

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичних занять, організації самостійної роботи
і виконання розрахунково-графічної роботи

з навчальної дисципліни

**«СПЕЦПИТАННЯ АЕРОДИНАМІКИ І ГІДРАВЛІКИ СИСТЕМ
ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ І ВЕНТИЛЯЦІЇ»**

*(для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання
спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія,
за освітньою програмою «Теплогазопостачання і вентиляція»)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2021**

Методичні рекомендації до проведення практичних занять, організації самостійної роботи і виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Спецпитання аеродинаміки і гідравліки систем теплогазопостачання і вентиляції» (для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія за освітньою програмою «Цивільна інженерія») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. В Ромашко, О. М. Хренов, В. А. Міланко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 29 с.

Укладачі: канд. техн. наук О. В. Ромашко,
канд. техн. наук О. М. Хренов,
асист. В. А. Міланко

Рецензент

Р. Б. Ткаченко, кандидат технічних наук, доцент кафедри енергоефективних інженерингових систем Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою енергоефективних інженерингових систем,
протокол № 2 від 26.02.2021.*

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Розрахунково-графічна робота «Розрахунок кільцевої мережі середнього тиску.....	5
1.1 Розрахунок нормального та аварійного режимів роботи мережі, визначення діаметру трубопроводу.....	5
1.2 Розрахунок гідравлічного режиму мережі.....	7
2 Розв’язання задач.....	11
3. Варіанти задач для самоконтролю.....	21
4. Контрольні питання для самостійної роботи.....	25
Список використаних та рекомендованих джерел.....	28

ВСТУП

Гідравліка є прикладною інженерною наукою про рівновагу та рух рідин, що базується в основному на експериментальних даних і використовує наближені методи розрахунку. Тут використовуються емпіричні і напівемпіричні залежності (засновані на експериментальних даних), середні величини та інші допущення, що спрощують розглянуту проблему з метою оцінки головних характеристик досліджуваного явища.

Знання законів гідравліки є однією з необхідних умов інтенсивного розвитку промисловості й підвищення її ефективності, пов'язаної з розробкою нових технологій, зниженням матеріальних і енергетичних витрат на виробництво продукції, підвищенням її якості та забезпеченням екологічної безпеки.

Науковою базою цієї дисципліни є основні закони природи, такі як перший закон термодинаміки, закони збереження маси і кількості руху (імпульсу). У ній використовуються найважливіші теоретичні положення фізики, термодинаміки, хімії, математики та інших дисциплін.

Однією з головних складових при теоретичному аналізі та практичних розрахунках гідравлічних і аеродинамічних процесів, що протікають в системах теплогазопостачання, вентиляції, кондиціювання повітря, опалювання, гарячого водопостачання, є розділи теоретичної механіки рідини і газу, що присвячені вивченню специфічних задач гідравліки, виникаючих при функціонуванні санітарно-технічних систем.

Метою вивчення дисципліни є надбання теоретичних та практичних навичок аналізу та кількісного розрахунку гідравлічних показників руху рідини і газу в трубопровідних системах теплогазопостачання і вентиляції, засвоєння методик розрахунку та умінь з конструювання указаних систем і окремих її вузлів, моделювання процесів руху теплоносіїв та їх експериментальне дослідження.

1 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

«РОЗРАХУНОК КІЛЬЦЕВОЇ МЕРЕЖІ СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ»

Розрахунково-графічна робота складається з декількох етапів розрахунку.

Метою розрахунку кільцевої мережі середнього тиску є:

1. Забезпечити безперебійне споживання газу в заданому тиску.
2. Діаметр повинен забезпечувати на вході у споживача тиск не нижче

допустимого.

3. Мережа в діапазоні тисків: макс значення – 700 000 і мін – 400 000 Па – робочий діапазон тисків.

Кільцева мережа з точки зору економічних показників повинна бути тупикової або деревовидної, проте кільцева мережа дає можливість безперебійної роботи мережі, і проектувати мережу необхідно на максимальний режим і максимальне газоспоживання за умови аварії поряд з точкою входу.

Діаметр визначається із залежності, яка описує умови протікання газу по ділянці трубопроводу.

Режимні параметри: витрата, втрати напору.

Структурні параметри: довжина і діаметр.

Для кожної категорії мереж існує своя залежність.

1.1 Розрахунок нормального та аварійного режимів роботи мережі, визначення діаметру трубопроводу

Спочатку знаходимо розрахункові довжини і витрати, множачи довжини і витрати, які дані в завданні, на відповідні коефіцієнти. Результати розрахунків зводимо в таблиці 1.1 і 1.2.

Таблиця 1.1 – Розрахункові довжини

Номер ділянки	Коефіцієнт	$L_{\text{баз.}}$	$L_{\text{розр.}}$
1–2			
2–3			
3–4			
4–5			
5–6			
6–7			
7–1			
			Σ

Таблиця 1.2 – Розрахункові витрати

Номер вузла	Коефіцієнт	$Q_{\text{баз.}}$	$Q_{\text{розр.}}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
			Σ

Знаходимо розрахункові довжини і шляхові витрати через вузлові витрати для несприятливих умов (тобто при аварії). Результати розрахунків зводимо в таблицю 1.3 і 1.4.

Таблиця 1.3 – Аварія на ділянці 7-1

Номер вузла	$L_{\text{розр.}}$	$Q_{\text{шл.}}$
1–2		
2–3		
3–4		
4–5		
5–6		
6–7		
7–1		
		Σ

Таблиця 1.4 – Аварія на ділянці 2-1

Номер вузла	$L_{\text{розр.}}$	$Q_{\text{шл.}}$
1–2		
2–3		
3–4		
4–5		
5–6		
6–7		
7–1		
		Σ

Далі розраховуємо діаметри трубопроводів при нормальній роботі, а також при аваріях на ділянках 1–2 і 7–1 за формулою:

$$d = \sqrt[5]{\frac{1.62 \cdot \rho_0 \cdot P_0 \cdot \lambda \cdot L \cdot Q^2}{P_n^2 - P_k^2}}, \quad (1.1)$$

де P_0 – 101 325 Па – атмосферний тиск;

P_n – початковий тиск, 700 кПа;

P_k – кінцевий тиск, 400 кПа;

ρ_0 – 0.73 м³ / кг – щільність природного газу;

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя, залежить від умов протікання газу по трубопроводу (або режиму): турбулентний, ламінарний, критичний, залежить від числа Рейнольдса Re; що менша швидкість, то більше значення λ ;

Q, L – беремо з попередніх таблиць.

