

Лекція 6. Основи гідравлічних розрахунків каналізаційних мереж

6.1 Гідравлічний радіус.

6.2 Наповнення труб і каналів.

6.3 Швидкості та ухили труб.

6.4 Формули та таблиці для гідравлічного розрахунку.

6.1 Гідравлічний радіус

Гідравлічний радіус – важлива характеристика трубопроводу чи каналу,

що визначається зі співвідношення:

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (6.1)$$

де ω – площа живого перетину;

χ – змочений периметр.

У відповідності до формули Шезі:

$$v = C \sqrt{R \cdot i}, \quad (6.2)$$

де C – коефіцієнт Шезі; i – ухил днища трубопроводу чи каналу; при постійних значеннях C та i чим вище значення R , тим вище швидкість потоку

v . Для круглого перетину справедливі наступні співвідношення:

при половинному наповненні ($h/d = 0,5$):

$$(\omega = \pi \cdot d^2 / 8, \quad \chi = \pi \cdot d / 2, \quad R = 0,25d);$$

при повному наповненні ($h/d = 1,0$):

$$(\omega = \pi \cdot d^2 / 4, \quad \chi = \pi \cdot d, \quad R = 0,25d).$$

При одній і тій же величині гідравлічного радіусу R швидкості течії рідини водовідвідної мережі круглого перетину при повному й половинному наповненні вважають рівними; вони досягають максимуму при наповненні $h = 0,813d$. Пропускна здатність труб (або витрата) досягає максимуму при наповненні $h = 0,95d$, а потім зменшується. Причому витрата при повному наповненні труби в два рази більше, ніж при половинному.

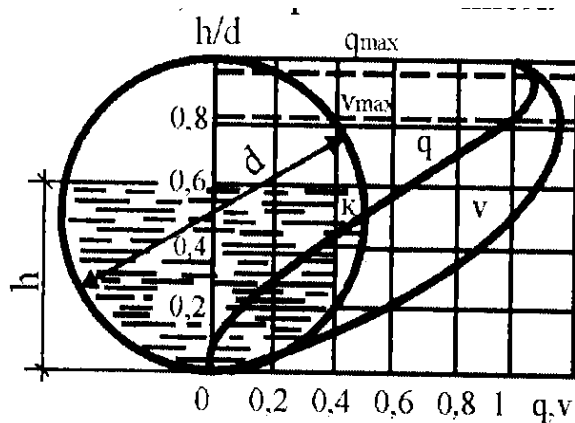


Рисунок 6.1 – Залежність q та v від ступеня наповнення трубопроводу h/d

На рисунку 6.1 наведені криві зміни швидкостей v і витрат q в трубах круглого перетину залежно від ступеня наповнення. По осі ординат відкладені ступені наповнення h , по осі абсцис цим наповненням відповідають швидкості v і витрати q , виражені в частках від швидкості та витрати при повному наповненні. Наповнення $h < 0,5d$ не приймається, так як при цьому істотно зменшуються швидкість потоку й витрата води.

Для міських водовідвідних мереж залежно від діаметра трубопроводу рекомендується $h = 0,5d - 0,8d$. Для водостоків рекомендується приймати $h = 0,95d - 1,0d$.

Гідравлічно найвигіднішим називають перетин каналу, що має найменший змочений периметр при заданій площі живого перерізу. Це також означає, що при заданих значеннях площі живого перетину, шорсткості й ухилу дна через даний канал пройде найбільша витрата. З усіх перетинів з однаковою площею найменший периметр мають круг та напівкруг. Прямокутний перетин каналу є гідравлічно найвигіднішим при $b/h = 2$, де b – нижня ширина каналу, h – глибина потоку.

Трапецієподібний перетин є гідравлічно найвигіднішим при співвідношенні $b/h = 2(\sqrt{1+m^2} - m)$, де $m = \text{ctg} \alpha$ – коефіцієнт закладання відкосу, або котангенс гострого кута між лінією відкосу та горизонтальною лінією.

