

ЛЕКЦІЯ № 5 Гідравлічний розрахунок трубопроводів

Змістовий модуль 2 “Сільськогосподарське водопостачання, насоси”

Тема: Гідравлічний розрахунок трубопроводів

Мета: Вивчити класифікацію трубопроводів і основні загальні розрахункові залежності

План лекції

1. Задачі розрахунку, класифікація трубопроводів і основні загальні розрахункові залежності.
2. Гідравлічно короткі трубопроводи.
3. Гідравлічно довгі трубопроводи.
4. Гідравлічний удар в трубопроводах.

Матеріал лекції

1. Задачі розрахунку, класифікація трубопроводів і основні загальні розрахункові залежності

Транспортування рідин за допомогою трубопроводів широко застосовується в інженерній практиці (наприклад водопроводи, нафтопроводи і т. ін.). Підкреслимо, що тут розглядаються круглі напірні трубопроводи, тобто трубопроводи, в яких рідиною заповнений весь поперечний переріз.

Метою гідравлічного розрахунку трубопроводів є знаходження їхніх гідравлічних параметрів – витрати рідини, діаметра трубопроводу, втрат напору та напору, необхідного на початку трубопроводу, щоб подати рідину споживачам.

У відповідності до цього, при гідравлічному розрахунку трубопроводів переважно розв’язуються три задачі.

Знаходження **втрат напору** в трубопроводі при відомих діаметрі, матеріалі, шорсткості внутрішньої поверхні, довжині та профілі, при відомій витраті рідини.

Знаходження **витрати рідини** при транспортуванні її по трубопроводу з відомими діаметром, матеріалом, шорсткістю, довжиною і профілем з допустимими втратами напору.

Знаходження **діаметра трубопроводу** для транспортування по ньому рідини з відомою витратою при заданих втратах напору та інших його характеристиках.

За конструкцією (профілем) та гідравлічними показниками трубопроводи певним чином класифікуються: гідравлічно короткі та довгі трубопроводи; послідовно і паралельно з'єднані трубопроводи; трубопроводи з рівномірною шляховою витратою; розімкнуті (тупикові) та кільцеві трубопроводи.

При гідравлічному розрахунку окремих типів трубопроводів мають місце свої особливості, які розглядаються в цьому посібнику.

Загальним для всіх типів трубопроводів є порядок знаходження діаметра, витрати рідини, втрат напору та необхідного напору на початку трубопроводу.

Діаметр трубопроводу при відомій витраті рідини знаходиться за допомогою рівняння нерозривності потоку $Q = \omega V$, якщо в нього підставити значення площі поперечного перерізу $\omega = \pi d^2 / 4$, то отримаємо:

$$d = 0,13 \sqrt{\frac{Q_p}{V_e}}, \quad (1)$$

де Q_p – розрахункова витрата рідини на цій ділянці трубопроводу; V_e – економічно доцільна швидкість руху рідини.

З великими швидкостями руху транспортувати рідини економічно недоцільно, оскільки будуть великі втрати напору. Наприклад, у водопостачанні $V_e = 0,7 \dots 1,5$ м/с.

Витрата рідини при відомому діаметрі трубопроводу також знаходиться за допомогою рівняння нерозривності потоку:

$$Q = \omega V = \frac{\pi d^2}{4} V_e, \quad (2)$$

де d – діаметр трубопроводу.

Витрату рідини Q за відомими діаметром трубопроводу d та швидкістю V можна брати за даними табл. 1.

Що стосується втрат напору в трубопроводі, то методика їхнього знаходження наведена в лекції 4.

Необхідний напір на початку трубопроводу $H_{пт}$, при якому забезпечуватиметься подача рідини споживачам, знаходиться за залежністю

$$H_{пт} = H_r + h_v, \quad (3)$$

де H_r – геометрична висота підняття рідини; h_v – втрати напору в трубопроводі.

Згідно з наведеною вище класифікацією трубопроводів, розглянемо порядок гідравлічного розрахунку трубопроводів, які найчастіше зустрічаються в інженерній практиці.

Таблиця 1 - Граничні значення швидкостей $V_{гр}$ і витрат $Q_{гр}$ у залежності від діаметра труб

d , мм	$V_{гр}$, м/с	$Q_{гр}$, л/с	d , мм	$V_{гр}$, м/с	$Q_{гр}$, л/с
50	0,75	1,5	400	1,15	145
75	0,75	3,3	450	1,20	190
100	0,76	6	500	1,25	245
125	0,82	10	600	1,3	365
150	0,85	15	700	1,35	520
200	0,95	30	800	1,4	705
250	1,02	50	900	1,45	920
300	1,05	74	1000	1,53	1200
350	1,10	106	1100	1,55	1475

2. Гідравлічно короткі трубопроводи

Це трубопроводи, в яких місцеві втрати напору приблизно однакові з втратами напору по довжині. До них належать усмоктувальні трубопроводи насосних станцій, сифони і т. ін.