За отриманими діаметрами знаходимо нормативні діаметри з таблиць.

Результати обчислень і підбору записуємо в таблицю 1.5.

Таблиця 1.5 – Результати обчислень

	1	2
Q		
L		
d		
D ст		

1.2 Розрахунок гідравлічного режиму мережі

Кільце середнього тиску повинно мати один діаметр або мати відмінності близько 15 % для забезпечення подачі газу по двом півкільцями. Вважаємо суму дорожніх витрат і множимо на коефіцієнт 0,59 для виходу на проєктний.

Для мережі середнього тиску залежність втрати напору визначається як різниця тисків:

$$\Delta P = P_n^2 - P_k^2, \quad (1.2)$$

$$P_n^2 - P_k^2 = \frac{1,62 \cdot \rho_o \cdot P_o \cdot \lambda \cdot L \cdot Q^2}{D^5}, \quad (1.3)$$

Для розрахунку λ приймаємо роботу мережі в турбулентному режимі і проводимо розрахунок, після цього ітераційно перераховуємо значення λ , враховуючи похибку. Формуємо таблицю розрахунку гідравліки для аварійної роботи мережі (аварія на ділянці 1–2).

Число Рейнольдса розраховуємо за формулою:

$$Re = \frac{4L \cdot Q}{\pi \cdot d \cdot \mu} \quad (1.4)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, $\mu = 0,00001044$;

π – число Пі = 3,14;

L – розрахункова довжина, м;

Q – шляхові витрати газу, Q_m^3/c .

Формуємо таблицю розрахунку гідравліки для аварійної роботи мережі (аварія на ділянці 1–2).

Таблиця 1.6 – Аварія на ділянці 1–2

Аварія на ділянці 1–2									
Номер ділянки	L	Q _{пл.}	Q _м ^{3/с}	d	λ	P _{вуз}	Re	λ _{розр.}	ΔP
1–2									
2–3									
3–4									
4–5									
5–6									
6–7									
7–1									

ΔP – забезпечення технологічного режиму, тобто ΔP більше ніж 400 000.

Таблиця 1.7 – Технологічний режим

Нормальний режим роботи									
Номер ділянки	L	Q _{пл.}	Q _м ^{3/с}	d	λ	P _{вуз}	Re	λ _{розр.}	ΔP
1–2									
2–3									
3–4									
4–5									
5–6									
6–7									
7–1									

Після цього розраховуємо Re , λ і порівнюємо два режими. Порівнюємо фіксоване λ і розрахункове λ . Далі задаємо точку сходу потоку і перераховуємо тиск по два півкільця (тиск повинні співпасти). У вузлі 5 $Q/2$ і половина йде по кожному півкільцю. Звести рішення задачі гідравліки до вирішення нелінійного рівняння моделюючи рішення одного рівняння, тобто підбір параметрів.

Від співвідношення потоків у вузлі будуть залежати витрати на ділянках 4–6 і 4–5. Наша мережа розіб'ється на два півкільця.

Перший спосіб розрахунку транспортної мережі

Це завдання можна вирішити за допомогою нелінійного рівняння:

$$\Delta P_{4-5} - \Delta P_{5-6} = 0$$

Через підбір параметра розраховуємо гідравліку.

У таблиці на крайньому ділянці записуємо постійну витрату, а далі, посилаючись на постійний розраховуємо шляховий.

У таблиці в λ записуємо рівняння:

Якщо $Re < 2\,300$ ламінарний режим,

$4\,000 > Re > 2\,300$ перехідний режим,

$Re > 4\,000$ турбулентний режим.

Оператор Якщо: = Якщо (логарифмічний вираз; значення якщо істина; значення якщо неправда) = Якщо ($Re > 4\,000$; $0.11 (68/Re + 0.0001/d)^{0.25}$; Якщо ($Re > 2\,000$; $0.0025 Re^{0.33}$; $64/Re$)).

В результаті гідравлічного розрахунку ми отримуємо тиск і витрати по кожній ділянці та вузлу.

Таблиця 1.8 – Гідравлічний розрахунок за першим способом

Номер ділянки	L	$Q_{\text{шл.}}$	$Q_{\text{м}^3/\text{с}}$	d	Re	λ	ΔP
1–2							
2–3							
3–4							
4–5							
5–6							
6–7							
7–1							

Другий спосіб вирішення транспортної задачі (лінійних рівнянь):

Чисельний підхід – на підставі ітераційних процедур (технологія).

Для розрахунку кільцевої мережі необхідно:

1. Поставити розподіл потоків по кожній ділянці мережі на підставі вузлових витрат і визначити диктуємий вузол, тобто вузол, у якому сходяться потоки. Таким чином, кільцева мережа буде представлена у вигляді двох тупикових мереж щодо диктуємої точки.

2. Визначити значення шляхових витрат по кожній ділянці мережі, задавши попередній розподіл витрат по ділянках мережі інцидентних (пов'язаних) з диктуємим вузлом.

Результати розрахунків заносимо в таблицю 1.9.

Розраховуємо невязку (тобто нестиківку між першим і другим півкільцем).

$$\varepsilon = \frac{\sum \Delta P_1 - \sum \Delta P_2}{0,5 * (\sum \Delta P_1 + \sum \Delta P_2)} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

Нев'язка повинна вийти $\varepsilon \leq 10 \%$

Таблиця 1.9 – Гідравлічний розрахунок за другим способом

Номер ділянки	L	D	Q м³/ч	Q м³/с	Re	λ	ΔP	$\Delta P/Q$	Кільце
1–2		$\Phi + \Delta Q$							I
2–3		Φ							
3–4		$\Phi + Q_4$							
4–5		Q_5							
							$\Sigma \Delta P_1$		
1–7		$\Phi - \Delta Q$							II
7–6		Φ							
6–5		$Q_5 = 0$							
							$\Sigma \Delta P_2$		
								$\Sigma(\Delta P/Q)$	

Для того щоб порахувати ΔQ , необхідно розрахувати додатковий параметр, який враховує одиницю падіння тиску ($\Delta P / Q$). Розраховуємо ΔQ за формулою:

$$\Delta Q = \frac{\sum \Delta P_1 - \sum \Delta P_2}{2 \cdot \sum \frac{\Delta P}{Q}} \quad (1.6)$$

Далі копіюємо таблицю і змінюючи параметр витрати (додаючи або віднімаючи в кожному напівкільці) добиваємося шляхом декількох ітерацій значення, $\varepsilon = 0,01$.

