

УТОЧНЕНІ ФОРМУЛИ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ТРУБОПРОВОДІВ МЕРЕЖ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

Ткачук О.А., д.т.н., професор,
Ярута Я.В., аспірант,

Національний університет водного господарства та природокористування
o.a.tkachuk@nuwm.edu.ua

Анотація. Отримано уточнену степеневу формулу з визначення гідравлічних уклонів, придатну для гідравлічних і оптимізаційних розрахунків як напірних, так і безнапірних водовідвідних трубопроводів. Для визначених ДБН В.2.5-75 вимог і нормативних показників умов роботи та розрахунків цих трубопроводів отримано числові значення коефіцієнта і показників степеня уточненої степеневі формули, а також запропоновано аналітичні залежності для розрахунків коефіцієнта, що враховує наповнення трубопроводу. Порівняння результатів розрахунків за уточненою степеневою формулою із еталонними формулами, рекомендованими чинними нормативами України, показали її цілковиту придатність для практичного використання.

Ключові слова: мережі водовідведення, трубопроводи, напірні і безнапірні режими, гідравлічні розрахунки.

УТОЧНЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТРУБОПРОВОДОВ СЕТЕЙ ВОДООТВЕДЕНИЯ

Ткачук А.А., д.т.н., профессор,
Ярута Я.В., аспирант,

Национальный университет водного хозяйства и природопользования
o.a.tkachuk@nuwm.edu.ua

Аннотация. Получено уточненную степенную формулу для определения гидравлических уклонов, пригодную для гидравлических и оптимизационных расчетов как напорных, так и безнапорных водоотводящих трубопроводов. Для определенных ДБН В.2.5-75 требований и нормативных показателей условий работы и расчетов этих трубопроводов получены числовые значения коэффициента и показателей степени уточненной степенной формулы, а также предложены аналитические зависимости для расчетов коэффициента, учитывающего наполнения трубопровода. Сравнение результатов расчетов по уточненной степенной формуле с эталонными формулами, рекомендованными действующими нормативами Украины, показали ее полную пригодность для практического использования.

Ключевые слова: сети водоотведения, трубопроводы, напорные и безнапорные режимы, гидравлические расчеты.

UPDATED FORMULAS FOR CALCULATIONS OF PIPELINES OF DRAINAGE NETWORKS

Tkachuk O.A., Doctor of Engineering, Professor,
Yaruta Y.V., post-graduate student,

National University of Water and Environmental Engineering
o.a.tkachuk@nuwm.edu.ua

Abstract. The basic empirical formulas for hydraulic calculation of the networks of drainage

are analyzed. Such formulas are cumbersome, practically not suitable for optimizing the analysis of the working of the sewage network. Basic formulas for hydraulic calculations are updated. The updated power formula, which takes into account the conditions and operating modes of the sewerage networks for both their hydraulic and optimization calculations is determined. An updated power-law formula for determining hydraulic slopes is obtained, suitable for the calculation of both pressure and non-pressure drainage pipelines, which are the main part of the drainage networks of modern settlements. For certain requirements and normative indices of working conditions and calculations represented in DBN B.2.5-75, numerical values of the coefficient and exponents of the degree of the updated power formula are obtained, and analytical dependencies for calculating of the coefficient taking into account the pipeline filling are proposed. Comparison of the calculation results with the reference formulas recommended by the current Ukrainian regulations for the calculation of sewerage pipelines showed that the updated power formula with the obtained numerical values of its parameters is quite suitable for its practical use.

Keywords: sewerage networks, pipelines, pressure and non-pressure regimes, hydraulic calculations.

Вступ (постановка проблеми). Гідравлічні режими роботи мереж водовідведення передбачають як безнапірний, так і напірний рух води у колекторах, які до того ж можуть мати різну форму поперечного перерізу [1, 2]. Важливою особливістю гідравлічних розрахунків безнапірних мереж є визначення уклонів і розмірів колекторів за умов дотримання цілого ряду обмежень: мінімальне (але не менше допустимого) заглиблення; достатні незамулюючі швидкості руху стічних вод, які, до того ж, не повинні перевищувати максимально допустимі; наповнення колекторів – менше допустимого. Дошові самопливні мережі можуть працювати як у безнапірному, так і напірному режимах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Такі вимоги та умови роботи мереж водовідведення потребують врахування значної кількості впливових факторів, які можуть суттєво впливати на точність гідравлічних розрахунків. Тому вивчення питань руху води в напірних і безнапірних колекторах займалось багато провідних вчених. Найбільшого поширення отримали роботи С. Шезі, А. Дарсі, Ю. Вейсбаха, М.М. Павловського, Л. Прандтля, І. Нікурадзе, Ф. Кольбрука, А.Д. Альтшуля, М.Ф. Федорова, Ю.М. Константинова та багатьох інших [2-9].

