

УДК 514.18

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМИХ ПОКАЗНИКІВ ВАРТОСТІ СПОРУДЖЕННЯ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРУБОПРОВОДІВ ЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Орел Ю.М.,

Магалов А.М.

Київський національний університет будівництва і архітектури

(Україна)

В роботі розглядаються декілька з підходів до визначення питомої вартості спорудження трубопроводів на різних ділянках досліджуваної області забудови при моделюванні ефективних з точки зору будівництва і експлуатації мереж систем водопостачання.

Результатом моделювання стає оптимізована геометрична форма дискретного образу мережі трубопроводів системи водопостачання, положення вузлів розгалуження якої визначаються в результаті вирішення системи нелінійних рівнянь. Основним ускладнення у формуванні відповідних рівнянь, а також у процесі моделювання в цілому, є визначення питомих показників економічної ефективності того чи іншого розміщення кожної із ланок трубопроводів. Це пов'язано з тим, що на різних ділянках досліджуваної області забудови, як правило, задаються різні показники вартості спорудження й експлуатації мереж водопостачання. Водночас, деякі з ланок трубопроводів можуть простягатися одразу на декількох ділянках даної області, а значить, вище зазначений показник буде змінюватися на усій протяжності відповідних ланок.

Пропонується застосовувати дискретний або інтегральний підхід, що передбачає визначення усереднених значень спеціальних цільових функції, які вводяться для об'єктивної оцінки економічної ефективності будівництва і обслуговування відповідних систем, на кожній прямолінійній ділянці трубопроводів. Такі оціночні функції дозволяють відобразити нерівномірності рівня трудовитрат на території, яку охоплює досліджувана область моделювання. Саму ж задачу оптимізації пропонується вирішувати системними засобами прикладної дискретної геометрії.

Дана задача є дуже важливою, оскільки її вирішення дозволяє ще на етапі виконання проектних робіт значно скоротити подальші будівельно-експлуатаційні витрати на мережі водопостачання.

Ключові слова: ефективні системи водопостачання, цільові функції, дискретне геометричне моделювання.

Постановка проблеми. Скорочення витрат на зведення та експлуатацію зовнішніх інженерних систем, і передусім мереж водопостачання, є одним із найбільш пріоритетних завдань інженерів-проектувальників, що працюють в галузі енергетики та житлово-комунального господарства. Для вирішення даної проблеми переважно вдаються до традиційних підходів, представлених уніфікацією технічних рішень та підбором оптимального з точки зору потужності та ефективності енергогенеруючого обладнання й автоматики. Однак, відповідні підходи більше орієнтовані на виключення ймовірності допущення помилок при монтажі та пуско-налагоджувальних роботах (в тому числі при підготовці до кожного наступного опалювального сезону, гідравлічних випробуваннях тощо), а ніж на максимізацію економічного ефекту при технічному обслуговуванні та подальшій експлуатації систем водопостачання.

Відтак, розробка нових та розвиток уже існуючих методів оптимізації інженерних систем ще на етапі проектування є актуальною та важливою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [1] та [2] було запропоновано відносно просту методику пошуку оптимальних геометричних параметрів досліджуваної інженерної системи на основі використання заданих цільових функцій. При цьому, рівняння, що визначають координати усіх вузлів розгалуження або зміни напрямку (повороту) ланок інженерних систем мають наступну форму:

$$\begin{cases} x_i \cdot \sum_{j=1}^n k_{i,j} - \sum_{j=1}^n (k_{i,j} \cdot x_j) = 0, \\ y_i \cdot \sum_{j=1}^n k_{i,j} - \sum_{j=1}^n (k_{i,j} \cdot y_j) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Тут: x_i та y_i ($i = 2, 3, \dots, N$) – координати вільних вузлів мережі; $k_{i,j}$ – коефіцієнти, що відображають питомі показники вартості будівництва й експлуатації окремих ланок на відповідних ділянках їх прокладання, й визначаються за формулою [2]:

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j), \quad (2)$$

де: i -й та j -й індекси відповідають кінцям відповідної прямолінійної ланки моделі мережі. Значення коефіцієнту $k_{i,j}$ може розраховуватися, як функціонал від деякої функції $f(x,y)$, а в найпростішому випадку, як сума функцій $f(x,y)$ від координат i -го та j -го вузлів:

$$F(x_i, x_j, y_i, y_j) = f(x_i, y_i) + f(x_j, y_j). \quad (3)$$

Згідно з [3] функція $f(x,y)$ може бути побудованою як на основі інтерполяції (шляхом розв'язання системи інтерполяційних рівнянь, з подальшим визначенням точних коефіцієнтів, що забезпечують проходження графіку остаточної функції через задані опорні точки

простору досліджуваних параметрів), так і апроксимації (шляхом прямої побудови апроксимаційної, але наближеної з деякою похибкою, функції) із застосуванням радіально-базисних функцій. Другий варіант є набагато простішим з точки зору трудовитрат на моделювання та дозволяє отримувати досить передбачувані результати.