В результаті розрахунку одержуємо розподіл витрат і встановлюємо тиск по ділянках.

Таблиця 1.10 – Розподіл витрат і тиску по ділянках

I.				II.	
			×		
700000					700000
			P – P		

$P_1 > P_2$

=

Змінюючи співвідношення між розподіленими витратами перераховуємо параметр співвідношення $\Delta P/Q$ і контролюємо режим тисків, співвідношення між кільцями.

Висновок

2 РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача № 1

Визначити надлишковий тиск в кінці ділянки газопроводу високого (середнього) тиску протяжністю 1 (м), при надмірному тиску на початку ділянки P_n (ати) і пропуск витрати газу $Q_{\text{год}}$ (м³ / год).

Примітка 1 Всі розрахунки проводяться в системі одиниць СІ.

Примітка 2 Величину нормального атмосферного тиску прийняти $P_0 = 101325$ Па.

Примітка 3 Коефіцієнт еквівалентної шорсткості прийняти:

Примітка 4 для сталевих газопроводів $k_e = 0,0001$ (м);

Примітка 5 для поліетиленових газопроводів $k_e = 0,000045$ (м).

Рекомендації до розв'язання задачі № 1

Для розв'язання задачі використаємо розрахункову залежність

$$P_n^2 - P_k^2 = 1,62 \cdot \lambda \cdot P_0 \cdot \rho_0 \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot l, \text{ Па.}$$

Розв'язуємо залежність в такій послідовності.

1. Виконуємо попередній вибір діаметра газопроводу за формулою:

$$d = a \cdot (\rho_0 \cdot Q_0^2 \cdot l \cdot k_s^{0,25})^{0,19}, \text{ м}$$

де ρ_0 – щільність газу, (кг / м³): для природного газу $\rho_0 = 0,73$ кг / м³; для зрідженого газу $\rho_0 = 2,00$ кг / м³;

$$Q_0 = \frac{Q_{\text{зод}}}{3600}; \text{ – витрати газу, м}^3/\text{с};$$

l – довжина розрахункового ділянки газопроводу, м;

k_e – коефіцієнт еквівалентної шорсткості, м: для сталевих газопроводів $k_e = 0,0001$ м; для поліетиленових газопроводів $k_e = 0,000045$ м;

a – коефіцієнт, що приймається в залежності від виду газопроводу.

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнта a

Вид газопроводу	Значення коефіцієнта a
Високий тиск I категорії	0,035 84
Високий тиск II категорії	0,045 87
Середній тиск	0,052 33
Низький тиск	0,17

За отриманим попередньою значенням діаметра вибираємо найближчий більший діаметр умовного проходу по нижчеподаному сортаменту:

$d_y = 0,025; 0,032; 0,05; 0,07; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ м.

2. Визначаємо критерій Рейнольдса за формулою:

$$Re = \frac{4 \cdot \rho_0 \cdot Q_0}{\pi \cdot \mu \cdot d};$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу: для природного газу $\mu = 10,44 \cdot 10^{-6}$ Па с; для зрідженого газу $\mu = 7,40 \cdot 10^{-6}$ Па с.

3. Визначаємо коефіцієнт гідравлічного тертя λ за залежностями:

$$\text{за } Re < 2000 \quad \lambda = \frac{64}{Re};$$

$$\text{за } 2000 < Re < 4000 \quad \lambda = 0,0025 \cdot \sqrt[3]{Re};$$

$$\text{за } Re > 4000 \quad \lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k_{\text{э}}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}.$$

4. Визначаємо абсолютний тиск на початку газопроводу:

$$P_{\text{н абс}} = P_{\text{н изб}} + 101\,325, \text{ Па}$$

5. Визначаємо абсолютний тиск в кінці газопроводу:

$$P_{\text{к абс}} = \sqrt{P_{\text{н абс}}^2 - 1,62 \cdot \lambda \cdot P_0 \cdot \rho_0 \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot l}, \text{ Па}$$

6. Визначимо надлишковий тиск в кінці газопроводу:

$$P_{\text{к изб}} = P_{\text{к абс}} - 101\,325, \text{ Па}$$

7. Переводимо отримане значення в атмосфери:

$$P_{\text{к надл}} = P_{\text{к надл}} / 100\,000, \text{ атм.}$$

Задача № 2

Визначити надлишковий тиск в кінці ділянки газопроводу низького тиску протяжністю 1 (м), при надмірному тиску на початку ділянки $P_{\text{н}}$ (Па) і пропуск витрати газу $Q_{\text{год}}$ (м³ / год).

Примітка 1 Всі розрахунки проводяться в системі одиниць СІ.

Примітка 2 Коефіцієнт еквівалентної шорсткості прийняти: для сталевих газопроводів $k_e = 0,0001$, м; для поліетиленових газопроводів $k_e = 0,000045$, м;

Рекомендації до розв'язання задачі № 2

Для визначення втрат тиску в газопроводі низького тиску використовуємо розрахункову залежність виду:

$$\Delta P = 0,81 \cdot \lambda \cdot \rho_0 \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot l, \text{ Па.}$$

Розв'язання здійснюємо в такій послідовності:

1. Виконуємо попередній вибір діаметра газопроводу за формулою:

$$d = a \cdot (\rho_0 \cdot Q_0^2 \cdot l \cdot k_e^{0,25})^{0,19}, \text{ м,}$$

де ρ_0 – щільність газу, кг / м³: для природного газу $\rho_0 = 0,73$ кг / м³; для зрідженого газу $\rho_0 = 2,00$ кг / м³;

$$Q_0 = \frac{Q_{\text{зод}}}{3600}; \text{ – витрата газу, м}^3/\text{с};$$

l – довжина розрахункового ділянки газопроводу, (м);

k_e – коефіцієнт еквівалентної шорсткості, м: для сталевих газопроводів $k_e = 0,0001$ м; для поліетиленових газопроводів $k_e = 0,000045$ м;

a – коефіцієнт, що приймається в залежності від виду газопроводу за таблицею 2.1.

За отриманим попереднім значенням діаметра обираємо найближчий більший діаметр умовного проходу за сортаментом:

$d_y = 0,025; 0,032; 0,05; 0,07; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ м.

