

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Кафедра теплотехніки та теплових двигунів

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни  
«ГІДРОГАЗОДИНАМІКА»

Харків 2016

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри теплотехніки та теплових двигунів 16 листопада 2015 р., протокол № 7.

Методичні вказівки призначено для виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Гідрогазодинаміка» студентами денної форми навчання напряму підготовки 6.050601 – «Теплоенергетика».

Укладачі:

доценти С.В. Комар,  
Г.В. Біловол,  
асист. О.В. Василенко

Рецензент

доц. В.І. Рубльов

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Програма дисципліни «Гідрогазодинаміка».....	4
1 Розв’язання задач на фізичні властивості рідин та основне рівняння гідростатики .....	7
1.1 Фізичні властивості рідин .....	7
1.2 Основне рівняння гідростатики. Визначення сил гідростатичного тиску на тверді стінки .....	9
1.3 Приклад розрахунку сумарної сили гідростатичного тиску на пласкі пластини .....	12
2 Розрахунок трубопроводу для подачі води на охолодження заслінок теплотехнологічного реактора (ТР).....	15
2.1 Варіант А. Завдання та вихідні дані.....	15
2.2 Варіант Б. Завдання та вихідні дані.....	17
2.3 Загальні положення .....	19
2.4 Методичні рекомендації до розрахунку складного трубопроводу для подачі води на охолодження заслінок теплотехнологічного реактора.....	21
2.5 Приклад розрахунку трубопроводу для подачі води до теплотехнологічного реактора .....	24
Вимоги до оформлення РГР .....	28
Список літератури .....	28
Додаток А. Значення абсолютної шорсткості А для труб із різних матеріалів .....	29
Додаток Б. Коефіцієнт місцевих опорів .....	30

## **ВСТУП**

Метою вивчення дисципліни «Гідрогазодинаміка» є формування у студентів знань з курсу механіка рідини та газу, які необхідні для вивчення спеціальних дисциплін (котельні установки промислових підприємств, теплові мережі, високотемпературні теплотехнологічні процеси й установки та ін.) та практичної діяльності майбутніх фахівців-теплоенергетиків.

Завдання дисципліни полягає у вивченні основних законів руху рідини і газу, гідро- та газостатики, одновимірного руху газу, основ теорії примежового шару, практичних питань гідрогазодинаміки в теплоенергетиці.

Студенти виконують згідно з вказівками обидві розрахунково-графічні роботи (РГР), які передбачені навчальним планом дисципліни «Гідрогазодинаміка».

При виконанні розрахунково-графічних робіт номер варіанта вихідних даних студенти отримують у викладача.

У методичних вказівках наведено програму дисципліни «Гідрогазодинаміка» для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика» Українського державного університету залізничного транспорту.

Знання, уміння і навички, отримані при вивченні дисципліни «Гідрогазодинаміка» та при виконанні цих РГР, використовуються у дипломному проектуванні.

## **ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ «ГІДРОГАЗОДИНАМІКА»**

### **Основні фізичні властивості рідин та газів**

Вступ. Континуальна модель середовища. Густина і питома вага. Стисливість. Температурне розширення. В'язкість. Пароутворення. Капілярність. Моделі рідин і газів.

### **Основи кінематики рідини та газу**

Методи опису руху рідини та газу. Кінематичні поняття й характеристики руху рідких частинок і потоків. Розкладання руху елементарного об'єму рідини. Лінія течії, траєкторія, струминка, живий перетин. Кінематика вихрових течій. Вихрова лінія,

вихрова трубка, вихровий шнур. Міра вихрового руху. Теорема Стокса. Безвихровий рух, потенціал швидкості.

### **Основні закони і рівняння динаміки рідини та газу**

Сили, що діють на рідину. Тензор напружень. Диференціальне рівняння Нав'є–Стокса. Закон збереження маси. Рівняння витрати. Закон збереження енергії. Рівняння енергії. Рівняння Бернуллі. Закон збереження кількості руху. Рівняння кількості руху (імпульсу). Закон збереження моменту кількості руху. Рівняння моменту кількості руху (моменту імпульсу). Рівняння руху нестисливої ідеальної рідини (рівняння Ейлера). Інтегрування рівнянь Ейлера для часткових випадків. Рівняння Бернуллі для ідеальної нестисливої рідини.

### **Основи теорії подібності**

Елементи теорії подібності й моделювання гідрогазодинамічних явищ. Числа подібності (Ейлера, Маха, Рейнольдса, Фруда, Струхаля, Прандтля). Часткова подібність. Автомодельність.

### **Гідро- і газостатика**

Властивості гідростатичного тиску. Основне рівняння гідростатики. Сила тиску рідини на пласку стінку. Сила тиску рідини на криволінійну стінку. Відносний спокій. Основи газостатики.

### **Витікання нестисливої рідини через отвори і насадки**

Витікання з отвору при незмінному напорі. Витікання рідини через насадки. Витікання при змінному напорі.

### **Рух нестисливої рідини в трубах**

Режими руху рідини. Ламінарний рух рідини в круглій трубі, закон розподілу швидкості та втрати на тертя. Турбулентний рух рідини в круглій трубі, коефіцієнти опору. Рух рідини в не круглих трубах. Місцеві гідравлічні опори. Гідравлічний розрахунок трубопроводів. Трубопровід з насосним подаванням. Гідравлічний удар у трубах.

## **Одновимірний рух газу**

Основні рівняння одновимірного потоку. Параметри загальмованого потоку. Максимальна і критична швидкості потоку. Критерії подібності газових течій. Зв'язок між відносними параметрами газу і критеріями подібності. Умови переходу від дозвукового руху до надзвукового і навпаки.

## **Збурення в газі. Ударна хвиля (стрибок ущільнення)**

Хвилі слабких збурень (хвилі Маха). Хвилі сильних збурень (ударна хвиля). Зміна стану газу при проходженні його через прямий стрибок ущільнення. Ударна адіабата. Навкісні стрибки ущільнення.

## **Витікання газу із сопел**

Витікання газу через сопло, що звужується. Витікання газу через сопло Лавалю на розрахунковому режимі. Витікання газу через сопло Лавалю на нерозрахунковому режимі. Надзвукові дифузори.

## **Основи теорії примежового шару**

Основні поняття і характеристики примежового шару. Види примежового шару та його моделі. Відрив примежового шару. Взаємодія примежового шару зі стрибком ущільнення.

## **Основні відомості про насоси**

Насосне обладнання теплоелектростанцій. Класифікація насосів. Основні параметри насосів. Висота всмоктування насоса. Втрати в насосах.

## **Відцентрові насоси**

Основи теорії робочого колеса. Основне рівняння роботи (рівняння Ейлера). Характеристики відцентрових насосів. Критерії подібності насосів (питоме число обертів, коефіцієнт швидкохідності). Робота відцентрового насоса на мережу. Регулювання роботи насоса. Спільна робота насосів на одну мережу.

## **Відцентрове сопло (форсунка)**

Охолодження циркуляційної води ТЕС. Види форсунок. Теорія відцентрової форсунки. Основні положення, коефіцієнт

витрати відцентрової форсунки, кут розпилювання відцентрової форсунки. Регульовані відцентрові форсунки.

### Газові ежектори

Призначення та принципова схема ежектора. Основні геометричні параметри ежектора. Робочий процес і режими роботи ежектора. Розрахунок газового ежектора.

## 1 РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ НА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН ТА ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ ГІДРОСТАТИКИ

### 1.1 Фізичні властивості рідин

Вихідні дані до задач та схем подано у таблицях 1.1 – 1.10.

*Задача 1.* Коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини  $\nu$ ,  $\text{см}^2/\text{с}$  (Ст), густина  $\rho$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Визначити коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu$  при даній температурі.

*Питання:* Як зміниться в'язкість рідини при збільшенні температури?

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до задачі 1

Задача	Рідина	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\nu \cdot 10^{-4}, \text{м}^2/\text{с}$
1.1	Вода дистильована	20	998	0,0101
1.2	Спирт етиловий	20	790	0,0152
1.3	Бензин	20	720	0,0065
1.4	Дизельне паливо	20	850	0,0045
1.5	Газ	20	800	0,0270
1.6	Масило моторне	20	895	0,4000
1.7	Мазут	20	950	20,000
1.8	Нафта	20	960	0,6500

*Задача 2.* При тискові  $p_1$ , Па, об'єм води  $V_1$ . На скільки зменшиться об'єм води при збільшенні тиску в  $n$  раз. Відповідь дати у відсотках.

