

Ткачук О. А., д.т.н. професор, Ліпянін В. А., к.т.н., доцент, Шевчук О. В., к.т.н., Ярута Я. В., доктор філософії (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, o.a.tkachuk@nuwm.edu.ua, v.a.lipyenin@nuwm.edu.ua, o.v.shevchuk@nuwm.edu.ua, ia.v.yaruta@nuwm.edu.ua)

ОПТИМІЗАЦІЯ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ТРУБОПРОВОДІВ МІСЬКОГО ВОДОВІДВЕДЕННЯ

Проаналізовано основні взаємозв'язки між конструктивними і кінематичними параметрами трубопроводів водовідведення при виконанні їхніх гідравлічних розрахунків за спрощеною формулою. Наведено оригінальні залежності, отримані авторами, для взаємозв'язків між параметрами трубопроводів. Встановлено, що характер зміни витрат води і швидкостей потоків у їхньому живому перерізі не залежить від діаметрів та ухилів трубопроводів, а тільки від їхнього наповнення. Значення мінімально допустимих ухилів трубопроводів для усіх типів міського водовідведення практично співпадають, залежать тільки від їх діаметрів і можуть бути визначені за отриманою емпіричною формулою. Визначено гранично допустимі мінімальні та максимальні ухили, а також максимальні витрати стічних вод, що відповідають цим ухилам для трубопроводів різних діаметрів. Для практичних розрахунків запропоновано програмний модуль, який слід застосовувати як електронний калькулятор гідравлічних розрахунків.

Ключові слова: гідравлічні розрахунки; колектори; трубопроводи; міське водовідведення.

Проектування зовнішніх трубопровідних мереж систем міського водовідведення базується на їхніх гідравлічних розрахунках, метою яких є оцінка пропускної здатності як окремих ділянок, так і мережі в цілому, при дотриманні нормативних обмежень до конструктивних і кінематичних параметрів потоків [1–6]. Враховуючи, що будівельна вартість колекторів систем водовідведення, більшість з яких є безнапірними, залежить від величин діаметрів труб і глибин їх закладання, важливе значення має оптимізація гідравлічних розрахунків з метою встановлення взаємозв'язків між конструктивними

(діаметри, ухили і заглиблення) та кінематичними (витрати стічних вод, швидкості, наповнення труб, числа Рейнольдса) параметрами трубопроводів. Актуальність оптимізації гідравлічних розрахунків зростає у випадках, коли потрібно дати оцінку можливому затопленню міських територій стічними водами. Це стосується, зокрема, мереж дощового водовідведення, для яких допускається підняття рівнів води у колодязях, тобто короткочасний напірний режим роботи [2, п. А1]. Такі умови роботи, а отже, і проектування мереж міського водовідведення потребують багатофакторного аналізу гідравлічно взаємозв'язаних параметрів.

Питанням руху води у трубопроводах присвячували багато наукових праць провідні вчені: С. Шезі, А. Дарсі, Ю. Вейсбах, М. М. Павловський, Л. Прандтль, І. Нікурадзе, Ф. Кольбрук, А. Д. Альтшуль, М. Ф. Федоров, Ю. М. Константинов, М. М. Хлапук, В. С. Мошинський та ін. [1–12]. За результатами їхніх досліджень запропоновано ряд формул для гідравлічних розрахунків трубопроводів. Для мереж водовідведення найбільше поширення отримали формули Кольбрука – Уайта [5; 10; 12], А. Шезі [1; 6; 12], М. М. Федорова [4; 5; 9]. Для напірних трубопроводів – формули Кольбрука – Уайта, Ф. О. Шевельова [3; 5] та Хазена – Вільямса [5; 11]. Вони дозволяють достатньо точно розрахувати залежність одних параметрів від інших (наприклад, коефіцієнта гідравлічного тертя від числа Рейнольдса та шорсткості внутрішньої поверхні труб) для визначених умов функціонування (тип і величина шорсткості, температура і каламутність води тощо). Як відомо, більшість вказаних формул є достатньо складними, багаточленними, містять логарифми і навіть задані у неявному вигляді (формула Кольбрука – Уайта). Це суттєво ускладнює розрахунки, особливо, оптимізаційні. Крім того, багатофакторний аналіз [7; 10; 12] показує, що впливові параметри (величини шорсткості, овальність труб, наявність місцевих опорів тощо) суттєво впливають на точність кінцевих розрахунків. Тому висока точність вказаних формул на тільки не відповідає точності кінцевих результатів, але й суттєво ускладнює оптимізаційні розрахунки. Для цих цілей найбільш придатною є спрощена формула (1), раніше запропонована авторами [7]

$$I_p = I_{TP} = k_v \cdot \frac{v^{\beta}}{(4-R)^{\beta}} = k_v \cdot \frac{v^{\beta}}{d^{\beta}} \cdot k_{h/d} \gamma = k \cdot \frac{q^{\beta}}{d^m} \cdot k_{h/d} \quad (1)$$

де k_v , k , β , p і m – коефіцієнти та показники степеня, які залежать від шорсткості внутрішньої поверхні труб, яка так само залежить від ма-

теріалу труб, кількості відкладень на стінках тощо (для мереж міського водовідведення їх можна прийняти рівними: $k_v = 0,0013$; $k = 0,002087$; $\theta = 1,96$; $p = 1,31$; $m = 5,23$ [7]);

V – середня швидкість потоку, м/с;

q – розрахункові витрати води, м³/с, або л/с;

R – гідравлічний радіус потоку у трубопроводі, який визначають за формулою (5), м;

d – внутрішній діаметр труби, м;

$k_{h/d}$ і k_{h/d_v} – коефіцієнти, що залежать від наповнення трубопроводу, які визначають за формулами

$$k_{h/d} = 0.74 + 0.26 \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{-3.92}; \quad (2)$$

$$k_{h/d_v} = k_{h/d} \cdot \left(\frac{\alpha - \sin \alpha}{2\pi}\right)^\beta, \quad (3)$$

де h/d – наповнення труби;

α – центральний кут сегмента наповнення труби h/d , рад (рис. 1).

