4.5)$$

Розв'язок системи з (4.3) і (4.4), за умови, що надлишкові тиски  $p'$  і  $p''$  значно менші, ніж атмосферний тиск  $p_0$ , отримаємо рівняння:

$$\gamma = \frac{p'}{p' - p''}. \quad (4.6)$$

Таким чином, вимірюючи манометром надлишкові тиски після адіабатного і ізохорного процесів, можна експериментально розрахувати показник адіабати повітря.

Порядок проведення дослідів:

1. Накачати повітря у колбу до надлишкового тиску 5-7 кПа. Зачекати, поки тиск у колбі не буде змінюватись (2-4 хвилини). Записати надлишковий тиск  $p'$ .
2. Короткочасно з'єднати колбу з атмосферою. Зачекати, поки тиск у колбі не стабілізується. Записати надлишковий тиск  $p''$ .
3. З'єднати колбу з атмосферою, поки в ній не встановиться постійний тиск.
4. Повторити дослід ще 4 рази.
5. За допомогою (4.6) розрахувати експериментальне значення  $\gamma_{\text{експ}}$  для 5 дослідів та середньоарифметичне значення.
6. За допомогою (4.3) визначити теоретичне значення  $\gamma_{\text{теор}}$ .
7. Визначити відносну похибку:

$$\delta = \frac{|\gamma_{\text{сер}} - \gamma_{\text{теор}}|}{\gamma_{\text{теор}}} \cdot 100\%.$$

8. Виміряні дані та результати розрахунків занести до Табл. 4.1.



Таблиця 4.1

№ з/п	$p'$ , кПа	$p''$ , кПа	$У_{\text{експ.}i}$	$У_{\text{сер}}$	$У_{\text{теор}}$	$\delta, \%$
1						
2						
3						
4						
5						

#### 4.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Робота здобувачами виконується на лабораторних заняттях за допомогою сучасних приладів та обладнання, із залученням інтерактивних симуляцій.

До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
4. Розрахунки.
5. Висновки.

Кількість балів	Критерій оцінювання
2	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
1	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, не приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт в Moodle



#### 4.5 Питання для самоперевірки

1. Дати визначення питомої і молярної теплоємностей.
2. Які ви знаєте ізопроцеси?
3. Поясніть, чому молярна теплоємність газів при ізобарному процесі більша, ніж при ізохорному?
4. Наведіть і поясніть рівняння Майера.
5. Дайте визначення, що таке кількість ступенів вільності молекул газу. Визначте їх кількість для одно-, дво- і трьохатомних молекул.
6. Який процес називають адіабатним? Наведіть приклади адіабатного процесу.
7. В чому полягає перший початок термодинаміки?
8. Як визначається робота газу при адіабатному процесі?
9. За якою формулою визначається внутрішня енергія ідеального газу?

#### 4.6 Перелік рекомендованих джерел

1. Фелінський Г. С. Загальна фізика : підручник. Київ : Каравела, 2020. 656 с.
2. Скіцько І. Ф., Скіцько О. І Фізика (Фізика для інженерів) : підручник. Київ : НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 513 с.
3. Кармазін В. В., Семенець В. В. Курс загальної фізики : навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ : Кондор, 2016. 786 с.



## 5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5. «ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСУ»

### 5.1 Мета

Побудова характеристик відцентрового насоса: напірної  $H-Q$ , потужності  $N-Q$ , ККД  $\eta-Q$ .

### 5.2 Теоретичні відомості

Напір насоса визначається за формулою:

$$H = M + V + Z + \frac{v_H^2 - v_E^2}{2g}, \quad (5.1)$$

де  $M$  – покази манометра, м;  $V$  – покази вакуумметра, м;  $Z$  – відстань по вертикалі між точкою відбору тиску на всмоктувальній лінії і центром коробки манометра на напірній лінії, м;  $v_H$  і  $v_E$  – швидкість руху рідини відповідно в напірному і всмоктувальному патрубках насоса, м/с;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Потужність насоса  $N$  визначається за залежністю:

$$N = N_e \eta_e, \quad (5.2)$$

де  $N_e$  – потужність, що споживається електродвигуном, в кВт (вимірюється ватметром);  $\eta_e$  – ККД електродвигуна (рекомендується прийняти за паспортними даними електродвигуна).

ККД насоса визначається за формулою:

$$\eta = \frac{N_k}{N}, \quad (5.3)$$

де  $N_k$  – корисна потужність насоса, кВт:

$$N_k = \frac{\rho g Q H}{1000} = 9,81 Q H, \quad (5.4)$$

де  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/с,  $H$  – напір, м.

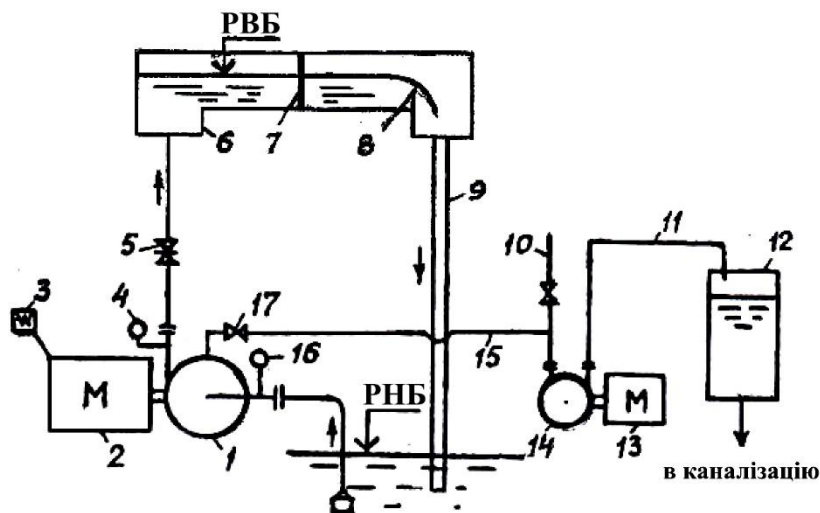


Рисунок 5.1 – Схема лабораторної установки для параметричних досліджень відцентрового насоса: 1 – відцентровий насос; 2, 13 – електродвигун; 3 – ватметр; 4 – манометр; 5 – засувка; 6 – мірний лоток; 7 – п'єзометр; 8 – водозлив; 9 – водоскидна труба; 10 – труба з вентилям для живлення вакуум-насоса від системи водопроводу; 11 – напірна лінія вакуум-насоса; 12 – циркуляційний бачок; 14 – вакуум-насос; 15 – всмоктувальна лінія вакуум-насоса; 16 – вакуумметр; 17 – вентиль.  
 $d_в=100$  мм;  $d_н=80$  мм.

