

DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.57.206-215>

УДК 514.18

**Орел Юлія Миколаївна***аспірант кафедри архітектурних конструкцій**Київського національного університету будівництва і архітектури,*

orel.yulia.m@gmail.com

[http://orcid.org / 0000-0002-4754-1555](http://orcid.org/0000-0002-4754-1555)

## **ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРИТОРІЇ БУДІВНИЦТВА ЗА ПОКАЗНИКАМИ ПИТОМИХ ВАРТОСТЕЙ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗОВНІШНІХ МЕРЕЖ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Анотація: у статті висвітлюється питання вирішення задачі оптимізації траєкторій прокладання зовнішніх мереж водопостачання методами дискретної геометрії на основі ітераційного корегування коефіцієнтів, що відображають техніко-економічну доцільність прокладання окремих ланок трубопроводів на різних територіях, виражену через рівні питомої вартості. Для цього скалярне поле величин питомої вартості будівельних та експлуатаційних робіт у кожній точці досліджуваної території пропонується задавати як інтерполяційну функцію. В свою чергу, пропонується інтерполяційна функція будується на основі підібраних під критерії задачі, що досліджується, радіально-базисних функціях. Розподіл питомих вартостей земельних ділянок буде мати безпосередній вплив на результати корегування траєкторії влаштування ланок трубопроводів та місць розміщення їх стикування (розгалуження мережі трубопроводу). Окрім цього результати моделювання території будівництва за показниками питомих вартостей її ділянок дозволяють виконати попередній передпроектний аналіз вихідних даних, на основі графічного відображення цих показників. В кінцевому результаті проведення оптимізації визначення траєкторії трасування мережі трубопроводів дозволять як зменшити довжини ланок трубопроводів, так і зменшити вартість будівельно-монтажних робіт, трудових ресурсів та подальших експлуатаційних витрат. Це пояснюється тим, що скорегована (оптимізована) схема мережі трубопроводів водопостачання буде володіти рядом переваг перед класичними підходами проектування, такими як доцільність використання ділянок міжбудинкових територій, зменшення навантажень на окремі ланки трубопроводів, можливість уточнюючих коригувань за рахунок введення додаткових критеріїв тощо.

Ключові слова: дискретне моделювання, зовнішні мережі водопостачання, радіально-базисні функції.

**Постановка проблеми.** Як відомо, процеси будівництва, ремонту та подальшої експлуатації зовнішніх інженерних мереж стикаються з більшою кількістю перешкод, аніж аналогічні процеси, що пов'язані із внутрішніми інженерними системами будівель. Для системи зовнішнього водопостачання дана ситуація не є виключенням. Зовнішні мережі водопостачання, на відміну від внутрішніх інженерних комунікацій, під час усунення аварій або проведення ремонтних робіт потребують більше часу та ресурсів для ідентифікації місць розривів або зношення трубопроводів, в більшості випадків, виконання земельних робіт по виїмці ґрунту, та усунення дефектів. Складність робіт підвищується також внаслідок таких факторів, як прокладання трубопроводів на ділянках загального користування, перетин в плані транспортних сполучень та інших інженерних систем, а також фактору деформації ґрунтів, на яких розміщуються трубопроводи, фактору лінійних сезонних деформацій матеріалів трубопроводів та ін.. Всі ці аспекти актуалізують питання оптимізації схем розміщення зовнішніх мереж водопостачання ще на етапі проектування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій** показав, що основна увага науково-практичних досліджень з оптимізації систем водопостачання [1 – 3], приділяється власне питанням удосконалення та реновації вже існуючих мереж та устаткування. Така оптимізація досягається шляхом налагодження режимів постачання, встановлення більш ефективного регулюючого обладнання та автоматизації, запровадження заходів з моніторингу та контролю споживання ресурсів та зменшення забруднення навколишнього середовища. Проте питання розробки проектних рішень влаштування інженерних систем таким чином, щоб досягти мінімальних витрат на зведення/експлуатацію та/або максимальних техніко-економічних показників системи за рахунок науково-обґрунтованого підходу до визначення оптимальних параметрів розгалуженої мережі трубопроводів водопостачання в достатній мірі не висвітлені. В окремих випадках, задля забезпечення вищої продуктивності та ефективності роботи інженерних систем пропонується застосовувати математичне вирішення локальних оптимізаційних задач розподілу або перерозподілу ресурсів, що постачаються,. При цьому застосовуються переважно класичні методи лінійного програмування [6]. В той же час принципи проектування мереж зовнішнього водопостачання, рекомендовані для інженерів-проектувальників є стандартними [5] і залежать, в більшій мірі, від практичного досвіду фахівця.