Параметри чотирьох найбільш гідравлічно вигідних перетинів представлені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри найбільш гідравлічно вигідних перетинів

Форма поперечного перетину	ω	χ	R
Круглий ($d = h$)	$\pi \cdot d^2 / 4$	$\pi \cdot d$	$0,25d$
Напівкруглий ($h = d/2$)	$\pi \cdot h^2 / 2$	$\pi \cdot h$	$0,5h$
Прямокутний ($b/h = 2$)	$2h^2$	$4h$	$0,5h$
Трапецієподібний [$m = 1, b/h = 2(\sqrt{2} - 1)$]	$h(b + h)$	$b + 2h\sqrt{2}$	$0,5h$

6.2 Наповнення труб і каналів

Ступенем наповнення труб і каналів h/d називають максимально допустиме відношення робочої глибини потоку стічних вод h до діаметру поперечного перетину d . Ступінь наповнення самопливних труб нормується з ціллю вентиляції мережі та компенсації неврахованих коливань рівня рідини. Наповнення, що відповідає пропуску розрахункової витрати, є *розрахунковим*.

З економічних та гідравлічних міркувань не рекомендується приймати для будь-яких діаметрів труб (окрім початкових ділянок мережі) $h/d < 0,5$. У відповідності до вимог ДБН В.2.5–75:2013 [1] максимальну ступінь наповнення назначають в залежності від діаметру:

d , мм.....	150–200	300–400	450–900	1000 та >
h/d	0,6	0,7	0,75	0,8

Зростання максимального наповнення зі збільшенням діаметра труб пояснюється зменшенням амплітуди коливань в припливі стічних вод.

У загальносплавній та дощовій системах водовідведення розрахункове наповнення приймають зазвичай повним ($h/d = 1$), тому що дощі розрахункової інтенсивності випадають вкрай рідко.

6.3 Швидкості, ухили та діаметри труб

Швидкості руху стічної рідини

Розрахунок водовідвідних мереж всіх систем має здійснюватися з урахуванням допустимих номінальних (незамулюючих) і максимальних (неруйнівних) швидкостей потоку стічних вод. У реальному поперечному перетині колектора швидкість течії в окремих точках (місцеві швидкості) значно відрізняється від середньої (рис. 4.6), в середині (ядрі) і ближче до вільної поверхні вони значно вищі, ніж у стінок і дна.

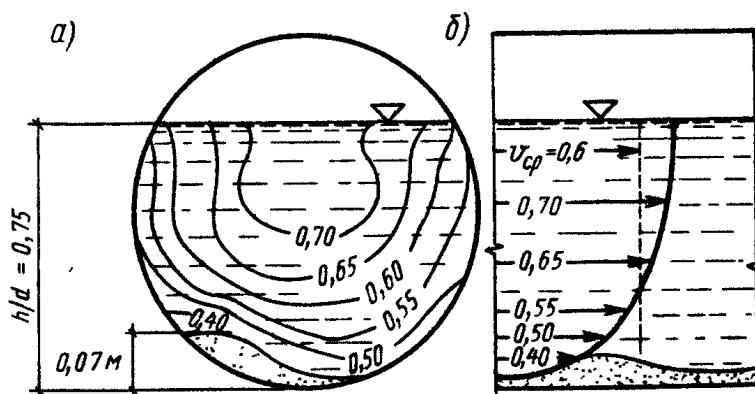


Рисунок 6.2 – Характер розподілу швидкостей течії стічної води в поперечному (а) та поздовжньому (б) перетинах круглого частково замуленого колектора діаметром 1400 мм

Середню швидкість течії в потоці визначають за формулою:

$$v_{cp} = q / \omega. \quad (6.3)$$

Донною швидкістю називають найменшу місцеву швидкість потоку в придонному шарі. Значення цієї швидкості в значній мірі визначає динаміку горизонтального переміщення відкладень в лотках труб.

Поверхневою швидкістю називають найбільшу місцеву швидкість потоку в його поверхневому шарі, близькому до горизонтальної осі труби.