Таблиця 1.2 – Вихідні дані до задачі 2

Задача	$V_1, м^3$	n	Задача	$V_1, м^3$	n	Примітка
2.1	1,0	40	2.5	0,8	80	$\beta_p=4,85 \cdot 10^{-10} Па^{-1}$ у всіх варіантах
2.2	1,5	50	2.6	1,6	60	
2.3	2,0	75	2.7	2,3	90	
2.4	3,0	100	2.8	1,7	45	

*Задача 3.* У резервуар, який містить об'єм  $V_1, м^3$ , рідини густиною  $\rho_1, кг/м^3$ , додали об'єм  $V_2, м^3$ , тієї ж рідини густиною  $\rho_2, кг/м^3$ . Визначити густину суміші.

Таблиця 1.3 – Вихідні дані до задачі 3

Задача	Рідина	$V_1, м^3$	$V_2, м^3$	$\rho_1, кг/м^3$	$\rho_2, кг/м^3$
3.1	Вода дистильована	25	33	998	965
3.2	Спирт етиловий	96	18	790	750
3.3	Бензин	42	54	720	760
3.4	Дизельне паливо	56	63	850	830
3.5	Газ	90	27	800	780
3.6	Масило моторне	42	17	895	880
3.7	Мазут	66	36	950	930
3.8	Нафта	225	144	960	890

*Задача 4.* Резервуар містить об'єм  $V_1, м^3$ , рідини густиною  $\rho_1, кг/м^3$ . Який об'єм  $V_2, м^3$ , рідини густиною  $\rho_2, кг/м^3$ , треба додати, щоб отримати суміш густиною  $\rho_{см}, кг/м^3$ .

Таблиця 1.4 – Вихідні дані до задачі 4

Задача	Рідина	$V_1, м^3$	$\rho_1, кг/м^3$	$\rho_2, кг/м^3$	$\rho_{см}, кг/м^3$
4.1	Вода дистильована	20	999	988	990
4.2	Спирт етиловий	18	730	780	745
4.3	Бензин	15	690	740	710
4.4	Дизельне паливо	12	830	790	800
4.5	Газ	16	770	810	780
4.6	Масило моторне	6	890	930	900
4.7	Мазут	17	900	960	910
4.8	Нафта	33	800	860	840



*Задача 5.* Сталевий товстостінний балон об'ємом  $V_1, \text{дм}^3$ , заповнений водою при температурі  $t_1, ^\circ\text{C}$ , і щільно закритий при тискові  $p_1=10^5 \text{Па}$ .

Визначити тиск у балоні при температурі  $t_2, ^\circ\text{C}$ .

Густина води при  $t_1, ^\circ\text{C}$ ,  $\rho_1, \text{кг/м}^3$ , при  $t_2, ^\circ\text{C}$ ,  $\rho_2, \text{кг/м}^3$ . Коефіцієнт об'ємного стиснення води  $\beta_p=4,85 \cdot 10^{-10} \text{Па}^{-1}$ .

Таблиця 1.5 – Вихідні дані до задачі 5

Задача	$V_1, \text{дм}^3$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\rho_1, \text{кг/м}^3$	$\rho_2, \text{кг/м}^3$
5.1	40	20	60	998,0	983,2
5.2	50	10	70	999,7	977,8
5.3	80	30	80	995,7	971,8
5.4	65	40	90	992,2	965,3
5.5	90	25	80	997,0	971,8
5.6	75	15	50	999,7	988,1
5.7	55	18	60	998,2	983,2
5.8	85	22	70	997,8	977,8

## 1.2 Основне рівняння гідростатики. Визначення сил гідростатичного тиску на тверді стінки

*Задача 6.* Визначити сумарну силу гідростатичного тиску на кожну пласку стінку шириною  $b, \text{м}$ .

1 Задачу розв'язати графічно, визначивши величину сили і точку її прикладення (центр тиску).

2 Задача розв'язати аналітично, визначивши величину сили.

3. Порівняти результати значень сил, отриманих двома способами розв'язання.

Схеми стінок складної конфігурації наведено на рисунку 1.1.

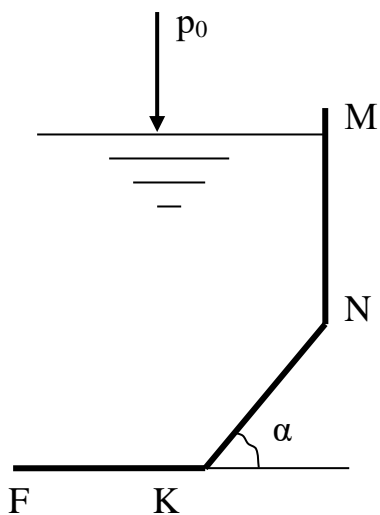


Схема 1  
b=2 м

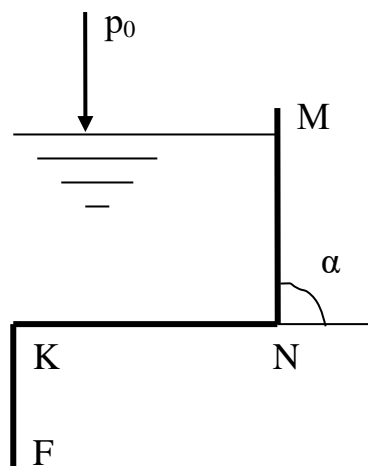


Схема 2  
b=3 м

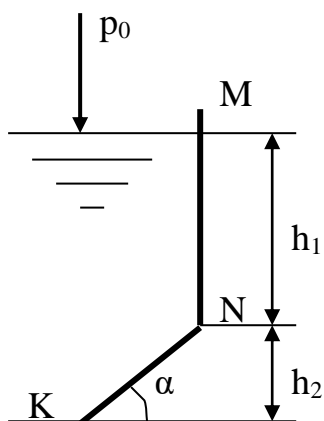
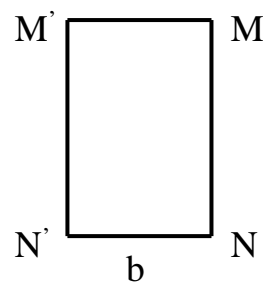


Схема 3  
b=2 м

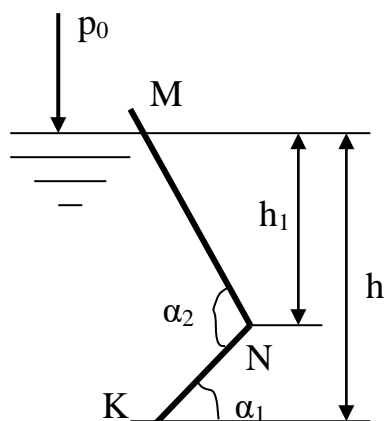


Схема 4  
b=4 м

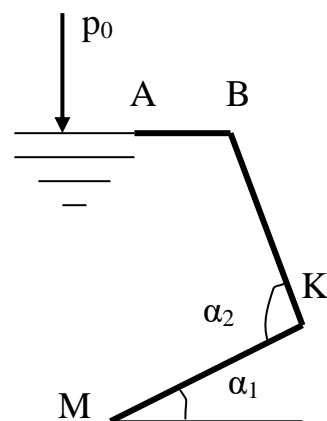


Схема 5  
b=1 м

Рисунок 1.1 – Варіанти схем стінок складної конфігурації

Таблиця 1.6 – Вихідні дані до схеми 1

Задача	$p_0, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	MN, м	NK, м	$\alpha, ^\circ$	KF, м
6.1.1	$5 \cdot 10^4$	1000	4	3	30	2
6.1.2	$2 \cdot 10^4$	800	2	2	45	3
6.1.3	$4 \cdot 10^4$	900	4	4	60	4
6.1.4	$6 \cdot 10^4$	750	3	4	120	5
6.1.5	$7 \cdot 10^4$	930	5	5	135	3
6.1.6	0	880	2	4	150	4
6.1.7	$2 \cdot 10^4$	960	3	6	60	2
6.1.8	$3 \cdot 10^4$	840	4	7	45	3