Формулювання цілей статті. Зважаючи на вище зазначене, проаналізуємо практичні аспекти визначення питомих економічних показників спорудження й подальшої експлуатації трубопроводів на різних ділянках досліджуваної області забудови при моделюванні ефективних мереж систем водопостачання. При цьому розглянемо дискретний та інтегральний підходи до визначення усереднених показників економічної ефективності розміщення окремих ланок мереж.

Основна частина. Спершу розглянемо дискретний підхід до визначення питомого економічного показника зведення і експлуатації досліджуваної ланки трубопроводу. Як уже було сказано вище, найпростіший випадок відповідного показника може бути представлений функціоналом (3) $k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j)$ від деякої функції $f(x, y)$. З логічних міркувань можна припустити, що вид елементарного питомого показника може бути визначений, як усереднене значення вартості спорудження й експлуатації (протягом визначеного відрізка часу) у областях, де розміщені початок і кінець даної ланки трубопроводу:

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j) = \frac{f(x_i, y_i) + f(x_j, y_j)}{2}. \quad (4)$$

Однак, такий підхід може дати лише дуже грубе уявлення про вартість спорудження й обслуговування відповідної ланки, оскільки при значній протяжності останньої виникає ймовірність того, що на її шляху траплятимуться такі фрагменти досліджуваної області моделювання, на яких функція вартості змінюватиметься. Відтак, для підвищення точності розрахунків, варто додати у формулу (4) щонайменше одну контрольну точку посередині ланки:

$$k_{i,j} = \frac{f(x_i, y_i) + f\left(\frac{x_j + x_i}{2}, \frac{y_j + y_i}{2}\right) + f(x_j, y_j)}{3}. \quad (5)$$

Вираз (5) можна переписати у наступній формі:

$$k_{i,j} = \frac{f(x_i, y_i) + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{2}, y_i + \frac{y_j - y_i}{2}\right) + f(x_j, y_j)}{3}. \quad (6)$$

В такому разі, ланка буде розділена контрольною точкою на два

відрізки, рівні по довжині.

Очевидно, що якщо розділити досліджувану ланку на три рівні відрізки двома внутрішніми контрольними точками, то точність розрахунку питомого показника економічної ефективності зросте ще більше. В такому разі формула для його визначення прийме наступний вигляд:

$$k_{i,j} = \frac{\left(f(x_i, y_i) + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{3}, y_i + \frac{y_j - y_i}{3}\right) + \right.}{\left. + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{3} \cdot 2, y_i + \frac{y_j - y_i}{3} \cdot 2\right) + f(x_j, y_j) \right)}{4}. \quad (7)$$

Продовжуючи ділення досліджуваної ланки більшою кількістю контрольних точок, та вважаючи i -ту точку (початок ланки) 1-ю, а j -ту точку (кінець ланки) n -ю, можна записати узагальнену формулу для визначення показника економічної ефективності з будь-якою точністю у наступній формі для n точок:

$$k_{i,j} = \frac{\left(f(x_i, y_i) + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot 1, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot 1\right) + \right.}{\left. + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot 2, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot 2\right) + \right.}{\left. + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot 3, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot 3\right) + \dots \right.}{\left. \dots + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot (n-2), y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot (n-2)\right) + f(x_j, y_j) \right)}{n}. \quad (8)$$

У скороченій формі формула (8) матиме наступний вид:

$$k_{i,j} = \left(f(x_i, y_i) + \sum_{r=1}^{n-2} f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot r, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot r\right) + f(x_j, y_j) \right) / n, \quad (9)$$

або:

$$k_{i,j} = \left(f(x_i, y_i) + \sum_{r=1}^{n-1} f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot r, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot r\right) \right) / n. \quad (10)$$

Очевидно, що точність формул (9) та (10) залежить від кількості точок досліджуваної ланки, і чим більше цих точок, тим вона вища.