Нерозчинні домішки, що містяться в стічних водах, здатні випадати в осад, зменшувати перетин трубопроводів і викликати їх повне засмічення. Найбільш складно транспортуються потоком води мінеральні домішки, що володіють великою щільністю. Транспортування нерозчинених домішок потоком є наслідком його турбулентності. При певних малих швидкостях зважені речовини осідають на дно й утворюють щільний шар осаду. При досягненні певної швидкості осад приходить в рух, утворюючи шар осаду, що

має форму безперервних гряд, які рухаються в напрямку потоку, але з меншою швидкістю (рис. 6.3).

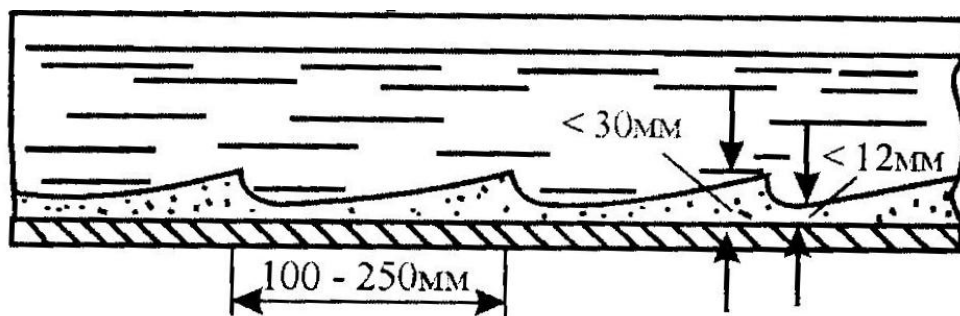


Рисунок 6.3 – Схема безперервного руху відкладень у водовідвідній мережі

Швидкість, яка відповідає початку руху осаду, називається *розмиваючою*. При подальшому збільшенні швидкості й досягненні певного значення весь осад зважується турбулентним потоком, а трубопровід самоочищається. Швидкість, яка відповідає цьому моменту, називається *самоочищуючою*. Відомо також поняття *критичної швидкості*. Ця швидкість відповідає початку осадження домішок (при зменшенні швидкості) або повному самоочищенню (при збільшенні швидкості). Витрата стічних вод в водовідвідних мережах змінюється в широких межах від певної мінімальної до відомої максимальної, яка приймається за розрахункову. Забезпечити можливість транспортування всіх домішок потоком при будь-якій витраті, у тому числі й мінімальній, не представляється можливим, оскільки в цьому випадку було б потрібно прокладати трубопроводи з великими ухилами, а це призвело б до їх значних заглиблень. В даний час розрахунок трубопроводів проводиться за умов підтримання труб в чистому стані при максимальній розрахунковій витраті. Таким чином, при мінімальних витратах в трубопроводах допускаються відкладення, але при досягненні розрахункової витрати трубопроводи повинні самоочищатися. Тому при розрахунку широко використовується поняття *самоочищуючої швидкості*. Це мінімальна швидкість, яка повинна забезпечуватися в водовідвідних мережах при розрахунковій витраті. Професори Н. Ф. Федоров і А. М. Курганов мінімальну швидкість, яку необхідно дотримуватися в трубопроводах з умов самоочищення, називають *незамулюючою* [5].

Рекомендації ДБН В.2.5–75:2013 [1] з вибору мінімальних самоочищуючих швидкостей наводяться в таблиці 4.2 (табл. 6 [1]). Мінімальну швидкість руху освітлених, біологічно очищених або умовно чистих виробничих стічних вод в трубах і каналах приймають рівною 0,4 м/с.

Максимальною швидкістю називають найбільшу усереднену по перетину колектора швидкість, допустиму з міркувань збереження механічної міцності труб від стирання. Максимальні швидкості призначають залежно від матеріалу труб і типу системи водовідведення. Їх слід приймати, м/с:

- для металевих труб – 8,
- для неметалевих – 4,
- для дощової мережі – відповідно 10 і 7.