Метою даної статті є встановлення аналітичних залежностей між конструктивними та кінематичними параметрами трубопроводів міського водовідведення для оптимізації їхніх гідравлічних розрахунків.

Для гідравлічних розрахунків безнапірних трубопроводів водовідведення за формулою (1) використано відомі залежності між діаметром труби d , її наповненням h/d , центральним кутом сегменту наповнення труби α , змоченим периметром χ , площею наповнення ω , середньою швидкістю потоку V і числом Рейнольдса (рис. 1)

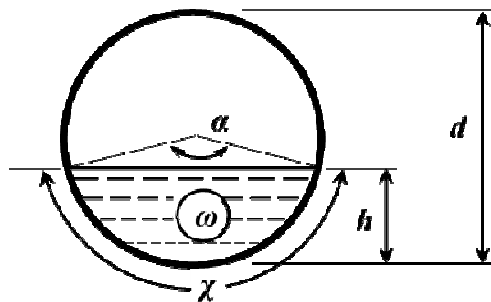


Рис. 1. Схема до визначення гідравлічних параметрів труби

$$\chi = \alpha \cdot \frac{d}{2}; \quad (4)$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{d}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha}\right); \quad (5)$$

$$\omega = \frac{d^2}{8} \cdot (\alpha - \sin \alpha); \quad (6)$$

$$\alpha = 2 \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{h}{d}\right); \quad (7)$$

$$V = \frac{8 \cdot q}{d^2 \cdot (\alpha - \sin \alpha)}; \quad (8)$$

$$Re = \frac{4 \cdot V \cdot R}{\nu} = \frac{V \cdot d}{\nu} \cdot \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha}\right), \quad (9)$$

де ν – кінематична в'язкість стічних вод, м²/с, яка залежить від їх температури та концентрації зважених речовин [9, табл. IV].

Як відомо [2, п. 6.1] у безнапірних трубопроводах гідравлічні ухили завжди рівні ухилам трубопроводів $I_{тр}$ та поверхні потоку I_p . Тому, при відомих значеннях конструктивних параметрів трубопроводу $I_{тр}$ та d , м, а також заданих величинах витрат води на окремих ділянках q , м³/с, кінематичні параметри потоків на підставі формул (1) і (2) слід визначати за формулами:

- коефіцієнт наповнення трубопроводу

$$k_{h/d} = \frac{I_{тр} \cdot d^{3m}}{k \cdot q^\beta}; \quad (10)$$

- наповнення трубопроводу

$$\frac{h}{d} = \frac{0,71}{(k_{h/d} - 0,74)^{0,266}}; \quad (11)$$

- середня швидкість води у потоці трубопроводу, м/с

$$V = \frac{I_{тр}^{\frac{1}{\beta}} \cdot d^{\frac{p}{\beta}}}{k_v^{\frac{1}{\beta}}} \cdot \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^{\frac{p}{\beta}} = \frac{4 \cdot I_{тр}^{\frac{1}{\beta}} \cdot d^{\frac{p}{\beta}}}{\pi \cdot k^{\frac{1}{\beta}}} \cdot \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^{\frac{p}{\beta}}. \quad (12)$$

Особливістю мереж міського водовідведення є те, що переважна їхня більшість є безнапірними і працює у самопливному режимі. При цьому для будь-яких витрат стічних вод гідравлічні ухили на ділянках мережі завжди однакові і дорівнюють ухилам самих трубопроводів. Зміна витрат води супроводжується зміною наповнень трубопроводів та швидкостей потоків. Для оцінки взаємозв'язків між кінематичними параметрами потоків при сталих ухилах трубопроводів встановлено залежності їхніх наповнень від відносних витрат і відносних середніх швидкостей по висоті потоків $h/d = f(q/q_1)$ і $h/d = f(V/V_1)$. Для цього на основі формул (1), (2) і (3) визначено коефіцієнти

K_q і K_v , що є співвідношенням витрат q (і швидкостей V) при частковому наповненні h/d до витрати q_1 (і швидкості V_1) при повному наповненні $h/d = 1,0$ трубопроводу (рис. 2)

$$K_q = \frac{q}{q_1} = \frac{1}{(0,74 + 0,26 \cdot (h/d)^{-3,92})^{1/\beta}}; \quad (13)$$

$$K_v = \frac{V}{V_1} = \frac{2 \cdot \pi}{(\alpha - \sin \alpha) \cdot (0,74 + 0,26 \cdot (h/d)^{-3,92})^{1/\beta}}. \quad (14)$$

Отримані дані показують, що характер змін наповнень трубопроводів не залежить від діаметрів та ухилів трубопроводів, а тільки від змін витрат води і швидкостей потоків у їхніх живих перерізах. Характерно, що збільшення наповнення трубопроводу супроводжується постійним зростанням витрат води, а швидкості при наповненнях $h/d > 0,7$ стабілізуються на рівні їхніх максимальних значень для даного діаметра і ухилу трубопроводу. Це вказує на те, що при мінімально допустимому ухилі трубопроводу нормативна мінімальна швидкість стічних вод за своєю суттю дорівнює максимальній для заданого діаметра (табл. 1).

