

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ ВОДИ В МІСЬКИХ ВОДОПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ

Олександр Кушка<sup>1</sup>, Яна Гензерська<sup>2</sup>

Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, проспект Повітряних сил., м. Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, kushka.om@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-0568-9006

<sup>4</sup> студентка, henzerska\_yu-2022@knuba.edu.ua, orcid.org/0009-0006-2245-5673

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.51.42-46

**Анотація.** У статті розглянуто проблему ефективного транспортування та розподілення води в зовнішніх водопровідних мережах міст та населених пунктів з урахуванням змінних умов експлуатації, енергоефективності та надійності. Зазначено, що основним фактором, що впливає на експлуатаційні витрати та надійність мереж, є швидкість руху води в трубопроводах. Проаналізовано чинну нормативну базу, в якій відсутні чіткі рекомендації щодо гідравлічних параметрів, що ускладнює проектування в умовах змінного міського середовища. Розглянуто вплив матеріалів труб, зокрема поліетилену, на довговічність мереж та актуальність гідравлічних розрахунків за застарілими таблицями. Запропоновано використання критерію оптимального діаметра труб, що базується на балансі втрат напору, часу руху води та її маси. Проведено аналіз залежності середньої швидкості руху води та питомих втрат напору від діаметра труб за даними літературних джерел. Виявлено особливості поведінки параметрів у діапазоні діаметрів 100–1000 мм. Визначено, що ігнорування швидкості потоку може призвести до значних енергетичних та фінансових втрат. Зроблено висновки щодо необхідності перегляду нормативних підходів до проектування та модернізації водопровідних мереж з урахуванням змін споживання, матеріалів труб та сучасних вимог до енергоефективності.

**Ключові слова:** водопровідна мережа, швидкість руху води, втрати напору, енергоефективність, гідравлічний розрахунок, оптимальний діаметр, поліетиленові труби, надійність водопостачання.

### ВСТУП

Ефективно використовувати ресурси люди намагались завжди, але зараз в умовах глобальної зміни клімату це стає найголовнішим завданням. Отримання, підготовка, транспортування водних ресурсів, при постійному скороченні доступних їх об'ємів виглядає, як одне з найголовніших завдань фахівців водної галузі.

Зупинимось на проблемі ефективного транспортування, розподілення води мережами міст та населених пунктів.

Ефективність експлуатації зовнішніх водопровідних мереж, а отже транспортування та розподілення води в мережах найбільше залежить від швидкості руху води по трубах тому що, втрати напору, як по довжині так і місцеві прямопропорційно залежні від квадрату швидкості руху води і ці втрати напору

конвертуються в гроші, які потрібно заплатити за кіловат-години спожитої електроенергії, що використані помпами насосних станцій.

### АНАЛІЗ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ

В українських державних нормах [п. 5.7, 1] вказується що: «при проектуванні мереж ... водопостачання слід передбачати на існуючих мережах переоснащення енергоємного технологічного устаткування», і далі, «для одержання споживачем води гарантованої якості та кількості», технологічні схеми повинні забезпечувати «безвідмовність функціонування мереж» протягом розрахункового строку їх експлуатації, «бути економічними та ефективними». «Необхідно передбачати економію електричної енергії».

Дещо дивно виглядає сентенція про проектування мереж водопостачання на ... існуючих мережах. Будемо розуміти це як «реконструкцію мереж».

«Підбір діаметрів трубопроводів [п.12.44, 1] слід здійснювати на підставі техніко-економічних розрахунків, враховуючи умови їх роботи при аварійному відключенні окремих ділянок водоводів і водопровідних мереж». Вказано що діаметр повинен бути не менше 100 мм для об'єднаних мереж водопостачання міст. Мова іде про об'єднання мереж господарсько-питних та протипожежних, але інших міських мереж водопроводу не існує в Україні, так дешевше.

Швидкості не згадуються, а визначення діаметрів потрібно виконувати «на підставі техніко-економічних розрахунків».

Для того щоб правильно розв'язати задачу повинні бути відомі вихідні дані, наприклад, на 50 років наперед а якщо вихідні дані змінюються з часом непрогнозованим чином, то ймовірність коректного розв'язання такої задачі наближається до нуля.

### **ВПЛИВ ЗМІН МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА**

Міста розвиваються, окремі квартали добудовуються, інші перебудовуються, виникають нові на місті промислових підприємств тощо. Як наслідок в умовах постійних змін в місті і його водопровідна мережа не може ніколи бути сталою.

Відомо [3] що проста «оптимізація за вартістю» може зробити мережу вразливою до гідравлічних та механічних збоїв та, як мінімум, з початку 21 століття [4] стали використовувати багатоцільові оптимізуючі моделі, які враховують: капітальні та експлуатаційні витрати, надійність мереж водопостачання, якість води та інше. Якщо оптимізувати мережу тільки за одним критерієм [5], то це, найбільш ймовірно, приведе до неоптимальності за іншими критеріями, буде страждати надійність мережі, якість води, тощо.