Таблиця 1.7 – Вихідні дані до схеми 2

Задача	$p_0, Па$	$\rho, кг/м^3$	$MN, м$	$NK, м$	$\alpha, ^\circ$	$KF, м$
6.2.1	$5 \cdot 10^4$	800	2,5	2	150	3,0
6.2.2	$1 \cdot 10^4$	900	3,2	3	30	4,0
6.2.3	$8 \cdot 10^4$	750	5,0	4	120	5,0
6.2.4	$6 \cdot 10^4$	950	3,0	3	60	2,5
6.2.5	$7 \cdot 10^4$	1000	4,0	2	135	3,5
6.2.6	0	1000	2,8	5	45	2,8
6.2.7	$2 \cdot 10^4$	960	3,5	3	110	3,2
6.2.8	$3 \cdot 10^4$	880	4,2	4	60	4,4

Таблиця 1.8 – Вихідні дані до схеми 3

Задача	$p_0, Па$	$\rho, кг/м^3$	$h_1, м$	$h_2, м$	$\alpha, ^\circ$
6.3.1	0	900	3,0	5,0	30
6.3.2	$4 \cdot 10^4$	800	4,0	4,0	45
6.3.3	$6 \cdot 10^4$	750	5,0	3,0	60
6.3.4	$7 \cdot 10^4$	950	4,0	5,0	120
6.3.5	$1 \cdot 10^4$	930	3,5	4,2	135
6.3.6	$3 \cdot 10^4$	880	4,8	3,5	150
6.3.7	$2 \cdot 10^4$	1000	3,8	25,0	60
6.3.8	$5 \cdot 10^4$	850	6,0	3,0	45

Таблиця 1.9 – Вихідні дані до схеми 4

Задача	$p_0, Па$	$\rho, кг/м^3$	$h_1, м$	$h, м$	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, ^\circ$
6.4.1	$3 \cdot 10^4$	950	3,0	6,0	45	90
6.4.2	0	800	2,0	5,0	30	120
6.4.3	$5 \cdot 10^4$	750	3,3	7,3	60	90
6.4.4	$6 \cdot 10^4$	900	3,5	6,5	120	210
6.4.5	$7 \cdot 10^4$	1000	4,0	8,0	135	225
6.4.6	$2 \cdot 10^4$	980	2,5	6,5	45	165
6.4.7	$4 \cdot 10^4$	860	3,0	7,0	150	240
6.4.8	$1 \cdot 10^4$	880	4,2	7,2	60	120

Таблиця 1.10 – Вихідні дані до схеми 5

Задача	$p_0, Па$	$\rho, кг/м^3$	ВК, м	КМ, м	АВ, м	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, ^\circ$
6.5.1	$5 \cdot 10^4$	780	3,0	2,0	2,5	90	120
6.5.2	$4 \cdot 10^4$	840	6,0	3,0	3,5	30	90
6.5.3	$3 \cdot 10^4$	900	3,0	5,0	1,5	135	225
6.5.4	$2 \cdot 10^4$	800	4,0	6,0	4,0	90	210
6.5.5	$6 \cdot 10^4$	750	5,0	4,0	3,0	60	90
6.5.6	$8 \cdot 10^4$	980	4,0	3,0	2,0	60	120
6.5.7	$7 \cdot 10^4$	850	6,0	4,0	2,0	30	120
6.5.8	$1 \cdot 10^4$	940	5,0	3,0	1,5	45	135

### 1.3 Приклад розрахунку сумарної сили гідростатичного тиску на плоскі пластини

Схема плоскої пластини подана на рисунку 1.2.

Визначити силу гідростатичного тиску на плоскі стінки:

- 1) графічно;
- 2) аналітично;
- 3) результати порівняти.

Дана схема стінки і вихідні дані:

- $p_0 = 5 \cdot 10^4 Па$ ;  
 $\rho = 1000 кг/м^3$ ;  
 $MN = 5 м$ ;  
 $NK = 3 м$ ;  
 $b = 2 м$ ;  
 $\alpha = 150^\circ$ .

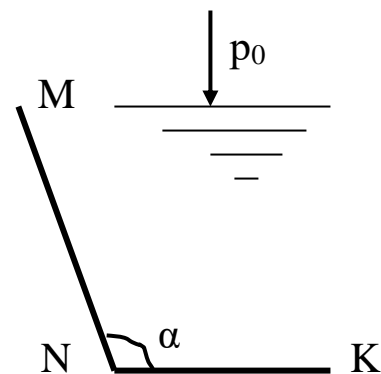


Рисунок 1.2 – Схема плоскої пластини

1. Розв'яжемо задачу графічним способом, побудувавши епюру тисків для кожної стінки згідно з основним рівнянням гідростатики:

$$p = p_0 + \rho g h. \quad (1.1)$$

Стінка MN:

$$p_M = p_0, \text{ так як } h = 0.$$

$$p_M = 5 \cdot 10^4 Па.$$

$$p_N = p_0 + \rho gh = p_0 + \rho \cdot g \cdot MN \cdot \sin 30^\circ =$$

$$= 5 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot 0,5 = 74525 \text{ Па}.$$

За цими даними будується епюра тисків, які спрямовані перпендикулярно стінці.

Сила тиску на стінку визначається добутком площі епюри тисків (трапеції MNnm) на ширину стінки  $b$  ( $MNnm \times b$ ).

$$P_{MN} = \frac{p_M + p_N}{2} \cdot MN \cdot b = \frac{50000 + 74525}{2} \cdot 5 \cdot 2 = 622625 \text{ Н} \approx 623 \text{ кН}.$$

Дана сила проходить перпендикулярно до стінки через центр ваги епюри. Отже центр тиску, точку D прикладення сили можна визначити з епюри тисків графічно. Якщо епюра являє собою трикутник (при  $p_0 = 0$ ), то її центр ваги розміщено на перетині медіан трикутника ( $2/3$  висоти трикутника). Якщо епюрою є трапеція (при  $p_0 \neq 0$ ), то для визначення її центра ваги необхідно:

- продовжити основи в протилежні сторони, тобто до верхньої додати нижню, а до нижньої – верхню;
- з'єднати отримані відрізки діагоналлю;
- провести лінію, що з'єднує середини основ трапеції.

Точка перетину діагоналі з лінією, що з'єднує середини основ, є центром ваги трапеції.

Графічний метод знаходження центра ваги трапецієподібної епюри подано на рисунку 1.3, а прямокутної – на рисунку 1.4.

Стінка НК

$$p_N = p_K = 74525 \text{ Па}.$$

Епюра – прямокутник зі сторонами  $p_N$  і НК

$$P_{NK} = p_N \cdot NK \cdot b = 74525 \cdot 3 \cdot 2 = 447150 \text{ Н} \approx 447 \text{ кН}.$$