Особливістю цих трубопроводів є те, що при їхньому гідравлічному розрахунку окремо вираховуються втрати напору в місцевих опорах і в опорах по довжині. Загальні втрати напору визначаються як сума перших і других. Їх розрахунок ведеться з використанням рівняння Бернуллі.

Отже, втрати напору в місцевих опорах вираховуються за формулою $h_m = \zeta V^2 / (2g)$, а в опорах по довжині – за формулою $h_{дов} = \lambda l V^2 / (2gd)$. Загальні втрати напору вираховуються за формулою $h_b = h_{дов} + h_m$.

Розглянемо приклад гідравлічного розрахунку **усмоктувальної лінії насосної установки** (рис. 1).

Метою прикладу, що розглядається, є знаходження висоти установлення насоса над рівнем води в її джерелі, тобто висоти усмоктування.

Скористуємося рівнянням Бернуллі, для чого перший переріз 1-1 призначимо на вільній поверхні води в її джерелі, а другий – 2-2 – перед входом у насос. Площину порівняння 0-0 візьмемо співпадаючою з першим перерізом 1-1, тобто також на рівні вільної поверхні води.

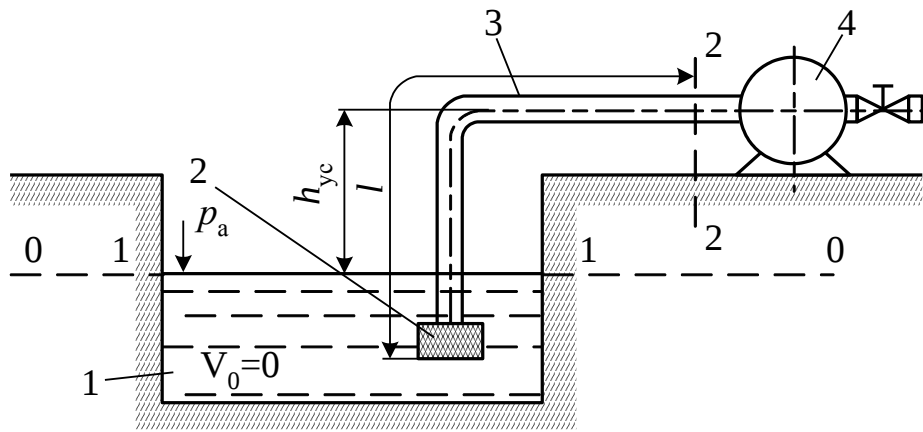


Рис. 1. Схема до гідравлічного розрахунку висоти усмоктування насосної установки:

1 – джерело води; 2 – приймальний пристрій (місцевий опір); 3 – усмоктувальний трубопровід; 4 – насос

Оскільки перший переріз 1-1 співпадає з площиною порівняння 0-0, то $Z = 0$. Оскільки джерело води відкрите, то на вільній поверхні діє атмосферний тиск p_a , тобто $p_1 = p_a$, а оскільки рух води в джерелі у вертикальному напрямку при роботі насосної установки буде несуттєвим, бо поперечний переріз усмоктувального трубопроводу набагато менший від площі вільної поверхні, то $V_1 = 0$. Що стосується другого перерізу, $Z_2 = h_{yc}$, тиск p_2 буде мати місце, $V_2 = Q/\omega = V$. Втрати напору h_b складаються з втрат напору по довжині $h_{дов} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}$ і місцевих $h = \sum \zeta \frac{V^2}{2g}$. Підставимо в рівняння Бернуллі значення величин з урахуванням вищевказаних умов:

$$\frac{p_a}{\gamma} = h_{yc} + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} + \sum \zeta \frac{V^2}{2g}.$$

Оскільки $p_a - p_2 = p_{бак}$, а $p_{бак} / \gamma = h_{бак}$, отримаємо:

$$h_{yc} = h_{бак} - \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta\right) \frac{V^2}{2g}.$$

Для надійної роботи насосів приймається $h_{бак} < 7 \dots 8$ м.

3. Гідравлічно довгі трубопроводи

Це трубопроводи, в яких переважають втрати напору по довжині, а місцеві втрати складають 5...10% від загальних втрат напору. Прикладами їх є водопровідні мережі, трубопроводи закритих зрошувальних систем. Вони бувають простими і складними. Прості трубопроводи не мають відгалужень, складні мають відгалуження, змінний діаметр, паралельне або послідовне з'єднання й ін.

При гідравлічному розрахунку таких трубопроводів втрати напору в місцевих опорах вираховуються не окремо, а шляхом умовного подовження трубопроводу на 5...10%, і втрати напору вираховуються за відомими залежностями, в яких дійсну довжину трубопроводу l замінюємо на умовну (розрахункову) l_p .