### 5.3 Хід роботи

Схема лабораторної установки представлена на рис. 5.1.

1. Перед початком досліджень всі засувки і вентиля на установці повинні бути закриті
2. Залити насос водою, для чого:
  - а) від водопроводу трубопроводом 10 подати воду до вакуум-насоса;
  - б) відкрити вентиль 17;
  - в) при витіканні з напірної лінії 11 вакуум насоса суцільного струменя рідини, яка замінила водоповітряну суміш, закрити вентиль 17 і відключити вакуум-насос.
3. Включити електродвигун 2 відцентрового насоса 1 і зняти покази приладів при відсутності подачі насоса  $Q=0$ .
4. Повільно відкрити засувку 5 на  $\Delta Q=Q_{max}/8$ .
5. Продути манометр 4 і вакуумметр 16.
6. Послідовно зняти покази приладів для 8...9 режимів роботи насоса, збільшуючи подачу з кроком  $\Delta Q$  до максимального значення подачі насоса  $Q_{max}$ .

Дані вимірювань і результати розрахунків за формулами (5.1)-(5.4) занести в табл. 5.1. На підставі даних табл. 5.1 побудувати характеристики насоса: напірну, потужності та ККД.



В лабораторних роботах подача насоса визначається з використанням прямокутного водозливу за формулою:

$$Q = mb\sqrt{2gH_{вод}^{3/2}}, \quad (5.5)$$

де  $m$  – коефіцієнт витрати водозливу;  $b$  – ширина водозливу, м;  $g=9,81\text{ м/с}^2$ ;  $H_{вод}$  – напір на водозливі, м.

Напірну характеристику насоса необхідно представити в аналітичному вигляді:

$$H = H_{\phi} - S_{\phi}Q^2, \quad (5.6)$$

де коефіцієнти  $H_{\phi}$  – фіктивний напір, м,  $S_{\phi}$  – фіктивний опір,  $\text{м}/(\text{м}^3/\text{с})^2$  або  $\text{м}/(\text{л/с})^2$ , знаходять за координатами двох точок напірної характеристики  $a$  та  $b$ , які знаходяться в першій і останній чверті рекомендованої зони роботи насоса:

$$S_{\phi} = \frac{H_a - H_b}{Q_b^2 - Q_a^2}, \quad (5.7)$$

$$H_{\phi} = H_a + S_{\phi}Q_a^2. \quad (5.8)$$

За формулою (5.6) визначають координати аналітичної напірної характеристики насоса, результати розрахунків заносять в табл. 5.1. За даними табл. 5.1 будують напірну аналітичну характеристику насоса.

Таблиця 5.1

Параметри		Один. вимір.	Номер вимірювання																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
Дані вимірювань																				
1	Частота обертання робочого колеса $n$	об/хв																		
2	Подача насоса $Q$	л/с																		
3	Покази манометра $M$	м																		
4	Покази вакуумметра $V$	м																		
5	Різниця в висотному положенні приладів $Z$	м																		
6	Потужність електродвигуна $N_e$	кВт																		



Результати обчислень												
1	Різниця швидкісних напорів	м										
2	Напір насоса $H$	м										
3	Корисна потужність $N_k$	кВт										
4	Потужність насоса $N$	кВт										
5	ККД насоса $\eta$	%										
6	Напір насоса, $H_{теор}$	м										

#### 5.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Робота здобувачами виконується на лабораторних заняттях за допомогою сучасних приладів та обладнання, із залученням інтерактивних симуляцій.

До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
4. Розрахунки.
5. Висновки.

Кількість балів	Критерій оцінювання
2	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
1	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, не приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт в Moodle



### **5.5 Питання для самоперевірки**

1. Будова та принцип роботи відцентрового насоса.
2. Основні параметри, що характеризують роботу відцентрового насоса?
3. Визначення втрат напору в трубопроводі?
4. Критерій Рейнольдса та залежності для визначення коефіцієнту гідравлічних втрат по довжині трубопроводу.
5. Визначення потужності, яку споживає насос.
6. Визначення напору насоса.

### **5.6 Перелік рекомендованих джерел**

1. Мандрус В. І. Гідравлічні та аеродинамічні машини: насоси, вентилятори, газодуви, компресори : підручник. Львів : «Магнолія 2006», 2018. 340 с.
2. Срібнюк С. М. Насоси і насосні установки : навчальний посібник. Київ : ЦУЛ. 2019. 312 с.
3. Шевчук С. П., Попович О. М., Світлицький В. М. Насосні, вентиляторні та пневматичні установки : підруч. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 308 с.

## 6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6. «ПОБУДОВА КРИВОЇ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ У ВІДКРИТОМУ РУСЛІ»

### 6.1 Мета

Познайомитись з різними формами запису диференціального рівняння нерівномірного плавно змінного руху води у відкритому призматичному руслі, різними способами побудови кривої вільної поверхні. Побудувати криву вільної поверхні води, співставити її з дослідною.

### 6.2 Теоретичні відомості

Основне диференціальне рівняння, що описує усталений нерівномірний рух рідини у відкритих непризматичних руслах, записується у вигляді:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dl} = i - i_f, \quad (6.1)$$

де  $\mathcal{E} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}$  – питома енергія потоку,  $i$  – ухил дна русла;  $i_f$  – ухил тертя (втрати енергії за довжиною).