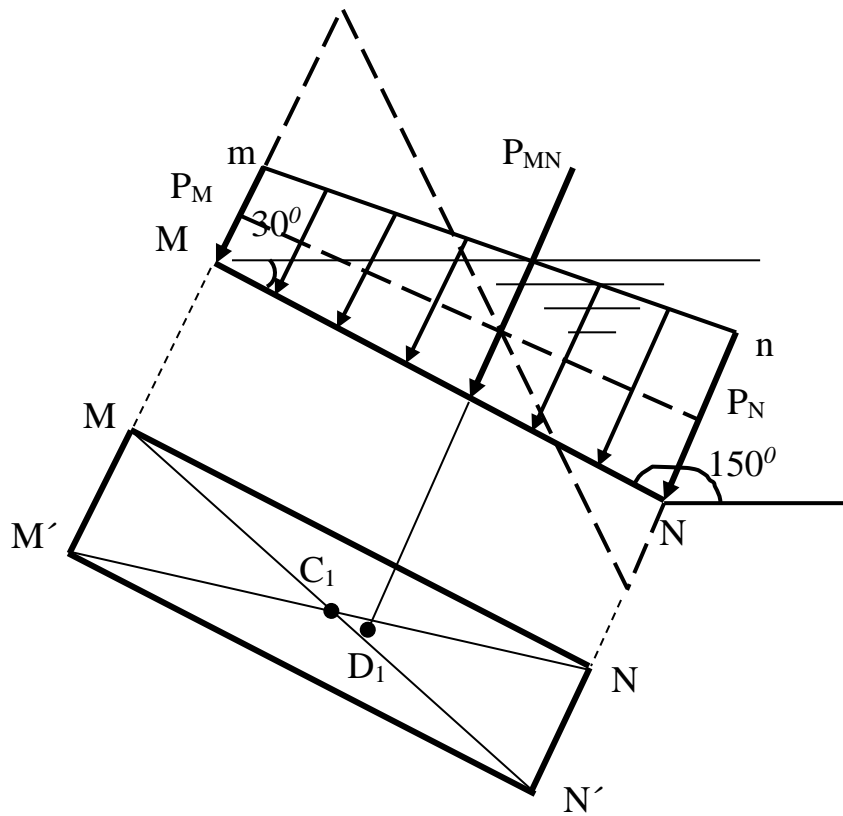


Рисунок 1.3 – Графічний метод знаходження центра ваги трапецієподібної епюри

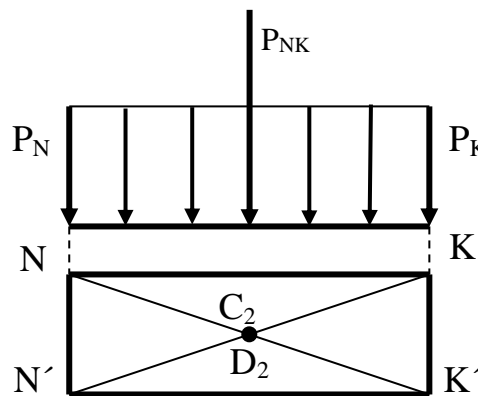


Рисунок 1.4 – Графічний метод знаходження центра ваги прямокутної епюри

*Зауваження*

Графічні розрахунки виконувати в масштабі і визначити положення центрів ваги і тиску відносно вибраної точки (наприклад,  $NC_1=$ ;  $ND_1=$ ;  $NC_2=$ ;  $ND_2=$ ).

2 Розв'яжемо задачу аналітично.

Стінка MN:

$$p = p_0 + \rho g \frac{h}{2} = p_0 + \rho g \frac{MN}{2} \sin 30^\circ =$$
$$= 5 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{5}{2} \cdot 0,5 = 62262,5 \text{ Па} .$$

$$S_{MM'NN'} = MN \cdot b = 5 \cdot 2 = 10 \text{ м}^2 .$$

$$P_{MN} = 62262,5 \cdot 10 = 622625 \text{ Н} \approx 623 \text{ кН} .$$

Стінка NK:

$$P_{NK} = p_N \cdot NK \cdot b = 74525 \cdot 3 \cdot 2 = 447150 \text{ Н} \approx 447 \text{ кН} .$$

## **2 РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВОДУ ДЛЯ ПОДАЧІ ВОДИ НА ОХОЛОДЖЕННЯ ЗАСЛІНОК ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕАКТОРА (ТР)**

### **2.1 Варіант А. Завдання та вихідні дані**

Провести розрахунок складного трубопроводу (рисунок 2.1) для подачі води до теплотехнологічної установки. Загальна схема трубопроводу включає живильну ємність з постійним рівнем води, трубопровід (О-А), що підводить воду до розгалуженої ділянки, яка складається з двох гілок: А-1, А-2. Труби сталеві зварні, помірно заіржавілі.

Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 2.1.

При цьому в кінці магістрального трубопроводу перед трійником і гілками розгалуженої ділянки встановлені вентиля з прямими затворами, які повністю відкриті.

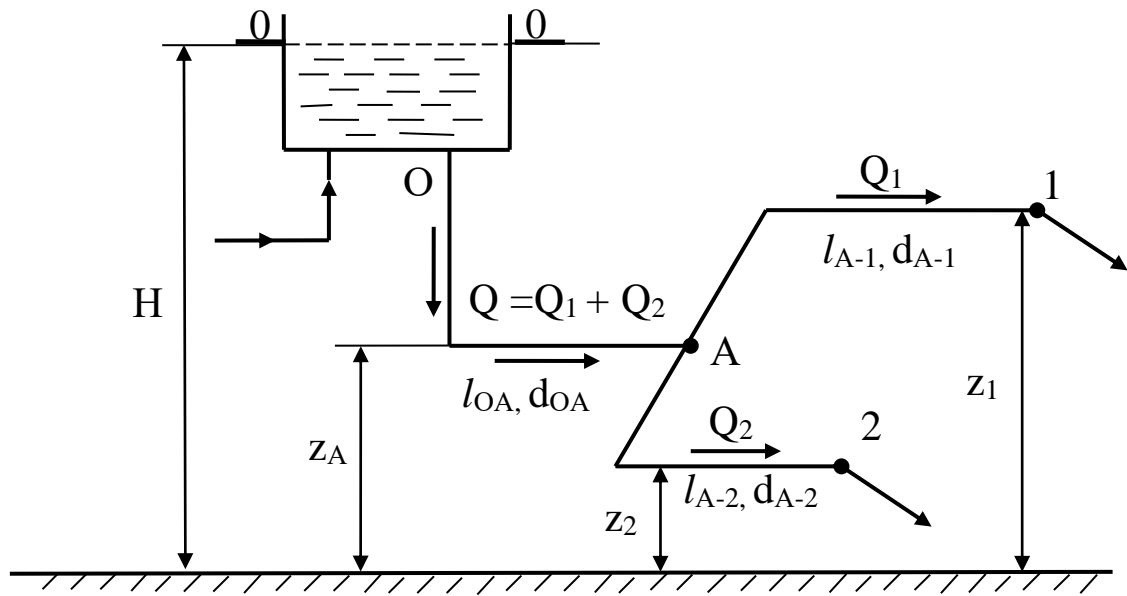


Рисунок 2.1 – Схема складного трубопроводу

Побудувати схему трубопроводу, розрахувати і побудувати його характеристики магістральної і розгалуженої ділянок, а також характеристику складного трубопроводу на аркуші формату А2. Визначити витрату рідини у другій гілці розгалуженої ділянки  $Q_1$  і потрібний напір складного трубопроводу  $H_{\text{потр}}$ .

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку складного трубопроводу

Варі-ант	$Q_1 \cdot 10^{-3},$ $м^3/с$	$l_{O-A},$ $м$	$l_{A-1},$ $м$	$l_{A-2},$ $м$	$d_{O-A},$ $мм$	$d_{A-1},$ $мм$	$d_{A-2},$ $мм$	$Z_A,$ $м$	$Z_1,$ $м$	$Z_2,$ $м$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	18	9	13	40	20	25	3	3	3
2	0,95	15	10	11	50	25	32	4	4	4
3	0,6	20	12	8	50	32	25	5	5	4
4	1,1	19	15	10	40	20	25	5	4	3
5	0,7	16	11	9	40	25	20	4	4	3
6	1,4	21	14	12	50	25	32	4	4	4
7	0,9	17	19	16	50	32	25	5	4	3
8	1,2	18	20	18	40	20	25	3	2	2
9	1,2	17	18	17	50	25	32	3	3	2
10	1,35	22	16	13	50	20	32	4	4	3
11	0,6	23	21	17	40	25	20	4	3	3



## Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	0,75	25	19	15	50	32	25	4	4	4
13	0,45	21	17	14	50	32	20	5	5	5
14	1,41	19	16	13	50	20	32	5	5	4
15	1,25	23	22	18	40	20	25	3	3	3
16	0,75	25	19	12	40	25	20	4	3	3
17	1,5	21	18	14	50	25	32	3	2	2
18	1,2	24	17	13	40	20	25	5	4	4
19	0,7	22	15	18	40	25	20	4	4	3
20	1,4	20	20	17	50	20	32	3	3	2
21	1,038	21	21	19	40	20	25	5	5	3
22	1,35	19	18	17	50	25	32	3	3	3
23	1,8	18	16	13	40	20	32	3	3	2
24	0,6	17	25	20	40	25	20	5	5	4
25	1,2	16	23	19	40	20	25	4	4	3

## 2.2 Варіант Б. Завдання та вихідні дані

Провести розрахунок складного трубопроводу (рисунок 2.1) для подачі води до ТР. Загальна схема трубопроводу включає живильну ємність з постійним рівнем води, трубопроводу (О-А), що підводить воду до розгалуженої ділянки, яка складається з двох гілок А-1, А-2. Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для розрахунку складного трубопроводу