Таким чином, формули для вирахування втрат напору будуть мати такий вигляд:

$$h_b = Al_p Q^2 \beta, \quad (4)$$

$$h_b = 1000 l_p, \quad (5)$$

де l_p – розрахункова довжина трубопроводу, $l_p = (1,05 \dots 1,1)l$.

Трубопроводи з рівномірною шляховою витратою. Це трубопроводи, в яких рідина відбирається з рівномірною витратою за шляхом її руху.

До таких трубопроводів належать вуличні водопровідні мережі з водорозбірними колонками чи врізками в кожне подвір'я і т. п.

Розглянемо випадок, коли по цьому трубопроводу, крім шляхової витрати $Q_{ш}$, проходить рідина, яка споживається за межами ділянки зі шляховою витратою, тобто **транзитна витрата** Q_T (рис. 2).

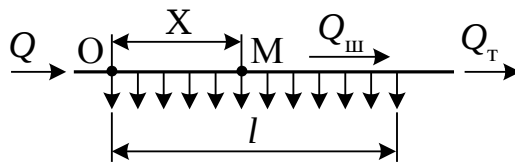


Рис. 2. Схема трубопроводу з рівномірною шляховою витратою

Отже, з трубопроводу рівномірно відбирається рідина за шляхом її руху. На одиниці довжини трубопроводу витрата складає $q = Q_{ш}/l$, яка називається **питомою витратою**, тобто це є відношення шляхової витрати до довжини трубопроводу. Витрата рідини, яка проходить через точку M (рис. 2), складає:

$$Q_M = Q_T + \frac{Q_{ш}}{l}(l - X) = Q_T + Q_{ш} - \frac{Q_{ш}X}{l}. \quad (6)$$

Згідно з формулою (4), втрати напору вздовж нескінченно малої ділянки шляху будуть дорівнювати

$$dh_b = A Q_x^2 dX = A \left(Q_T + Q_{ш} - \frac{Q_{ш}X}{l} \right)^2 dX. \quad (7)$$

Повні втрати на всій ділянці l –

$$h_b = \int_0^l A Q_x^2 dX = \int_0^l A [Q_T + q(l - X)]^2 dX. \quad (8)$$

Проінтегрувавши рівняння (8) у межах від 0 до l , отримаємо розрахункове рівняння для знаходження втрат напору на всій ділянці довжиною l :

$$h_b = Al(Q_T^2 + 2Q_T Q_{ш} + Q_{ш}^2 - Q_T Q_{ш} - Q_{ш}^2 + \frac{1}{3} Q_{ш}^2), \quad (9)$$

а після перетворень –

$$h_b = Al(Q_T^2 + Q_T Q_{ш} + \frac{1}{3} Q_{ш}^2), \quad (10)$$

при $Q_T = 0$ отримаємо:

$$h_b = \frac{1}{3} A Q_{ш}^2 l. \quad (11)$$

Вираз у дужках (10) і є розрахунковою витратою рідини на ділянці зі шляховою її витратою.

Оскільки рівнянням (10) при практичних розрахунках користуватися незручно, прийнято шляхову витрату враховувати деякою її часткою, приймаючи розрахункову витрату Q_p як суму транзитної і певної частки шляхової витрати:

$$Q_p = Q_T + \alpha Q_{ш}, \quad (12)$$

де Q_T – транзитна витрата; α – коефіцієнт еквівалентності, 0,5...0,65; $Q_{ш}$ – шляхова витрата;

$$Q_{ш} = q \cdot l, \quad (13)$$

де q – питома витрата рідини; l – довжина ділянки з питомою витратою рідини.

Враховуючи рівняння (12), повні втрати напору на ділянці зі шляховою витратою будуть

$$h_b = Al(Q_T + \alpha Q_{ш})^2. \quad (14)$$

Послідовно з'єднані трубопроводи. Це трубопроводи, в яких до кінця попередньої ділянки приєднується початок наступної ділянки. Окремі ділянки мають різні діаметри $d_1, d_2, \dots, d_n$ та довжину $l_1, l_2, \dots, l_n$, а витрата рідини Q постійна по всій його довжині (рис. 1.43).