Таблиця 6.2 – Найменші розрахункові швидкості руху стічних вод у трубах

Діаметр d , мм	Швидкість v_{\min} , м/с, при наповненні h/d			
	0,6	0,7	0,75	0,8
150–250	0,70	–	–	–
300–400	–	0,80	–	–
450–500	–	–	0,90	–
600–800	–	–	1,00	–
900	–	–	1,15	–
1000–1200	–	–	–	1,20
1500	–	–	–	1,30
Понад 1500	–	–	–	1,50

Примітка 1. Для пластмасових труб при наповненні $h/d = 0,80$ найменша швидкість приймається для $d = 1000–1200$ мм – $v_{\min} = 1,15$ м/с; для $d = 1400–2000$ мм – $v_{\min} = 1,2$ м/с.

Примітка 2. Для виробничих стічних вод найменші швидкості приймаються згідно з галузевими будівельними нормами проектування підприємств або за експлуатаційними даними.

Примітка 3. Для виробничих стічних вод, близьких до господарсько-побутових за забрудненням завислими речовинами, найменші швидкості приймаються як для господарсько-побутових стічних вод.

Примітка 4. Для дощової каналізації при періоді одноразового перевищення розрахункової інтенсивності дощу $P = 0,33$ року найменшу швидкість приймають 0,6 м/с.

Розрахунковою швидкістю називають усереднену по перетину колектора швидкість при максимальній (розрахунковій) витраті стічних вод і розрахунковому наповненні. Розрахункову швидкість слід призначати в межах між максимальними й мінімальними швидкостями течії. Розрахункову швидкість руху неосвітлених стічних вод у дюкерах необхідно приймати не менше 1 м/с.

Мінімальні діаметри та мінімальні ухили труб

У початкових ділянках внутрішньоквартальної та вуличної каналізації розрахункова витрата зазвичай невелика і її можна було б пропустити по трубах невеликого діаметру. Однак практика показує, що кількість засмічень в трубах геометрично зростає зі зменшенням діаметру. Тому при зменшенні діаметра експлуатаційні витрати на очищення збільшуються. Граничне значення витрати, при якій капітальні витрати на влаштування мережі дорівнюють експлуатаційним витратам на її утримання – близько 10 л/с.

Виходячи їх цих міркувань, в ДБН В.2.5–75:2013 [1] встановлені мінімальні діаметри труб, які залежать від виду стоків, системи та мережі водовідведення (табл. 6.3).

Гідравлічний ухил дорівнює відношенню падіння рівня води на початку та в кінці трубопроводу до його довжини. При самопливному режимі руху гідравлічний ухил приймається рівним ухилу самого трубопроводу.

Таблиця 6.3 – Мінімальні діаметри водовідвідних мереж

Вид водовідвідної мережі	Системи водовідведення		
	побутова та виробнича	загальносплавна	дощова
вулична	200	250	250
внутрішньо квартальна та виробнича	150	200	200
приєднання від дощоприймачів	–	200–250	200–250
напірні трубопроводи	150	200	200

Мінімальні i_{\min} та максимальні i_{\max} ухили найбільш точно визначаються за допомогою формули Дарсі для самопливних трубопроводів після підстановки в неї значень мінімальної (самоочищуючої) швидкості v_{\min} та максимальної (неруйнівної) швидкості v_{\max} [5]:

$$i_{\min} = \frac{\lambda v_{\min}^2}{4R \cdot 2g}, \quad (4.4) \quad i_{\max} = \frac{\lambda v_{\max}^2}{4R \cdot 2g}, \quad (6.5)$$

де R – гідравлічний радіус труби при розрахунковому наповненні.

Найменші ухили самопливних трубопроводів і каналів слід приймати залежно від допустимих мінімальних швидкостей руху стічних вод при найбільшому розрахунковому наповненні труб і каналів (табл. 6.4).

Таблиця 6.4 – Мінімальні діаметри та ухили водовідвідної мережі

Системи водовідведення	Мінімальний діаметр d_{\min} , мм		Мінімальні ухили i_{\min}	
	внутрішньо-квартальної	вуличної	внутрішньо-квартальної	вуличної
Повна роздільна та напівроздільна з мережами:				
побутовою	150	200	0,008 (0,007)	0,007 (0,005)
дощовою (водостоки)	200	250	0,007 (0,005)	
Загальносплавна	200	250	0,007 (0,005)	

Примітка 1. В дужках вказані ухили, які допускається застосовувати при обґрунтуванні.

Примітка 2. В населених пунктах з витратою до 300 м³/добу допускається використання труб діаметром 150 мм.

Для визначення мінімального ухилу широко відома формула:

$$i_{\min} = \frac{\alpha_i}{d}, \quad (6.6)$$

де d – діаметр трубопроводу, мм;
 α_i – коефіцієнт, що дорівнює:

d , мм.....	500	600–800	1000–1200	1400	1600	2000
α_i	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0

6.3 Формули та таблиці для гідравлічного розрахунку водовідвідної мережі

З метою спрощення гідравлічних розрахунків водовідвідних мереж рух води в них умовно приймаємо сталим і рівномірним, і тоді розрахунок можна проводити за двома основними формулами:

- сталості витрати:

$$q = \omega \cdot V, \quad (6.7)$$

- та формулі Шезі (див. формулу (4.2)):

$$V = C\sqrt{Ri},$$

де q – розрахункова витрата стічних вод, м³/с;
 ω – площа перетину, що заповнена рідиною (живого перетину), м²;
 V – швидкість потоку, м/с;
 C – коефіцієнт Шезі;

$$R = \frac{\omega}{\chi} \text{ – гідравлічний радіус, м;}$$

де χ – змочений периметр;

$$i = \frac{h_1}{l} \text{ – гідравлічний ухил,}$$

де h_1 – втрати напору по довжині, м;

l – довжина труби, м.

Коефіцієнт Шезі визначається за формулою академіка М. М. Павловського (при $0,1 < R < 3$ м):

$$C = \frac{R^y}{n}, \quad (6.8)$$

де n – коефіцієнт шорсткості, що залежить від стану стінок труби; а показник ступені y визначається за формулою:

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1). \quad (6.9)$$

Інший, більш складний спосіб визначення коефіцієнта опору λ (а значить, і коефіцієнта Шезі C) здійснюється за формулою М. Ф. Федорова, що включає в себе додаткові параметри:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{\Delta_9}{13,68R} + \frac{a_2}{\text{Re}} \right). \quad (6.10)$$

де Δ_9 – еквівалентна абсолютна шорсткість;

a_2 – коефіцієнт, що враховує характер шорсткості стінок труб;

Re – число Рейнольдса.

Ця універсальна формула справедлива для всіх трьох областей турбулентного режиму руху: областей гладких труб, квадратичного опору і перехідної області між ними. Для розрахунку коефіцієнта λ можна використовувати формулу, яка б пов'язала коефіцієнт шорсткості та абсолютну еквівалентну шорсткість:

$$n = 0,0392 \cdot \sqrt[6]{\Delta_g}. \quad (6.11)$$

При проектуванні водовідвідних мереж потрібно виконувати розрахунки великого числа окремих ділянок трубопроводів з різними умовами проектування. Їх розрахунок проводиться шляхом застосування тих чи інших спрощують прийомів, при яких використовуються розроблені таблиці, графіки, номограми, різні узагальнені параметри тощо. В даний час для розрахунку самопливних трубопроводів використовують різні таблиці, до числа яких належать таблиці А. А. Лукіних і Н. А. Лукіних, які складені за формулою М. М. Павловського [7] та М. Ф. Федорова та Л. Є. Волкова.

У таблиці 4.5 наведена коротка витримка з перших таблиць для трубопроводу діаметром 200 мм. Таблиці містять значення витрати і швидкості при різних наповненнях від 0,05 до 1,0 для всіх можливих в інженерній практиці діаметрів і ухилів труб. При проектуванні водовідвідних мереж попередньо визначають розрахункову витрату. Ухил трубопроводу приймають з урахуванням ухилу поверхні землі та керуючись економічними міркуваннями (мінімальними об'ємом земляних робіт і вартості будівництва). Розрахунок трубопроводів за описаними таблицями зводиться до підбору діаметра трубопроводу, що забезпечує пропуск витрати при наповненні, відповідному самоочищуючій швидкості. Цей розрахунок вельми простий і зручний. Однак для нього потрібні таблиці великого об'єму, які видаються окремими книжками. Вони повинні бути «під рукою» у кожного проектувальника. У той же час, видані таблиці не охоплюють усіх можливих у інженерній практиці діаметрів і ухилів трубопроводів і параметрів їх роботи.

Аналогічно ведеться розрахунок за графіками та номограмами. Він вимагає кропіткої роботи. В інженерній практиці ними користуються рідше.

6.4 Врахування місцевих опорів при гідравлічному розрахунку водовідвідних мереж

Гідравлічний розрахунок водовідвідних мереж заснований на положенні, що в мережі рух стічних вод є рівномірним і сталим. Насправді через місцеві опори (перепади, повороти тощо) на значному протязі трубопроводів спостерігається нерівномірний рух.

Найбільш різке зниження швидкості при безнапірному русі відбувається перед поворотами потоку й перед бічними приєднаннями. Тут може випасти суспензія, що призводить до замулювання мережі. Тому при гідравлічному розрахунку як напірних, так і самопливних мереж слід враховувати місцеві втрати напору, які визначаються за формулою Вейсбаха:

$$h_m = \sum \zeta \frac{v^2}{2g}. \quad (6.12)$$

де h_m – втрати напору, м;
 ζ – коефіцієнт місцевого опору;
 v – середня швидкість течії, м/с.

Таблиця 6.5 – Значення витрат стічних вод q і швидкостей їх руху v в трубах $d = 200$ мм

Наповнення, долі d	Значення q , л/с і v , м/с при ухилі, тисячні					
	5		6		7	
	q	v	q	v	q	v
0,05	0,11	0,18	0,12	0,20	0,13	0,21
0,10	0,45	0,28	0,50	0,30	0,54	0,33
0,15	1,06	0,36	1,16	0,39	1,26	0,42
0,20	1,91	0,43	2,09	0,47	2,26	0,50
0,25	2,98	0,49	3,26	0,53	3,52	0,58
0,30	4,26	0,54	4,67	0,59	5,05	0,64
0,35	5,71	0,58	6,26	0,64	6,76	0,69
0,40	7,34	0,62	8,04	0,69	8,69	0,74
0,45	9,07	0,66	9,94	0,72	10,7	0,78
0,50	10,9	0,69	11,9	0,76	12,9	0,82
0,55	12,7	0,72	14,0	0,79	15,1	0,85
0,60	14,6	0,74	16,0	0,81	17,3	0,89
0,65	16,5	0,76	18,0	0,83	19,5	0,90
0,70	18,2	0,78	20,0	0,85	21,6	0,92
0,75	19,8	0,79	21,8	0,86	23,5	0,93
0,80	21,3	0,79	23,3	0,87	25,2	0,93
0,85	22,4	0,79	24,6	0,86	26,6	0,93
0,90	23,2	0,78	25,4	0,85	27,5	0,82
0,95	23,4	0,76	25,6	0,83	27,7	0,90
1,00	21,8	0,69	23,9	0,76	25,8	0,82

При розрахунках зазвичай приймають середню швидкість, віднесену до перетину, розташованому нижче за течією після місцевого опору. Коефіцієнт місцевого опору залежить від значення числа Рейнольдса. Практично місцеві втрати напору в поворотних колодязях складають 1,5–3 см, а сполучних колодязях досягають 6 см. Тому, наприклад, в поворотних колодязях слід давати додатковий ухил поворотному лотку на величину місцевих втрат напору (рис. 6.8).

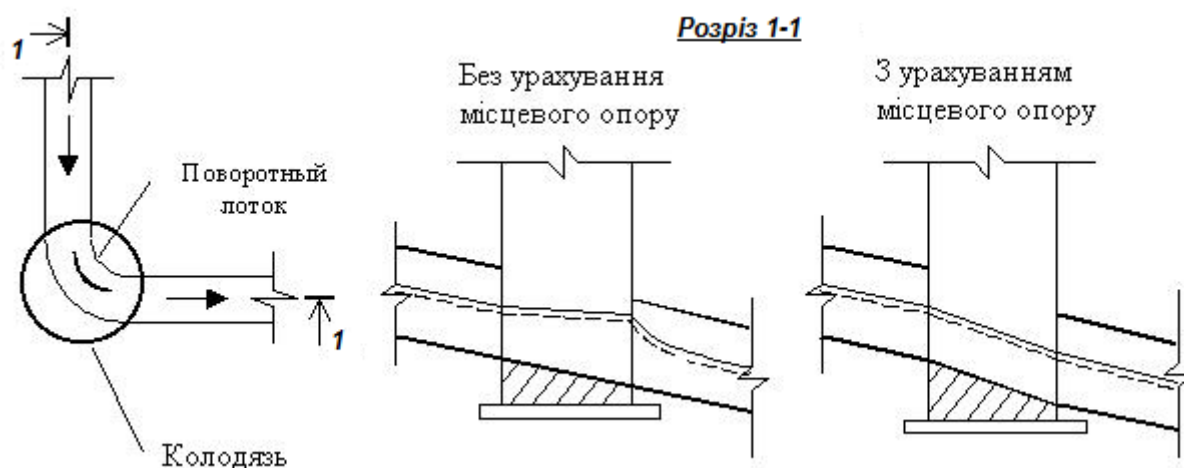


Рисунок 6.8 – Врахування місцевого опору в поворотних колодязях

6.5 Розрахунок напірних трубопроводів

До напірних трубопроводів відносять трубопроводи, що йдуть від насосної станції та дюкеру. Особливість їх роботи полягає в тому, що вони працюють з повним заповненням перетину труб, а тиск в них вище атмосферного. Перебіг води в напірних трубопроводах від насосної станції відбувається за рахунок тиску, створюваного насосами, а в дюкерах – за рахунок перепаду рівнів води до і після них.

Напірні трубопроводи мають велику протяжність, тому основні втрати напору в них складають по довжині трубопроводу, а місцеві втрати не перевищують 5 %.

Розрахунок напірних трубопроводів полягає у визначенні діаметра труб і втрат напору. Діаметр можна розрахувати за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{4q}{\pi V}}, \quad (6.13)$$

але для спрощення розрахунків є таблиці, за якими в залежності від швидкості в напірному трубопроводі підбирається діаметр. Швидкість руху води в трубопроводах приймаємо такою, щоб забезпечити оптимальний режим роботи системи насоси-трубопроводи. Ця швидкість повинна дорівнювати 1,5–2,5 м/с. У таблицях наводяться втрати напору на одиницю довжини. Втрати по довжині дорівнюють:

$$h_l = i \cdot l, \quad (6.14)$$

а місцеві втрати напору визначаються за формулою (4.10).

$$h_m = \sum \zeta \frac{V^2}{2g},$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору (зادвижка, коліно тощо). Також існують таблиці, за якими визначається цей коефіцієнт.

Загальні втрати напору:

$$H = il + \sum \gamma \frac{V^2}{2g}, \text{ м.} \quad (6.15)$$

Різницю відміток лотка труб на початку та наприкінці трубопроводів приймаємо рівною цим витратам.

Контрольні питання

1. Охарактеризуйте режими течії стічних вод.
2. Розкрийте особливості руху стічної рідини в водовідвідних мережах.
3. Охарактеризуйте форми поперечного перетину труб і каналів.
4. Дайте визначення гідравлічного радіусу та наповнення труб. Їх взаємозв'язок.
5. Охарактеризуйте швидкості руху стічних вод.
6. Охарактеризуйте мінімальні діаметри та мінімальні ухили труб водовідвідних мереж. Принципи визначення.
7. Охарактеризуйте формули та таблиці для гідравлічного розрахунку водовідвідної мережі.
8. Врахування місцевих опорів при гідравлічному розрахунку водовідвідних мереж.
9. У чому полягає розрахунок напірних трубопроводів?