Визначаючи ухил тертя, припускають, що втрати енергії за довжиною при нерівномірному плавнозмінному русі рідини у відкритих руслах обчислюються за формулами для рівномірного руху рідини:

$$i_f = \frac{Q^2}{\omega^2 W^2}. \quad (6.2)$$

Основне диференціальне рівняння, що описує усталений нерівномірний рух рідини у відкритих призматичних руслах (при прямому ухилі дна,  $i > 0$ ), записується у вигляді:

$$\frac{dh}{dl} = i \frac{1 - \frac{K_0^2}{K^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}. \quad (6.3)$$

Основне диференціальне рівняння, що описує усталений нерівномірний рух рідини у відкритих призматичних руслах (при нульовому ухилі дна,  $i = 0$ ), записується у вигляді:



$$\frac{dh}{dl} = -i_k \frac{\frac{K_k^2}{K^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}. \quad (6.4)$$

Основне диференціальне рівняння, що описує усталений нерівномірний рух рідини у відкритих призматичних руслах (при зворотному ухилі дна,  $i > 0$ ), записується у вигляді:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}. \quad (6.5)$$

Побудова кривих підпору або спаду при протіканні потоку полягає у визначенні відстані між перерізами, глибини потоку в яких відомі (або за умовою задачі, або на підставі дослідження форми кривої), і має у підсумку забезпечити знаходження глибини потоку в будь-якому перерізі, розташованому на заданій відстані від будь-якого початкового перерізу, гідравлічні елементи потоку в якому відомі.

Відстань  $l_{1-2}$  між перерізами з глибинами  $h_1$  і  $h_2$  при прямому ухилі дна ( $i > 0$ ) може бути визначено декількома способами.

#### **Спосіб В.І. Чарномського.**

Відстань між перерізами потоку визначається за залежністю:

$$l_{1-2} = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{i - i_{fcep}}, \quad (6.6)$$

де  $\mathcal{E}$  – питома енергія потоку,  $i$  – ухил дна русла;  $i_{fcep}$  – середній ухил тертя (втрати енергії за довжиною) в межах ділянки, що розглядається, визначається як для рівномірного руху потоку у відкритому руслі.

Для отримання надійних результатів необхідно брати на даній ділянці русла велику кількість проміжних перерізів. Тоді довжина кривої вільної поверхні між перерізами з глибинами  $h_{поч}$  і  $h_{кін}$  буде дорівнювати сумі відстаней між усіма прийнятими перерізами:

$$l_{кр} = l_{1-2} + l_{2-3} + \dots + l_{(n-1)-n}. \quad (6.7)$$

#### **Спосіб М.М. Павловського.**

Відстань між перерізами потоку визначається за формулою:

$$l_{1-2} = \frac{\Pi_2 - \Pi_1 - (1 - j_{cep})[\Phi(\Pi_2) - \Phi(\Pi_1)]}{ai}, \quad (6.8)$$

де  $\Pi_n = K_n/K_0$  – відносна витратна характеристика в  $n$ -му перерізі,  $K_n$ ,  $K_0$  – відповідно витратна характеристики в  $n$ -му перерізі, що розглядається, та в перерізі з нормальною глибиною потоку,  $a$  – допоміжна величина:

$$a = \begin{cases} \frac{\Pi_1 - \Pi_2}{h_1 - h_2} \text{ при } h_1 > h_2 \\ \frac{\Pi_2 - \Pi_1}{h_2 - h_1} \text{ при } h_2 > h_1 \end{cases}, \quad (6.9)$$

$j_{cep} = \frac{\alpha i W_{cep}^2 B_{cep}}{g \omega_{cep}}$ ,  $\Phi(\Pi)$  – функція Павловського, що визначається за додатком 7.

Для горизонтального русла формула Павловського приймає вигляд:

$$l_{1-2} = \frac{(j_{\kappa} - 1)(\Pi_{\kappa 2} - \Pi_{\kappa 1}) + [\Phi(\Pi_{\kappa 2}) - \Phi(\Pi_{\kappa 1})]}{a_{\kappa} i_{\kappa}}, \quad (6.10)$$

де  $\Pi_{\kappa n} = K_n/K_{\kappa}$ ;  $K_n$ ,  $K_0$  – відповідно витратна характеристики в  $n$ -му перерізі, що розглядається, та витратна характеристика, що відповідає критичній глибині;  $\Phi(\Pi_{\kappa})$  – функція Павловського, що визначається за додатком 8;

$$a = \frac{\Pi_{\kappa 2} - \Pi_{\kappa 1}}{h_2 - h_1}; \quad j_{cep} = \frac{\alpha i_{\kappa} W_{cep}^2 B_{cep}}{g \omega_{cep}}. \quad (6.11)$$

Для отримання більш точних результатів рекомендується розбити ділянку потоку на проміжні перерізи. Загальна довжина кривої визначається аналогічно тому, як це робилось для метода Чарномського.

### 6.3 Хід роботи

Диференціальне рівняння нерівномірного руху води у призматичному руслі можна розв'язати чисельно, перейшовши від диференціалів до кінцевих різниць. З огляду на це, відстань між двома близькими перерізами можна розрахувати наступним чином:

$$\Delta s = \frac{\varphi(h_{n+1}) + \varphi(h_n)}{2i} \Delta h,$$



де  $\Delta s$  – відстань між двома близькими перерізами;  $\Delta h$  – різниця глибин між двома перерізами, що розглядаються; функція  $\varphi$  розраховується наступним чином:

$$\varphi = \frac{\left(\frac{K}{K_0}\right)^2 - J}{\left(\frac{K}{K_0}\right)^2 - 1},$$

де  $K = \omega C \sqrt{R}$  – витратна характеристика при глибині  $h$ ;

$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}$  – витратна характеристика за нормальної глибини (при рівномірному русі);

$$J = \frac{\alpha i C^2 B}{g \chi};$$

$\alpha = 1,1$  – коефіцієнт Кориоліса;

$C$  – коефіцієнт Шезі при глибині  $h$ ;

$B$  – ширина каналу по верху при глибині  $h$ ;

$\chi$  – змочений периметр при глибині  $h$ .