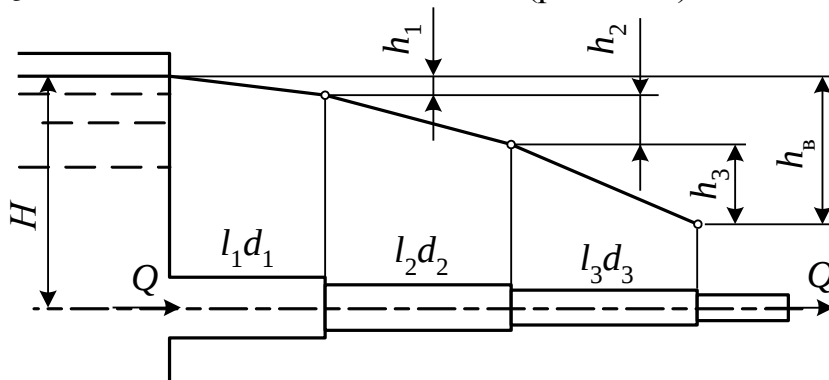


Рис. 3. Схема послідовно з'єднаного трубопроводу

Особливістю при гідравлічному розрахунку цих трубопроводів є те, що загальні втрати напору дорівнюють сумі його втрат на окремих ділянках, тобто

$$h_b = h_{b_1} + h_{b_2} + \dots + h_{b_n}, \quad (15)$$

де $h_{b_1}, h_{b_2}, \dots, h_{b_n}$ – втрати напору на окремих ділянках.

Витрата рідини однакова на всіх ділянках, тобто

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = Q. \quad (16)$$

Таким чином загальні втрати напору можна виразити формулою

$$h_b = (S_1 + S_2 + \dots + S_n)Q^2 = \sum S_i Q^2, \quad (17)$$

де S_i – опір окремих ділянок трубопроводу.

Паралельно з'єднані трубопроводи – це трубопроводи, які в певній точці розгалужуються на дві або більше гілок, а в наступній точці об'єднуються в один трубопровід (рис. 4).

Особливістю цих трубопроводів є те, що втрати напору h_{b_i} в усіх його гілках однакові, тобто

$$h_{b_1} = h_{b_2} = \dots = h_{b_n} = h_b, \quad (18)$$

а загальна витрата рідини Q дорівнює сумі витрат її в окремих гілках, тобто

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n. \quad (19)$$

Загальні втрати напору, згідно зі схемою (рис.4), $h_b = H_A - H_B$.

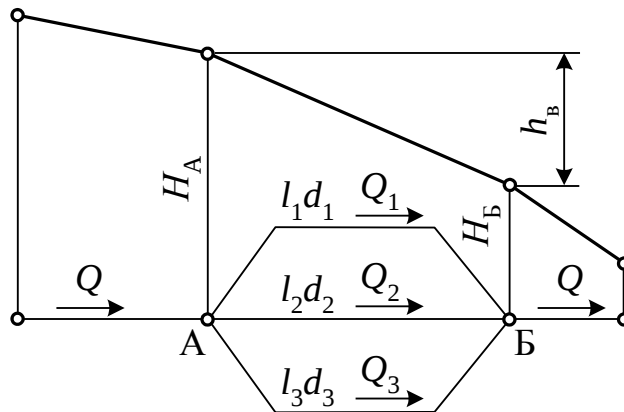


Рис. 4. Схема паралельно з'єднаних трубопроводів

Показаний на рис. 4 трубопровід складається з трьох гілок. Типовою задачею у цьому випадку є знаходження витрати рідини в окремих гілках трубопроводу та загальної витрати.

Першою умовою, згідно з рівнянням (19), є баланс витрат рідини в гілках і загального її значення, другою – рівність втрат напору в гілках.

Отже, з урахуванням втрат напору в місцевих опорах втрати напору в окремих гілках визначаються за залежностями

$$h_{b_1} = \frac{l_{p1} Q_1^2}{K_1^2}; \quad h_{b_2} = \frac{l_{p2} Q_2^2}{K_2^2}; \quad h_{b_3} = \frac{l_{p3} Q_3^2}{K_3^2}, \quad (20)$$

звідки

$$Q_1 = \sqrt{\frac{h_{B1} K_1^2}{l_{p1}}}; \quad Q_2 = \sqrt{\frac{h_{B2} K_2^2}{l_{p2}}}; \quad Q_3 = \sqrt{\frac{h_{B3} K_3^2}{l_{p3}}}. \quad (21)$$

Рівняння загальної витрати рідини буде мати такий вигляд:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = K_1 \sqrt{\frac{h_{B1}}{l_{p1}}} + K_2 \sqrt{\frac{h_{B2}}{l_{p2}}} + K_3 \sqrt{\frac{h_{B3}}{l_{p3}}}. \quad (22)$$

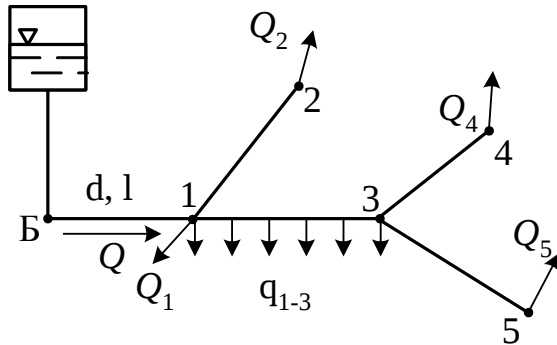


Рис. 5. Схема розімкнутого (тупикового) трубопроводу

Користуючись рівняннями (20), (21) та (22), можна розв'язувати конкретні задачі щодо знаходження невідомих гідравлічних характеристик гідросистеми.