2. Визначаємо критерій Рейнольдса за формулою:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot \rho_0 \cdot Q_0}{\pi \cdot \mu \cdot d},$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, для природного газу $\mu = 10,44 \cdot 10^{-6}$ Па с; для зрідженого газу $\mu = 7,40 \cdot 10^{-6}$ Па с.

Визначаємо коефіцієнт гідравлічного тертя λ за залежностями:

$$\text{за } Re < 2000 \quad \lambda = \frac{64}{Re};$$

$$\text{за } 2000 < Re < 4000 \quad \lambda = 0,0025 \cdot \sqrt[3]{Re};$$

$$\text{за } Re > 4000 \quad \lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k_g}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$$

3. Визначаємо втрати тиску в газопроводі:

$$\Delta P = 0,81 \cdot \lambda \cdot \rho_0 \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot l, \text{ Па}$$

4. Визначаємо гравітаційний тиск, що виникає в газопроводі за рахунок різниці відміток початку і кінця газопроводу:

$$P_g = g \cdot H \cdot (\rho_g - \rho_z), \text{ Па}$$

Рекомендація: величину H підставляти зі своїм знаком.

5. Визначаємо надлишковий тиск в кінці газопроводу:

$$P_k = P_n - \Delta P + P_g, \text{ Па}$$

6. Перевірка: різниця тисків на початку і кінці газопроводу не повинна перевищує 1200 Па:

$$P_n - P_k < 1200, \text{ Па.}$$

Задача № 3

Визначити втрати напору Δh і витрати води Q_1 і Q_2 в кожній гілці двох паралельно з'єднаних трубопроводів.

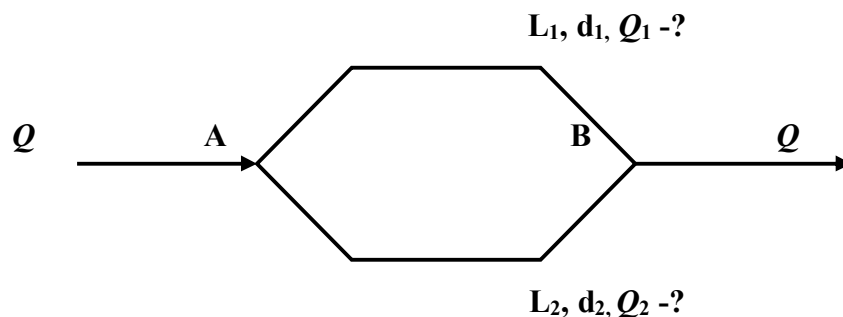


Рисунок 2.1 – Схема паралельно з'єднаних трубопроводів

Рекомендація. Поправочний коефіцієнт k прийняти рівним 1,0.

Питомий опір: $Ad_{150} = 6,9 \cdot 10^{-6}$, $Ad_{200} = 7,4 \cdot 10^{-6}$, $Ad_{250} = 2,3 \cdot 10^{-6}$.

Рекомендації до розв'язання задачі № 3

Для розв'язання цього завдання необхідно використовувати закони Кірхгофа.

Розв'язання здійснюємо в такій послідовності.

1. Визначаємо опір кожного з паралельних трубопроводів: $S = k \cdot A \cdot L$;

де A – питомий опір трубопроводу діаметром d , для $d = 150$ мм $A_{150} = 6,9 \cdot 10^{-6}$;
для $d = 200$ мм $A_{200} = 6,9 \cdot 10^{-6}$; для $d = 250$ мм $A_{250} = 6,9 \cdot 10^{-6}$;

k – поправочний коефіцієнт (в першому наближенні для автомоделної зони опору можна прийняти $k = 1,0$;

L – довжина трубопроводу, м.

2. Визначаємо загальний опір паралельно з'єднаних трубопроводів:

$$S = \frac{S_1 \cdot S_2}{(\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2})^2},$$

3. Розраховуємо втрати напору в системі паралельно з'єднаних трубопроводів (де Q – загальна витрата в л/с):

$$\Delta h = S \cdot Q^2, \text{ м. вод. ст.}$$

4. Визначаємо витрати води в кожному з паралельно з'єднаних трубопроводів:

$$Q_1 = \sqrt{\frac{\Delta h_{ab}}{S_1}}; \quad Q_2 = \sqrt{\frac{\Delta h_{ab}}{S_2}}; \quad \text{л/с}$$

5. Перевірка: $Q_1 + Q_2 = Q$, л/с.

Задача № 4

Побудувати п'єзометричний графік для двотрубною закритою теплової мережі про тяжінням L (м) і визначити напір мережевого $H_{\text{мер}}$ і поживного $H_{\text{пож}}$

насосів при поверховості забудови в N поверхів і наявному напорі на вводі в будинок не менше $H_{расп}$ (м. вод. ст.). Рельєф місцевості за профілем.

Діаметр теплопроводів d (мм) ($A_{200} = 7,4 \times 10^{-6}$, витрата теплоносія Q м³/год, температура в прямому трубопроводі τ_1 (°C).

Рекомендація. Поправочний коефіцієнт k прийняти рівним 1,0; висоту поверху прийняти рівною 3 м.

Питомий опір: $A_{d150} = 6,9 \times 10^{-6}$, $A_{d200} = 7,4 \times 10^{-6}$, $A_{d250} = 2,3 \times 10^{-6}$.

Рекомендації до розв'язання задачі № 4

Рішення виробляємо в такій послідовності.

1. Визначаємо опір виходу та повернення теплопроводів:

$$S_{под} = S_{обр} = S = k \cdot A \cdot L,$$

де A – питомий опір трубопроводу діаметром d , для $d = 150$ мм $A_{150} = 6,9 \times 10^{-6}$; для $d = 200$ мм $A_{200} = 7,4 \times 10^{-6}$; для $d = 250$ мм $A_{250} = 2,3 \times 10^{-6}$;

k – поправочний коефіцієнт (в першому наближенні для автотрассової зони опору можна прийняти $k = 1,0$;

L – довжина трубопроводу, м.