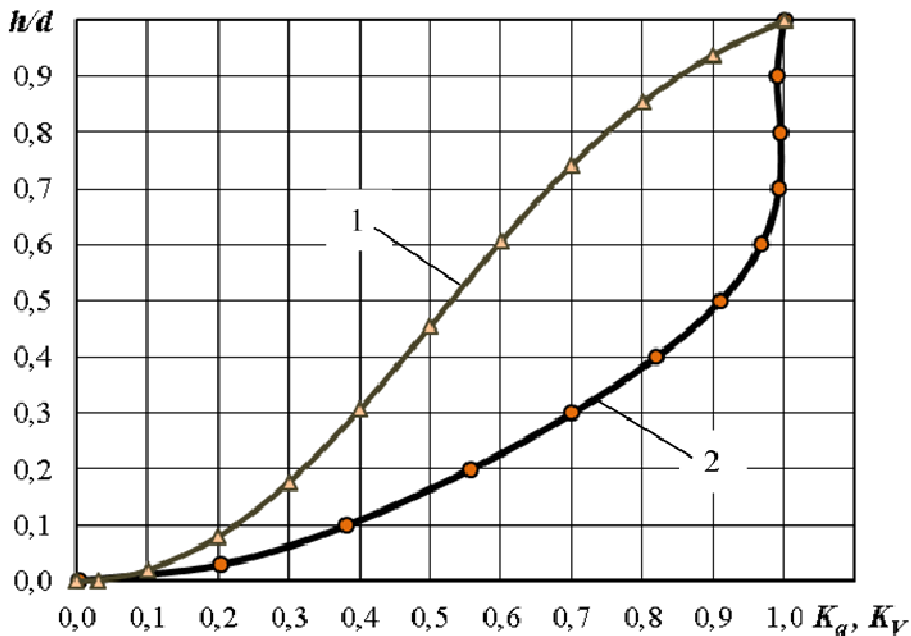


Рис. 2. Зміни наповнень h/d від відносних витрат K_q та середніх швидкостей K_v потоків у трубопроводах:
1 – залежність $h/d = f(K_q)$; 2 – те ж, $h/d = f(K_v)$

На основі формул (1)–(8) для практичних розрахунків можуть бути складені або спеціальні програми, або програмні модулі. Таким, зокрема, у середовищі *Microsoft Excel* є програмний модуль **Гідр_Розр_ТрКан.xlsx**, який слід застосовувати для гідравлічних розрахунків як електронний калькулятор (рис. 3). За його допомогою можна визначати наповнення h/d і середню швидкість води V у трубопроводі при заданому діаметрі труб d , витраті води q та ухилі трубопроводу $I_{тр}$. У безнапірному режимі має місце: $h/d \leq 1,0$; $I_p = I_{тр}$. У випадку «переповнення мережі», тобто роботи трубопроводу у напірному режимі, буде зафіксовано: $h/d = 1,0$; $I_p > I_{тр}$. Це вказує на надзвичайні умови роботи самопливних мереж.

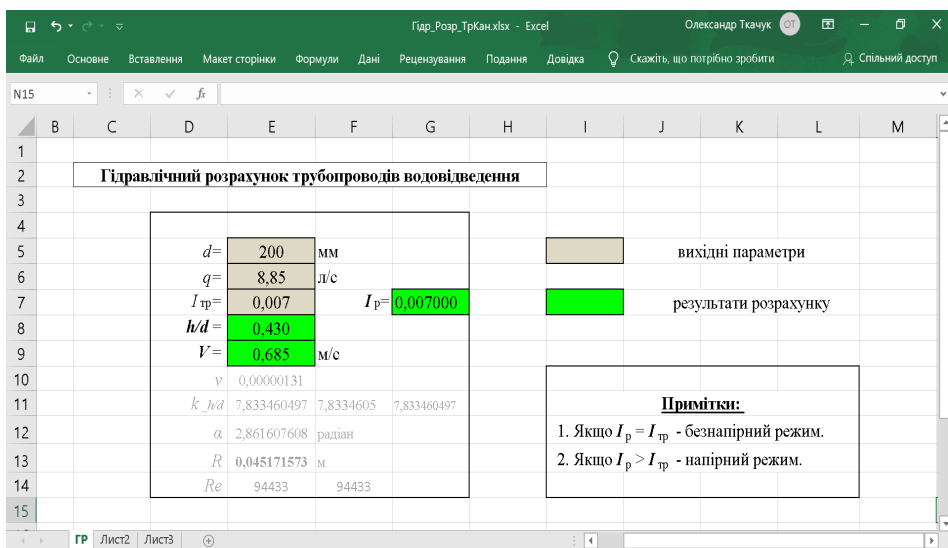


Рис. 3. Приклад робочого поля програмного модуля **Гідр_Розр_ТрКан.xlsx**

Крім основних результатів розрахунків, сірим кольором наведено проміжні дані обчислень, які можуть бути корисними для поглибленого аналізу чи для пошуку оптимальних значень, наприклад, ухилу чи діаметра трубопроводу.

Такий підхід є альтернативою гідравлічним розрахункам за допомогою таблиць [0], а також інструментом для створення і налаштування спеціальних програм чи програмних модулів для розрахунків всієї мережі водовідведення з гідравлічною ув'язкою параметрів окремих її ділянок.

Безнапірні трубопроводи у складі мереж різного призначення мають специфічні конструктивні особливості, різні нормативні вимо-

ги щодо режимів роботи та умов функціонування, а також нормативні обмеження (табл. 1).

Таблиця 1

Нормативні вимоги та обмеження до влаштування мереж водовідведення

№ з/п	Параметри	Показники для мереж		Додаткові умови
		Господарсько-побутових	дощових та загальносплавних	
1	Мінімально допустимі діаметри труб d [2, п. 8.3.1]:			
	- внутрішньо квартальних	150	200	
	- вуличних	200	250	
2	Найменші ухили трубопроводів $I_{\text{тр.мін}}$ [2, п. 8.5.1]:			
	- для діаметрів $d = 150$ мм	0,008	-	0,007 (0,006) ¹
	- для діаметрів $d = 200$ мм	0,007	0,007	0,005 (0,004) ¹
	- для діаметрів $d > 200$ мм	залежно від $V_{\text{мін}}$ при $(h/d)_{\text{макс}}$ (рис. 2)		
3	Найбільше розрахункове наповнення труб $(h/d)_{\text{макс}}$ [2, табл. 6]:			
	- для діаметрів $d \leq 250$ мм	0,6	1,0	
	- для $d = 300-400$ мм	0,7	1,0	
	- для $d = 450-900$ мм	0,75	1,0	
	- для $d > 1000$ мм	0,8	1,0	
4	Найменші розрахункові швидкості стічних вод у трубах $V_{\text{мін}}$ при найбільшому розрахунковому наповненні труб $(h/d)_{\text{макс}}$ [2, п. 8.4.1]:			
	- для діаметрів $d \leq 250$ мм	0,7	0,7	Для пластмасових труб [2, табл. 6, прим. 1]:
	- для $d = 300-400$ мм	0,8	0,8	
	- для $d = 450-500$ мм	0,9	0,9	
	- для $d = 600-800$ мм	1,0	1,0	
	- для $d = 900$ мм	1,15	1,15	
	- для $d = 1000-1200$ мм	1,2	1,2	
	- для $d = 1500$ мм	1,3	1,3	
	- для $d \geq 1500$ мм	1,5	1,5	
- для $d \geq 1500$ мм	1,5	1,5		
5	Максимальні швидкості стічних вод у трубах $V_{\text{макс}}$ [2, п. 8.4.3]:			
	- для металевих труб	8,0	10,0	
	- для неметалевих труб	4,0	7,0	

Примітки: 1. Залежно від місцевих умов, як виняток, для окремих ділянок найменші ухили трубопроводів $I_{\text{тр.мін}}$ можуть бути зменшені до вказаних величин (в дужках – значення для пластмасових труб).

2. Для дощової каналізації при періоді одноразового перевищення

розрахункової інтенсивності дощу $P = 0,33$ року – $V_{\text{мін}} = 0,6$ м/с [2, п. 8.4.1, табл. 6, прим. 4].

Дотримання цих вимог є обов'язковим при проектуванні міських мереж водовідведення, конструктивні параметри яких визначають на основі їхніх гідравлічних розрахунків. Тому при оптимізації гідравлічних розрахунків кожного із типів мереж міського водовідведення важливе значення мають їхні особливі умови функціонування, нормативні вимоги та обмеження.

Для самопливних трубопроводів значення максимальних розрахункових наповнень $(h/d)_{\text{макс}}$, відповідних їм мінімальних швидкостей $V_{\text{мін}}$ і найменших ухилів $I_{\text{тр.мін}}$ обумовлені нормативом [0]. При цьому значення найменших ухилів $I_{\text{тр.мін}}$ необхідно приймати залежно від допустимих найменших розрахункових швидкостей руху стічних вод у трубопроводах і каналах при найбільшому їхньому розрахунковому наповненні $(h/d)_{\text{макс}}$ [2, п. 8.5.1]. На основі формул (1), (2) і (3) при відповідних нормативних величинах $V_{\text{мін}}$ та $(h/d)_{\text{макс}}$ отримано

$$I_{\text{тр.мін}} = k_v \cdot \frac{V_{\text{мін}}^{\beta}}{d^{\beta}} \cdot \left(0,74 + \frac{0,26}{(h/d)_{\text{макс}}^{0,92}} \right) \cdot \left(\frac{\alpha - \sin \alpha}{2\pi} \right)^{\beta}. \quad (15)$$

Розраховані за формулою (15) значення $I_{\text{тр.мін}}$ для різних діаметрів труб d і відповідних їм нормативних величин $V_{\text{мін}}$ та $(h/d)_{\text{макс}}$ (табл. 1) наведено на рис. 4.

Отримані дані показують, що значення $I_{\text{тр.мін}}$, особливо для труб великих діаметрів всіх типів водовідведення (господарсько-побутового, дощового і загальносплавного), практично співпадають. Для практичних розрахунків величини $I_{\text{тр.мін}}$ для $d > 200$ мм з достатньою точністю можуть бути визначені за рис. 4 або за апроксимуючою залежністю

$$I_{\text{тр.мін}} = 0,22 \cdot d^{-0,7}, \quad (16)$$

де d – діаметр трубопроводу, мм.

Для труб діаметрами 150 і 200 мм мінімально допустимі величини ухилів $I_{\text{тр.мін}}$ слід приймати згідно нормативних вимог, наведених у табл. 1.

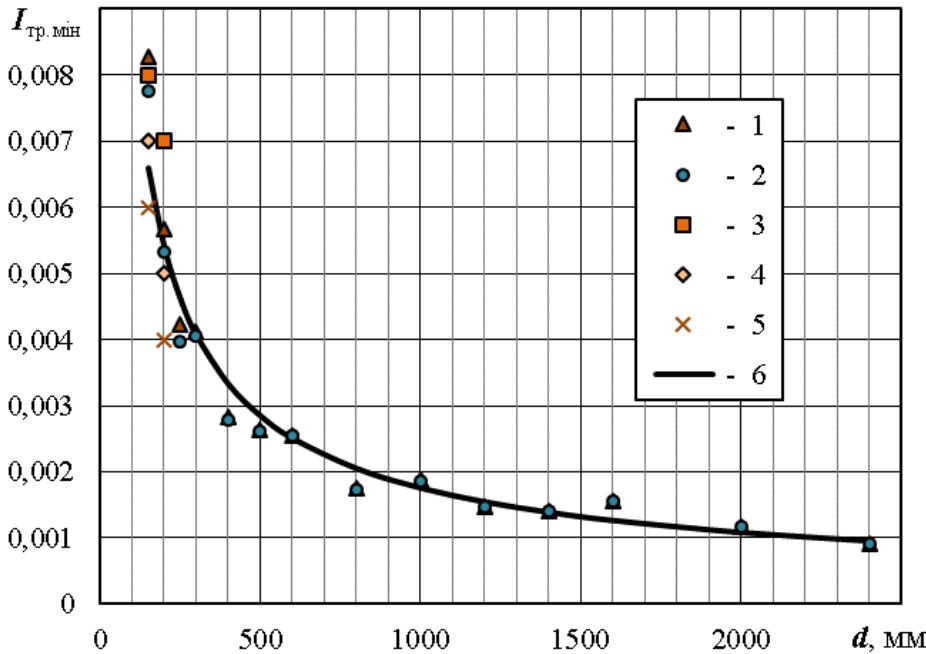


Рис. 4. Зміни мінімально допустимих ухилів трубопроводів $I_{\text{тр.мін}}$ залежно від їхніх діаметрів d при відповідних їм нормативних величинах $V_{\text{мін}}$ та $(h/d)_{\text{макс}}$:

- 1 – розраховані за формулою (15) значення $I_{\text{тр.мін}}$ для трубопроводів мереж господарсько-побутового водовідведення; 2 – те ж, для дощового і загальносплавного водовідведення; 3 – нормативні величини $I_{\text{тр.мін}}$ для труб $d = 150$ і 200 мм; 4 – те ж, допустимі, як виняток, для окремих ділянок мережі; 5 – те ж, при застосуванні пластмасових труб; 6 – лінія апроксимаційної залежності (16)

Граничні величини максимальних ухилів трубопроводів водовідведення не нормуються [2]. Але для запобігання руйнуванню трубопроводів встановлено максимальні швидкості руху стічних вод у них [2, п. 8.4.3]. Однак, враховуючи безпосередню залежність середніх швидкостей руху води у трубопроводах від їхніх ухилів (формула (12)), аналогічно, як і для $I_{\text{тр.мін}}$, визначено максимально допустимі ухили трубопроводів $I_{\text{тр.макс}}$. Для цього за формулами (1), (2) і (3) при $V_{\text{макс}}$ та $(h/d)_{\text{макс}}$ (табл. 1) отримано залежність

$$I_{\text{тр.макс}} = k_v \cdot \frac{v_{\text{макс}}^\beta}{d^\beta} \cdot \left(0,74 + \frac{0,26}{(h/d)_{\text{макс}}^{2,92}} \right) \cdot \left(\frac{\alpha - \sin \alpha}{2\pi} \right)^\beta. \quad (17)$$

Розраховані за цією формулою величини максимально допустимих ухилів неметалевих трубопроводів $I_{\text{тр.макс}}$ господарсько-

побутового та дощового водовідведення з відповідними їм максимальними швидкостями руху стічних вод V_{\max} і максимальними розрахунковими наповненнями трубопроводів $(h/d)_{\max}$ (табл. 1), наведено на рис. 5.

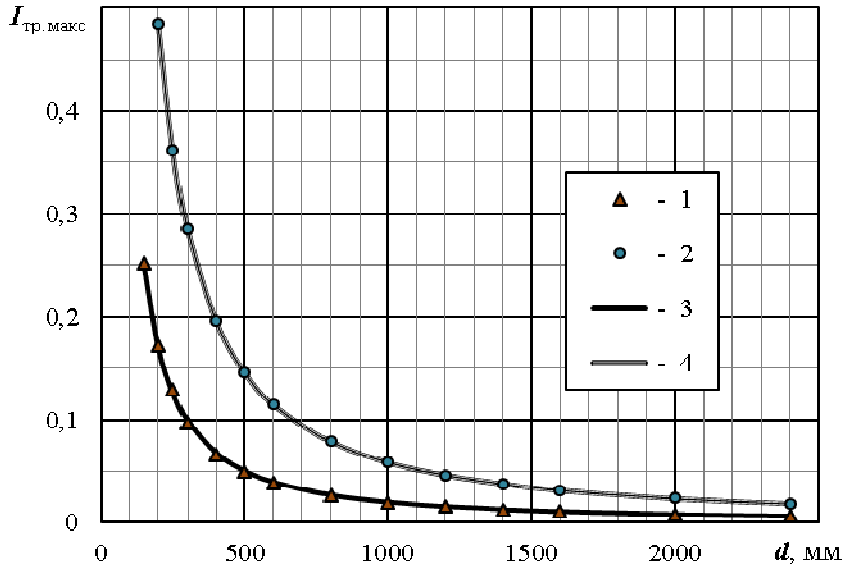


Рис. 5. Зміни максимально допустимих ухилів трубопроводів $I_{\text{тр.макс}}$ залежно від їх діаметрів d при відповідних їм нормативних величинах V_{\max} та $(h/d)_{\max}$:

1 – розраховані за формулою (17) значення $I_{\text{тр.макс.г-п}}$ для трубопроводів господарсько-побутового водовідведення; 2 – те ж, $I_{\text{тр.макс.дощ}}$ для дощового і загальносплавного водовідведення; 3 – лінія апроксимаційної залежності (18) для трубопроводів господарсько-побутового водовідведення; 4 – те ж, за формулою (19) для трубопроводів дощового і загальносплавного водовідведення

Ці значення $I_{\text{тр.макс}}$ апроксимовані залежностями, які є достатньо точними (рис. 5) і можуть бути застосовані для практичних розрахунків

$$I_{\text{тр.макс.г-п}} = 195 \cdot d^{-1,33}, \quad (18)$$

$$I_{\text{тр.макс.дощ}} = 500 \cdot d^{-1,31}, \quad (19)$$

де d – діаметри трубопроводів, мм.

При відомих величинах допустимих ухилів трубопроводів $I_{\text{тр.мін}}$ та $I_{\text{тр.макс}}$ та значеннях максимальних наповнень труб $(h/d)_{\max}$ на основі формул (1) і (2) достатньо просто визначити відповідні їм граничні максимальні витрати стічних вод

$$q_{\max, I_{\min}} = \left(\frac{I_{\text{тр.мін}} \cdot d^m}{k \cdot (0.74 + 0.26 \cdot (h/d)_{\max}^{-3.92})} \right)^{1/\beta}; \quad (20)$$

$$q_{\max, I_{\max}} = \left(\frac{I_{\text{тр.макс}} \cdot d^m}{k \cdot (0.74 + 0.26 \cdot (h/d)_{\max}^{-3.92})} \right)^{1/\beta}, \quad (21)$$

де $q_{\max, I_{\min}}$ та $q_{\max, I_{\max}}$ – максимально допустимі граничні витрати стічних вод при ухилах трубопроводів $I_{\text{тр.мін}}$ та $I_{\text{тр.макс}}$.

Результати розрахунків за формулами (20) і (21) для значень $(h/d)_{\max}$ (табл. 1) наведені на рис. 6 та у табл. 2. Біля відповідних ліній на рис. 6 наведені більш прості степеневі формули $q = a \cdot d^\alpha$, які достатньо точно апроксимують складніші залежності (20) і (21) і є зручнішими для практичних розрахунків. Наведені у табл. 2 значення витрат стічних вод q_{\max} для $I_{\text{тр.мін}}$ і $I_{\text{тр.макс}}$ визначають їхні діапазони при зміні ухилів трубопроводів від мінімально допустимих до максимальних. Це дозволяє оптимізувати гідравлічні розрахунки за рахунок обґрунтованого вибору діаметрів труб.

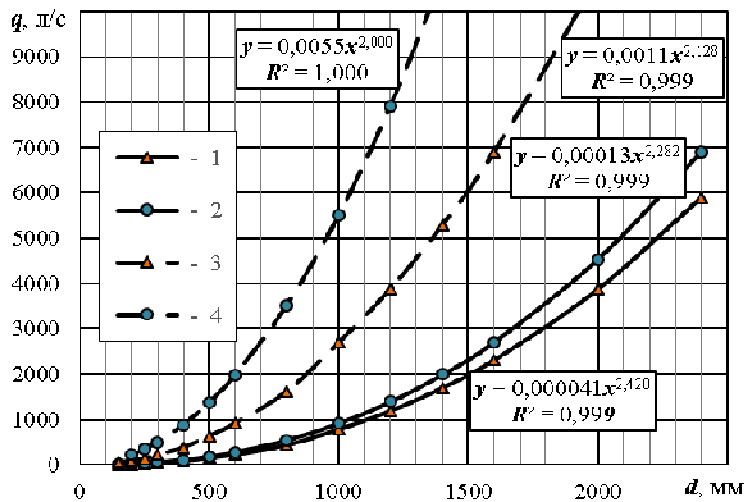


Рис. 6. Зміни максимально допустимих витрат води у трубопроводах залежно від їх діаметрів d при відповідних їм допустимих ухилах $I_{\text{тр.мін}}$ і $I_{\text{тр.макс}}$ та $(h/d)_{\max}$:

- 1 – розраховані за формулою (20) значення $q_{\max, I_{\min}}$ для трубопроводів господарсько-побутового водовідведення; 2 – те ж, для дощового і загальносплавного водовідведення; 3 – розраховані за формулою (21) значення $q_{\max, I_{\max}}$ для трубопроводів господарсько-побутового водовідведення; 4 – те ж, для дощового і загальносплавного водовідведення

Для визначення діаметрів труб, які слід прокладати з мінімально допустимими ухилами (практично горизонтальна поверхня землі, або має зворотній ухил), на основі формул, що наведені на рис. 6 для ліній 1 і 2, для відомих витрат води на ділянках $q_{г-п}$ і $q_{дощ}$, л/с, рекомендовано такі залежності

- для господарсько-побутових мереж

$$d_{рек.г-п} = \left(\frac{q_{г-п}}{0,000041} \right)^{1/2,42} = 65 \cdot q_{г-п}^{0,41}; \quad (22)$$

- для дощових мереж

$$d_{рек.дощ} = \left(\frac{q_{дощ}}{0,00013} \right)^{1/2,282} = 50 \cdot q_{дощ}^{0,438}. \quad (23)$$

Отримані за цими формулами значення діаметрів труб d , мм, заокруглюють у більшу сторону до найближчих стандартних величин діаметрів і за формулою (16) уточнюють значення мінімально допустимого ухилу трубопроводу $I_{тр.мін}$.

Таблиця 2

Максимально допустимі витрати води у трубопроводах мереж водовідведення

d , мм	Для мінімальних ухилів			Для максимальних ухилів			
	$I_{тр.мін}$	$q_{макс.мін}$, л/с		$I_{тр.макс}$		$q_{макс.макс}$, л/с	
		осп.-поб	дощових	госп.-поб.	дощових	осп.-поб	дощових
150	0,008	7,6	-	0,25180	-	44,3	-
200	0,007	15,3	25,3	0,17274	0,48527	78,7	219,9
250	0,00461	22,5	37,1	0,12896	0,36227	123,0	343,6
300	0,00406	42,0	56,5	0,09658	0,28530	211,4	494,8
400	0,00332	81,6	109,9	0,06625	0,19572	375,8	879,7
500	0,00284	147,5	184,0	0,04915	0,14611	631,9	1374,5
600	0,00250	224,8	280,5	0,03871	0,11507	909,9	1979,3
800	0,00204	437,1	545,4	0,02655	0,07894	1617,6	3518,8
1000	0,00175	779,8	913,4	0,01986	0,05893	2694,4	5498,1
1200	0,00154	1188,4	1392,1	0,01564	0,04641	3880,0	7917,2
1400	0,00138	1697,0	1987,9	0,01278	0,03792	5281,1	10776,2
1600	0,00126	2310,6	2706,6	0,01073	0,03184	6897,8	14075,1
2000	0,00108	3869,9	4533,3	0,00801	0,02377	10777,8	21992,3
2400	0,000947	5898,1	6909,0	0,00631	0,01872	15520,0	31668,9

Висновки. Характер зміни витрат води і швидкостей потоків у їхніх живих перерізах не залежать від діаметрів та ухилів трубопроводів, а тільки від їхніх наповнень. При наповненні $h/d > 0,7$ швидкості стабілізуються на рівні їхніх максимальних значень для даного

діаметра і ухилу трубопроводу. При мінімально допустимому ухилі трубопроводу нормативна мінімальна швидкість стічних вод за своєю суттю дорівнює максимальній для заданого діаметра труб.

Встановлено, що для всіх типів міського водовідведення (господарсько-побутового, дощового і загальносплавного), значення мінімально допустимих ухилів трубопроводів практично співпадають, залежать тільки від їх діаметрів і можуть бути визначені за отриманою емпіричною формулою (16).

Визначено гранично допустимі мінімальні та максимальні ухили, а також максимальні витрати стічних вод, що відповідають цим ухилам для трубопроводів різних діаметрів (рис. 6 і табл. 2).

1. Справочник по гидравлике / Большаков В. А., Константинов Ю. М., Попов В. Н. и др. Київ : Вища школа, 1984. 343 с. 2. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. 112 с.
3. Константинов Ю. М., Гіжа О. О. Технічна механіка рідин та газу : підручник. Київ : Вища школа, 2002. 277 с.
4. Гидравлический расчет сетей водотоотведения. Расчетные таблицы / Константинов Ю. М., Василенко А. А., Сапухин А. А., Батченко Б. Ф. Київ : Будівельник, 1987. 120 с.
5. Курганов А. М., Федоров Н. Ф. Гидравлические расчеты водоснабжения и водоотведения : справочник. Л. : Стройиздат, 1986. 440 с.
6. Лукиных А. А., Лукиных М. А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н.Павловского. М. : Стройиздат, 1987. 156 с.
7. Ткачук О. А., Ярута Я. В. Уточнені формули для розрахунків трубопроводів мереж водовідведення. *Вісник ОДАБА* : зб. наук. праць. Одеса, 2017. Вип. 68. С. 165–172.
8. Аналіз розвитку теорії руху потоку в трубопроводах / Хлапук М. М., Мошинський В. С. Безусяк О. В. Волк Л. Р. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. 2019. Вип. 2(86). С. 70–78.
9. Федоров Н. Ф., Волков Л. Е. Гидравлический расчет канализационных сетей (Расчетные таблицы). 4-е издание. Л. : Стройиздат, 1968. 251 с.
10. Brkić D. A note on explicit approximations to Colebrook's friction factor in rough pipes under highly turbulent cases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. 93, 513–515. URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.109> (дата звернення: 15.05.2022).
11. Fluid Flow Friction Loss – Hazen-Williams Coefficients. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d_798.html (дата звернення: 15.05.2022).
12. Mala-Jetmarova H., Sultanova N., Savic D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental Modelling & Software*. 2017. 93, 209–254. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.009> (дата звернення: 15.05.2022).

REFERENCES:

1. Spravochnik po gidravlike / Bolshakov V. A., Konstantinov Yu. M., Popov V. N. i dr. Kyiv : Vyshcha shkola, 1984. 343 s.
 2. DBN V.2.5-75:2013. Kanalizatsiia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia. [Chynnyi vid 2014-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2013. 112 s.
 3. Konstantynov Yu. M., Hizha O. O. Tekhnichna mekhanika ridyn ta hazu : pidruchnyk. Kyiv : Vyshcha shkola, 2002. 277 s.
 4. Gidravlicheskiy raschet setey vodootvedeniya. Raschetnyie tablitsyi / Konstantinov YU. M., Vasilenko A. A., Sapuhin A. A., Batchenko B. F. Kiiiv : Budivelnik, 1987. 120 s.
 5. Kurganov A. M., Fedorov N. F. Gidravlicheskie raschetyi vodosnabjeniya i vodootvedeniya : spravochnik. L. : Stroyizdat, 1986. 440 s.
 6. Lukinyih A. A., Lukinyih M. A. Tablitsyi dlya gidravlicheskogo rascheta kanalizatsionnyih setey i dyukerov po formule akad. N.N. Pavlovskogo. M. : Stroyizdat, 1987. 156 s.
 7. Tkachuk O. A., Yaruta Ya. V. Utochneni formuly dlia rozrakhunkiv truboprovodiv merezh vodovidvedennia. *Visnyk ODABA* : zb. nauk. prats. Odesa, 2017. Vyp. 68. S. 165–172.
 8. Analiz rozvytku teorii rukhu potoku v truboprovodakh / Khlapuk M. M., Moshynskiy V. S. Bezusiak O. V. Volk L. R. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky*. 2019. Vyp. 2(86). S. 70–78.
 9. Fedorov N. F., Volkov L. E. Gidravlicheskiy raschet kanalizatsionnyih setey (Raschetnyie tablitsyi). 4-e izdanie. L. : Stroyizdat, 1968. 251 s.
 10. Brkić D. A note on explicit approximations to Colebrook's friction factor in rough pipes under highly turbulent cases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. 93, 513–515. URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.109> (data zvernennia: 15.05.2022).
 11. Fluid Flow Friction Loss – Hazen-Williams Coefficients. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d_798.html (дата звернення: 15.05.2022).
 12. Mala-Jetmarova H., Sultanova N., Savic D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental Modelling & Software*. 2017. 93, 209–254. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.009> (data zvernennia: 15.05.2022).
-

**Tkachuk O. A., Doctor of Engineering, Professor, Lipianin V. A.,
Candidate of Engineering (Ph.D.) Associate Professor, Shevchuk O. V.,
Candidate of Engineering (Ph.D.), Yaruta Ya. V., Ph.D. (National
University of Water and Environmental Engineering, Rivne)**

OPTIMIZATION OF HYDRAULIC CALCULATIONS OF URBAN WATER SUPPLY PIPELINES

The main dependences between the structural and kinematic parameters of drainage pipelines during their hydraulic calculations according to a simplified formula are analyzed. The patent dependences obtained by the authors for the correlations between the pipelines parameters are given. It is established that the nature of changes in water consumption and flow velocities in their cross-section does not depend on the diameters and slopes of the pipelines, but only on their filling. When filling more than two thirds of the diameters of the pipes, the velocities are stabilized at the level of their maximum values for a given diameter and slope of the pipeline. With the minimum allowable slope of the pipeline, the normative minimum velocity of wastewater is essentially equal to the maximum for a given diameter of pipes. The values of the minimum allowable slopes of pipelines for all types of urban drainage are almost the same, depend only on their diameters and can be determined by the obtained empirical formula. The critical allowable minimum and maximum slopes, as well as the maximum wastewater flow corresponding to these slopes for pipelines of different diameters are determined. For practical calculations, a software module is proposed, which should be used as an electronic calculator of hydraulic calculations. It can be used to determine the filling and average velocity of water in the pipeline at a given diameter of the pipes, water flow and slope of the pipeline. In addition to the main results of the calculations, intermediate calculation data are given, which can be useful for in-depth analysis or for finding optimal values, such as the slope or diameter of the pipeline. This approach is an alternative to hydraulic calculations using tables, as well as a tool for creating and configuring special programs or software modules for calculations of the entire drainage network with hydraulic correlation of the parameters of its individual sections.

***Keywords:* hydraulic calculations; collectors; pipelines; urban drainage.**