Розімкнуті (тупикові) трубопроводи – це трубопроводи, в яких рідина в кожну точку подається з одного напрямку. Прикладами їх є трубопроводи зрошувальних і водопровідних систем. Як правило, при гідравлічному розрахунку цих трубопроводів знаходиться діаметр трубопроводу та висота водонапірної башти або необхідний напір на початку трубопроводу.

Розглянемо приклад такого трубопроводу (рис. 5), який складається з ділянок, по яких транспортуються тільки вузлові (транзитні) витрати рідини (Q_1, Q_2, Q_4, Q_5), та ділянки 1-3, з якої відбирається рідина за шляхом її руху. Тупикові трубопроводи складаються з основної (головної) магістралі та відгалужень.

Основна магістраль – це лінія, яка з'єднує початкову точку мережі з тією точкою, в яку найважче подати рідину, тобто з *диктуючою* точкою. Точки, в яких відгалужуються окремі ділянки або в які подаються зосереджені (вузлові) витрати рідини, називаються **вузловими** (точки 1, 2, 3, 4, 5), а відповідні їм витрати (Q_1, Q_2, Q_4, Q_5) – **вузловими витратами**.

Основним питанням при розрахунку цих трубопроводів є встановлення розрахункових витрат рідини на окремих ділянках трубопроводу. У випадках, коли по трубопроводу транспортується тільки транзитна витрата (ділянки Б-1, 1-2, 3-4 і 3-5), вона буде й розрахунковою. На ділянці зі шляховою витратою рідини розрахункову витрату слід визначати за залежністю (12). Отже, розрахунковими витратами рідини будуть:

$$Q_{pB-1} = Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5 + Q_{ш1-3},$$

де $Q_{ш1-3}$ – шляхова витрата, визначається за формулою (1.214).

$$Q_{p1-2} = Q_2; \quad Q_{p1-3} = Q_4 + Q_5 + 0,5Q_{ш1-3}; \quad Q_{p3-4} = Q_4; \quad Q_{p3-5} = Q_5. \quad (23)$$

Гідравлічний розрахунок цих трубопроводів ведеться із застосуванням табл. 2, якою регламентується порядок розрахунку, і в неї ж вносяться його результати.

Таблиця 2- Гідравлічний розрахунок тупикової водопровідної мережі

Ділянка	$l, \text{ м}$	Витрата, л/с			$d_{\text{окр}}, \text{ мм}$	$V, \text{ м/с}$	$A, \text{ с}^2/\text{м}^6$	β	$h_{\text{в}}, \text{ м}$	$\sum_{\text{м}}^i h_{\text{в}},$	$H_{\text{Б}}, \text{ м}$	При $H_{\text{Б буд}} =$			
		$Q_{\text{ш}}$	$Q_{\text{тр}}$	$Q_{\text{р}}$								$H_{\text{пi}}, \text{ м}$		$H_{\text{вiлi}}, \text{ м}$	
												Поч. діл.	Кін. діл.	Поч. діл.	Кін. діл.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Б-1		-													
1-2		-													
1-3															
3-4		-													
3-5		-													

Назва ділянок трубопроводу та їхньої довжини (колонки 1, 2 табл. 2) беруться з гідравлічної схеми трубопроводу. Витрати рідини $Q_{\text{ш}}$, $Q_{\text{тр}}$, Q_p (колонки 3, 4, 5) визначаються за методикою, згідно з формулами (1.224). Діаметр трубопроводу d на окремих ділянках (колонка 6) визначається за формулою (1) і округлюється до ближчого більшого стандартного. Середня швидкість V (колонка 7) визначається за формулою $V = 4Q_p/(\pi d^2)$. Втрати напору h_b вираховуються за формулою (4), для чого питомий опір A і поправочний коефіцієнт β (справочна література). Вирахувавши втрати напору h_b (колонка 10), знаходимо їх суму від башти до кожної вузлової (i -тої) точки $\sum_B^i h_b$ (колонка 11).

Висота водонапірної башти (колонка 12) знаходиться для кожної вузлової точки за формулою

$$H_{\text{Б}} = H_{\text{віль}} + \sum_B^i h_b + (Z_i - Z_{\text{б}}), \quad (24)$$

де $H_{\text{віль}}$ – вільний напір рідини, який заданий (вимагається) в i -тій точці, тобто напір, під яким рідина витікає з пристрою, за допомогою якого

вона відбирається з трубопроводу; $\sum_B^i h_B$ – сума втрат напору від башти до i -тої точки; Z_i, Z_6 – геодезичні відмітки поверхні землі відповідно в i -тій точці й у місці установки башти.