Наприклад, «транспортна задача», що є однією з найбільш відомих класичних вирішень оптимізаційної задачі розподілу будь-яких ресурсів полягає у пошуку оптимального положення єдиної точки розподілу  $P_0(x_0, y_0)$ , до

якої надходить весь обсяг ресурсів від постачальника, а далі цей ресурс розподіляється від цієї точки розподілу до усіх споживачів [7].

Однак на практиці, система зовнішнього водопостачання представляє собою складну та досить розгалужену мережу, що обумовлюється врахуванням ряду містобудівних умов та обмежень, технологічних, інженерно-геологічних й інших факторів. Відповідно, планування положення вузлів система зовнішнього водопостачання за цим підходом на практиці дуже складно реалізується, а за умови встановлення функціональної залежності положення точки розподілу з полем значень характеристик цінності ділянки, на якій буде розташовуватись точка, стає ще складнішою.

Попередні дослідження показали, що найбільш точний та науково-обґрунтований підхід до оптимізації складних зовнішніх мереж теплопостачання було зроблено в роботі [8], де була одержана система рівнянь, що визначає положення будь-якої кількості вузлів їх розгалуження:

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

де  $k_{i,j}$  – коефіцієнт, що дорівнює величині параметрів питомих тепловтрат, віднесених до довжин окремих ділянок, й визначається за формулою:

$$k_{i,j} = q_{l_{i,j}} \cdot K_{SUP_{i,j}} / ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1/2}, \quad (2)$$

де  $q_{l_{i,j}}$  та  $K_{SUP_{i,j}}$  – лінійна щільність теплового потоку й коефіцієнт, який враховує збільшення тепловтрат через опори і підвіски, на ділянці між  $i$ -м та  $j$ -м вузлами.

Однак, коли мова йде про системи водопостачання й основною цільовою функцією є техніко-економічні показники будівництва й експлуатації, а не енерговитрати, то доцільніше в якості коефіцієнта  $k_{i,j}$  прийняти величину, яка відобразить рівень питомої вартості прокладання трубопроводів на різних ділянках досліджуваної території.

**Мета статті.** В рамках запропонованого підходу до оптимізації схем прокладання трубопроводів мереж водопостачання з урахуванням характеристик техніко-економічної доцільності, виконати геометричне моделювання території будівництва за показниками питомої вартості (цінності) її окремих ділянок. Тобто необхідно запропонувати таку геометричну модель розподілу питомих вартостей ділянок, яка б максимально відповідала об'єкту дослідження.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо систему рівнянь (1), з точки зору прикладної геометрії. Таким чином, розв'язання системи (1) дозволяє

визначити координати мінімальної (по загальній довжині ланок) сітки із урахуванням коефіцієнтів щільності взаємодії між окремими вузлами ( $k_{i,j}$ ). Якщо ж до (1) застосувати апроксимацію зрівноваженою сіткою, сформованою відповідно до статико-геометричного методу дискретної геометрії [9], то в результаті отримаємо координати сітки, яка буде мати достатньо високу точність та наблизиться до мінімальної. Відповідно до цього методу, коефіцієнти (2) у більшості випадках приймаються сталими величинами, тобто:  $k_{i,j} = \text{const}$ . В даному випадку  $k_{i,j}$  є наперед заданими коефіцієнтами пропорційності, що характеризують силу взаємодії між окремими вузлами, які їх сполучають.

Для системи водопостачання основною цільовою функцією є техніко-економічні показники будівництва й експлуатації, а не енерговитрати, тому найкращим є прийняти в якості коефіцієнта  $k_{i,j}$  величину, яка відобразить рівень питомої вартості прокладання трубопроводів на різних ділянках досліджуваної території під будівництво. Отже, коефіцієнт пропорційності  $k_{i,j}$  буде залежати від координат початку і кінця кожної ланки, тобто деякого  $i$ -го та  $j$ -го вузлів і може бути поданий функціональною залежністю (3):

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j). \quad (3)$$

Для найпростішого випадку можемо записати:

$$F(x_i, x_j, y_i, y_j) = f(x_i, y_i) + f(x_j, y_j). \quad (4)$$

Відповідно до (4) функція  $f(x,y)$  від координат  $i$ -го та  $j$ -го вузлів визначає поле питомих показників вартості будівництва, ремонту й експлуатації трубопроводів на площині.