Варі-ант	$H_{\text{потр}},$ <i>м</i>	$l_{\text{О-А}},$ <i>м</i>	$l_{\text{А-1}},$ <i>м</i>	$l_{\text{А-2}},$ <i>м</i>	$d_{\text{О-А}},$ <i>мм</i>	$d_{\text{А-1}},$ <i>мм</i>	$d_{\text{А-2}},$ <i>мм</i>	$Z_{\text{А}},$ <i>м</i>	$Z_1,$ <i>м</i>	$Z_2,$ <i>м</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	10,5	40	35	28	50	25	32	3	3	3
2	12	50	26	34	40	20	25	4	4	3
3	9,5	45	25	39	40	32	25	5	5	4
4	16	55	18	38	50	25	20	4	4	4
5	15	60	15	27	40	20	32	5	4	4
6	7	65	19	22	50	32	25	3	2	2

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	18	62	21	33	40	25	20	4	3	3
8	9	64	22	17	50	20	32	5	4	4
9	10,5	63	41	35	40	32	20	4	3	2
10	13	51	37	18	40	32	25	4	4	3
11	15	53	42	17	50	25	20	5	5	5
12	12,5	52	34	20	40	25	32	4	4	4
13	11,5	54	27	19	40	32	20	4	4	3
14	8	57	16	21	50	32	25	5	5	4
15	19	42	27	16	50	20	25	4	3	3
16	12	48	19	17	40	25	20	3	2	2
17	11	47	23	27	40	20	32	4	3	3
18	17,5	43	26	31	50	20	25	5	5	4
19	10,8	49	27	17	40	25	32	4	4	3
20	15	56	32	27	50	20	25	5	5	5
21	16	58	30	16	50	25	20	3	3	2
22	7	46	33	19	40	25	32	4	3	3
23	14,5	67	35	40	40	32	20	5	4	4
24	11	41	37	32	50	32	25	4	4	4
25	10,8	39	28	30	40	25	20	3	3	3

Труби сталеві зварні помірно заіржавілі. При цьому в кінці магістрального трубопроводу перед трійником і гілками розгалуженої ділянки встановлені вентиля з прямими затворами, які повністю відкриті.

Побудувати схему трубопроводу, розрахувати і побудувати його характеристики магістральної і розгалуженої ділянок, а також характеристику складного трубопроводу на аркуші формату А2. Визначити витрати води у гілках розгалуженої ділянки  $Q_1$  і  $Q_2$ , а також у магістральному трубопроводі  $Q$  при заданому потрібному напорі складного трубопроводу  $H_{номр}$ .

## 2.3 Загальні відомості

Трубопроводи для подачі рідини (води) до споживачів поділяються на прості і складні.

Простим трубопроводом називають трубопровід, по якому рідина транспортується від живильника до споживача без проміжних відгалужень.

Складний трубопровід має розгалужені ділянки, які складаються із декількох труб (гілок), між якими розподіляється рідина, що подається у трубопровід з живильника.

Перерізи трубопроводу, у яких змикаються декілька гілок, мають назву вузли.

При розрахунку як простих, так і складних трубопроводів можна виділити три основні групи задач:

1) визначення розмірів труб за заданими в них об'ємними витратами і перепадами напорів;

2) визначення об'ємних витрат у трубах заданих розмірів за відомими перепадами напорів;

3) визначення перепадів напорів у живильниках за заданими об'ємними витратами в трубах заданих розмірів.

Останні дві групи задач являють собою перевірні розрахунки існуючого трубопроводу, що пояснюють умови його роботи при різних значеннях гідравлічних параметрів.

Для розв'язання сформульованих задач складається система рівнянь, які встановлюють функціональні залежності між параметрами, що характеризують потоки рідини у трубах, тобто між розмірами труб, об'ємними витратами і напорами. Ця система складається із рівнянь балансу напорів (рівнянь Бернуллі) для кожної гілки трубопроводу.

Для заданого складного трубопроводу (рисунок 2.1):

- рівняння балансу об'ємних витрат має вигляд

$$Q = Q_1 + Q_2; \quad (2.1)$$

- рівняння Бернуллі підвідного (магістрального) трубопроводу до розгалуженої ділянки:

$$H_{O-A} = z_A + \frac{p_A}{\rho \cdot g} + \frac{8 \cdot Q^2}{\pi \cdot d_A^4 \cdot g} + K_{O-A} \cdot Q^2, \quad (2.2)$$

де  $H_{O-A}$  – повний напір потоку, м;

$z_A$  – геометрична висота трубопроводу  $O-A$ , м;

$p_A$  – тиск рідини у трубопроводі, Па;

$Q$  – витрата рідини, м<sup>3</sup>/с;

$d_A$  – діаметр трубопроводу, м;

$K_{O-A}$  – коефіцієнт опору трубопроводу  $O-A$ ;

- рівняння Бернуллі гілок розгалуженої ділянки:

$$H_{A-1} = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{8 \cdot Q_1^2}{\pi \cdot d_1^4 \cdot g} + K_1 \cdot Q_1^2;$$

$$H_{A-2} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{8 \cdot Q_2^2}{\pi \cdot d_2^4 \cdot g} + K_2 \cdot Q_2^2,$$

де

$$K_{O-A} = \left( \lambda_{O-A} \cdot \frac{l_{O-A}}{d_{O-A}} + \sum_{O-A} \xi_i \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 \cdot d_{O-A}^4 \cdot g}, \quad (2.3)$$

де  $\lambda_{O-A}$  – коефіцієнт втрат на тертя;

$\xi_i$  – коефіцієнт місцевого опору.

$$K_1 = \left( \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \sum_1 \xi_i \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 \cdot d_1^4 \cdot g};$$

$$K_2 = \left( \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{d_2} + \sum_2 \xi_i \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 \cdot d_2^4 \cdot g}.$$

Підсумовування втрат напорів у послідовно розташованих ділянках складного трубопроводу (підвідна магістральна труба, розгалужена ділянка) призводить до співвідношення

$$H_0 = H_{O-A} + H_{A-1} \text{ або } H_0 = H_{O-A} + H_{A-2},$$

яке виражає баланс напорів у складному трубопроводі з розгалуженими гілками.

## 2.4 Методичні рекомендації до розрахунку складного трубопроводу для подачі води на охолодження заслінок теплотехнологічного реактора

Спочатку потрібно навести вихідні дані розрахункового трубопроводу згідно з завданням і побудувати його схему (рисунок 2.1).

Для всіх труб (магістральної і розгалуженої гілок) системи будуться характеристики.

Для побудови характеристик потрібно задатися послідовністю значень об'ємної витрати  $Q_i$ , ( $i=1, 2 \dots, n$ ).

Визначити режим руху для кожної витрати, користуючись числом Рейнольдса

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d \cdot \nu}, \quad (2.4)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, приймаємо для визначення  $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Якщо  $Re < Re_{кр}$  ( $Re_{кр} = 2300$ ), то рух у трубопроводі ламінарний і

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (2.5)$$

Якщо  $Re > Re_{кр}$ , то рух у трубопроводі турбулентний

$$\lambda = 0,11 \cdot \left[ \frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right]^{0,25}, \quad (2.6)$$

де  $\Delta$  – значення абсолютної шорсткості, визначається з додатка А.

Згідно з рухом (води) визначаємо коефіцієнт втрат на тертя  $\lambda$  для ділянок О-А, А-1 і А-2 (магістральної підвідної і розгалужених гілок) для кожної об'ємної витрати  $Q_i$ .

Визначаємо  $K_i$ , що дорівнює

$$K_i = \left( \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} + \sum_i \xi_i \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 \cdot d_i^4 \cdot g}. \quad (2.7)$$

З рівняння Бернуллі для підвідної і розгалужених ділянок коефіцієнти місцевого опору  $\xi_i$  (визначаються з додатка Б):

- при повороті на  $90^0$ ;
- при встановленні вентиля з прямими затворами;
- при встановленні трійника.

Оскільки складні трубопроводи є довгими, у рівняннях Бернуллі можна знехтувати швидкісними напорами, приймаючи повний напір потоку в кожному розрахунковому перерізі трубопроводу практично таким, що дорівнює гідростатичному, і виражати його висотою п'єзометричного рівня над прийнятою площиною порівняння. Тиск рідини, що витікає з розгалужених гілок, дорівнює атмосферному тиску.

У такому випадку потрібний напір буде визначатися з рівняння

$$H_i = z_i + K_i \cdot Q_i^2. \quad (2.8)$$

На підставі розрахунків будуюмо характеристики розгалужених гілок, тобто  $H_i = f(Q_i)$ . Потім підсумовуємо їх шляхом складання витрат при однакових напорах. Отриману в результаті такого підсумовування характеристику розгалуженої ділянки можна розглядати як характеристику еквівалентної труби, яка заміняє розгалужені гілки.