Порядок проведення дослідів:

1. Робота виконується у гідравлічному лотку з ухилом дня  $i$ .
2. Витрата води визначається за допомогою мірної ємності та секундоміру.
3. Заміряються глибини у двох близьких перерізах.
4. Розраховуються площі живих перерізів.
5. Розраховуються змочені периметри.
6. Розраховуються гідравлічні радіуси.
7. Розраховуються коефіцієнти Шезі.
8. Розраховуються витратні характеристики.
9. Розраховуються функції  $J$ .
10. Розраховуються функції  $\varphi(h)$ .
11. Розраховується відстань між перерізами  $\Delta s$ .
12. Співставляється  $\Delta s$  з дослідною  $\Delta s_{\text{досл}}$ .
13. Дані вимірювань та розрахунків заносяться у табл. 6.1.

Таблиця 6.1

№	Показники					Одиниці вимірювання		Числові значення показників	
1	Напір на порозі водозливу, Н					см			
2	Витрата, Q					л/с			
3	Глибина, h <sub>1</sub>					см			
4	Глибина, h <sub>2</sub>					см			
5	Глибина, h <sub>3</sub>					см			
<i>h, м</i>	<i>Δh, м</i>	<i>ω, м<sup>2</sup></i>	<i>χ, м</i>	<i>R, м</i>	$\sqrt{R}$	<i>C</i>	<i>K</i>	<i>K<sub>0</sub></i>	$\frac{K}{K}$
$\frac{K^2}{K_0^2}$	<i>C<sup>2</sup></i>	<i>B</i>	<i>J</i>	$\frac{K^2}{K_0^2} - j$	$\frac{K^2}{K_0^2} - 1$	$\varphi(h)$	$\varphi(h_{сер})$	$\Delta S$	$\frac{\Delta S}{\Delta S_{досл}}$

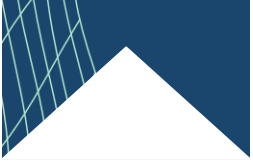
#### 6.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Робота здобувачами виконується на лабораторних заняттях за допомогою сучасних приладів та обладнання, із залученням інтерактивних симуляцій.

До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
4. Розрахунки.
5. Висновки.

Кількість балів	Критерій оцінювання
2	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
1	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, не приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт в Moodle



## **6.5 Питання для самоперевірки**

1. Який рух називається нерівномірним?
2. Запишіть основне рівняння нерівномірного усталеного руху рідини у відкритому руслі.
3. Опишіть спосіб Чарномського побудови кривої вільної поверхні.

## **6.6 Перелік рекомендованих джерел**

1. Вамболь С. О., Міщенко І. В., Кондратенко О. М. Технічна механіка рідини і газу : підручник. Харків : НУЦЗУ, 2016. 300 с.
2. Константинов Ю. М., Гіжа О. О. Інженерна гідравліка. Київ : Слово, 2006. 432 с.
3. Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика / Л. Є. Пелевін та ін. Київ : КНУБА, 2015. 340 с.



## 7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7. «ПЕРЕВІРКА РОБОТИ ВОДОБІЙНОЇ СТІНКИ»

### 7.1 Мета роботи

Виконати візуальне спостереження за спряженням б'єфів. Встановити спряження з відігнаним стрибком. Встановити водобійну стінку з розмірами, що розраховані, та перевірити правильність розрахунку візуально.

### 7.2 Теоретичні відомості

Водозлив – це перешкода (поріг, гребля), через яку переливається рідина (рис. 7.1).

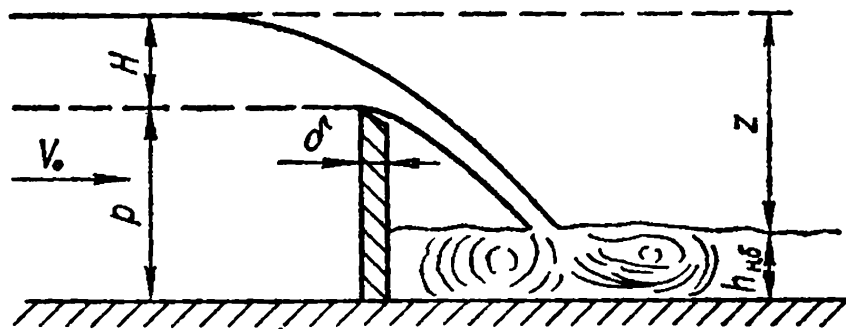


Рисунок 7.1 – Водозлив

Розрізняють наступні типи водозливів:

1) водозлив з тонкою стінкою ( $\delta < 0,67H$ ) (рис. 7.2);

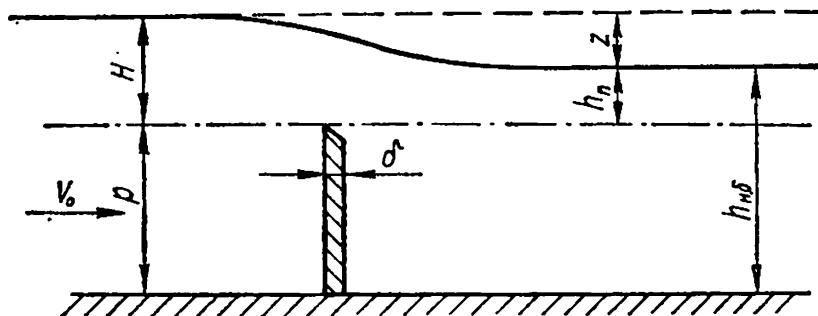


Рисунок 7.2 – Водозлив з тонкою стінкою

Витрата через водозлив з тонкою стінкою визначається за формулою:

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2} \sigma_3$$

$\sigma_3$  – коефіцієнт затоплення.

2) водозлив практичного профілю ( $0,67H < \delta < 2 \dots 3H$ ) (рис. 7.3).  
Такі водозливи поділяються на безвакуумні та вакуумні.