На практиці поле питомих показників вартості будівництва, ремонту й експлуатації трубопроводів матиме нелінійний характер. Тому функція  $f(x,y)$  може бути представлена деякою інтерполяційною або апроксимаційною поверхнею.

Досвід геометричного моделювання складних структурованих геометричних поверхонь [10] свідчить про доцільність використання у якості апроксимаційних функцій для даного типу задач саме радіально-базисних функцій [4]. Прикладом найбільш вживаних радіально-базисних функцій є зворотні квадратичні (5) або мультиквадратичні (6) функції:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M z_i / [1 + \varepsilon^2 \cdot ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2)], \quad (5)$$

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M z_i / \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2)}. \quad (6)$$

В формулах (5) та (6) використані наступні позначення:  $z_i$  – значення питомих показників вартості у опорних точках з координатами  $x_i$  та  $y_i$ ;  $\varepsilon$  – коефіцієнт гладкості апроксимації між опорними точками функції  $f(x,y)$ ;  $M$  – кількість

опорних точок.

В якості основної радіально-базисної функції приймемо функцію (6). Дана функція може бути в деякій мірі модифікована. Виконавши ряд перетворень та аналізуючи результати графічних побудов було виконано пошук найефективнішої варіації з точки зору відповідності фактичному розподілу техніко-економічних характеристик ділянок будівельної території. Тобто, модифікована мультіквадратична радіально-базисна функція може бути записана у вигляді функції (7).

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M z_i / \left( \left[ \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right). \quad (7)$$

де  $r$  – показник ступеня мультіквадратичної базисної функції, найоптимальніше значення для вирішення поставленої задачі було отримано при  $k=20$ ; решта позначень залишились без змін.

Розглянемо випадок розподілу питомих вартостей 5-и земельних ділянок будівельної території. Нехай відомі результатами аналізу території будівництва мережі водопостачання за показниками вартості (цінності) земельних ділянок. Значення питомих вартостей земельних ділянок зведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Вихідні значення питомих вартостей земельних ділянок

Позначення визначеної ділянки за показниками питомої вартості	Показники питомої вартості (цінності) земельних ділянок	Координатами центру ваг ділянки	
		$x_i$	$y_i$
ділянка А	$z_A = 4,2$	$x_A = 24$	$y_A = 63$
ділянка В	$z_B = 3,1$	$x_B = 50$	$y_B = 75$
ділянка С	$z_C = 5,4$	$x_C = 110$	$y_C = 31$
ділянка D	$z_D = 2,0$	$x_D = 80$	$y_D = 26$
ділянка E	$z_E = 1,3$	$x_E = 67$	$y_E = 52$

Для візуалізації геометричної моделі (рис. 1) розподілу питомих вартостей ділянок будівельної території використаємо зважені функції згідно з (8):

$$z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N z_i \cdot f(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i, y_i)} = \frac{\sum_{i=1}^N z_i \cdot 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right)}{\sum_{i=1}^N 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right)}. \quad (8)$$

Перепишемо (8) для заданого вище випадку з п'яти ділянок:

$$z(x, y) = \frac{z_A \cdot 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_A - x)^2 + (y_A - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right) + z_{0,B} \cdot 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_B - x)^2 + (y_B - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right) + 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_A - x)^2 + (y_A - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right) + 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_B - x)^2 + (y_B - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right) + z_C \cdot 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_C - x)^2 + (y_C - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right) + z_{0,D} \cdot 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_D - x)^2 + (y_D - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right) + 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_C - x)^2 + (y_C - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right) + 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_D - x)^2 + (y_D - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right) + z_A \cdot 1 / \left( \left[ \sqrt{(x_E - x)^2 + (y_E - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right)}{1 / \left( \left[ \sqrt{(x_E - x)^2 + (y_E - y)^2} \right]^{20} + \varepsilon \right)}$$

При цьому введемо наступні крайові умови:  $x \in (0;150)$  та  $y \in (0;150)$ . Коефіцієнт гладкості апроксимації  $\varepsilon = 0,00001$ .