Для практичних розрахунків мереж водовідведення найчастіше застосовують напівемпіричні та емпіричні залежності, які базуються на відомих формулах Шезі (1) та Дарсі (2) [2-9]:

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot I}; \quad (1)$$

$$I = \frac{\lambda}{4 \cdot R} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}, \quad (2)$$

де V – середня швидкість руху стічних вод, м/с; C – коефіцієнт Шезі, що залежить від гідравлічного радіуса R та шорсткості змоченої поверхні колекторів; I – гідравлічний уклон; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі); g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для визначення параметрів C і λ багатьма дослідниками запропоновано ряд емпіричних залежностей і рекомендацій, які відображають конкретні умови роботи колекторів мереж водовідведення [2-9]. Окремі із них є базовими національних стандартів. Так, в Україні для гідравлічних розрахунків каналізаційних мереж (трубопроводів, лотків і каналів) згідно із чинним ДБН В.2.5-75 [1, п.8.2.1] слід застосовувати формули (1) і (2), а зазначенні параметри визначати на основі формул Павловського М.М. (3 і 4) [3, 4] та Федорова М.Ф. (5) [3, 5]:

$$C = \frac{R^y}{n}, \quad (3)$$

де y – показник степеня, який розраховують за формулою:

$$y = 2.5 \cdot \sqrt{n} - 0.13 - 0.15 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n} - 0.1), \quad (4)$$

n – коефіцієнт шорсткості змоченої поверхні трубопроводу (лотка або каналу), який залежить від шорсткості внутрішньої поверхні і гідравлічного радіусу R і приймають за відповідними довідковими даними [3, 5];

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta_e}{13,68 \cdot R} + \frac{a_2}{Re} \right), \quad (5)$$

Δ_e – еквівалентна шорсткість, м; a_2 – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від шорсткості внутрішньої поверхні труб; Re – число Рейнольдса.

В країнах ЄС гідравлічні розрахунки каналізаційних колекторів проводять згідно з європейським стандартом BS EN 752:2008 [10], підґрунтям для якого є формули:

– Кольбука-Уайта:

$$V = -2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot d \cdot I} \cdot \lg \left(\frac{\Delta}{3,71 \cdot d} + \frac{2,51 \cdot \nu}{d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot d \cdot I}} \right); \quad (6)$$

– Манінга:

$$V = K \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}, \quad (7)$$

де d – внутрішній діаметр труби, м; Δ – шорсткість внутрішньої поверхні труби, м; ν – кінематична в'язкість, м²/с; K – коефіцієнт Манінга, який приймається рівним 80, що буде відповідати $1/n$ при $n=0,0125$, м^{1/3}/с.

Ціль та завдання статті. Очевидним є те, що базові емпіричні формули (3-6) громіздкі і практично не придатні для оптимізаційного аналізу роботи каналізаційної мережі. Той факт, що розрахунки за формулами (1, 3, 4, 7) орієнтовані на квадратичну зону опору, а за формулами (2, 5, 6) – на перехідну зону турбулентного режиму, має місце значна розбіжність результатів розрахунків для однакових вихідних даних (до 20 %). Крім того, зазначенні чинні нормативи [1, 10] не враховують впливу гідродинамічних характеристик потоку на величину витрат води у колекторах при їх частковому наповненні [6, 7]. Тому формули для гідравлічних розрахунків мереж водовідведення потребують уточнення.

Основний матеріал дослідження. При гідравлічних розрахунках мереж водовідведення важливим є визначення не тільки витрат і швидкостей води залежно від уклонів колекторів, але й п'єзометричних позначок у вузлах, як при безнапірному, так і, особливо, при напірному русі води. Це необхідно не тільки для висотного розміщення і з'єднання колекторів, але й для аналізу сумісної роботи ділянок мережі, оптимізації окремих її параметрів, визначення можливих зон затоплення міських територій тощо. Враховуючи, що більшість мереж водовідведення сучасних міст є трубопроводами, найбільш доцільними є використання простої степеневі залежності (8), яку застосовують для розрахунків напірних трубопроводів [7, 8]:

$$I = \frac{k \cdot q^\beta}{d^m}, \quad (8)$$

де k , β та m – коефіцієнт та показники степеня, які залежать від шорсткості внутрішньої поверхні труб, яка в свою чергу залежить від матеріалу труб, кількості та типу відкладень на стінках тощо; q – розрахункові витрати води, м³/с, або л/с; d – розрахунковий внутрішній діаметр або інший розмір колектора, м, або мм.

Застосування формули (8) обумовлено тим, що практично у всіх трубопроводах водовідведення рух води здійснюється у перехідній області гідравлічного опору [5, 7, 8]. Отримані за формулою (8) значення розрахункових величин будуть відрізнятися від їх «точних» величин, розрахованих за формулами типу (2, 5 і 6) в межах заданої точності для визначеного діапазону режиму гідравлічного опору (чисел Рейнольдса, швидкості, діаметрів тощо). Враховуючи, значну кількість вихідних впливових факторів [3-8], прогнозувати зміни

яких практично неможливо, та й недоцільно (зміни кількості та форми відкладень на стінках колекторів, температури і каламутності води, наявність у ній мастил, полімерів та інших речовин, які впливають на гідродинамічні параметри потоків), точність розрахунків у межах $\pm 5\%$, а інколи і $\pm 10\%$, є цілком допустимою.

В якості еталонних розрахункових даних прийнято значення відповідних параметрів, визначених за формулами (2 і 5), які рекомендовані чинним вітчизняним нормативом [1], а також з врахуванням значень вихідних параметрів [5] та впливу гідродинамічних характеристик потоку на величину витрат води в трубопроводах при їх частковому наповненні [6, 7].

Для визначення числових значень коефіцієнта k та показників степеня β і m формула 8 може бути представлена у вигляді:

$$I = \frac{k}{d^m} \cdot \left(V \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)^\beta = k \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right)^\beta \cdot \frac{V^\beta}{d^{m-2\cdot\beta}} = k_v \cdot \frac{V^\beta}{d^p}, \quad (9)$$

де k_v та p – аналоги коефіцієнта k та показника степеня m при переведенні характеристики потоку з витрати q на середню швидкість потоку V .

Числові значення коефіцієнтів k та k_v залежать також від розмірності параметрів q та V . Однак за структурою формули (8 і 9) аналогічні, легко доступні для математичного аналізу і набули поширення у світовій практиці для розрахунків напірних трубопроводів [3, 6, 8].

Значення пошукових величин k_v , β та p визначали шляхом апроксимації числових даних масиву гідравлічних уклонів I , розрахованих за формулами (2 і 5) для повного заповнення трубопроводу в межах заданих діапазонів параметрів: швидкостей $V = 0,5-4,0$ м/с; діаметрів $d = 0,15-2,5$ м; кінематичної в'язкості води $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, яка характерна для стічної води з температурою $t = 11-12^\circ\text{C}$ при кількості завислих речовин до 400 мг/л; шорсткості внутрішньої поверхні труб $A_e = 0,002$ м ($n = 0,014$; $a_2 = 100$), що найбільше поширена у колекторах водовідведення, зокрема з бетонних та залізобетонних труб [1-7].

В процесі розрахунків було здійснено такі додаткові перетворення числових значень гідравлічних уклонів I :

– значення масиву гідравлічних уклонів ранжовано за величинами швидкостей V_i та діаметрів d_j з утворенням множин MI_i та MI_j ;

– для визначення показника степеня β кожне значення гідравлічних уклонів множини MI_j (для всіх швидкостей j -го діаметру) поділено на величину гідравлічного уклону $I_{1,j}$ (при швидкості V_1 того ж діаметру) з утворенням множини $y_{i,j} = f(x_i)$:

$$y_{i,j} = \frac{I_{i,j}}{I_{1,j}} = \frac{\frac{k_v \cdot V_i^\beta}{d_j^p}}{\frac{k_v \cdot V_1^\beta}{d_j^p}} = \left(\frac{V_i}{V_1} \right)^\beta = x_i^\beta; \quad (10)$$

– для визначення показника степеня p кожне значення гідравлічних уклонів множини MI_i (для відповідної швидкості кожного діаметру) поділено на величину гідравлічного уклону $I_{i,1}$ (для діаметра d_1 тієї ж швидкості) з утворенням нової множини $y_{i,j} = f(x_j)$:

$$y_{i,j} = \frac{I_{i,j}}{I_{i,1}} = \frac{\frac{k_v \cdot V_i^\beta}{d_j^p}}{\frac{k_v \cdot V_i^\beta}{d_1^p}} = \left(\frac{d_j}{d_1} \right)^p = x_j^p. \quad (11)$$

Залежності (10 і 11) для визначення показників степеня β і p є ідентичними – степеневими формулами із коефіцієнтом, рівним 1,0. Крім того, значення аргументів $y_{i,j}$ для одних і тих же x_i (чи x_j) практично співпадають (рис. 1). Тому, в обох випадках (для визначення β і p) залежності (10 і 11) розглянуто у вигляді:

$$y_i = x_i^\varepsilon, \quad (12)$$

де ε – показник степеня, який у першому варіанті рівний β , а у другому – p .

Показники степеня ε в кожному випадку (для β і p) визначали за методом найменших квадратів.

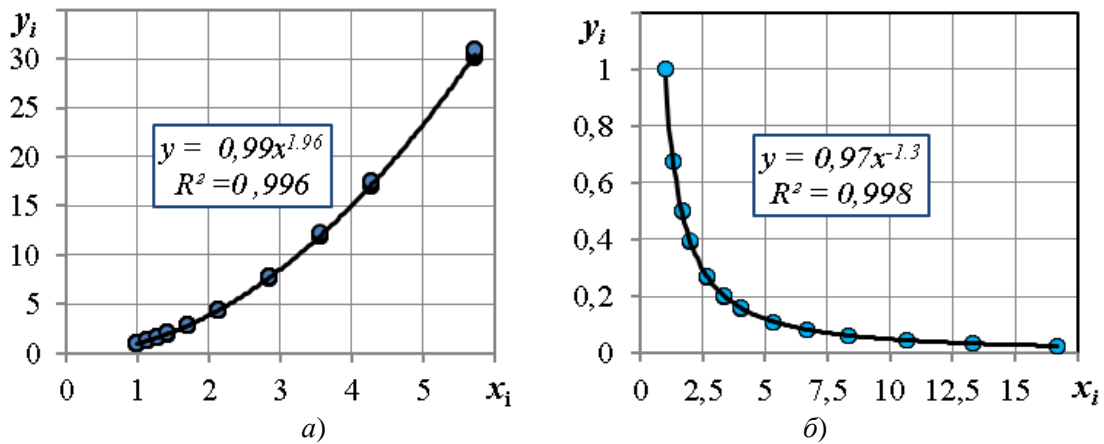


Рис. 1. Залежності $y_i = f(x_i)$ для визначення показників степеня: а – β ; б – p

В результаті було отримано такі значення пошукових параметрів: $k_v = 0,0013$; $k = 0,002087$; $\beta = 1,96$; $p = 1,31$; $m = 5,23$.

Порівняння точності розрахунків за формулою (9) для отриманих числових значень коефіцієнта k_v та показників степеня β і p із розрахунками гідравлічних уклонів за еталонними формулами (2 і 5) показує (рис. 2), що похибки не перевищують $\pm 3\%$ в діапазоні робочих швидкостей (0,5-2,5 м/с). Виняток становлять розрахунки для труб великих діаметрів (2 і 2,5 м), особливо при швидкостях понад 2,5 м/с (до -6%). Це вказує на прийнятність уточненої формули і отриманих числових значень коефіцієнта k_v та показників степеня β і p для практичних розрахунків трубопроводів при напірному русі води.

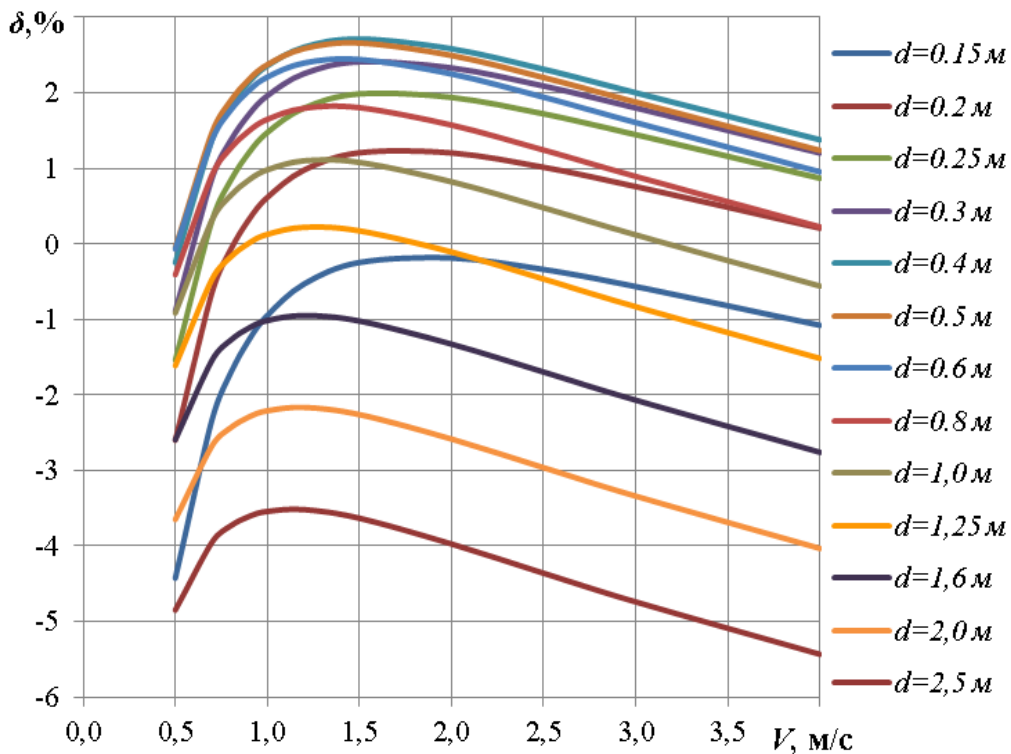


Рис. 2. Похибки розрахунків гідравлічних уклонів за степеневою формулою (9) у порівнянні із розрахунками за еталонними формулами (2 і 5)

Для гідравлічних розрахунків трубопроводів при безнапірному русі стічних вод у формулі (9) значення діаметра труби записано через її гідравлічний радіус R ($d = 4R$), а його – через наповнення трубопроводу h/d (рис. 3), використовуючи відомі залежності між наповненням труби h/d , центральним кутом сегменту наповнення труби α , виміряного у радіанах, площею наповнення ω і змоченим периметром χ :

$$\chi = \alpha \cdot \frac{d}{2}; \quad (13)$$

$$\omega = \frac{d^2}{8} \cdot (\alpha - \sin \alpha); \quad (14)$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{d}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha}\right); \quad (15)$$

$$\alpha = 2 \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{h}{d}\right). \quad (16)$$

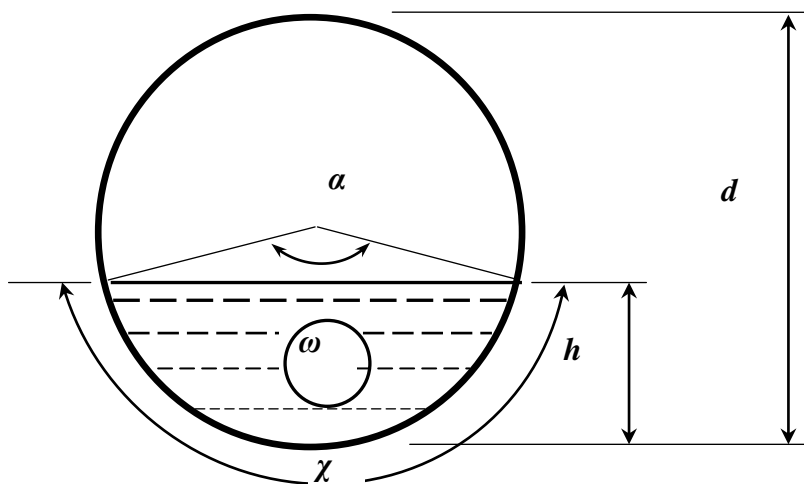


Рис. 3. Схема до визначення гідравлічного радіусу труби

В результаті отримано:

$$I = \frac{k_v \cdot V^\beta}{(4 \cdot R)^p} = \frac{k_v}{4^p} \cdot \frac{\left(\frac{q}{\omega}\right)^\beta}{\left(\frac{d}{4}\right)^p \cdot \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^p} = \dots = k_v \cdot \frac{q^\beta}{d^{2\beta+p}} \cdot \frac{8^\beta \cdot \alpha^p}{(\alpha - \sin \alpha)^{\beta+p}}. \quad (17)$$

Виходячи із формул (9) і (17) можна записати:

$$I = k \cdot \frac{q^\beta}{d^m} \cdot k_{h/d}, \quad (18)$$

де $k_{h/d}$ – коефіцієнт, що залежить від наповнення трубопроводу:

$$k_{h/d} = \frac{(2\pi)^\beta \cdot \alpha^p}{(\alpha - \sin \alpha)^{\beta+p}}, \quad (19)$$

де α – центральний кут сегменту наповнення (рис. 3), рад, який слід визначати залежно від наповнення h/d за формулою 16.

Формула (18) відрізняється від формули (8) для напірного режиму тільки коефіцієнтом $k_{h/d}$, який при $h = d$ рівний одиниці (кут $\alpha = 2\pi$ (360°), $\sin 360^\circ = 0$). При $h/d < 1$, а отже і $\alpha < 2\pi$ (360°), коефіцієнт $k_{h/d} > 1,0$ (рис. 4).

Дані розрахунків за формулами (16 і 19) показують, що залежність $k_{h/d} = f(h/d)$ має мінімум при $h/d = 0,938$. Це означає що, при заданому уклоні I витрата q буде максимальною для цього наповнення, що підтверджується числовими даними таблиць для гідравлічних розрахунків мереж водовідведення [4]. Однак, більш пізніші дослідження [6, 7] дозволили

встановити вплив гідродинамічних характеристик потоку на величину витрат води в трубопроводах при їх частковому наповненні. На основі значних експериментальних даних рекомендовано значення коефіцієнтів впливу гідродинамічних характеристик потоку $K_{2\theta}$, які слід враховувати для визначення витрат води при гідравлічних розрахунках трубопроводів. Залежно від наповнення h/d ці коефіцієнти становлять $K_{2\theta} = 0,88-1,0$ [6, табл. 4]. Із врахуванням коефіцієнта $K_{2\theta}$ залежність коефіцієнтів $k_{h/d}$ від наповнення трубопроводу h/d буде визначатись за формулою:

$$k_{h/d} = \frac{(2\pi)^\beta \cdot \alpha^p}{K_{2\theta}^\beta \cdot (\alpha - \sin \alpha)^{\beta+p}} \quad (20)$$

Числові розрахунки значень кута α від наповнення трубопроводу h/d за формулою (16) і коефіцієнта $k_{h/d}$ – за формулою (20) дозволили шляхом апроксимації отриманих числових даних встановити залежність для коефіцієнтів $k_{h/d}$ (рис. 4):

$$k_{h/d} = 0.74 + 0.26 \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{-3.92} \quad (21)$$

Перевірка формули (21) на граничні умови показує, що при $h/d \rightarrow 0 - k_{h/d} \rightarrow \infty$, а при $h/d = 1 - k_{h/d} = 1,0$. Це повністю відповідає умовам «точної» формули 20 і сучасним уявленням про природу гідродинамічних потоків у безнапірних трубопроводах [6, 7].

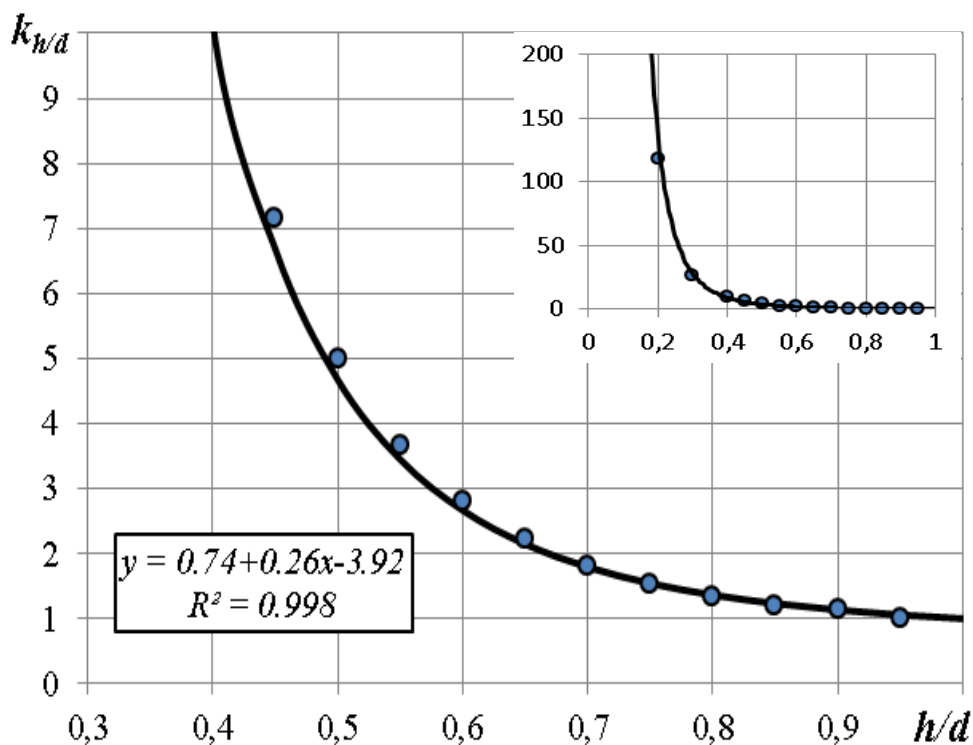


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів $k_{h/d}$ від наповнення трубопроводу h/d з урахуванням впливу гідродинамічних характеристик потоку

Порівняння результатів розрахунків за формулою (18) і еталонними формулами [1] при різних наповненнях трубопроводів показує, що їх точність повністю співрозмірна з точністю розрахунків напірних трубопроводів (рис. 2) а, формула (18) може бути рекомендована для гідравлічних розрахунків руху стічних вод, як у напірному, так і безнапірному режимах.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Для гідравлічних розрахунків мереж водовідведення багатьма дослідниками запропоновано емпіричні формули, які, зазвичай, мають складну структуру, враховують різну кількість впливових факторів і значно

відрізняються у результатах розрахунку для ідентичних вихідних умов. Визначено, що найбільш доцільною при проведенні як гідравлічних, так і оптимізаційних розрахунків, є степенева формула типу (18), яка є придатною для розрахунків як напірних, так і безнапірних трубопроводів. Для визначених ДБН В.2.5-75 нормативних показників умов роботи і розрахунку трубопроводів водовідведення отримано числові значення коефіцієнта і показників степеня уточненої формули (18), а також запропоновано аналітичні залежності (20 і 21) для розрахунків коефіцієнта, що враховує наповнення трубопроводу. Порівняння результатів розрахунків із даними, еталонних формул, рекомендованих чинними нормативами України, показали, що уточнена формула (18) з отриманими числовими значеннями її параметрів цілком придатна для розрахунків трубопроводів водовідведення як у безнапірному, так і напірному режимах.

В ході подальших досліджень планується встановити залежності коефіцієнтів k і k_{hd} та показників степеня β , m і p у формулах (18, 20 і 21) від шорсткості внутрішньої поверхні труб (Δ_e або n).

Література

1. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування : ДБН В.2.5-75:2013. – К.: Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2013. – 211 с.
2. Гіроль М.М. Системи водовідведення: Навчальний посібник / М.М. Гіроль, Б. Охримюк, Г. Собчук, Г. Лагуд. – Рівне: НУВГП, 2011. – 444с.
3. Яковлев С.В. Канализация / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 633 с.
4. Лукиных А.А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н. Павловского / А.А. Лукиных, М.А. Лукиных. – М.: Стройиздат, 1987. – 159 с.
5. Федоров Н.Ф. Гидравлический расчет канализационных сетей (Расчетные таблицы) / Н.Ф. Федоров, Л.Е. Волков. – 4-е издание. – Стройиздат, 1968. – 251с.
6. Константинов Ю.М., Гидравлический расчет сетей водоотведения. Расчетные таблицы / Ю.М. Константинов, А.А. Василенко, А.А. Сапунин, Б.Ф. Батченко. – К.: Будівельник, 1987. – 120с.
7. Константинов Ю.М. Інженерна гідравліка / Ю.М. Константинов, О.О. Гижа. – К.: «Слово», 2006. – 432 с.
8. Mays L.W. Storm water collection systems design handbook / L.W. Mays. – McGraw-Hill Professional, 2001. – 1008 p.
9. Rossman, L.A. Storm Water Management Model. User's Manual. Version 5.0 : EPA/600/R 05/040 / L. A. Rossman; Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati: [s. n.], 2007. – 265 p.
10. Drain and sewer systems outside buildings: BS EN 752:2008. – 182 p.

Стаття надійшла 13.10.2017