Серед знайдених висот башти для всіх вузлових точок у якості будівельної приймається найбільша, округлена до ближчої більшої стандартної висоти. У колонки 13, 14 вносяться значення п'єзометричної висоти (напору), вираховані на початку й у кінці ділянки за формулою

$$H_{\Pi} = Z_6 + H_{\text{Ббуд}} - \sum_B^i h_B. \quad (25)$$

Останнім у гідравлічному розрахунку розгалужених трубопроводів є перевірочний розрахунок забезпечення необхідного вільного напору в кожній вузловій точці за формулою

$$H_{\text{віль}} = H_{\Pi} - Z, \quad (26)$$

де H_{Π} – п'єзометричний напір у точці; Z – геодезична відмітка поверхні землі в точці.

Кільцеві трубопроводи – це трубопроводи, в яких рідина в кожному точку подається з декількох напрямків, що забезпечує підвищену надійність їхньої роботи в порівнянні з тупиковими. Прикладом їх є сільські кільцеві водопровідні мережі.

Ці трубопроводи складаються з певної кількості замкнутих кілець, а тому називаються **замкнутими** (рис. 6).

Гідравлічний розрахунок цих трубопроводів ведеться в такій послідовності:

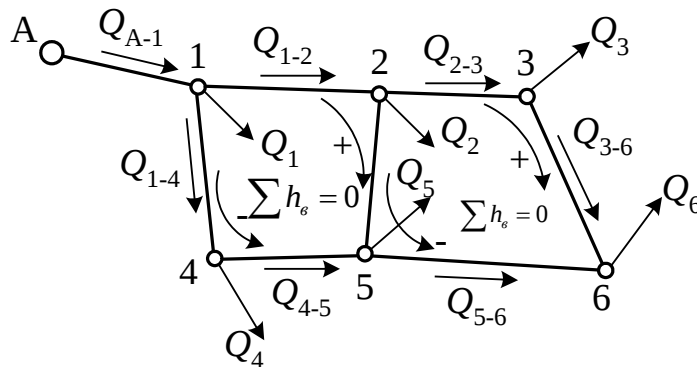


Рис. 6 Кільцева водопровідна мережа

1. Обчислюються розрахункові вузлові витрати рідини Q_i , які складаються із зосередженої вузлової витрати (якщо вона є) і з півсуми шляхових витрат на лініях, що сходяться у вузлі, тобто

$$Q_i = Q_3 + 0,5 \sum_{i=1}^n Q_{\text{ш}_i}, \quad (27)$$

де Q_3 – зосереджена вузлова витрата; $Q_{\text{ш}_i}$ – шляхові витрати на лініях, що сходяться у вузлі.

2. Призначаються лінійні (розрахункові) витрати рідини в першому приближенні та їхній напрям (рис. 6, закруглені стрілочки). При цьому сума витрат рідини, які надходять до вузла, повинна дорівнювати сумі витрат, які виходять з вузла.

3. Визначаються діаметри труб на ділянках за формулою (1), які потім округлюються до більшого стандартного діаметра.

4. За формулою (4) обчислюються втрати напору на кожній ділянці кільцевої мережі, а потім виконується ув'язка кілець. Суть її полягає в тому, що алгебраїчна сума втрат напору в гілках кільця має бути близькою до нуля. Для цього в гілці з рухом рідини за годинниковою стрілкою втрати напору умовно приймають зі знаком плюс, а в протилежному напрямку – зі знаком мінус (рис. 6), наприклад, у першому кільці схеми мережі

$$h_{B1-2} + h_{B2-5} - h_{B4-5} - h_{B1-4} \approx 0. \quad (28)$$

Якщо умова (28) не виконується, то необхідно або перерозподілити розрахункові витрати в гілках кільця, або змінити діаметр труб і повторити розрахунки. Досягти повного виконання умови (28) практично неможливо, а тому допускається неув'язка в кільці $\Delta h_B = 0,3 \dots 0,5$ м, а в усій мережі – $\Delta h_B = 1 \dots 1,5$ м.

1.3.12.4. Гідравлічний удар у трубопроводах

Гідравлічний удар може мати місце тільки в напірних трубопроводах і є прикладом несталої руху рідини в них.

Гідравлічний удар – це різке збільшення або зменшення тиску в напірних трубопроводах внаслідок різкого перекриття або відкриття їх, що викликає різке збільшення або зменшення швидкості руху рідини в трубопроводі.

Явище гідравлічного удару для трубопроводів негативне, оскільки значне підвищення тиску може викликати розрив трубопроводу.