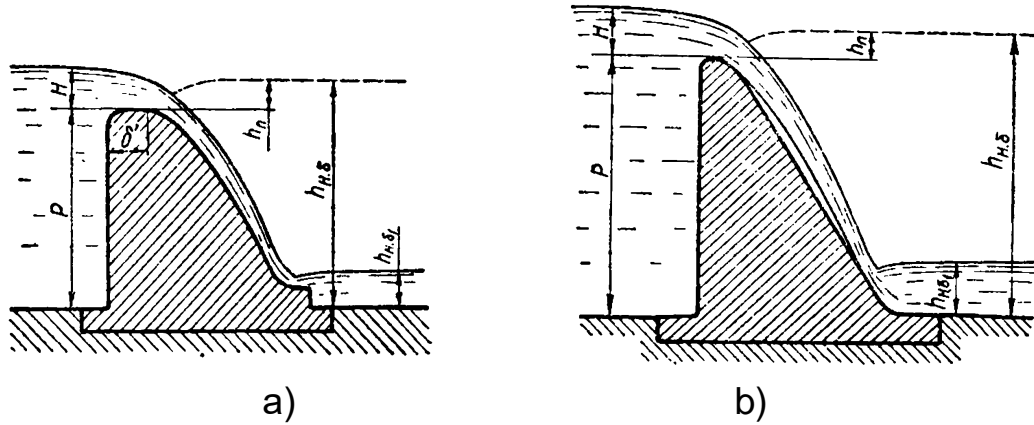


Рисунок 7.3 – Водозливи практичного профілю: а) безвакуумний водозлив; б) вакуумний водозлив

Витрата через водозлив практичного профілю визначається за формулою М.М. Павловського:

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}\sigma_{cm}\sigma_3,$$

де  $H_0 = H + \frac{\alpha V_0^2}{2g}$  – повний напір на порозі водозливу;  $V_0$  – швидкість підходу потоку (можна знехтувати при  $\Omega_{в.б.} > 4bH$ );  $\sigma_{cm}, \sigma_3$  – коефіцієнти відповідно бокового стиснення та затоплення.

3) водозлив з широким порогом ( $2 \dots 3H < \delta < 8 \dots 10H$ ) (рис. 7.4).

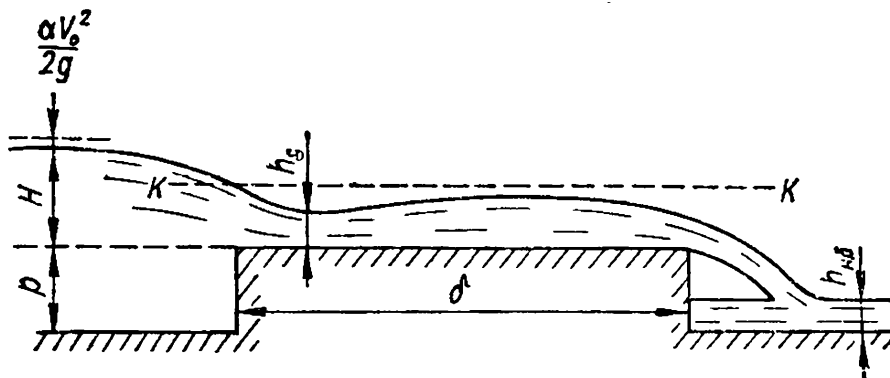


Рисунок 7.4 – Водозлив з широким порогом

Витрата рідини через водозлив з широким порогом визначається за формулою:

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}\sigma_3.$$

Спряження струменя (що, наприклад, переливається через водозлив) з потоком у нижньому б'єфі може приймати різні форми (рис. 7.5) залежно від співвідношення між гідравлічними елементами потоку до та після споруди.

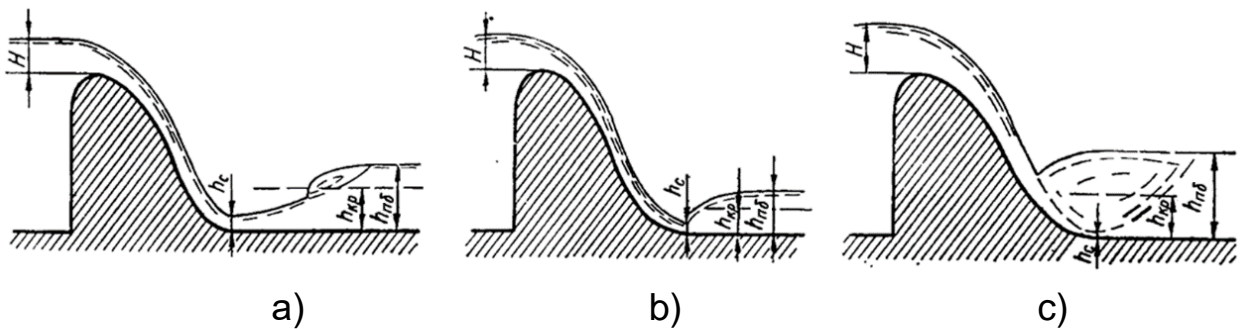


Рисунок 7.5 – Форми спряження б'єфів: а) по типу відігнутого стрибка; б) по типу стрибка у стисненому перерізі; с) по типу затопленого стрибка

Так, якщо у нижньому б'єфі бурхливий стан потоку ( $h_{пб} < h_c$ ), то спряження потоків буде плавним без гідравлічного стрибка.

При спокійному стані потоку у нижньому б'єфі ( $h_{пб} > h_c$ ) перехід від стисненого перерізу до побутової глибини можливий лише через гідравлічний стрибок. У цьому випадку можливі наступні варіанти:

а) при  $h_c'' > h_{пб}$  спряження б'єфів відбувається по типу відігнутого стрибка (рис. 8.7, а);

б) при  $h_c'' = h_{пб}$  спряження б'єфів відбувається по типу стрибка у стисненому перерізі (рис. 8.7, б);

с) при  $h_c'' < h_{пб}$  спряження б'єфів відбувається по типу затопленого стрибка (рис. 8.7, с);

Бурхливий потік нижче водозливу має велику кінетичну енергію, що змушує споруджувати в нижньому б'єфі потужне кріплення, що потребує значних фінансових витрат. Спеціальні споруди, що споруджуються у нижньому б'єфі з метою погашення енергії, називаються гасителями енергії. Одним з гасителів енергії є водобійна стінка, розрахунок якої виконується наступним чином:

1. Визначається глибина потоку в стисненому перерізі  $h_c$ .
2. Розраховується спряжена глибина  $h_2$ .
3. Глибина  $h_2$  порівнюється з побутовою глибиною  $h_{пб}$ . Якщо  $h_2 > h_{пб}$ , необхідне влаштування водобійної стінки.