Характеристику розгалуженої ділянки потім треба підсумувати з характеристикою магістральної (підвідної) ділянки шляхом складання напорів при однакових витратах. Отримана в результаті крива є характеристикою складного трубопроводу.

Побудовані характеристики (рисунок 2.2) даватимуть змогу за заданою витратою в одній із гілок визначити потрібний напір складного трубопроводу або за заданим напором визначити витрати у всіх трубах.

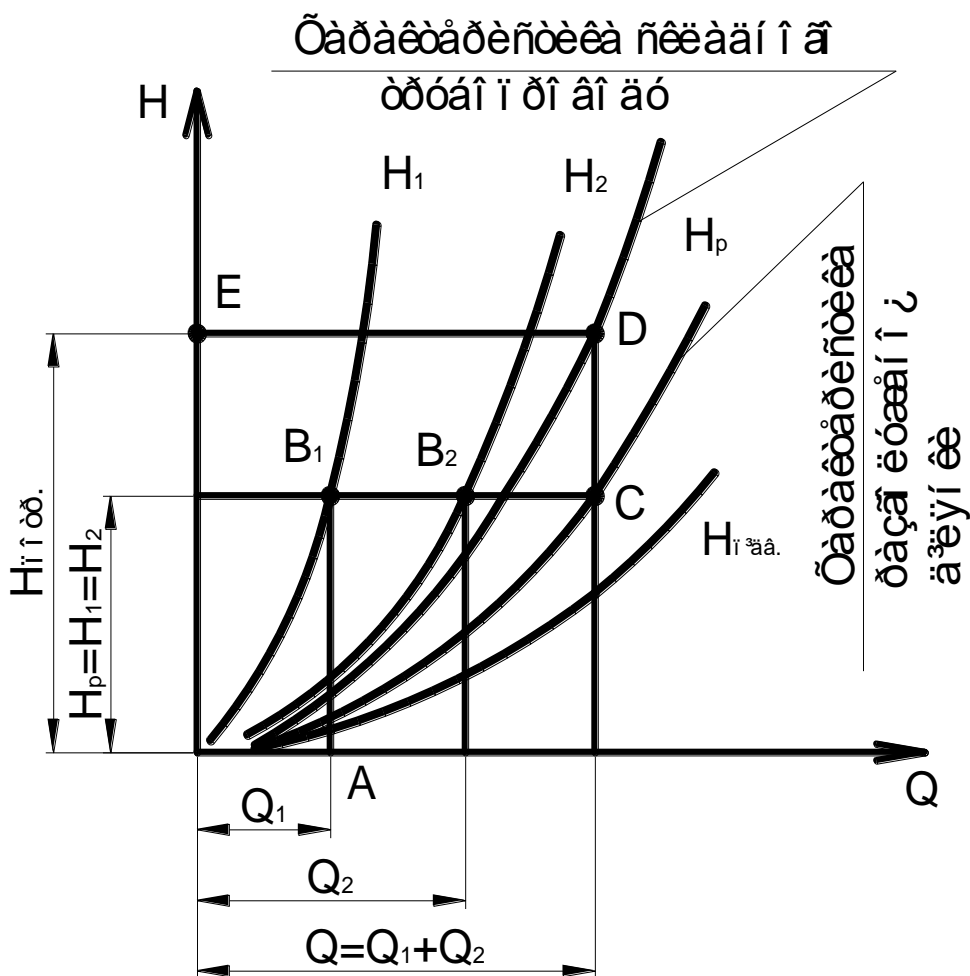


Рисунок 2.2 – Побудова характеристики складного трубопроводу

Для розв’язання першої задачі потрібно відому витрату, наприклад  $Q_1$ , відкласти на осі витрат і через отриману точку А провести вертикаль до перетину з характеристикою першої гілки. Отримана при цьому ордината точки  $B_1$  виражає втрати напору в розгалужених гілках:

$$H_{втр1} = H_{втр2} = H_{втр}.$$

Якщо через точку  $B_1$  провести горизонталь до перетину з характеристикою розгалуженої ділянки, то отримаємо точку С, абсциса якої виражає сумарну витрату  $Q = Q_1 + Q_2$ . Якщо провести через точку С вертикаль до перетину з характеристикою складного трубопроводу, то отримаємо точку D, ордината якої виражає шуканий напір  $H$ .

Для вирішення другого питання потрібно на осі ординат відкласти відомий напір  $H$  і через отриману точку  $E$  провести горизонталь до перетину з характеристикою складного трубопроводу. Абсциса отриманої при цьому точки  $D$  виражає сумарну витрату.

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Якщо через точку  $D$  провести вертикаль до перетину з характеристикою розгалуженої ділянки, то ордината отриманої при цьому точки  $C$  буде являти собою втрати напору в кожній з розгалужених гілок. Якщо через точку  $C$  провести горизонталь до перетину з характеристиками гілок, то отримаємо точки  $B_2$  і  $B_1$ , абсциси яких є витратами у гілках розгалуженого трубопроводу.

## 2.5 Приклад розрахунку трубопроводу для подачі води до теплотехнічного реактора

**Завдання.** Провести розрахунок складного трубопроводу для подачі води до теплотехнічної установки, наведеної на рисунку 2.1. Вихідні дані до розрахунку подано у таблиці 2.3.

Схема трубопроводу включає живильну ємкість з постійним рівнем води, трубопровід ( $O-A$ ), що підводить воду до розгалуженої ділянки, яка складається з двох гілок  $A-1$  і  $A-2$ . Труби використовуються сталеві зварні помірно заіржавілі. У кінці магістрального трубопроводу (підвідного)  $O-A$  перед трійником і в кінці гілок розгалуженої ділянки встановлені вентилі з прямими затворами, які повністю відкриті.

Таблиця 2.3 – Вихідні дані для розрахунку трубопроводу

$Q_1,$ $м^3/с$	$l_{O-A},$ $м$	$l_{A-1},$ $м$	$l_{A-2},$ $м$	$d_{O-A},$ $мм$	$d_{A-1},$ $мм$	$d_{A-2},$ $мм$	$z_A,$ $м$	$z_1,$ $м$	$z_2,$ $м$
$0,6 \cdot 10^{-3}$	40	20	15	50	25	32	3	3	3

Користуючись графічним методом розрахунку, потрібно визначити витрату рідини у другій гілці розгалуженої ділянки  $Q_2$ , витрату води у магістральному трубопроводі  $Q$  і потрібний напір  $H$  складного трубопроводу.



Побудувати схему трубопроводу і його характеристики на аркуші формату А2.

Для розв'язання задачі для кожної труби (підвідної  $O-A$ , розгалуженої ділянки гілок  $A-1$  і  $A-2$ ) системи згідно з методичними рекомендаціями розраховуємо потрібний напір  $H_i$  для прийнятих послідовних значень об'ємних витрат  $Q_i$  і будуємо характеристики трубопроводів.

При розрахунку трубопроводів знаходимо  $Re$ ,  $\lambda$ ,  $K$ ,  $H$ , коефіцієнти місцевого опору  $\xi_i$  визначаємо з додатка Б, а шорсткість труб – з додатка А.

Для трубопроводу  $O-A$  розрахункові дані та результати розрахунків наведені в таблиці 2.4, для трубопроводів  $A-1$  та  $A-2$  – у таблицях 2.5 та 2.6 відповідно.