Вперше це явище було досліджене російським ученим М. Є. Жуковським, і результати досліджень були опубліковані в 1898 р.

При гідравлічному ударі збільшення тиску, викликане ним, – Δp – підсумовується з тиском у трубопроводі до гідравлічного удару p_0 , і загальний тиск p буде дорівнювати

$$p = p_0 + \Delta p. \quad (29)$$

Розглянемо явище гідравлічного удару при миттєвому закритті засувки 2, розташованої в кінці горизонтального трубопроводу 1 (рис. 7).

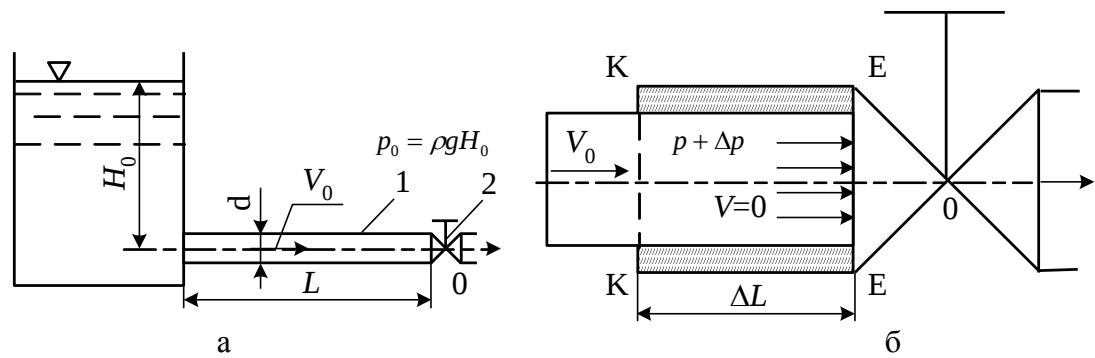


Рис. 7. Схеми до визначення тиску при гідравлічному ударі:

1 – трубопровід; 2 – засувка

За нескінченно малий проміжок часу після закриття засувки відсік ЕЕКК довжиною ΔL , який примикає до засувки, зупиниться (рис. 7, б). Рідина в трубопроводі продовжує рухатись зі швидкістю V_0 , внаслідок чого тиск у відсіку збільшиться на величину Δp , яку можна визначити за допомогою теореми про зміну кількості руху, застосувавши її до маси рідини, що зупинилася.

Кількість руху в об'ємі відсіку ЕЕКК до закриття засувки –

$$KP = \rho \omega \Delta L V_0, \quad (30)$$

де ω – площа перерізу труби; V_0 – швидкість руху рідини до закриття засувки.

Після закриття засувки рідина зупиниться, швидкість і кількість руху зменшаться до нуля, тобто зміна кількості руху буде дорівнювати самій кількості руху, яка мала місце до закриття засувки. Зміна кількості руху буде дорівнювати імпульсу сили:

$$IC = (p_0 + \Delta p) \omega \Delta t - p_0 \omega \Delta t = \Delta p \omega \Delta t. \quad (31)$$

Прирівняємо кількість руху й імпульс сили:

$$\rho \omega \Delta L V_0 = \Delta p \omega \Delta t. \quad (32)$$

Позначимо $c = \Delta L / \Delta t$, отримаємо формулу підвищення тиску при гідравлічному ударі:

$$\Delta p = \rho V_0 c, \quad (33)$$

де c – швидкість розповсюдження ударної хвилі.

Протягом наступного нескінченно малого проміжку часу зупиниться наступний, ближчий до першого, відсік рідини, і підвищення тиску, яке почалося біля засувки, розповсюдиться по трубопроводу проти течії у вигляді хвилі підвищення тиску. Після збігу часу L/c зупиниться останній відсік рідини в трубопроводі. Вся рідина буде стиснена, але цей стан нестійкий, оскільки рівень її в резервуарі не змінюється.

Приріст тиску Δp погаситься, і спад тиску почне розповсюджуватися зі швидкістю c у вигляді хвилі зниження тиску. Через час $t_\phi = 2L/c$ у трубопроводі відновиться початковий тиск. Час t_ϕ називається **часом фази**,

тобто це час проходження ударної хвилі до резервуара й назад. Таким чином, у момент часу тиск біля засувки знизиться на величину $\Delta p = \rho V_0 c$, тобто на таку, на яку він підвищувався. Зниження тиску буде розповсюджуватися у тому ж порядку, що і його підвищення, і в момент $t = 3L/c$ воно досягне резервуара. Відбившись від нього, хвиля тиску через $t = 4L/c$ повернеться до засувки, і рідина в трубопроводі прийме початковий стан.