4. Висота водобійної стінки розраховується за формулою:

$$c = \sigma h_2 - H_1, \quad (7.1)$$

де  $H_1$  – напір на порозі водобійної стінки, який визначається:

а) при незатопленій стінці

$$H_1 = H_{01} - \frac{\alpha v_{01}^2}{2g},$$
$$H_{01} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{2gm^2}}, m = 0,42,$$
$$v_{01} = \frac{q}{\sigma h_2}.$$

Відстань від стінки падіння до водобійної стінки:

$$l_k = l_{\text{сидл}} + 0,8l_{\text{смп}},$$

$l_{\text{сидл}} = 0,3H_0 + 1,25\sqrt{H_0(p_1 + 0,45H_0)}$  – для водозливу з тонкою стінкою;

$l_{\text{сидл}} = 1,64\sqrt{H_0(p_1 + 0,24H_0)}$  – для водозливу з широким порогом;

$l_{\text{сидл}} = 1,33\sqrt{H_0(p_1 + 0,3H_0)}$  – для водозливу з широким порогом.

б) при затопленій стінці її висота визначається підбором.

### 7.3 Хід роботи

1. У гідравлічному лотку через водозлив пропускається вода.
2. Встановлюється спряження б'єфів по типу відігнутого стрибка, заміряється витрата.
3. Виконується розрахунок водобійної стінки.
4. Розраховується довжина водобійного колодязя.
5. Встановлюється водобійна стінка з отриманими розмірами у лоток, перевіряється візуально робота водобійної стінки. Якщо розрахунок виконано вірно, то гідравлічний стрибок буде затопленим.

Дані вимірювань та розрахунків слід занести до табл. 7.1.

Таблиця 7.1

№	Показники	Одиниця вимірювання	Чисельні значення показників	
			дослідні	теоретичні
1	Напір на порозі трикутного водозливу, $H$	см		
2	Витрата, $Q$	см <sup>3</sup> /с		
3	Питома витрата, $g$	см <sup>3</sup> /с · см		
4	Висота порога водозливу, $R$			
5	Геометричний напір на порозі водозливу	см		
6	Швидкість руху води перед водозливом, $v$	см/с		
7	Повний напір на порозі водозливу, $H_0$	см		
8	Повний запас енергії перед водозливом	см		
9	Коефіцієнт швидкості $\varphi$			
10	Стисла глибина, $h_c$	см		
11	Спряжена глибина, $h_2$	см		
12	Коефіцієнт запасу, $\sigma$			
13	Швидкість руху води перед водобійною стінкою $v_{01}$	см/с		
14	Повний напір на порозі водобійної стінки	см		
15	Висота водобійної стінки $s$	см		

#### 7.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Робота здобувачами виконується на лабораторних заняттях за допомогою сучасних приладів та обладнання, із залученням інтерактивних симуляцій.

До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
4. Розрахунки.
5. Висновки.


Кількість балів	Критерій оцінювання
2	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
1	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, не приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт в Moodle

### 7.5 Питання для самоперевірки

1. Що таке водозлив? Які бувають водозливи?
2. Які є форми спряження б'єсів?
3. Записати формулу для зв'язку між спряженими глибинами.

### 7.6 Перелік рекомендованих джерел

1. Вамболь С. О., Міщенко І. В., Кондратенко О. М. Технічна механіка рідини і газу : підручник. Харків : НУЦЗУ, 2016. 300 с.
2. Константінов Ю. М., Гіжа О. О. Інженерна гідравліка. Київ : Слово, 2006. 432 с.
3. Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика / Л. Є. Пелевін та ін. Київ : КНУБА, 2015. 340 с.



## 8 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8. «ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРІДЖЕННЯ, ЩО СТВОРЮЄТЬСЯ ДИМОВОЮ ТРУБОЮ»

### 8.1 Мета роботи

Ознайомитися з принципом дії димової труби, визначити величину розрідження біля основи димової труби та вплив на нього температури газів і висоти труби.

### 8.2 Теоретичні відомості

За допомогою димової труби забезпечується рух газів у печах і видаляються продукти згоряння палива з робочого простору печі в навколишнє середовище.

Видалення продуктів згоряння (диму) з печі відбувається за рахунок **природної тяги** при створенні розрідження всередині димової труби.

У тих випадках, коли в печі виходить велика кількість продуктів згоряння або коли одна труба забезпечує кілька печей, може застосовуватися **штучна тяга**. Вона створюється за допомогою спеціальних дуттьових вентиляторів - димососів.

Димосос може бути вбудований безпосередньо в димовий тракт печі для висмоктування димових газів із печі та нагнітання їх у димову трубу - це **пряма схема включення**. Як димососи прямої дії можуть бути використані вентилятори з лопатками зі звичайної сталі за умови охолодження продуктів горіння підсмоктуванням атмосферного повітря до температури 200...250°C. Димососи прямої дії спеціальної конструкції з лопатками з жаротривкої сталі, підшипниками з водяним охолодженням і валом дають змогу забезпечити штучну тягу при температурі диму до 400...600°C.

Димосос також може бути вбудований **опосередковано** - нагнітає в димову трубу повітря навколишнього середовища, яке ежектує димові гази з робочої камери печі.

Застосування димососів пов'язане зі значними витратами енергії на влаштування тяги в печі, що здебільшого й обмежує їхнє застосування.

У цій роботі аналізується принцип створення природної тяги і визначається розрідження, створене в димовій трубі за рахунок природної тяги. На практиці після розрахунку необхідного розрідження, створюваного димовою трубою, за графіками орієнтовно визначають висоту труби. При остаточному виборі висоти необхідно врахувати такі санітарно-гігієнічні вимоги. Висота заводських труб має бути більше 16м. При розташуванні труби менш ніж на 100м поблизу будівель висота її має бути на 5м вищою за гребінь даху будівлі. Якщо продукти горіння містять у збільшених кількостях шкідливі гази (SO<sub>2</sub> тощо), висота труби має бути понад 100 м, і тяга в цьому разі регулюється шиберами.