Таблиця 2.4 – Результати розрахунків магістрального трубопроводу  $O-A$

Магістральний трубопровід				
$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$Re_{O-A}$	$\lambda_{O-A}$	$K_{O-A}$	$H_{O-A}, \text{м}$
$0,3 \cdot 10^{-3}$	7643	0,041	$4,924 \cdot 10^5$	3,04
$0,6 \cdot 10^{-3}$	15287	0,038	$4,607 \cdot 10^5$	3,17
$0,9 \cdot 10^{-3}$	22930	0,037	$4,501 \cdot 10^5$	3,36
$1,2 \cdot 10^{-3}$	30573	0,0366	$4,459 \cdot 10^5$	3,64
$1,5 \cdot 10^{-3}$	38217	0,0362	$4,417 \cdot 10^5$	3,99
$1,8 \cdot 10^{-3}$	45860	0,0360	$4,396 \cdot 10^5$	4,42
$2,1 \cdot 10^{-3}$	53503	0,0358	$4,374 \cdot 10^5$	4,93

Таблиця 2.5 – Результати розрахунків розгалуженої ділянки трубопроводу  $A-1$

Гілка розгалуженого трубопроводу $A-1$				
$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$Re_{A-1}$	$\lambda_{A-1}$	$K_{A-1}$	$H_{A-1}, \text{м}$
$0,3 \cdot 10^{-3}$	15287	0,041	$8,65 \cdot 10^6$	3,78
$0,6 \cdot 10^{-3}$	30573	0,038	$8,48 \cdot 10^6$	6,05
$0,9 \cdot 10^{-3}$	45860	0,037	$8,412 \cdot 10^6$	9,81
$1,2 \cdot 10^{-3}$	61146	0,0366	$8,378 \cdot 10^6$	15,06
$1,5 \cdot 10^{-3}$	76433	0,0362	$8,361 \cdot 10^6$	21,81
$1,8 \cdot 10^{-3}$	91720	0,0360	$8,344 \cdot 10^6$	30,03
$2,1 \cdot 10^{-3}$	107006	0,0358	$8,343 \cdot 10^6$	39,79

Таблиця 2.6 – Результати розрахунків розгалуженої ділянки трубопроводу А-2

Гілка розгалуженого трубопроводу А-2				
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\text{Re}_{\text{А-2}}$	$\lambda_{\text{А-2}}$	$K_{\text{А-2}}$	$H_{\text{А-2}}, \text{ м}$
$0,3 \cdot 10^{-3}$	11943	0,0420	$20,22 \cdot 10^5$	3,18
$0,6 \cdot 10^{-3}$	23885	0,0405	$19,66 \cdot 10^5$	3,71
$0,9 \cdot 10^{-3}$	35828	0,0400	$19,48 \cdot 10^5$	4,58
$1,2 \cdot 10^{-3}$	47771	0,0397	$19,37 \cdot 10^5$	5,79
$1,5 \cdot 10^{-3}$	59713	0,0396	$19,33 \cdot 10^5$	7,35
$1,8 \cdot 10^{-3}$	71656	0,0395	$19,29 \cdot 10^5$	9,25
$2,1 \cdot 10^{-3}$	83599	0,0394	$19,26 \cdot 10^5$	11,49

На підставі наведених розрахунків будуємо характеристики розгалужених гілок  $H_1, H_2$  і магістральної ділянки  $H_{\text{відв.}}$  (рисунок 2.3).

Підсумовуючи характеристики розгалужених віток  $H_1, H_2$  шляхом складання витрат при однакових напорах, будуємо характеристику розгалуженої ділянки  $H_p$ .

Характеристику складного трубопроводу будуємо шляхом складання напорів  $H_{\text{відв.}}$  і  $H_p$ .

На підставі побудованої схеми графічного розрахунку складного трубопроводу при заданій витраті  $Q_1 = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  у гілці (А-1) визначаємо, що витрата  $Q_2$  у гілці А-2 буде дорівнювати  $Q_2 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  у магістральному трубопроводі

$$Q = Q_1 + Q_2 = (0,6 + 1,2) \cdot 10^{-3} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Потрібний напір складного трубопроводу буде дорівнювати  $H = 7,5 \text{ м}$  (рисунок 2.3).



## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РГР

Завдання виконується на аркушах формату А4.

Задача повинна бути сформульована, тобто текст задачі переписаний, наведено числові значення заданих величин (Дано:) і позначено шукані величини, показано вихідне креслення.

Розв'язання необхідно виконувати з поясненнями і посиланнями на закони та формули, що використовувались.

Числові результати подавати в розмірності системи СІ.

Графічні розв'язання виконувати акуратно на міліметровому папері з наданням необхідних пояснень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 503 с.

2 Альтшуль А.Д., Животновский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.

3 Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Гидрогазодинамика: Учеб. пособие для теплотехнических специальностей вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 304 с.

4 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.

5 Аверин С.И., Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф. и др. Расчеты нагревательных печей / Под ред. Н.Ю.Тайца. – 2-е изд., испр. и доп. – К.: Техника, 1969. – 540 с.

6 Ярхо А.А., Счастный Е.Е., Лялюк В.М. Гидрогазодинамика. Учеб. пособие. – Харьков: УкрГАЗТ, 2007. – Ч.1. – 237 с.

7 Ярхо А.А., Счастный Е.Е., Лялюк В.М. Гидрогазодинамика. Учеб. пособие. – Харьков: УкрГАЗТ, 2009. – Ч. 2. – 130 с.

## ДОДАТОК А

### Значення абсолютної шорсткості $\Delta$ для труб із різних матеріалів


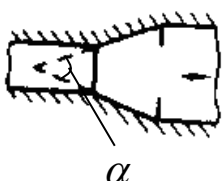
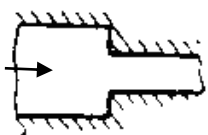

Таблиця А.1

Матеріал і вид труби	Стан труби	$\Delta$ , мм
Безшовні сталеві	Нові та чисті, старанно укладені	$\frac{0,01-0,02}{0,014}$
	Після декількох років експлуатації	$\frac{0,15-0,3}{0,02}$
Сталеві зварні	Нові і чисті	$\frac{0,03-0,10}{0,05}$
	З незначною корозією після чищення	$\frac{0,10-0,20}{0,15}$
	Помірно заіржавілі	$\frac{0,30-0,70}{0,50}$
	Старі заіржавілі	$\frac{0,80-1,5}{1,0}$
	Сильно заржавілі або з великими відкладеннями	$\frac{2,0-4,0}{3,0}$
Клепані сталеві	Легко клепані	0,5–3,0
	Сильно клепані	до 9,0
Оцинковані залізні	Нові і чисті	$\frac{0,10-0,20}{0,15}$
	Після декількох років експлуатації	$\frac{0,40-0,70}{0,50}$
Чавунні	Нові без покриття	$\frac{0,20-0,50}{0,30}$
	Ті, що були у використанні	$\frac{0,5-1,5}{1,10}$
	Дуже старі	До 3,0
Цегляні	Покриті глазур'ю	0,45–3,0
	Штукатурка цементним розчином	0,45–3,0
	Кладка на цементному розчині	0,8–6,0
Примітка – У чисельнику показані межі вимірювання абсолютної шорсткості $\Delta$ , у знаменнику – рекомендоване середнє значення		

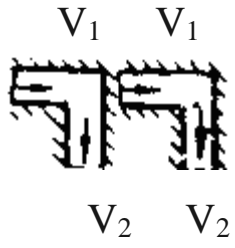
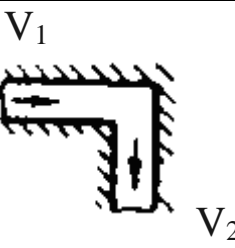
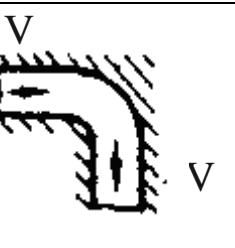
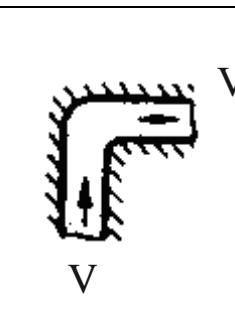
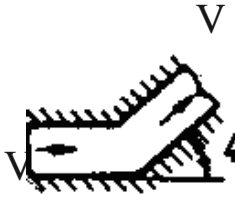
## ДОДАТОК Б

### Коефіцієнти місцевих опорів

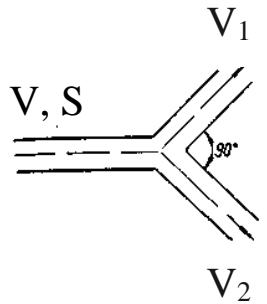

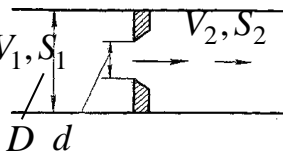
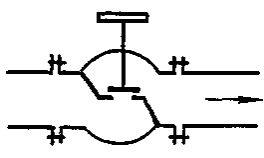
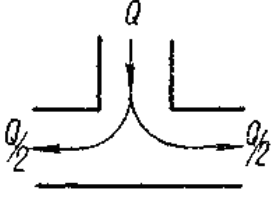
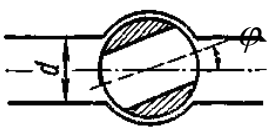
Таблиця Б.1