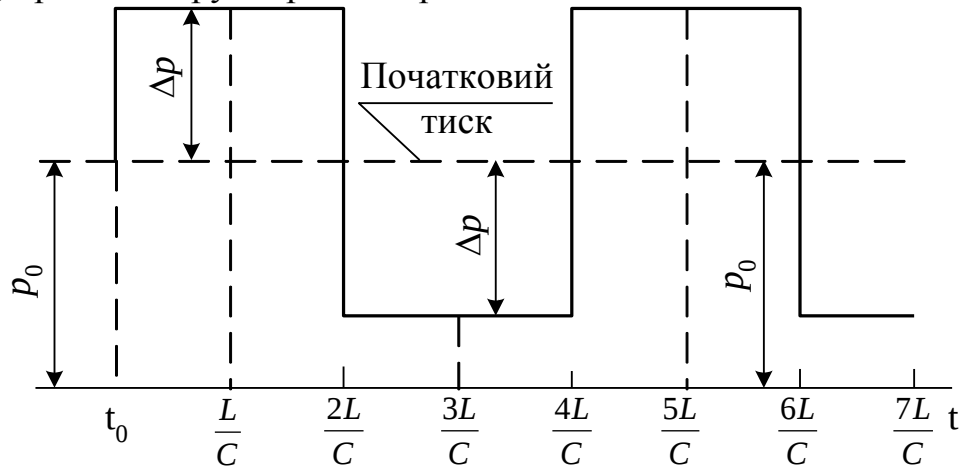


Рис. 8. Діаграма зміни тиску в трубопроводі при гідравлічному ударі

Проілюструємо зміну тиску в точці О діаграмою (рис. 8).

Діаграма (рис 8) складається з відрізків, паралельних осі часу t , які знаходяться від неї поперемінно то на відстані $p_0 + \Delta p$, то $p - \Delta p$ по чергово через проміжок часу $t_{\phi} = 2L/c$.

Швидкість розповсюдження ударної хвилі c в пружному круглому трубопроводі визначається за формулою

$$c = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{d}{\delta} \frac{E_p}{E_{тр}}}}, \quad (34)$$

де d – діаметр трубопроводу; δ – товщина стінки трубопроводу; E_p – модуль об'ємної пружності рідини; $E_{тр}$ – модуль об'ємної пружності трубопроводу (матеріалу).

У табл. 1.10 наводиться відношення $E_p/E_{тр}$ для води і для деяких матеріалів труб.

Таблиця 3 - Відношення $E_p/E_{тр}$

Матеріал труб	$E_p/E_{тр}$	Матеріал труб	$E_p/E_{тр}$
Сталь	0,01	Азбестоцемент	0,11
Чавун	0,02	Вінілопласт	0,68...0,73
Залізобетон	0,065...0,09	Поліетилен	1,0...1,45
Бетон	0,1	Гума	120...350

Швидкість розповсюдження ударної хвилі води в металевих трубах складає близько 1000 м/с, а підвищення тиску (при швидкості $V \approx 1,0$ м/с) $\Delta p = 10^6$ Па = 1 МПа.

У залежності від співвідношення часу закриття засувки T_3 і фази гідравлічного удару t_ϕ розрізняють прямий і непрямий гідравлічний удар.

Гідравлічний удар називається **прямим**, якщо $T_3 < t_\phi$, підвищення тиску Δp при цьому визначається за формулою (33).

При $T_3 > t_\phi$ гідравлічний удар називається **непрямим**, і підвищення тиску визначається залежністю

$$\Delta p = 2\rho L V_0 / T_3. \quad (35)$$

Оскільки явище гідравлічного удару негативне, то для недопущення його застосовуються різні заходи і пристрої.

Основним з них там, де це можливо, є недопущення прямого гідравлічного удару, тобто забезпечення повільного перекриття трубопроводів, що й робиться, наприклад, у побутових водорозбірних кранах. Тоді раптове підвищення тиску Δp визначається за залежністю (35), згідно з якою воно менше, ніж при прямому ударі. У боротьбі з гідравлічним ударом застосовуються запобіжні клапани, водоповітряні резервуари та ін.

Питання для самоконтролю до лекції № 5.

1. Які задачі розв'язуються при гідравлічному розрахунку трубопроводів, і за якими загальними залежностями це виконується?
2. Що таке гідравлічно короткі трубопроводи, і за якими залежностями виконується їхній гідравлічний розрахунок?
3. Що таке гідравлічно довгі трубопроводи, і за якими залежностями виконується їхній гідравлічний розрахунок?
4. Що таке трубопроводи зі шляховою витратою рідин, 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? Опишіть порядок їхнього гідравлічного розрахунку.
8. Що таке кільцеві трубопроводи, і в чому полягає сутність (особливість) їхнього гідравлічного розрахунку?
9. Що таке гідроудар у трубопроводах, і якими залежностями (формулами) описується це явище?