2. Визначаємо втрати напору в подаючому і зворотньому теплопроводах:

де $Q = Q_{год} / 3,6$ – витрата в л/с

$$\Delta h = S \cdot Q^2, \text{ м. вод. ст.}$$

2. Визначаємо напір підживлювального насоса:

$$H_{подп} = 3 \cdot N_{эт} + 5, \text{ м. вод. ст.}$$

3. Визначаємо напір мережевого насоса:

$$H_{сет} = 2 \cdot \Delta h + H_{расп}, \text{ м. вод. ст.}$$

5. Побудувати п'єзометричний графік на профілі (на міліметрівці).

Задача № 5

Визначити висоту установки припливного отвору системи повітряного опалення площею F_0 (м^2) при швидкості витікання повітря U_0 (м/с) під кутом β° до горизонту вниз з температурою t_0 ($^\circ\text{C}$); температура повітря в приміщенні t_∞ ($^\circ\text{C}$).

Аеродинамічна характеристика m , теплова характеристика n .

Швидкість повітря на вході в робочу зону прийняти U_{pz} (м/с).

Висота робочої зони – 2 м над рівнем підлоги приміщення.

Рекомендації до розв'язання задачі № 5

Розв'язуємо в такій послідовності.

1. Визначаємо геометричну характеристику неізотермічного припливного струменя:

$$H = \sqrt{\frac{m^2 \cdot U_0^2 \cdot \sqrt{F_0} \cdot T_\infty}{n \cdot g \cdot \theta_0}}, \text{ м}$$

$$T_\infty = t_\infty + 273\text{K}; \quad \theta_0 = t_0 - t_\infty;$$

2. Визначаємо координати вершини неізотермічного припливного струменя:

$$X_\epsilon = H \cdot \cos \beta, \text{ м}$$

$$Z_\epsilon = \frac{2}{3} \cdot H, \text{ м}$$

3. Визначаємо відстань від осі припливного струменя до точки зі швидкістю U_{pz} :

$$R = c \cdot \frac{X_\epsilon}{\cos(\beta)} \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \left(\frac{m \cdot U_0 \cdot \sqrt{F_0} \cdot \cos \beta}{U_{pz} \cdot X_\epsilon} \right)}; \text{ (м)}$$

де $c = 0,082$ – експериментальна постійна.

4. Визначаємо висоту установки припливного отвору і будуємо схему поширення неізотермічної струменя:

$$H_{уст} = H_{pz} + R + Z_6, \text{ м.}$$

Задача № 6

Визначити швидкість вітання у вхідному потоці повітря з температурою t_v^0 кулястих частинок щільністю ρ_m (кг/м³), якщо середньо зважений діаметр їх становить d (мм).

Рекомендації до розв'язання задачі № 6

Розв'язуємо за формулою:

$$V = \frac{\rho_m \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \rho_v \cdot \nu_v}, \text{ м/с.}$$

Задача № 7

Визначити надлишковий тиск вентилятора $P_{ізб}$ (Па), необхідне для подачі Q (м³/год) повітря по прямокутному воздуховоду $a \times b$ (м) довжиною L (м), (рис. 2.2), за температурою t_v^0 (С). Еквівалентна шорсткість сталевго воздуховода $K_e = 0,1$ мм. Температура навколишнього повітря $t_\infty = 20$ С, ($\rho_\infty = 1,205$ кг / м³, $\nu_\infty = 15,06 \times 10^{-6}$ м² / с). Коефіцієнти місцевих опорів $\zeta_{шибера}$, $\zeta_{колена}$.

Рекомендація. При визначенні щільності повітря ρ_v використовувати дані за варіантом

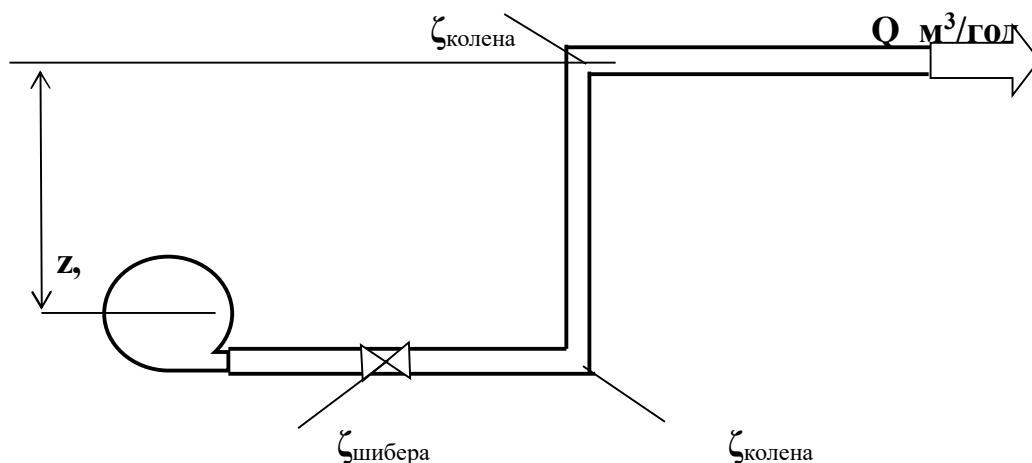


Рисунок 2.2 – Фрагмент прямокутного воздуховоду

Рекомендації до розв'язання задачі № 7

Розв'язуємо в такій послідовності.

1. Визначаємо еквівалентний діаметр прямокутного повітроводу:

$$d_{\text{екв}} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a + b)}, \text{ м.}$$

2. Для перетинів 1–1 і 2–2 складаємо рівняння Бернуллі:

$$\rho_1 \cdot g \cdot z_1 + P_1 + \frac{\rho_2 \cdot V_1^2}{2} = \rho_2 \cdot g \cdot z_2 + P_2 + \frac{\rho_2 \cdot V_{21}^2}{2} + \Delta P_{1-2},$$

тут: площину порівняння О – О вибираємо по осі вентилятора:

$$Z_1 = 0; Z_2 = 5; \text{ м}$$

$$P_1 = P_m + P_{\text{атм}}; P_2 = P_{\text{атм}}, \text{ Па}$$

$$V_1 = V_2 = \frac{Q}{3600 \cdot a \cdot b}, \text{ м/с.}$$

3. Визначаємо критерій Рейнольдса за формулою:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d_{\text{екв}}}{\nu},$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря,

4. Визначаємо коефіцієнт гідравлічного тертя λ по залежностям:

$$\text{за } \text{Re} < 2000 \quad \lambda = \frac{64}{\text{Re}};$$

$$\text{за } 2000 < \text{Re} < 4000 \quad \lambda = 0,0025 \cdot \sqrt[3]{\text{Re}};$$

$$\text{за } \text{Re} > 4000 \quad \lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}.$$

4. Визначаємо надлишковий тиск на виході вентилятора:

$$P_m = \rho_2 \cdot g \cdot z_2 + \rho \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \left(\zeta_{\text{ш}} + 2 \cdot \zeta_{\kappa} + \lambda \cdot \frac{l}{d_{\text{екв}}} \right), \text{ Па.}$$

3. ВАРІАНТИ ЗАДАЧ ДЛЯ МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ

Задача № 1

Визначити надлишковий тиск в кінці ділянки газопроводу високого тиску протяжністю L (м), діаметром d (мм), при надмірному тиску на початку ділянки $P_{ати}$ і пропуску витрати газу Q_0 ($m^3 / год$).