Розрідження або вакуум можуть бути створені в будь-якій замкненій системі (посудина, труба тощо), якщо тиск у системі буде меншим за навколишнє середовище, тобто:

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}},$$

де  $p_{\text{вак}}$  – розрідження в системі,  $\text{Н/м}^2$ ;  $p_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск або тиск навколишнього середовища,  $\text{Н/м}^2$ ;  $p_{\text{абс}}$  – абсолютний тиск у системі, що відраховується від абсолютного вакууму,  $\text{Н/м}^2$ .

Найпростішим приладом для вимірювання тиску є U-подібний манометр, тобто вигнута трубка, заповнена будь-якою рідиною (рис. 8.1). Такий манометр може застосовуватися як для вимірювання статичного тиску, так і для вимірювання динамічного тиску. **Статичний тиск** - це різниця тисків газу всередині посудини і навколишнього повітря. Оскільки пропонуваний тиск усередині димаря менший за атмосферний (розрідження або вакуум), то статичний тиск у цьому випадку негативний. **Динамічний тиск** залежить тільки від швидкості руху димових газів і є еквівалентом кінетичної енергії потоку - він завжди позитивний.

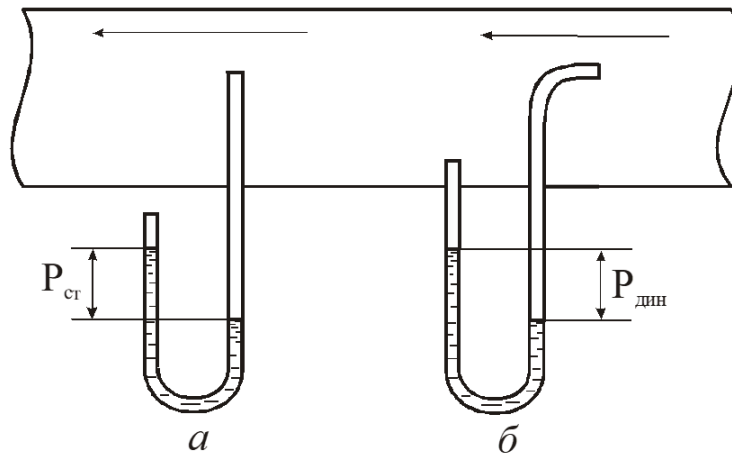


Рисунок 8.1 – Схема вимірювання тиску за допомогою U-подібного манометра: а) статичний тиск; б) динамічний тиск

Розглянемо, як розподіляється тиск по висоті димаря (рис. 8.2). Досвід показує, що тиск у площині вихідного перерізу димової труби, яка працює, практично дорівнює тиску навколишньої атмосфери (це справедливо для будь-якого каналу, що видає газу в деякий об'єм). Якщо заслінку (шибер) опустити, то рух газів у трубі припиниться, а на виході з труби тиск пічних газів і атмосфери, як і раніше, будуть рівні.

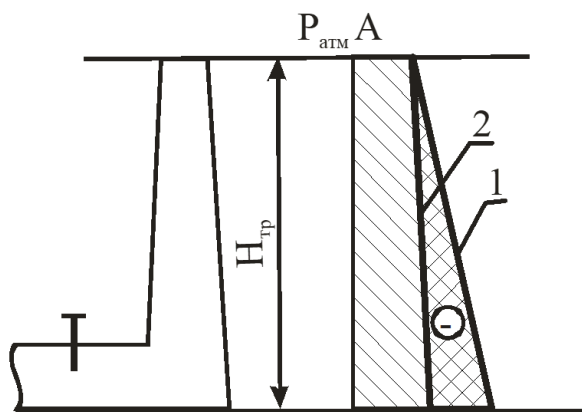


Рисунок 8.2 – Розподіл тиску по висоті димової труби

Тиск атмосферного повітря лінійно залежить від висоти при незначних її змінах. Нахил епюри тиску залежить від густини газу – чим більша густина, то більш полого проходить пряма, і навпаки. У зв'язку з цим тиск повітря, що оточує трубу, буде виражатися прямою 1.

Пічні газы мають температуру, вищу за навколишнє середовище, тому їхня густина менша за густину повітря. Залежність густини будь-якого газу від температури мають вигляд:

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t},$$

де  $\rho_t$  – густина газу за температури  $t$ , кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – густина газу за нормальних умов, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення газів, для газів  $\beta=1/273$  К<sup>-1</sup>

Отже, зі збільшенням температури газу, його густина зменшується. Тоді зміна тиску пічних газів по висоті труби буде виражатися прямою 2. Ця пряма значно крутіша за пряму 1, оскільки температура пічних газів у трубі практично не змінюється. Оскільки тиск на виході з труби дорівнює тиску атмосферного повітря, то прямі 1 і 2 перетинаються в точці А.

Порівнюючи величину тиску газів повітря біля основи труби, можна відзначити, що тиск пічних газів менший за тиск атмосферного повітря, тобто біля основи труби створюється розрідження.

За відкритого шабера (заслінки) пічні газы почнуть рухатися вгору під дією різниці густин між газом і атмосферним повітрям. Інакше кажучи, стовп атмосферного повітря, що дорівнює висоті труби і має більшу щільність, ніж пічні газы, своїм тиском видавлює останні вгору.

З аналізу нахилу прямих 1 і 2 видно, що зі збільшенням температури пічних газів пряма 2 наближатиметься до вертикалі, і різниця тисків пічних газів і повітря біля основи труби - розрідження - зростатиме. Зростання різниці тисків (розрідження) спостерігається також у разі збільшення



висоти труби, тому що температура пічних газів, а, отже, і густина газів за висотою труби, практично не змінюється, а густина атмосферного повітря з висотою змінюється істотно.