Найбільш привабливі для будівництва зовнішніх мереж водопроводу населених пунктів є полімерні труби, а саме, поліетиленові

труби застосовуються найчастіше. Термін гарантованої експлуатації їх становить 50 років. Тобто лише за декілька десятиліть потрібно буде зібрати гроші для капітальних робіт на окремих ділянках у разі виникнення проблем. І незважаючи на те, що перші поліетиленові труби на теренах нашої країни експлуатуються вже майже пів сторіччя, але потреби у їх заміні поки не виникало.

З іншого боку, в сімдесяті роки минулого століття чи можна було знати вартість електроенергії сьогодні, вартість труб, робіт, всього того що входить до розрахунку сьогоднішніх експлуатаційних витрат?

В ДБН [п.12.44, 1] нагадують що потрібно врахувати умови «при аварійному відключенні окремих ділянок», цебто знову водопровідна мережа міст не повинна змінюватись, розвиватись інакше неможливо це врахувати.

У сімдесяті роки чи хтось враховував, наприклад, що добове споживання Києва за період з початку 90-х по сьогодні зменшиться більше ніж в два рази з понад 1,5 млн. літрів на добу до менше ніж 700 тис. літрів на добу?

### **ШВИДКІСТЬ ПОТОКУ ЯК ВИЗНАЧАЛЬНИЙ ФАКТОР**

А ще зустрічається таке явище як «гідравлічний удар», прямиий та непрямиий, - це швидке підвищення тиску в мережі і до розрахункових формул визначення величини підвищення тиску входить швидкість руху води до моменту удару. Чим більше швидкість тим вище збільшення тиску. Як наслідок - без визначення швидкостей руху на окремих ділянках неможливо розрахувати втрати напору в мережі, підібрати помпове обладнання насосних станцій, розрахувати можливі величини підвищеного тиску тощо.

Для порівняння, в будівельних нормах [2], які визначають облаштування внутрішніх мереж водопроводу будівель, вказано діапазони швидкостей руху води для різних мереж (господарсько-питних, протипожежних) з різних матеріалів труб (металевих і неметалевих).

У внутрішніх мережах непотрібно застосовувати енергоефективні методи будівництва? Навпаки, потрібно.

В пункті 14.8 [2] ДБН «Внутрішній водопровід та каналізація» знаходимо: «потрібно передбачати насосну установку з урахуванням вимог з енергоефективності відповідно до ДСТУ Б EN 15232-1 (точності підтримки заданого тиску, застосування систем керування насосними установками з використанням частотних перетворювачів».

Обидва ДБН [1] та [2], для зовнішніх та внутрішніх мереж почали діяти одночасно (2013).

### ОБМЕЖЕННЯ НАЯВНИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ

В Україні використовували «Таблиці для гідравлічного розрахунку» в яких була вказана оптимальна зона швидкостей для різних діаметрів та матеріалів труб з урахуванням техніко-економічних розрахунків, «економічного фактору», але останнє видання їх припадає на 1984 рік, відповідно і техніко-економічні розрахунки були виконанні в цінах 80-х років минулого століття. За цей час змінились, як ціни так і стандарти на труби, а отже розрахункові діаметри труб.

Найбільш наближеним до нас в часі (2009) є фундаментальна праця Тугая А.М., Орлова В.О. «Водопостачання» [6] в якій в таблиці 10.2 наведено для: чавунних, сталевих, пластмасових, залізобетонних труб в залежності від умовного діаметру з урахуванням «економічного чинника» діапазон рекомендованих витрат води.

Під словом «пластмасові» потрібно розуміти вірогідно в першу чергу поліетиленові труби, але в таблиці наведено для пластмасових труб діаметри, мм: 100, 125, 150, 200, 250, 300. Термін «пластмасові труби» зустрічається і в «Таблицях» (1984) тільки для труб діаметром: 110, 140, 160, 225, 280, 315.

Зараз випускають поліетиленові труби і більшого діаметру, але труби саме діаметром: 100, 125, ... 300 не випускають і не випускали, тому скористатись табл. 10.2 для «пластмасових труб» неможливо. Таблицею 10.2 можна скористатись для сталевих труб, тільки невідомо для «нових» або «нених».

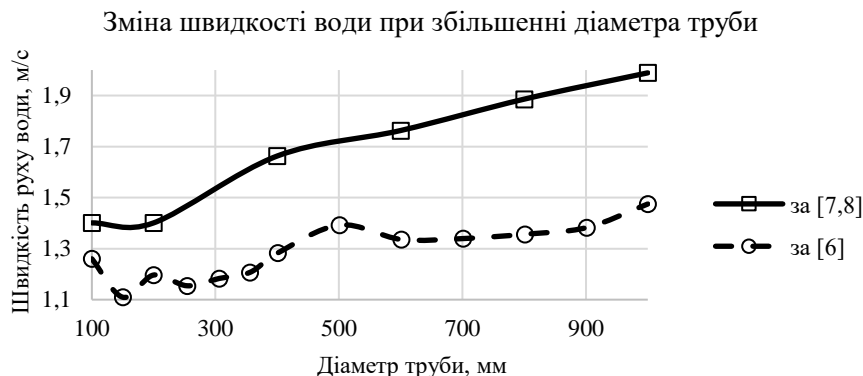
### ОЦІНКА ШВИДКОСТІ ТА ВТРАТ НАПОРУ

Визначимо для труб в діапазоні діаметрів 100 - 1000 мм швидкості руху води за умовними діаметрами та витратами наведеними в [6]. Результат наведено на рис.1.

При діаметрах: 150, 200 та 500 мм відбуваються зміна характеру залежності, а при зміні діаметру з 900 на 1000 мм відбувається різка зміна нахилу кривої. Це виглядає достатньо дивним, особливо при малих діаметрах, 150 та 200 мм. За характером залежності можна припустити, що швидкість руху води в трубах діаметру 100 мм не повинна перевищувати 1 м/с.

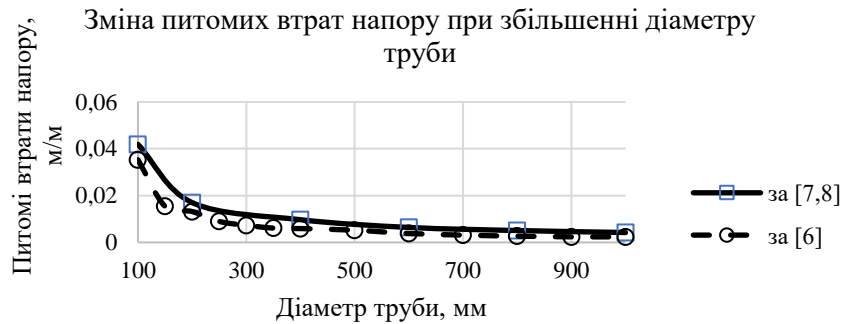
Швидкість руху води в трубах діаметром 1000 мм менше за 1,5 м/с. Це неочікувана цифра.

Потрібно ще поглянути на зміну питомих витрат напорю в залежності від діаметрів труб. Залежність наведена на рис. 2.



**Рис. 1.** Зміна швидкості руху води при збільшенні діаметра труби

**Fig. 1.** Change in water velocity with increasing pipe diameter



**Рис. 2.** Зміна питомих втрат напору при збільшенні діаметра труби  
**Fig. 2.** Change in specific pressure losses with increasing pipe diameter

Крива непогано описується степеневу залежністю, тільки «завалена» питома втрата при діаметрі 150 мм та занадто велика питома втрата при діаметрі 100 мм. При діаметрі 100 мм, ймовірно, питомі втрати треба зменшити на 25%, а відповідно зменшити витрати води. На відрізку 900 мм – 1000 мм не спостерігається нічого особливого, хоча швидкість, як пам'ятаємо, суттєво зростає. Напрошується збільшення витрат, а відповідно і швидкостей в діапазоні труб 600 – 900 мм.

### ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ: БЕЗРОЗМІРНИЙ ПАРАМЕТР

В роботах [7,8] розглядається використання безрозмірного параметру «оптимальний діаметр» для визначення оптимальних діаметрів окремих ділянок мереж внутрішнього водопроводу, але головне, знаходиться баланс між втратами напору та якістю води у споживача (мінімальний час руху води), мінімальні втрати при максимальній швидкості руху води.

Загальний вигляд параметру такий:

$$D_{op} = \frac{\Delta P L T^2}{M}$$

де  $\Delta P L$  – втрати напору на розрахунковій ділянці,  $\text{кг}/(\text{м} \times \text{с}^2) \times \text{м}$ ;  $T$  – час, за який вода проходить по розрахунковій ділянці, с;  $M$  – середня маса води в 1 метрі труби на розрахунковій ділянці, кг.

При зміні витрати води на ділянці змінюється втрата напору та швидкість руху води, величина параметру зменшується або збіль-

шується. При мінімальному значенні параметру відповідно буде оптимальна витрата і оптимальна швидкість руху води.

При розрахунках вибирали «ненові» труби і припускали що умовний і розрахунковий діаметри труби співпадають. Результати наведені на рис. 1 та рис. 2.

### ВИСНОВКИ

Швидкість руху води є критичним параметром, який не можна ігнорувати при проектуванні водопровідних мереж. Сучасні нормативи вимагають перегляду з урахуванням нових матеріалів, змін водоспоживання та енергетичних викликів. Запропонований підхід дозволяє знайти баланс між економічністю, надійністю та енергоефективністю функціонування систем водопостачання.

### ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Мінрегіон України. К.: Укрархбудінформ, 2013. 115 с.
2. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Мінрегіон України. К.: Укрархбудінформ, 2013. 105 с.
3. Saldarriaga, J.; Takahashi, S.; Hernández, F.; Escovar, M. Multi-objective water distribution system design using an expert algorithm. In Proceedings of the Urban Water Management Challenges Opportunities —11th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2011, Exeter, UK, 5–7 September 2011; Volume 3.
4. Prasad, T.D.; Park, N.-S. Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. J. Water Resour. Plan. Manag. 2004, 130, 73–82.

5. Farmani, R.; Savic, D.A.; Walters, G.A. Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design. *Eng. Optim.* 2005, 37, 167–183.
6. Тугай А.М., Орлов В.О. Водопостачання: Підручник. Київ: Знання, 2009. 735 с.
7. Кушка О., Степова Н. Щодо оптимізації розрахунку внутрішніх систем холодного та гарячого трубопроводу // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2021, Вип. 36. С. 18-26.
8. Кушка О. Розрахунок внутрішніх мереж водопроводу при максимальному збереженні якості питної води // Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти: матер. VII Міжнар. наук.-практ. конф. 25-26 листопада 2021 р., м. Київ. 209 с.

#### REFERENCES

1. Ministry of Regional Development of Ukraine (2013). DBN V.2.5-75:2013. Sewerage. External Networks and Structures. Basic Design Principles. Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2013. [in Ukrainian]
2. Ministry of Regional Development of Ukraine (2013). DBN V.2.5-64:2012. Internal Water Supply and Sewerage. Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2013. [in Ukrainian]
3. Saldarriaga, J., Takahashi, S., Hernández, F., & Escovar, M. (2011). Multi-objective water distribution system design using an expert algorithm. *In Proceedings of the Urban Water Manage-*

- ment: Challenges and Opportunities. *11th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI 2011)*, Exeter, UK, September 5–7, 2011, Vol. 3. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/320331290\\_Multi-objective\\_water\\_distribution\\_system\\_design\\_using\\_an\\_expert\\_algorithm](https://www.researchgate.net/publication/320331290_Multi-objective_water_distribution_system_design_using_an_expert_algorithm)
4. Prasad, T. D., & Park, N.-S. (2004). Multi-objective genetic algorithms for design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 73–82. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2004\)130:1\(73\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2004)130:1(73))
5. Farmani, R., Savic, D. A., & Walters, G. A. (2005). Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design. *Engineering Optimization*, 37(2), 167–183. <https://doi.org/10.1080/03052150512331303436>
6. Tuhai, A. M., & Orlov, V. O. (2009). *Water Supply: Textbook*. Kyiv: Znannia. [in Ukrainian]
7. Kushka, O., & Stepova, N. (2021). On the optimization of calculation of internal cold and hot water pipeline systems. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulics*, (36), 18–26. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.36.18-26>
8. Kushka, O. (2021). Calculation of internal water supply networks with maximum preservation of drinking water quality. *In Clean Water: Fundamental, Applied and Industrial Aspects – Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference* (Kyiv, November 25–26, 2021). [in Ukrainian]

#### Methodology for Determining the Optimal Water Flow Velocity in Urban Water Distribution Networks

Oleksandr Kushka, Yana Genzerska

**Abstract.** The article addresses the problem of efficient transportation and distribution of water in external water supply networks of cities and settlements, considering variable operating conditions, energy efficiency, and system reliability. It is noted that the key factor affecting operational costs and network reliability is the water flow velocity in pipelines. The current regulatory framework is analyzed, which lacks clear recommendations regarding hydraulic parameters, complicating the design process in the context of a dynamic urban environment. The influence of pipe materials, particularly polyethylene, on network durability and the relevance of hydraulic calculations based on outdated tables is discussed. The use of an optimal pipe diameter criterion is proposed, based on the balance of head losses, water transit time, and mass. An analysis of the relationship between average flow velocity and specific head losses depending on pipe diameter, based on literature sources, is presented. Specific behavioral patterns in the 100–1000 mm diameter range are identified. It is determined that ignoring flow velocity may lead to significant energy and financial losses. Conclusions are drawn on the necessity of revising regulatory approaches to the design and modernization of water supply networks, taking into account changes in consumption, pipe materials, and modern energy efficiency requirements.

**Keywords:** water supply network, water flow velocity, head loss, energy efficiency, hydraulic calculation, optimal diameter, polyethylene pipes, water supply reliability.

Стаття надійшла до редакції 18.09.2025