Газ природний: щільність $\rho_0 = 0,73 \text{ кг} / m^3$, коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu = 14,3 \times 10^{-6} m^2 / c$, коефіцієнт динамічної в'язкості $\mu = 10,44 \times 10^{-6} \text{ Па} \cdot c$; еквівалентна шорсткість стінок газопроводу K_e , (мм), тиск при нормальних умовах $P_0 = 101\,325 \text{ Па}$.

Рекомендації. Вихідні дані слід вибирати по першій букві свого прізвища з таблиці 3.1; – із таблиці 3.2 за останній цифрі номера залікової книжки.

Критерій Рейнольдса визначається за формулою: $Re = (4 \rho_0 Q_0) / (\pi \mu d)$.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані вибору тиску та коефіцієнту еквівалентності

Перша буква прізвище	P , ати	K_e , мм.
А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З, І, Ї, Й, К, Л, М, Н, О	12,0	0,1
П, Р, С, Т, У, Ф, Х, Ц, Ч, Ш, Щ, Э, Ю, Я	6,0	0,045

Таблиця 3.2 – Вихідні дані вибору діаметру, довжини трубопроводу та витрат газу

Номер варіанта (остання цифра номера залікової книжки)	Вихідні данні		
	Q_0 , $m^3/час$	L , м	d , мм
1	2	3	4
0	1500	1000	125
1	2000	1250	150
2	2500	1500	175
3	3000	1750	200
4	3500	2000	250
5	4000	1750	250
6	4500	1500	250
7	5000	1250	300
8	5500	1000	300
9	6000	750	300

Задача № 3

Визначити втрати напору Δh і витрати води Q_1 і Q_2 в кожній гілці двох паралельно з'єднаних трубопроводів.

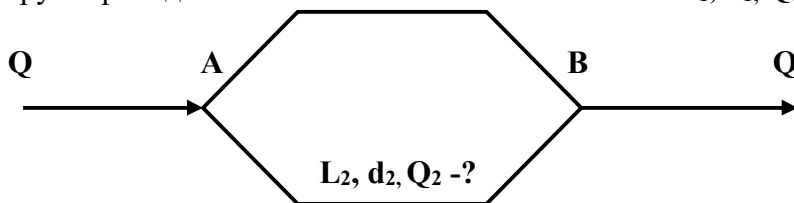


Рисунок 3.1 – Схема паралельно з'єднаних трубопроводів

Вказівка.

Вихідні дані слід вибирати з таблиці 3.3. Поправочний коефіцієнт k прийняти рівним 1,0.

Питомий опір: $Ad_{150} = 6,9 \times 10^{-6}$, $Ad_{200} = 7,4 \times 10^{-6}$, $Ad_{250} = 2,3 \times 10^{-6}$.

Q , л/с = 100.

Таблиця 3.3 – Вихідні данні

Номер варіанта	Вихідні данні			
	L ₁ , м	d ₁ , мм	L ₂ , м	d ₂ , мм
0	150	150	200	200
1	200	200	250	250
2	250	150	300	200
3	300	200	350	250
4	350	150	400	200
5	400	200	450	250
6	450	150	500	200
7	500	200	550	250
8	550	150	600	200
9	600	200	650	250

Задача № 4

Побудувати п'єзометричеський графік для двотрубної закритою теплової мережі протяжністю L (м) і визначити напір мережевого Н_{сет} і поживного Н_{піт} насосів при поверховості забудови в N поверхів і наявному напорі на вводі в будинок не менше Н_{расп} (м. вод. ст). Рельєф місцевості вважати плоским.

Діаметр теплопроводів d (мм) ($A_{200} = 7,4 \times 10^{-6}$), витрата теплоносія Q (м³/год), температура в прямому трубопроводі t₁ (°C).

Рекомендації. Вихідні дані слід вибирати з таблиці 3.4; – з таблиці 3.5. Поправочний коефіцієнт k прийняти рівним 1,0; висоту поверху прийняти рівною 3 м.

Питомий опір: $A_{d150} = 6,9 \times 10^{-6}$, $A_{d200} = 7,4 \times 10^{-6}$, $A_{d250} = 2,3 \times 10^{-6}$.

Таблиця 3.4 – Вихідні данні для вибору діаметру

Перша буква фамілії	Q, м ³ /час	d, мм
А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З, И	50	150
К, Л, М, Н, О, П, Р, С, Т	100	200
У, Ф, Х, Ц, Ч, Ш, Щ, Є, Ю, Я	150	250

Таблиця 3.5 – Вихідні данні

Номер варіанта	Вихідні данні		
	L, м	Н _{расп} , м. вод. ст	N, поверх.
0	1500	10	5
1	2000	15	6
2	2500	20	7
3	3000	25	8
4	3500	30	9
5	4000	30	5
6	4500	25	6
7	5000	20	7
8	5500	15	8
9	6000	10	9

Задача № 5

Визначити висоту установки припливного отвору системи повітряного опалення площею F_о (м²) при швидкості витікання повітря U_о (м / с) під кутом β° до горизонту вниз з температурою t_о° (C); температура повітря в приміщенні t_∞ (°C).

Аеродинамічна характеристика m, тепла характеристика n.

Швидкість повітря на вході в робочу зону прийняти U_{рз} (м/с).

Висота робочої зони – 2 м над рівнем підлоги приміщення.

Рекомендації. Вихідні дані слід вибирати з таблиці 3.6; з таблиці 3.7.