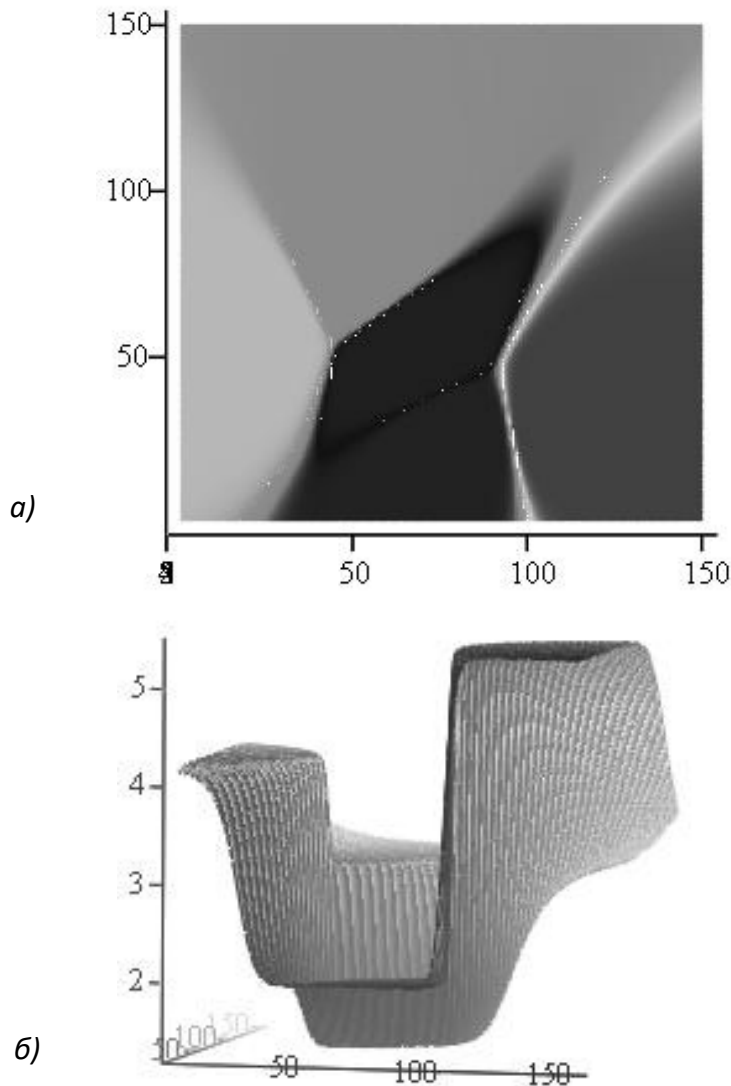


Рис 1. Поверхня  $z(x, y)$  значень питомих вартостей земельних (містобудівних) ділянок:  
а) в плані; б) в аксонометрії

**Висновки.** Розподіл питомих вартостей земельних ділянок буде мати безпосередній вплив на результати корегування траєкторії влаштування ланок трубопроводів та місць розміщення їх стикування (розгалуження мережі трубопроводу). Окрім цього результати моделювання території будівництва за показниками питомих вартостей її ділянок дозволяють виконати попередній передпроектний аналіз вихідних даних, на основі графічного відображення цих показників. В кінцевому результаті проведення оптимізації визначення траєкторії трасування мережі трубопроводів дозволять як зменшити довжини ланок трубопроводів, так і зменшити вартість будівельно-монтажних робіт, трудових ресурсів та подальших експлуатаційних витрат. Це пояснюється тим, що скорегована (оптимізована) схема мережі трубопроводів водопостачання буде володіти рядом переваг перед класичними підходами проектування, такими як доцільність використання ділянок міжбудинкових територій, зменшення навантажень на окремі ланки трубопроводів, можливість уточнюючих коригувань за рахунок введення додаткових критеріїв тощо.