Місця опорів	Ескіз	$\xi$	До якої швидкості	Примітка																												
1	2	3	4	5																												
Раптове розширення	$S_1 V_1 \quad S_2$ 	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><math>\frac{S_1}{S_2}</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\xi</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\frac{S_1}{S_2}</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\xi</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,0</td> <td style="text-align: center;">1,0</td> <td style="text-align: center;">0,6</td> <td style="text-align: center;">0,16</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,1</td> <td style="text-align: center;">0,81</td> <td style="text-align: center;">0,7</td> <td style="text-align: center;">0,09</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,2</td> <td style="text-align: center;">0,64</td> <td style="text-align: center;">0,8</td> <td style="text-align: center;">0,04</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,3</td> <td style="text-align: center;">0,49</td> <td style="text-align: center;">0,9</td> <td style="text-align: center;">0,01</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,4</td> <td style="text-align: center;">0,36</td> <td style="text-align: center;">1,0</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,5</td> <td style="text-align: center;">0,25</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	$\frac{S_1}{S_2}$	$\xi$	$\frac{S_1}{S_2}$	$\xi$	0,0	1,0	0,6	0,16	0,1	0,81	0,7	0,09	0,2	0,64	0,8	0,04	0,3	0,49	0,9	0,01	0,4	0,36	1,0	0,00	0,5	0,25			$V_1$	$\xi = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$
		$\frac{S_1}{S_2}$	$\xi$	$\frac{S_1}{S_2}$	$\xi$																											
		0,0	1,0	0,6	0,16																											
		0,1	0,81	0,7	0,09																											
		0,2	0,64	0,8	0,04																											
		0,3	0,49	0,9	0,01																											
		0,4	0,36	1,0	0,00																											
0,5	0,25																															
Поступове розширення	$S_1 V_1 \quad S_2$  $\alpha$	$\xi \cdot \sin \alpha$		$V_1$	Значення $\xi$ береться із даних вище																											
		Раптове звуження	$S_1 V_1 \quad S_2 V_2$ 			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><math>\frac{S_2}{S_1}</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\xi</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\frac{S_2}{S_1}</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\xi</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,1</td> <td style="text-align: center;">0,50</td> <td style="text-align: center;">0,6</td> <td style="text-align: center;">0,26</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,2</td> <td style="text-align: center;">0,46</td> <td style="text-align: center;">0,7</td> <td style="text-align: center;">0,20</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,3</td> <td style="text-align: center;">0,42</td> <td style="text-align: center;">0,8</td> <td style="text-align: center;">0,13</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,4</td> <td style="text-align: center;">0,37</td> <td style="text-align: center;">0,9</td> <td style="text-align: center;">0,06</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,5</td> <td style="text-align: center;">0,32</td> <td style="text-align: center;">1,0</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> </tr> </table>	$\frac{S_2}{S_1}$	$\xi$	$\frac{S_2}{S_1}$	$\xi$	0,1	0,50	0,6	0,26	0,2	0,46	0,7	0,20	0,3	0,42	0,8	0,13	0,4	0,37	0,9	0,06	0,5	0,32	1,0	0,00	$V_1$	-
						$\frac{S_2}{S_1}$	$\xi$	$\frac{S_2}{S_1}$	$\xi$																							
						0,1	0,50	0,6	0,26																							
						0,2	0,46	0,7	0,20																							
						0,3	0,42	0,8	0,13																							
0,4	0,37	0,9	0,06																													
0,5	0,32	1,0	0,00																													
Поступове звуження	$V_1$ 	0,08		$V_1$	-																											

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5
Різкий поворот на $90^0$	 <p><math>V_1</math> <math>V_1</math> <math>V_2</math> <math>V_2</math> <math>V_1=V_2=V</math> <math>V_1&lt;V_2</math></p>	1,5 2,0	$V$ $V_1$	Для каналів квадратного і круглого перерізів; для каналів, що мають форму щілини
Різкий поворот на $90^0$	 <p><math>V_1</math> <math>V_2</math> <math>V_1 &gt; V_2</math></p>	1 0,5	$V_1$ $V_2$	На лобовий удар; на зміну напрямку
Поворот на $90^0$ із закругленням	 <p><math>V</math> <math>V</math></p>	1	$V$	-
Поворот на $90^0$ із напрямними Прандтля	 <p><math>V</math> <math>V</math></p>	0,35	$V$	-
Різкий поворот на $45^0$	 <p><math>V</math> <math>V</math> <math>45^0</math></p>	0,5	$V$	-

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5																												
Розгалуження в залежності від кута $\alpha$ при $V=V_1=V_2$		<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\alpha</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>90^0</math></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><math>180^0</math></td> <td>1,5</td> </tr> </tbody> </table>	$\alpha$	$\xi$	$90^0$	1	$180^0$	1,5	V	-																						
$\alpha$	$\xi$																															
$90^0$	1																															
$180^0$	1,5																															
Регулююча дросельна заслінка		<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\varphi</math></th> <th><math>\xi</math></th> <th><math>\varphi</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>0,24</td> <td>40</td> <td>10,8</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>0,52</td> <td>50</td> <td>32,6</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>0,9</td> <td>60</td> <td>118</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>1,54</td> <td>65</td> <td>256</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>2,51</td> <td>70</td> <td>761</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>3,91</td> <td>90</td> <td><math>\infty</math></td> </tr> </tbody> </table>	$\varphi$	$\xi$	$\varphi$	$\xi$	5	0,24	40	10,8	10	0,52	50	32,6	15	0,9	60	118	20	1,54	65	256	25	2,51	70	761	30	3,91	90	$\infty$	-	-
$\varphi$	$\xi$	$\varphi$	$\xi$																													
5	0,24	40	10,8																													
10	0,52	50	32,6																													
15	0,9	60	118																													
20	1,54	65	256																													
25	2,51	70	761																													
30	3,91	90	$\infty$																													
Діафрагма з гострою кромкою		<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\frac{D}{d}</math></th> <th><math>\xi</math></th> <th><math>\frac{D}{d}</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,0</td> <td>0</td> <td>2,5</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>1,25</td> <td>2,5</td> <td>3,0</td> <td>195</td> </tr> <tr> <td>1,5</td> <td>7,0</td> <td>4,0</td> <td>225</td> </tr> <tr> <td>1,75</td> <td>15,0</td> <td>5,0</td> <td>1560</td> </tr> <tr> <td>2,0</td> <td>30,0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	$\frac{D}{d}$	$\xi$	$\frac{D}{d}$	$\xi$	1,0	0	2,5	90	1,25	2,5	3,0	195	1,5	7,0	4,0	225	1,75	15,0	5,0	1560	2,0	30,0			-	-				
$\frac{D}{d}$	$\xi$	$\frac{D}{d}$	$\xi$																													
1,0	0	2,5	90																													
1,25	2,5	3,0	195																													
1,5	7,0	4,0	225																													
1,75	15,0	5,0	1560																													
2,0	30,0																															
Вентиль з прямим затвором		$\xi = 3 \dots 5,5$	-	При повному відкритті																												
Трійник		$\xi = 1 \dots 1,5$	-	Зі з'єднанням під прямим кутом																												
Кран конусний		<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\varphi</math></th> <th><math>\xi</math></th> <th><math>\varphi</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>0,05</td> <td>35</td> <td>9,68</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>0,29</td> <td>40</td> <td>17,3</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>0,75</td> <td>45</td> <td>31,2</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>1,56</td> <td>50</td> <td>52,6</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>3,10</td> <td>55</td> <td>106</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>5,47</td> <td>65</td> <td>486</td> </tr> </tbody> </table>	$\varphi$	$\xi$	$\varphi$	$\xi$	5	0,05	35	9,68	10	0,29	40	17,3	15	0,75	45	31,2	20	1,56	50	52,6	25	3,10	55	106	30	5,47	65	486	-	Пробковий або поворотний
$\varphi$	$\xi$	$\varphi$	$\xi$																													
5	0,05	35	9,68																													
10	0,29	40	17,3																													
15	0,75	45	31,2																													
20	1,56	50	52,6																													
25	3,10	55	106																													
30	5,47	65	486																													