Існує можливість абсолютно точного визначення значення питомого показника економічної ефективності із застосуванням інтегрального підходу. Цей підхід полягає у знаходженні інтегралу в полі функції $f(x,y)$ уздовж ланки, віднесеного до її довжини $L_{i,j}$:

$$k_{i,j} = \int_{L_{i,j}} f(x,y) dl / L_{i,j}, \quad (11)$$

де dl – елементарний фрагмент відрізка ланки трубопроводу, уздовж якої здійснюється інтегрування.

Однак, в дійсності більшість інтегралів не можуть бути обчислені точно. А значить, при їх чисельному визначенні застосовується розкладання підінтегрального виразу в ряди (до певного члену). Відтак, у разі високої нелінійності функції $f(x,y)$, застосування інтегрального підходу може виявитися просто невиправданим, оскільки потребуватиме значних витрат машинних комп'ютерних ресурсів та призводитиме до зниження швидкості моделювання.

Окрім того, можливе застосування дискретних методів інтегрування.

Висновки. Продемонстровані підходи до визначення питомих економічних показників спорудження й подальшої експлуатації трубопроводів на різних ділянках досліджуваної області забудови можуть бути відносно просто застосовані при моделюванні ефективних мереж систем водопостачання. При цьому дискретний підхід до обчислення відповідних показників є простішим і може виявитися ефективнішим за умови високої складності інтерполяційних або апроксимаційних функцій розподілу нерівномірності рівня трудовитрат на території, яку охоплює досліджувана область моделювання.

З іншого боку, якщо функція розподілу питомих економічних показників має дуже нерівномірний характер і суттєво змінюється уздовж досліджуваної ланки трубопроводів, то інтегральний підхід виявляється точнішим, оскільки не вимагає аналізу та підбору такого ступеню дискретизації, який забезпечуватиме найвищу точність при оптимальній кількості контрольних точок на цій ланці.

Література

1. Орел Ю.М., Чернишев Д.О., В Скочко.І., Кожедуб С.А. Дискретне моделювання оптимальних параметрів зовнішніх мереж водопостачання засобами прикладної геометрії. *International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2019": Conference Proceedings*. 2019. С. 288-289.
2. Скочко В.І., Плоский В.О., Гегер А.Д., Скочко Л.О. Скорочення тепловтрат систем теплопостачання шляхом оптимізації їх геометричних моделей при проектуванні. *Наук. тех. журн.: Енерго-ефективність в буд. та арх.* Вип. 10. 2018. С. 15-28.
3. Орел Ю.М., Чернишев Д.О., Плоский В.О., Скочко В.І. Побудова спеціальних цільових функцій при оптимізації геометричних моделей систем водопостачання. *Сучасні проблеми моделювання*.

- Технічні науки*. Мелітополь, 2020. Вип. 17. С. 66-74.
4. Верещага В.М. Дискретное интегрирование. Харьков: Полиграфист, 1995. 47 с.
 5. Найдыш В.М., Верещага В.М. Проблемы численного интегрирования. Харьков: Полиграфист, 1995. 47 с.
 6. Поддубный Г.В. Множества. Интеграл по области. Векторный анализ, теория поля. ВВКИУ, 1973. 136 с.
 7. Хомченко А.Н. Тулученко Г.Я. Полиномы Бернулли и формулы приближенного интегрирования. *Вестник Севастопольского государственного технического университета*. Севастополь: СевНТУ, 2005. Вып. 70: Физика и математика. С. 167-173.
 8. Iske A. Radial basis functions: basics, advanced topics and meshfree methods for transport problems. *Rend. Sem. Mat. Univ. Pol.*, Torino, 2003. № 61 (3). P. 247–284.
 9. Haykin S.: *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. Upper Saddle River – New Jersey, 2006, 1105.
 10. Ball K., Sivakumar N., and Ward J.D., On the sensitivity of radial basis interpolation to minimal data separation distance, *Constr. Approx.*, 8 (1992), 401–426.
 11. Baxter B. J. C., Norm estimates for inverses of distance matrices, in *Mathematical Methods in Computer Aided Geometric Design II*, T. Lyche and L. Schumaker (eds.), Academic Press, New York, 1992, P. 9–18.
 12. Baxter B.J.C., Preconditioned conjugate gradients, radial basis functions, and Toeplitz matrices, *Comput. Math. Appl.* 43 (2002), P. 305–318.
 13. Beatson R.K., Cherrie J.B., and Mouat C.T., Fast fitting of radial basis functions: methods based on preconditioned GMRES iteration, *Adv. Comput. Math.* 11 (1999), P. 253–270.
 14. Driscoll T.A. and Fornberg B., Interpolation in the limit of increasingly flat radial basis functions, *Comput. Math. Appl.* 43 (2002), P. 413–422.
 15. Dyn N., Interpolation and approximation by radial and related functions, in *Approximation Theory VI*, C. Chui, L. Schumaker, and J. Ward (eds.), Academic Press, New York, 1989. P. 211–234.
 16. Hon Y.C. and Schaback R., On nonsymmetric collocation by radial basis functions, *Appl. Math. Comput.* 119 (2001). P. 177–186.
 17. Rudin W., *Functional Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1973.
 18. Sarra S.A., Accurate derivative approximations using radial basis functions, preprint, Marshall University, 2003.
 19. Schaback R., Multivariate interpolation by polynomials and radial basis functions, preprint, Universität Göttingen, 2002.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТОИМОСТИ СООРУЖЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Орел Ю.М., Магалов А.М.

В работе рассматриваются несколько из подходов к определению удельной стоимости сооружения трубопроводов на различных участках исследуемой области застройки при моделировании эффективных с точки зрения строительства и эксплуатации сетей систем водоснабжения.

Результатом моделирования становится оптимизированная геометрическая форма дискретного образа сети трубопроводов системы водоснабжения, положение узлов разветвления которой определяются в результате решения системы нелинейных уравнений. Основным осложнением при формировании соответствующих уравнений, а также в процессе моделирования в целом, является определение удельных показателей экономической эффективности того или иного размещения каждого из отрезков трубопроводов. Это связано с тем, что на разных участках исследуемой области застройки, как правило, задаются различные показатели стоимости сооружения и эксплуатации сетей водоснабжения. В то же время, некоторые из отрезков трубопроводов могут простираться сразу на нескольких участках данной области, а значит, выше указанный показатель будет меняться на всей протяженности соответствующих отрезков.

Предлагается применять дискретный или интегральный подходы, предусматривающие определение усредненных значений специальных целевых функции, которые вводятся для объективной оценки экономической эффективности строительства и обслуживания соответствующих систем, на каждом прямолинейном участке трубопроводов. Такие оценочные функции позволяют отобразить неравномерности уровня трудозатрат на территории, которую охватывает исследуемая область моделирования. Саму же задачу оптимизации предлагается решать системными средствами прикладной дискретной геометрии.

Данная задача является очень важной, поскольку ее решение позволяет еще на этапе выполнения проектных работ значительно сократить дальнейшие строительно-эксплуатационные затраты на сети водоснабжения.

Ключевые слова: эффективные системы водоснабжения, целевые функции, дискретное геометрическое моделирование.

DETERMINATION OF SPECIFIC INDICATORS OF THE COST OF CONSTRUCTION AND OPERATION OF PIPELINES OF EFFECTIVE WATER SUPPLY SYSTEMS

Orel Yu., Magalov A.

This paper considers several of the approaches to determine the unit cost of constructing pipelines in various parts of the studied area of construction when modeling water supply networks that are effective from the point of view of building and operation.

The result of the simulation is the optimized geometric shape of the discrete image of the piping network of the water supply system, the location of the branching nodes of which are determined by solving a system of nonlinear equations. The main complication in the formation of the corresponding equations, as well as in the modeling process as a whole, is the determination of specific indicators of the economic efficiency of a particular location of each of the pipeline sections. This is due to the fact that at different sites of the studied area of development, as a rule, various indicators of the cost of construction and operation of water supply networks are set. At the same time, some of the segments of pipelines can extend immediately to several sections of this area, which means that the above indicator will change over the entire length of the corresponding sections.

It is proposed to apply a discrete or integral approach, providing for the determination of averaged values of special objective functions that are introduced for an objective assessment of the economic efficiency of the construction and maintenance of the respective systems, on each straight section of pipelines. Such evaluation functions allow you to display the uneven level of labor costs in the territory covered by the study area of modeling. The optimization problem itself is proposed to be solved by systemic tools of applied discrete geometry.

This task is very important, because its solution allows even at the stage of design work to significantly reduce further construction and maintenance costs for water supply networks.

Keywords: effective water supply systems, target functions, discrete geometric modeling.