Величина створюваного розрідження розраховується за рівнянням:

$$\Delta p = H(\rho_n - \rho_e)g - h_m \rho_e g,$$

де  $H$  – висота труби, м;

$\rho_n$  – густина повітря при температурі довкілля визначається за формулою:

$$\rho_n = \frac{\rho_{n0}}{1 + \beta t_n},$$

де  $\rho_{n0}$  – густина повітря при 0°C,  $\rho_{n0}=1,29$  кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_e$  – густина пічних газів за температури печі  $t_e$ , визначається за формулою:

$$\rho_e = \frac{\rho_{e0}}{1 + \beta t_e},$$

де  $t_e$  – середня температура газів у трубі, °C;

$\rho_{e0}$  – густина пічних газів за 0°C,  $\rho_{e0}=1,29$ кг/м<sup>3</sup>;

$h_m$  – втрати тиску газу під час руху димовою трубою за рахунок тертя. Приймаються в цій роботі залежно від висоти труби:

1) при  $H=1$ м –  $h_m=2$  Н/м<sup>2</sup>;

2) при  $H=2$ м –  $h_m=4$  Н/м<sup>2</sup>.

Установка (рис. 8.3) складається з електричної нагрівальної печі 1, у якій нагрівається повітря, і вертикально встановленої сталеві труби 2, що складається з двох частин для зміни висоти. По висоті труби 2 встановлено три термомпари 3, 4, 5. Труба 2 підключена до манометра 7 за допомогою трубок 6.

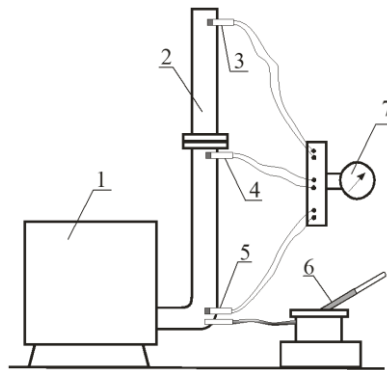


Рисунок 8.3 – Схема лабораторної установки



**Термопара** – пристрій для вимірювання температури, який складається з двох послідовно з'єднаних між собою різнорідних провідників. Якщо спаї перебувають за різних температур, то в ланцюзі виникає термоЕРС, величина якої однозначно пов'язана з різницею температур «гарячого» і «холодного» контактів. Для виміру температури повітря в трубі «гарячі» контакти термопар 3, 4, 5 розташовані біля основи труби, в середній частині труби і на її виході, «холодні» - на приладі 7. Вимірювання розрідження біля основи труби проводять мікроманометром 6. Показання температури повітря в трубі фіксують за допомогою мілівольметра 7.

### 8.3 Хід роботи

1. Увімкнути електропіч і нагріти повітря в печі до отримання біля основи труби температури 200°C при повній висоті труби.
2. Виміряти температуру повітря в трьох точках по висоті труби і розрідження біля основи труби.
3. Нагріти повітря в печі до температури 300°C і повторити дослід 2.
4. Зменшити висоту труби і повторити дослід 2.
5. Розрахувати розрідження біля основи труби для трьох дослідів.
6. Визначити похибку результатів вимірювань порівняно з розрахунковими даними.
7. Результати вимірювань і розрахунків звести в таблицю 8.1.

Таблиця 8.1

Вимірювана та розрахункова величина	Одиниця вимірювання	Номер досліду		
		1	2	3
Висота труби	м	2	2	1
Температура нагрітого повітря: - біля основи труби - в середині труби - в гирлі труби	°C °C °C			
Середня температура нагрітого повітря	°C			
Температура оточуючого повітря	°C			
Розрідження біля основи труби: - виміряне - розрахункове	Н/м <sup>2</sup> Н/м <sup>2</sup>			
Похибка вимірювань	%			

8. За результатами розрахунків зробити висновки про залежність розрідження біля основи труби від температури газів і висоти труби.



## 8.4 Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Робота здобувачами виконується на лабораторних заняттях за допомогою сучасних приладів та обладнання, із залученням інтерактивних симуляцій.

До складу звіту повинні входити:

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета практичної роботи.
3. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
4. Розрахунки.
5. Висновки.

Кількість балів	Критерій оцінювання
2	Здобувач(ка) працював(ла) на лабораторних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
1	Здобувач(ка) не працював(ла) на лабораторних заняттях, не приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) завдання у повному обсязі та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle.
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт в Moodle

## 8.5 Питання для самоперевірки

1. Яке призначення димової труби?
2. Способи створення штучної тяги.
3. Із чим пов'язане обмеження використання димососів?
4. Які вимоги застосовуються до висоти димової труби?
5. Що називається розрідженням?
6. Як вимірюється розрідження?
7. Що називається статичним, динамічним і абсолютним тиском?
8. За рахунок яких чинників створюється розрідження в димовій трубі?
9. Що викликає рух нагрітих газів угору?
10. Як впливають на розрідження димової труби температура пічних газів і висота труби?
11. Що таке термопара?
12. Як знаходяться абсолютна та відносна похибки вимірювань?



## 8.6 Перелік рекомендованих джерел

1. Вамболь С. О., Міщенко І. В., Кондратенко О. М. Технічна механіка рідини і газу : підручник. Харків : НУЦЗУ, 2016. 300 с.
2. Константинов Ю. М., Гіжа О. О. Інженерна гідравліка. Київ : Слово, 2006. 432 с.
3. Константинов Ю. М., Гіжа О. О. Технічна механіка рідини і газу. Київ : Вища школа, 2002. 358 с.



**ДОДАТОК А.**

*ПРИКЛАД ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА*

**ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Кафедра природничо-наукових та загальноінженерних  
дисциплін**

**Лабораторна робота №\_**

з навчальної дисципліни

**«ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ТА ІНЖЕНЕРНА МЕХАНІКА»**

Здобувача групи \_\_\_\_\_  
Прізвище Ім'я По батькові

Керівник:  
к.т.н., доцент  
В.А. Козачина

Запоріжжя, 20XX



*Навчально-методичне видання*

**Козачина Віталій Анатолійович**

**ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ТА ІНЖЕНЕРНА МЕХАНІКА**  
**методичні вказівки до виконання лабораторних робіт**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції