



УДК 628.241:532.543

**Ткачук О. А., д.т.н., професор, Ярута Я. В., аспірант** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Шумінський В. Д., к.т.н., доцент** (ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ)

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ФОРМУЛ ТА ЇХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ РОЗРАХУНКІВ МЕРЕЖ ДОЩОВОГО ВОДОВІДВЕДЕННЯ**

**Проаналізовано умови роботи мереж дощового водовідведення та чинні методики їх розрахунків. Визначено причини, що призводять до затоплень і підтоплень міських територій дощовими водами через недосконалість мереж дощового водовідведення. Встановлено необхідність вивчення умов сумісної роботи різних ділянок мережі між собою та із регульовальними спорудами, підключеними до мереж системи водовідведення. Показано, що це потребує удосконалення гідравлічних та оптимізаційних розрахунків усієї дощової мережі, враховуючи напірний режим роботи її ділянок. Визначено тип формули для цих розрахунків та числові значення її параметрів. Проведено порівняння результатів розрахунків із даними, отриманими на основі формул Павловського та Федорова, що рекомендовані чинними нормативами України. Обґрунтовано доцільність як оптимізаційних, так і гідравлічних розрахунків за встановленою формулою та отриманими для неї числовими параметрами. *Ключові слова:* дощова мережа, сумісна робота, гідравлічні та оптимізаційні розрахунки.**

**Останнім часом** все частіше спостерігаються підтоплення і затоплення міських територій в результаті атмосферних опадів не тільки в Україні, але й в усьому світі. Цьому сприяють не тільки значні зміни клімату і випадіння дощів великої інтенсивності, але і збільшення площ із водонепроникними покриттями, порушення у роботі систем дощового водовідведення та їх недосконалість [1; 2].

Практика показує, що підтоплення можуть виникати навіть тоді, коли справно функціонує система дощового водовідведення, але міська територія має складний рельєф [2; 3]. В багатьох випадках при дощах великої інтенсивності, коли мережі працюють у напірному режимі, затоплення територій здійснюється через дощоприймальні та оглядові колодязі [3]. Зношуваність споруд та мереж водовідведення або їх незадовільний стан – тільки ускладнюють проблему і в останні

роки набувають значного поширення.

Аналіз таких умов затоплення і підтоплення міських територій показав, що їх причинами є недосконалість міських систем дощового водовідведення, обумовленою допустимістю напірного режиму у колекторах [4], який недостатньо обґрунтований при їх проектуванні, зокрема гідравлічними розрахунками. Так, чинні методики розрахунків дощових мереж [4; 5; 6] не передбачають врахування сумісної роботи всіх ділянок по довжині водовідвідного колектора.

**Проблемами вивчення умов** формування дощового стоку на міських територіях, роботи систем дощового водовідведення та їх розрахунків займалися такі науковці, як Алексєєв М.І., Бєлов М.М., Дикаревський В.С., Курганов А.М., Жук В.М., Ткачук С.Г., Сальчук В.Л., Ткачук О.А., Шевчук О.В. [1-7], Dziopak J., James W., Horton R., Huder W., Mays L.W., Rossman L.A., Weitman D. [9-11] та інші.

Ними вивчено умови надходження дощових вод у системи водовідведення, гідравлічні закономірності напірного і безнапірного руху стічних вод у колекторах та застосування методів регулювання дощового стоку на міських територіях. Для практичних розрахунків отримано ряд напівемпіричних та емпіричних залежностей. Так, для гідравлічних розрахунків каналізаційних колекторів широко використовують формули, які увійшли до європейського стандарту BS EN 752:2008 [11]:

- Кольбрука-Уайта

$$V = -2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot d \cdot I} \cdot \lg \left( \frac{\Delta}{3,71 \cdot d} + \frac{2,51 \cdot v}{d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot d \cdot I}} \right), \quad (1)$$

- Манінга

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

де  $V$  – середня швидкість потоку, м/с;  $d$  – внутрішній діаметр труби, м;  $I$  – гідравлічний уклон;  $\Delta$  – шорсткість внутрішньої поверхні труби, м;  $v$  – кінематична в'язкість, м<sup>2</sup>/с;  $K$  – коефіцієнт Манінга, м<sup>1/3</sup>/с;  $R$  – гідравлічний радіус, м.

В Україні для розрахунків гідравлічних уклонів по довжині трубопроводів, лотків і каналів ДБН В.2.5-75 [4, п. 8.2.1] рекомендує проводити за формулою

$$q = \omega \cdot V = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot I}, \quad (3)$$

де  $\omega$  – площа перерізу потоку, м<sup>2</sup>;  $C$  – коефіцієнт Шезі, що залежить від гідравлічного радіуса та шорсткості змоченої поверхні колектора,



який слід визначати за формулою Павловського [4-6; 8].

Гідравлічні уклони для самопливних колекторів можна визначати за формулою Дарсі [4, п. 8.2.1]

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

де  $\lambda$  – коефіцієнт опору тертю, який слід визначати за формулою 5, отриманою професором Федоровим М.Ф. [5; 6] для різних ступенів турбулентності потоку, шорсткості і розмірів каналізаційних колекторів

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

де  $\Delta_e$  – еквівалентна шорсткість, м;  $a_2$  – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від шорсткості внутрішньої поверхні труб;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса.

Очевидним є те, що базові формули (1 і 5) громіздкі, практично не придатні для оптимізаційного аналізу сумісної роботи різних ділянок мережі між собою та із регульовальними спорудами, підключеними до мереж системи водовідведення, і тому потребують уточнення.

**При проведенні гідравлічних розрахунків** сумісної роботи трубопроводів мережі важливим є визначення як втрат напорів на її окремих ділянках, так і п'єзометричних позначок у вузлах. Для цього можуть бути використанні стандартні комп'ютерні програми, адаптовані до розрахунків водовідвідних мереж. При оптимізації окремих параметрів мережі важливим є математичний диференціальний аналіз залежностей, що встановлюють взаємозв'язки між параметрами, які впливають на результати гідравлічного розрахунку. В цьому плані найбільш доцільною є залежності виду

$$I = \frac{k \cdot q^\beta}{d^m}, \quad (6)$$

де  $k$ ,  $\beta$  та  $m$  – коефіцієнт та показники степеня, які залежать від шорсткості внутрішньої поверхні труб, яка, в свою чергу, залежить від матеріалу труб, кількості відкладень на стінках тощо;  $q$  – розрахункові витрати води, м<sup>3</sup>/с, або л/с.

Формула 6 може бути представлена у вигляді

$$I = \frac{k}{d^m} \cdot \left( V \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)^\beta = k \cdot \left( \frac{\pi}{4} \right)^\beta \cdot \frac{V^\beta}{d^{m-2 \cdot \beta}} = k_v \cdot \frac{V^\beta}{d^p}, \quad (7)$$

де  $k_v$  та  $p$  – видозмінені коефіцієнт та показник степеня при переведенні характеристики потоку з витрати  $q$  на середню швидкість  $V$ .

Числові значення коефіцієнтів  $k$  та  $k_v$  залежать також від розмірності параметрів  $q$  та  $V$ . Однак структура формул (6 і 7) аналогічна, легко доступна для математичного аналізу і має поширення у світовій практиці для розрахунків трубопроводів [6; 9].

Значення пошукових величин  $k_v$ ,  $\beta$  та  $p$  визначали шляхом апроксимації числових даних масиву гідравлічних уклонів  $I$ , розрахованих за формулами (4 і 5) для діапазону вхідних параметрів швидкостей  $V$  та діаметрів  $d$ . Для цього було здійснено такі додаткові перетворення числових значень гідравлічних уклонів  $I$ :

- значення масиву гідравлічних уклонів ранжовано за величинами швидкостей  $V_j$  та діаметрів  $d_j$  з утворенням множин  $MI_j$  та  $Ml_j$ ;
- для визначення показника степеня  $\beta$  кожне значення гідравлічних уклонів множини  $Ml_j$  (для всіх швидкостей  $j$ -го діаметру) поділено на величину гідравлічного уклону  $I_{1,j}$  (при швидкості  $V_1$  того ж діаметру); в результаті для кожного діаметру труб  $d_j$  була утворена нова множина  $y_{i,j} = f(x_j)$  (рис. 1)

$$y_{i,j} = \frac{I_{i,j}}{I_{1,j}} = \frac{\frac{k_v \cdot V_i^\beta}{d_j^p}}{\frac{k_v \cdot V_1^\beta}{d_j^p}} = \left( \frac{V_i}{V_1} \right)^\beta = x_i^\beta; \quad (8)$$

- 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); в результаті для кожної швидкості  $V_i$  були утворені нові множини  $y_{i,j} = f(x_j)$  (рис. 2)

$$y_{i,j} = \frac{I_{i,j}}{I_{i,1}} = \frac{\frac{k_v \cdot V_i^\beta}{d_j^p}}{\frac{k_v \cdot V_i^\beta}{d_1^p}} = \left( \frac{d_j}{d_1} \right)^p = x_j^p. \quad (9)$$

Залежності (8 і 9) для визначення показників степеня  $\beta$  і  $p$  є ідентичними – степеневими 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 і 2). Тому в обох випадках (для визначення  $\beta$  і  $p$ ) залежності (8 і 9) можна представити у вигляді

$$y_i = x_i^\varepsilon, \quad (10)$$



де  $\varepsilon$  – показник степеня, який у першому варіанті рівний  $\beta$ , а у другому –  $\rho$ .

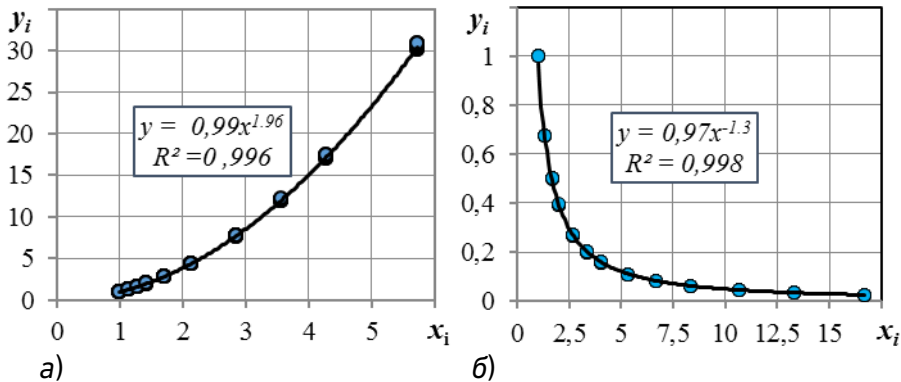


Рис. 1. Залежності  $y_i = f(x_i)$  для визначення показників степеня:  
а)  $\beta$ ; б)  $\rho$

Показники степеня  $\varepsilon$  визначали за методом найменших квадратів для широкого діапазону вхідних параметрів, що мають практичне значення:  $V = 0,7 - 4,0$  м/с;  $d = 0,15 - 2,5$  м, і для шорсткості внутрішньої поверхні труб  $n = 0,014$ ;  $\Delta_e = 0,002$  м і  $a_2 = 100$ , що має найбільше поширення для гідравлічних розрахунків колекторів водовідведення [4; 5; 6; 8].

В результаті було отримано такі величини:

- коефіцієнт  $k_v = 0,0013$ ;
- показники степеня:  $\beta = 1,96$ ;  $\rho = 1,31$ .

Відповідно для розрахунків за формулою (6) величини аналогічних параметрів становлять:

- коефіцієнт  $k = 0,002087$ ;
- показники степеня:  $\beta = 1,96$ ;  $m = 5,23$ .

Порівняння точності розрахунків за формулою (7) для отриманих числових значень коефіцієнта  $k_v$  та показників степеня  $\beta$  і  $\rho$  із розрахунками гідравлічних уклонів на основі формули Федорова М.Ф. (5) показало, що похибки в розрахунках в діапазоні робочих швидкостей (0,7-2,5 м/с) не перевищують  $\pm 3\%$ . Виняток становлять розрахунки для труб великих діаметрів (2 і 2,5 м), особливо при швидкостях понад 2,5 м/с. Однак і для них похибки розрахунків є цілком придатними (до 6%), що вказує на прийнятність формули 7 і отриманих числових значень коефіцієнта  $k_v$  та показників степеня  $\beta$  і  $\rho$  для практичних розрахунків. Результати порівняльних розрахунків наведено на рис. 2.

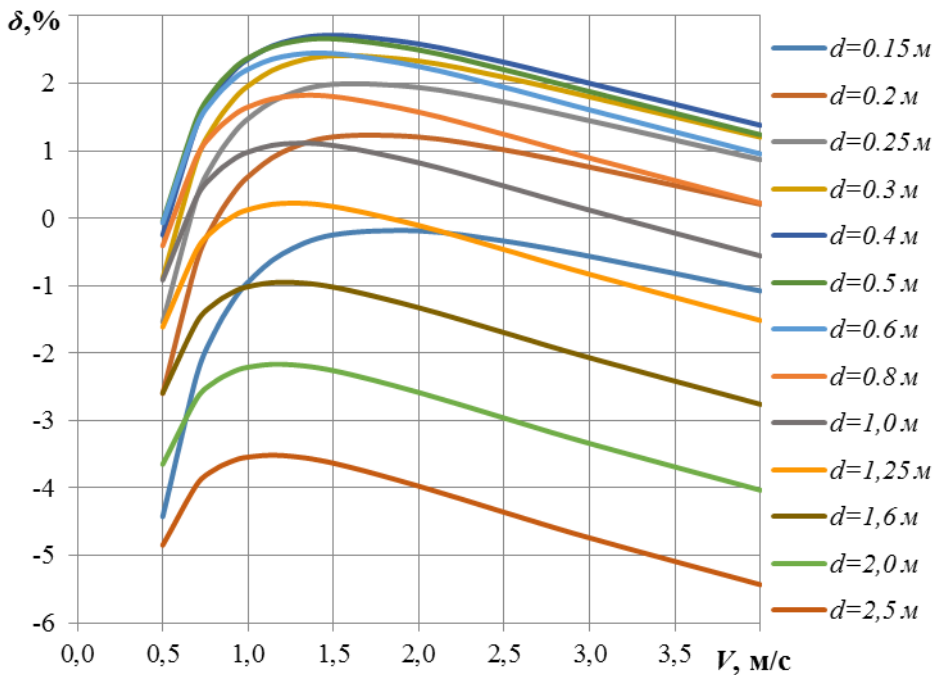


Рис. 2. Похибки розрахунків гідравлічних уклонів за формулою (7) у порівнянні із розрахунками за формулами (4) і (5) (Федорова М.Ф.)

Крім порівняння результатів розрахунків за формулою (7) з результатами за формулою Федорова М.Ф., було проведено оцінку відхилень при проведенні розрахунків за формулою академіка Павловського М.М. [5; 6; 8], яка, на наш погляд, є менш точною, оскільки відповідає тільки квадратичній області гідравлічного опору, однак вона знаходиться в основі чинних нормативних рекомендацій [4], таблиць [8] і має значне поширення у практиці гідравлічних розрахунків напірних і самопливних мереж водовідведення. Порівняльні результати (рис. 3) також підтверджують допустимість розрахунків за формулою (7) незважаючи на те, що похибки є дещо вищими ніж у першому випадку. Це обумовлено тим, що розрахунки за формулами Павловського М.М. і Федорова М.Ф. при ідентичних вихідних умовах дають розбіжність від - 3% до + 15%.

Порівняльні розрахунки показали, що значення гідравлічних уклонів, отриманих за формулою (7), знаходяться між аналогічними значеннями, отриманими за формулами Павловського М.М. і Федорова М.Ф., із кращим наближенням до результатів за формулою Федорова М.Ф. Отже формулу (7), як і формулу (6), можна вважати найбільш придатними для гідравлічних і оптимізаційних розрахунків



водовідвідних труб і вибору їх оптимальних параметрів.

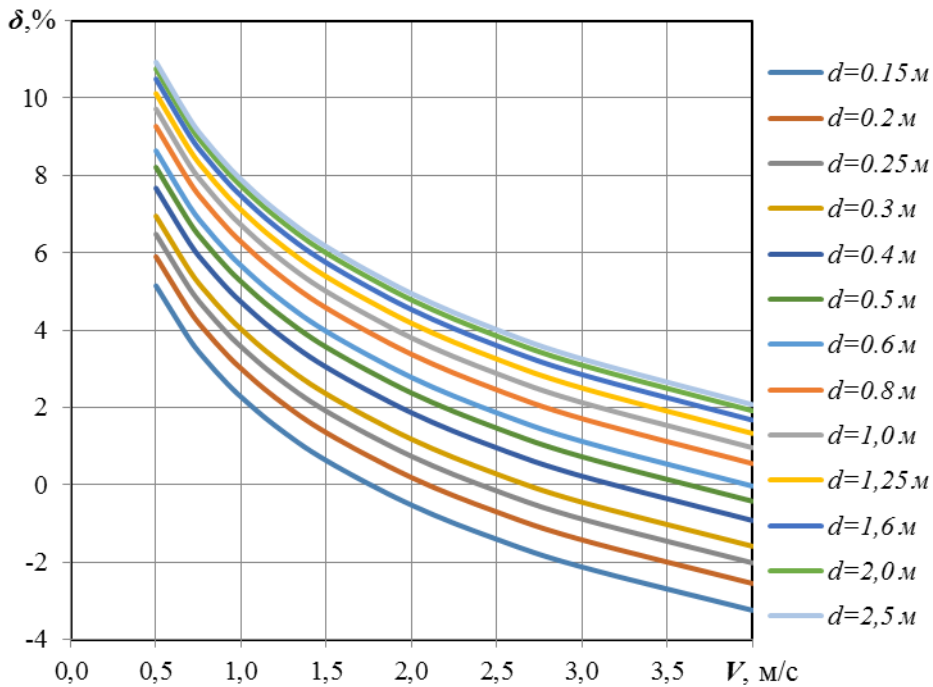


Рис. 3. Похибки розрахунків гідравлічних уклонів за формулою (7) у порівнянні із розрахунками за формулою (3) з визначенням коефіцієнта Шезі  $C$  за формулою М.М. Павловського

**Висновки.** Серед причин, що призводять до затоплень і підтоплень міських територій дощовими водами, є недосконалість мереж дощового водовідведення. Їх удосконалення потребує аналізу сумісної роботи різних ділянок мережі між собою та із регульовальними спорудами, підключеними до мереж системи водовідведення. Для проведення як гідравлічних, так і оптимізаційних розрахунків визначено тип формул (6 і 7) та числові значення їх параметрів. Проведені порівняння результатів розрахунків із даними, отриманими на основі рекомендованих чинними нормативами України формул Павловського М.М. та Федорова М.Ф., що рекомендовані чинними нормативами України, показали, що ці формули можна вважати найбільш придатними для розрахунків водовідвідних труб.

1. Жук В. М. Сучасні системи управління дощовим стоком на забудованих територіях // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки : науково-технічний збірник. Випуск 17. – К. : КНУБА, 2011. – С. 26–31. 2. Звіт про НДР. Проведення досліджень щодо пропускної спроможності систем

поверхневого водовідведення в сучасних природних умовах. – Х. : ДЦІК Укр-ВОДГЕО, 2013. – 60 с. **3.** Ткачук О. А. Оцінка причин затоплення каналізованих міських територій дощовими водами / Ткачук О. А., Сальчук В. Л., Олексіюк О. В. // Вісник НУВГП. Зб. наук. пр. Вип. 1 (65). – Рівне : НУВГП, 2014. – С. 344–350. **4.** Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування : ДБН В.2.5-75:2013. – К. : Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2013. – 211 с. **5.** Константинов Ю. М. Інженерна гідравліка / Константинов Ю. М., Гижа О. О. – К. : Видавничий дім «Слово», 2006. – 432 с. **6.** Канализация / Яковлев С. В., Карелин Я. А., Жуков А. И., Колобанов С. К. – М. : Книга по Требованию, 2012. – 633 с. **7.** Ткачук С. Г. Регулювання дощового стоку в системах водовідведення: монографія / Ткачук С. Г., Жук В. М. – Львів : Львівська політехніка, 2012. – 216 с. **8.** Лукиных А. А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н. Павловского / Лукиных А. А., Лукиных М. А. – М. : Стройиздат, 1987. – 159 с. **9.** Mays L. W. Storm water collection systems design handbook / L. W. Mays. – McGraw-Hill Professional, 2001. – 1008 p. **10.** 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. **11.** Drain and sewer systems outside buildings: BS EN 752:2008. 182 p.

Рецензент: д.т.н., професор, Филипчук В. Л. (НУВГП)

---

**Tkachuk O. A., Doctor of Engineering, Professor, Yaruta Y. V., Post-graduate Student** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Shuminskyi V. D., Candidate of Engineering, Associate Professor** (SE «State Scientific Research Institute of Building Structures», Kyiv)

## **JUSTIFICATION OF FORMULAS AND THEIR PARAMETERS FOR THE OPTIMIZATION CALCULATIONS OF RAIN SEWER NETWORKS**

**The working conditions of the network of rain sewerage and existing methods of their calculations are analyzed. The reasons of inundation and flooding of urban areas of rainwater because of imperfections in the rain sewer networks are estimated. The present article deals with the necessity of studying of network between themselves and with regulatory structures that are connected to the wastewater system. This requires improvements and optimization of hydraulic calculations of all rain sewer networks, taking into account pressure**





head operation of mode sections. The type formulas for these calculations and numerical values of their parameters are estimated. The article discloses comparison of simulation results obtained from the Pavlovsky's and Fedorov's formula that Ukrainian existing standards are recommended. Optimization and hydraulic calculations based on the proposed formula and numerical parameters obtained for this formula are justified.

**Keywords:** rain sewer networks, compatible work, hydraulic and optimization calculations.

---

**Ткачук А. А., д.т.н., профессор, Ярута Я. В., аспирант**  
(Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно), **Шуминский В. Д., к.т.н., доцент**  
(ГП «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», г. Киев)

## **ОБОСНОВАНИЕ ФОРМУЛ И ИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ СЕТЕЙ ДОЖДЕВОГО ВОДООТВОДА**

Проанализированы условия работы сетей дождевого водо-отвода и действующие методики их расчетов. Определены причины затоплений и подтоплений городских территорий дождевыми водами из-за несовершенства сетей дождевого водоотвода. Установлена необходимость изучения условий совместной работы различных участков сети между собой и с регулируемыми сооружениями, подключенными к сетям системы водоотведения. Показано, что это требует совершенствования гидравлических и оптимизационных расчетов всей дождевой сети, учитывая напорный режим работы ее участков. Определен тип формулы для этих расчетов и числовые значения ее параметров. Проведено сравнение результатов расчетов с данными, полученными на основе формул Павловского и Федорова, рекомендованных действующим нормативам Украины. Обоснована целесообразность, как оптимизационных, так и гидравлических расчетов по установленной формуле и полученными для нее числовыми параметрами.

**Ключевые слова:** дождевая сеть, совместная работа, гидравлические и оптимизационные расчеты.

---