Таблиця 3.6 – Вихідні данні

Номер варіанта	m		n	Fo, м²
1	4,5		3,2	0,25

Таблиця 3.7 – Вихідні данні для вибору температури

Номер варіанта	Вхідні данні				
	U₀, м/с	U_{рз}, м/с	t₀^o, C	t_∞^o, C	β^o
0	3,0	0,2	10	16	20
1	3,5	0,25	15	18	25
2	4,0	0,3	20	20	30
3	4,5	0,2	25	16	20
4	5,0	0,25	30	18	40
5	5,5	0,3	35	20	20
6	6,0	0,2	20	16	25
7	6,5	0,25	25	18	30
8	7,0	0,3	30	20	25
9	7,5	0,2	35	16	40

Задача № 6

Визначити швидкість витання у висхідному потоці повітря з температурою t_v^o з кулястих частинок щільністю ρ_m (кг/м³), якщо середньо зважений діаметр їх становить d (мм).

Вказівка. Вихідні дані слід вибирати з таблиці 3.8; з таблиці 3.9.

Таблиця 3.8 – Вихідні данні

ρ_м, кг/м³	d, мм
700	0,1
Перша буква прізвища	
А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З, И	700
К, Л, М, Н, О, П, Р, С, Т	600
У, Ф, Х, Ц, Ч, Ш, Щ, Є, Ю, Я	300

Таблиця 3.9 – Вихідні данні для вибору щільності і температури

Номер варіанта	Вхідні данні		
	t_в^o, C	ρ_в, кг/м³	v_в · 10⁻⁶, м²/с
0	0	1,251	13,75
1	10	1,207	14,66
2	15	1,1865	15,135
3	20	1,166	15,61
4	25	1,1465	16,095
5	30	1,127	16,58
6	35	1,109	17,075
7	40	1,109	17,57
8	45	1,074	18,075
9	50	1,057	18,58

Задача № 7

Визначити надлишковий тиск вентилятора Різб (Па), необхідне для подачі Q ($\text{м}^3/\text{год}$) повітря по квадратному воздуховоду $a \times b$ (м) довжиною L (м), (рис. 3.2), при температурі t_v ($^{\circ}\text{C}$). Еквівалентна шорсткість сталевих воздуховодів $K_e = 0,1$ мм. Температура навколишнього повітря $t_{\infty} = 20$ $^{\circ}\text{C}$, ($\rho_{\infty} = 1,205$ $\text{кг}/\text{м}^3$, $\nu_{\infty} = 15,06 \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^2/\text{с}$). Коефіцієнти місцевих опорів $\zeta_{\text{шибера}}$ і $\zeta_{\text{коліна}}$.

Рекомендація. Вихідні дані слід вибирати з таблиці 3.10; – з таблиці 3.11. При визначенні щільності повітря ρ_v використовувати дані таблиці 3.12.

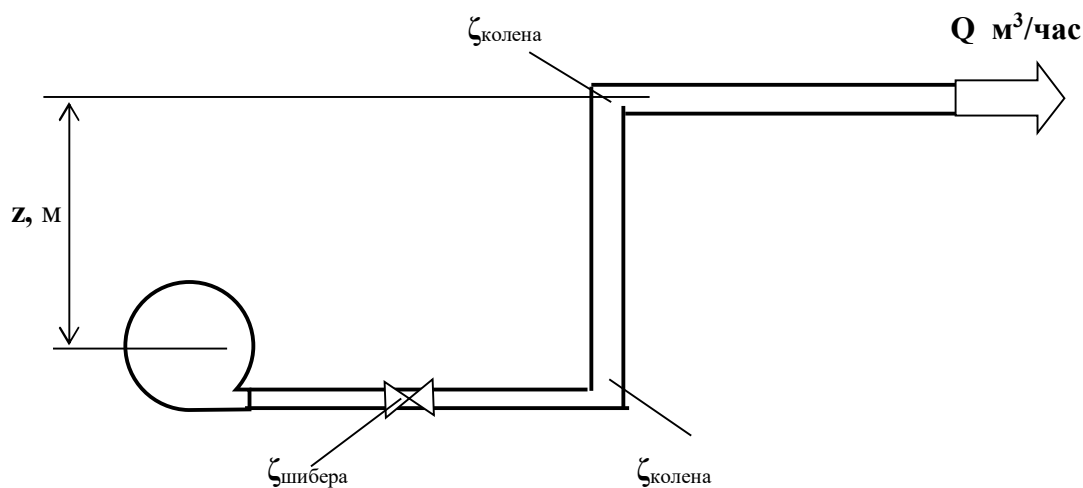


Рисунок 3.2 – Фрагмент прямокутного воздуховоду

Таблиця 3.10 – Вихідні данні

Q , $\text{м}^3/\text{час}$	$a \times b$, м
2000	$0,2 \times 0,3$

Таблиця 3.11 – Вихідні данні для вибору місцевих опорів

Номер варіанта	Вхідні данні				
	L , м	$\zeta_{\text{шибера}}$	$\zeta_{\text{коліна}}$	z , м	t_v , $^{\circ}\text{C}$
1	20	2,75	0,3	6	35

Таблиця 3.12 – Вихідні данні для вибору температури

Номер	Вхідні данні		
	t_v , $^{\circ}\text{C}$	ρ_v , $\text{кг}/\text{м}^3$	$\nu_v \cdot 10^{-6}$, $\text{м}^2/\text{с}$
1	0	1,251	13,75
2	10	1,207	14,66
3	15	1,1865	15,135
4	20	1,166	15,61
5	25	1,1465	16,095
6	30	1,127	16,58
7	35	1,109	17,075
8	40	1,091	17,57
9	45	1,074	18,075
10	50	1,057	18,58

Контрольні питання для самостійної роботи

Контрольні питання до вирішення задач 1,2

1. Обґрунтуйте припущення про можливість неврахування зміни щільності транспортуемого газу по довжині газопроводу низького тиску.
2. Які рівняння використовуються для одержання розрахункової залежності для газопроводу низького тиску?
3. Назвіть зони гідравлічного опору?
4. Який систему відрахунку тиску – абсолютну чи манометричну слід використовувати при розрахунках газопроводів низького тиску?
5. Які залежності використовуються для визначення втрат тиску в газопроводах?
6. Що таке «гравітаційний тиск», що виникає на вертикальних ділянках газопроводів? За рахунок чого він з'являється?
7. Як залежить величина гравітаційного тиску, що виникає у вертикальному газопроводі, від властивостей транспортуемого газу?
9. Основні критерії щодо вибору гідравлічного режиму розподільних мереж. Обґрунтування наявного перепаду тиску.
10. Методика гідравлічного розрахунку газопроводів високого (середнього) тиску.
11. Методика гідравлічного розрахунку газопроводів низького тиску. Методика гідравлічного розрахунку відгалуджень.
12. Ділянка газорозподільної мережі. Її геометрична та розрахункова довжини. Способи визначення розрахункової довжини.
13. Шляхові, вузлові та розрахункові витрати газу у вуличних газопроводах низького тиску. Методика визначення витрат газу.

Контрольні питання до вирішення задач 3,4

1. Класифікація трубопроводів і основні загальні розрахункові залежності
2. Які задачі розв'язуються при гідравлічному розрахунку трубопроводів, і за якими загальними залежностями це виконується?

3. Що таке гідравлічно короткі трубопроводи, і за якими залежностями виконується їхній гідравлічний розрахунок?
4. Що таке гідравлічно довгі трубопроводи, і за якими залежностями виконується їхній гідравлічний розрахунок?
5. Що таке послідовно з'єднані трубопроводи, і за якими залежностями виконується їхній гідравлічний розрахунок?
6. Що таке паралельно з'єднані трубопроводи, і за якими залежностями виконується їхній гідравлічний розрахунок?
7. Що таке розгалужені (тупикові) трубопроводи? Поясніть порядок їх гідравлічного розрахунку.
8. В чому полягає перший та другий закон Кіркгофа?
9. Що таке п'єзометричний графік? Для чого його будують?
10. Основні вимоги до режиму тисків водяних теплових мереж за умови надійності роботи системи теплопостачання?
11. Що означає статистичний та динамічний режими роботи теплової мережі?

Контрольні питання до вирішення задачі 5?

1. Який струмінь називаємо неізотермічним?
2. На які характері дільниці можливо розділити вентиляційний струмінь?
3. Які основні постулати розрахунку неізотермічних струменів?
4. По якій залежності відбувається зміна відносній швидкості w в поперечному перетині основної ділянки струменя ?
5. По якій залежності відбувається зміна відносної надлишкової температури в поперечному перетині основної ділянки струменя ?
6. Як змінюється кількість надлишкового тепла по довжині струменя ?
7. Як скривлюється траєкторія неізотермічного струменя в залежності від його температури?
8. Якою можна вважати течія у всмоктуючих факелах?

Контрольні питання до вирішення задачі 6

1. Що називається повітряобміном та кратністю повітряобміну?
2. Що називається аерацією?
3. Як змінюється тиск по периметру кулі, яку обтікає повітря?
4. Що таке «аеродинамічний коефіцієнт»?
5. Дайте визначення терміну «аеродинамічна сила»?
6. Дайте визначення терміну «аеродинамічний момент»?
7. Як залежить аеродинамічний коефіцієнт від числа Рейнольдса?
8. Як визначити швидкість вітання частки в повітряному потоці?
9. Що таке швидкість зрушування?
10. Принцип дії систем аспірації і пневмотранспорту.

Контрольні питання до вирішення задачі 7

1. Які види втрат тиску слід враховувати при розрахунку повітряпроводів?
2. Яким чином матеріал повітряпроводів впливає на коефіцієнт гідравлічного опору повітряпроводів?
3. Що таке «питомі втрати тиску»?
4. Які значення швидкостей повітря рекомендуються у виробничих і громадських будівлях?
5. Що таке «еквівалентний діаметр»?
6. Укажіть граничне значення ув'язки втрат тиску по відгалуженнях повітряпроводів?
7. На яких ділянках рекомендується встановлювати діафрагми в повітряводах?

Список використаних та рекомендованих джерел

1. Ионин А. А. Газоснабжение / А. А. Ионин. – М. : Стройиздат, 1989. – 439 с.
2. Єнін П. М. Газопостачання населених пунктів і об'єктів природним газом : навч. посібник / П. М. Єнін, Г. Г. Шишко, К. М. Предун. – Київ : Логос, 2002. – 198 с.
3. ДБН В.2.5-20-2018. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Газопостачання. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 150 с.
4. ДБН В.2.5-20:2018 Газопостачання. – Київ : Мінрегіон України, 2019. – 109 с.
5. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д Альтшуль, П. Г Киселев. – М. : Стройиздат, 1975. – 323 с.
6. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. – М. : Энергия, 1975. – 376 с.
7. Отопление и вентиляция. Ч.1. Отопление. / [П. Н. Каменев, А. Н. Сканава, В. Н. Богословский и др.]. – М. : Стройиздат, 1975. – 480 с.
8. Талиев. В. Н. Аэродинамика вентиляции / В. Н. Талиев. – М. : Стройиздат, 1979. – 295 с.
9. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. Мінрегіонбуд України. – Київ : Укрархбудінформ, 2011. – 123 с.
10. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. – [Чинний з 01 січня 2014 року]. – Київ : Держстандарт України, 2013. – 32 с.
11. Городские инженерные сети и коллекторы / [М. И. Алексеев, В. Д. Дмитриев и др.]. – Л. : Стройиздат, 1990. – 384 с.
12. Бережнов І. О. Улаштування і експлуатація теплових і газових мереж / І. О. Бережнов, М. О. Шульга. – Київ : НМК ВО, 1992. – 124 с.
13. Дмитриев М. И. Городские инженерные сети / М. И. Дмитриев. – М. : Стройиздат, 1988.

Виробничо-практичне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичних занять, організації самостійної роботи
і виконання розрахунково-графічної роботи

з навчальної дисципліни

«СПЕЦПИТАННЯ АЕРОДИНАМІКИ І ГІДРАВЛІКИ СИСТЕМ ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ І ВЕНТИЛЯЦІЇ»

*(для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання
спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія,
за освітньою програмою «Теплогазопостачання і вентиляція»)*

Укладачі: **РОМАШКО** Олександр Васильович,
ХРЕНОВ Олександр Михайлович,
МІЛАНКО Вікторія Анатоліївна

Відповідальний за випуск *В. А. Міланко*

Технічний редактор *О. В. Михайленко*

Комп'ютерне верстання *В. А. Міланко*

План 2021, поз. 275М

Підп. до друку 16.03.2021. Формат 60 × 84/16.

Електронне видання. Ум. друк. арк. 1,7.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК 5328 від 11.04.2017.