#### Література:

1. Rak J.R. Selected problems of water supply safety / J.R. Rak // *Environment Protection Engineering*, 35, 2, 2009. – P. 23-28.
2. Nahman J.M. Dependability of engineering systems – modeling and evaluation / J. M. Nahman // *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2002, 192 pp.. DOI: 10.1007/978-3-662-04892-4.
3. Ostfeld A. Reliability simulation of water distribution systems – single and multiquality / Avi Ostfeld, Dimitri Kogan, Uri Shamir // *Urban Water*, №4, 2002 – P. 53–61. DOI: 10.1016/S1462-0758(01)00055-3.
4. Iske A. Radial basis functions: basics, advanced topics and meshfree methods for transport problems / A. Iske // *Rendiconti del Seminario Matematico*, Univ. Pol. Torino, 2003. № 61 (3). – P. 247–284.
5. Тугай А.М. Розрахунок і проектування споруд систем водопостачання / Тугай А.М., Терновцев В.О., Тугай Я.А. // *Навч. посібник*. К.: КНУБА, 2001. – 256 с.
6. Гюльштейн Е.Г. Задачи линейного программирования транспортного типа / Е.Г. Гюльштейн, Д.Б. Юдин / *Учебник*. М., Наука, 1969. – 384 с.
7. Бронштейн И.Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инж. и учащихся вузов. М., Наука, 1980. – 976 с.
8. Скочко В.І. Скорочення тепловтрат систем тепlopостачання шляхом оптимізації їх геометричних моделей при проектуванні / В.І. Скочко, В.О. Плоский, А.Д. Гегер, Л.О. Скочко // *Енергоефективність в будівництві та*

архітектури. К.: КНУБА, 2018, Вип. 10. – С. 15-28. DOI: 10.32347/2310-0516.2018.10.15-28

9. Ковальов С.М. Прикладна геометрія та інженерна графіка. Спеціальні розділи. Випуск 1 / С.М. Ковальов, М.С. Ігумен, С.И. Пустюльга, В.Є. Михайленко та ін. // *Навч. посіб.*: за ред. В. Є. Михайленка. Луцьк: Редакційно-видавничий відділ ЛДТУ, 2006. – 256 с.

10. Плоский В.О. Дослідження методів геометричного моделювання топографічних поверхонь / В.О. Плоский, С.А. Кожедуб // *Геометричне та комп'ютерне моделювання*. Харків: ХДУХТ, 2009, Вип. 22 – С.11-17.

11. Dyn N. Interpolation and approximation by radial and related functions / N. Dyn // *Approximation Theory*, 1989, – P. 211-234.

12. Rudin W. Functional Analysis / W. Rudin // McGraw-Hill, New York, 1973. – P. 424.

#### References

1. Rak J.R. (2009). Selected problems of water supply safety. *Environment Protection Engineering*, 35 (2), 23-28. (in English).

2. Nahman J.M. (2002). Dependability of engineering systems – modeling and evaluation, 192 pp. DOI: 10.1007/978-3-662-04892-4. (in English).

3. Ostfeld A. Reliability simulation of water distribution systems – single and multiquality / Avi Ostfeld, Dimitri Kogan, Uri Shamir // *Urban Water*, №4, 2002 – P. 53–61. DOI: 10.1016/S1462-0758(01)00055-3. (in English).

4. Iske A. (2003). Radial basis functions: basics, advanced topics and meshfree methods for transport problems. *Rendiconti del Seminario Matematico*, № 61 (3), 247-284. (in English).

5. Tuhai A.M., Ternovtsev V.O., Tuhai Ya.A. (2001). Calculation and design of water supply systems [Rozrakhunok i proektuvannya sporud system vodopostachannya], 256 pp. (in Ukrainian).

6. Gyul'shteyn Ye.G., Yudin D.B. (1969). Transport type linear programming problems [Zadachi lineynogo programmirovaniya transportnogo tipa], 384 pp. (in Russian).

7. Bronshteyn I.N., Semendyayev K. A. (1980). A handbook of mathematics for engineers and students [Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov], 976 pp. (in Russian).

8. Skochko V.I. Ploskyi V.O., Heher A.D., Skochko L.O. (2018). [Skorochennya teplovtrat system teplopostachannya shlyakhom optymizatsiyi yikh heometrychnykh modeley pry proektuvanni] *Energy-Efficiency in Civil Engineering and Architecture*. Vol. 10, 15-28. DOI: 10.32347/2310-0516.2018.10.15-28. (in Ukrainian).



9. Kovalov S.M., Ihumen M.S., Pustyulha S.Y., Mykhaylenko V.Ye., ets. (2006). Applied geometry and engineering graphics. Special sections. Issue 1 [Prykladna heometriya ta inzhenerna hrafika. Spetsialni rozdily. Vypusk 1], 256 pp. (in Ukrainian).

10. Ploskyi V.O., Kozhedub S.A. (2009). Research of methods of geometric modeling of topographic surfaces [Doslidzhennya metodiv heometrychnoho modelyuvannya topohrafichnykh poverkhon] *Geometric and computer modeling*, Vol. 22, 11-17. (in Ukrainian).

11. Dyn N. (1989) Interpolation and approximation by radial and related functions. *Approximation Theory*, 211-234. (in English).

12. Rudin W. (1973). *Functional Analysis*, 424 pp. (in English).

#### Аннотация

**Орел Юлія Миколаївна**, аспірантка кафедри архітектурних конструкцій, Київський національний університет будівництва і архітектури.

#### **Геометрическое моделирование территории строительства по показателям удельных стоимостей при оптимизации внешних сетей водоснабжения.**

В статье рассматриваются вопросы решения задачи оптимизации траекторий проложения внешних сетей водоснабжения методами дискретной геометрии на основе итерационного корректирования коэффициентов которые отображают технико-экономическую целесообразность проложения отдельных звеньев трубопроводов на различных территориях, выраженную через уровни удельной стоимости. Для этого скалярное поле величин удельной стоимости строительных и эксплуатационных работ в каждой точке исследуемой территории предлагается задавать как интерполяционную функцию. В свою очередь, предлагаемая интерполяционная функция строится на основе подобранных под критерии задачи, радиально-базисных функций. Распределение удельных стоимостей земельных участков будет иметь непосредственное влияние на результаты корректировки траектории устройства звеньев трубопроводов и мест размещения их стыковки (разветвления сети трубопровода). Кроме этого результаты моделирования территории строительства по показателям удельных стоимостей ее участков позволяют выполнить предварительный предпроектный анализ исходных данных, на основе графического отображения этих показателей. В конечном результате проведение оптимизации траектории трассировки сети трубопроводов позволит как уменьшить длины звеньев трубопроводов, так и уменьшить стоимость строительно-монтажных работ, трудовых ресурсов и дальнейших

эксплуатационных расходов. Это объясняется тем, что скорректированная (оптимизированная) схема сети трубопроводов водоснабжения будет обладать рядом преимуществ перед классическими подходами проектирования, такими как целесообразность использования участков общедоступных территорий, уменьшение нагрузок на отдельные звенья трубопроводов, возможность уточняющих корректировок за счет введения дополнительных критериев и т.п..

Ключевые слова: дискретное моделирование, внешние сети водоснабжения, радиально-базисные функции.

#### Annotation

**Yulia Orel**, graduate student, Kiyv National University of Construction and Architecture.

#### **Geometric modeling of the construction site in terms of unit costs for optimizing external water supply networks.**

The article describes the issues of solving the problem of optimizing the trajectories of laying external water supply networks. This problem has solving by using discrete geometry methods based on iterative correction of the coefficients that reflect the technical and economic feasibility of pipeline links on some territories, expressed through the unit cost levels. For this, the scalar field of values of the unit cost of construction and maintenance work at each point of the study area is proposed to be set as an interpolation function. In turn, the proposed interpolation function is constructed on the basis of radial-basis functions selected for the criteria of the problem. The distribution of the specific values of land plots will have a direct impact on the results of adjusting the trajectory of pipeline links and the locations of their docking (branching of the pipeline network). In addition, the results of modeling the construction site in terms of the specific values of its plots make it possible to perform a preliminary pre-design analysis of the initial data. These analysis based on the graphical display of indicators of the unit cost. As a result, the optimization of the trajectory of the routing of pipeline network will allow both to reduce the length of the pipeline links and to reduce the cost of construction and installation work, labor resources and further operating costs. This is due to the fact that the adjusted (optimized) scheme of the water supply pipeline network will have a number of advantages over classical design approaches, such as the expediency of using sections of public areas, reducing the load on individual pipeline links, the possibility of making adjustments by introducing additional criteria, etc.

Keywords: discrete modeling, external water supply networks, radial-basis functions.