

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І  
АРХІТЕКТУРИ

**ОРЕЛ ЮЛІЯ МИКОЛАЇВНА**



**УДК 628.349**

**РЕСУРСОЕФЕКТИВНІ ЗОВНІШНІ МЕРЕЖІ СИСТЕМ  
ВОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ГРАФО-АНАЛІТИЧНОГО  
МОДЕЛЮВАННЯ**

Спеціальність: 05.23.04 – Водопостачання, каналізація

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021



**Дисертацією є рукопис.**

**Робота виконана** в Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**ЧЕРНИШЕВ ДЕНИС ОЛЕГОВИЧ,**  
перший проректор, професор кафедри  
водопостачання та водовідведення Київського  
національного університету будівництва і архітектури

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**МАРТИНОВ СЕРГІЙ ЮРІЙОВИЧ,**  
завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та  
бурової справи Національного університету водного  
господарства та природокористування (м. Рівне)

доктор технічних наук, доцент  
**УСЕНКО ВАЛЕРІЙ ГРИГОРОВИЧ,**  
професор кафедри архітектури і міського  
будівництва Національного університету  
«Полтавська політехніка ім. Юрія  
Кондратюка»

Захист дисертації відбудеться « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р. об 13-00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 у Київському національному університеті будівництва і архітектури (03037, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31, ауд. 466).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
Вченої ради Д 26.056.07  
докт. техн. наук, професор

Ткаченко Т. М.



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми

На сьогоднішні в Україні не існує жодної цілісної системи прийняття рішень, що дозволяла б виконувати планування розміщення нових об'єктів житлового, громадського та енергетичного призначення на основі комплексних системних розрахунків, які б в свою чергу давали достатньо надійні й точні результати та не вимагали внесення значних коректив у одержані проектні рішення.

Визначення та забезпечення надійності водопровідних систем під час проектування є важливою науковою проблемою. Структури мережевого типу властиві багатьом різним протяжним територіально розподіленим системам.

Існують істотні труднощі у побудові нових та оперативній реконструкції наявних систем водопровідної інфраструктури і їх складових через непрості економічні ситуації, незлагодженості планів та наявності обмежених ресурсів. Значна кількість наявних водопровідних систем функціонують давно через що закладений у них запас та можливості використання вичерпуються. Відповідно до цього забезпечення та підвищення рівня надійності водопровідних систем, збільшення періоду їх роботи є важливою науковою задачею.

Скорочення витрат на зведення та експлуатацію зовнішніх інженерних систем, і передусім систем водопостачання, є одним із найбільш пріоритетних завдань інженерів-проектувальників, що працюють в галузі енергетики та житлово-комунального господарства. Розроблення нових підходів та методів проектування ефективних водопровідних систем є вкрай важливою прикладною задачею при плануванні мікрорайонів, районів та інших одиниць сучасної житлової й промислової забудови. При цьому одним із ключових питань є забезпечення нової забудови водними ресурсами, а значить, системи водопостачання повинні відповідати вимогам необхідної потужності, бути надійними та безпечними.

Особливістю наявних методик є те, що вони вимагають дотримання у більшій мірі конструктивних рішень, аніж інженерних й аналітичних засобів проектування та передбачають попереднє задання багатьох геометричних параметрів системи, які могли б бути оптимізованими. Вирішення цього питання дасть можливість на основі графо-аналітичного моделювання проектувати ресурсоефективні зовнішні мережі систем водопостачання.

### Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Роботу виконано згідно державної програми «Про концепцію розвитку водного господарства України» і тісно пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури, які виконуються на замовлення Міністерства освіти та науки України (державний реєстраційний номер № 0112U0011484, 0112U005393).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є розроблення і застосування графо-аналітичного моделювання раціональних зовнішніх мереж систем водопостачання для підвищення їх ресурсоефективності та екологічності у проектуванні, будівництві та експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі *завдання*:

- проаналізувати наявні методи оптимізації територіального планування районів житлових пунктів та відповідних методів дискретного геометричного моделювання і математичних методів чисельного моделювання;
- розробити математичні моделі функцій розподілу техніко-економічних показників доцільності будівництва та подальшої експлуатації, та оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання у графо-аналітичній формі;
- розробити розрахункові алгоритми спільного застосування математичних моделей функцій розподілу техніко-економічних показників та оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання;
- реалізувати створені розрахункові алгоритми у середовищі програм символного та чисельного комп'ютерного моделювання;
- провести апробацію запропонованих математичних методів та відповідних алгоритмів у практику реального проектування зовнішніх систем водопостачання;
- оцінити техніко-економічний та екологічний ефект питомих показників вартості спорудження та експлуатації трубопроводів ефективних систем водопостачання.

**Об'єкт дослідження** - ресурсоефективні та екологічно безпечніші зовнішні мережі систем водопостачання.

**Предмет дослідження** - методи графо-аналітичного моделювання раціональних мереж систем водопостачання в умовах нової забудови

**Методи дослідження** – математичне та комп'ютерне моделювання, теорія надійності та структурний аналіз, аналітична геометрія, теорія графів, апарат диференціального числення.

**Наукова новизна роботи** полягає у тому, що *уперше*:

- створено й науково обґрунтовано математичну модель оптимізації ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання на основі графо-аналітичних методів моделювання.

*удосконалено*:

- математичну модель на основі радіально-базисних функцій, яка дозволяє здійснювати оптимізацію геометричних моделей мереж систем водопостачання на етапі проектування;

*набула подальшого розвитку*:

- математичну модель оптимізації мережі систем водопостачання в графо-аналітичній формі, яка дозволяє виконати попередній передпроектний аналіз вихідних даних;

**Практичне значення одержаних результатів.** Проведено оцінку техніко-економічного та екологічного ефектів питомих показників вартості спорудження та експлуатації трубопроводів ефективних систем водопостачання, що дозволило підвищити ефективність проектування та експлуатації систем водопостачання із скороченням витрат енергетичних та

природних ресурсів. Розроблено розрахункові алгоритми у символічному та чисельному комп'ютерному моделюванні для оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання при їхньому графо-аналітичному моделюванні. Запропоновано рекомендації щодо зниження обсягів будівельно-монтажних робіт, пов'язаних із прокладанням нових мереж систем водопостачання та їх реконструкцією. Реалізовано алгоритми щодо розрахунку та проектування енергоефективних систем водопостачання у програмному комплексі.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні мереж систем водопостачальних в робочі проекти ТОВ «СМУ 2194», а також в проекти ТОВ «ПЕК Інжиніринг».

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати, які викладені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень. Розроблено процес формоутворення дискретної геометричної моделі шляхом виконання послідовних наближень при обчисленнях та підходи до визначення питомих економічних показників спорудження й подальшої експлуатації трубопроводів на різних ділянках досліджуваної області забудови. Запропоновано геометричне моделювання оптимальної траєкторії прокладання трубопроводу ефективних систем водопостачання та території будівництва за показниками питомих вартостей при оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання. Розроблено підхід до оптимізації геометричних параметрів схем зовнішніх мереж систем водопостачання на основі ітераційного корегування коефіцієнтів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідались на науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2018 – 2020 рр.), на Міжнародних науково-практичних конференціях молодих вчених "Build-Master-Class" (м. Київ, 2018 – 2019 рр.); на XXI міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (м. Мелітополь, 2019 р.); на VIII та IX міжнародних науково-практичних конференціях «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція» (м. Київ, 2018 – 2019 рр.).

**Публікації.** Основні положення дисертації викладені та опубліковані у 10 друкованих наукових працях, в т.ч. у 4 фахових виданнях та 1 міжнародному виданні.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел зі 146 найменувань і додатків. Робота викладена на 151 сторінці, містить 11 рисунків, 5 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, наведено дані про зв'язок дисертаційної роботи з науковими темами та програмами, сформульовано мету і задачі дослідження, подано об'єкт, предмет та методи дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, приведені відомості про особистий внесок здобувача, публікації, про впровадження та апробацію результатів дослідження.

У першому розділі «Аналіз існуючих підходів до дослідження моделювання зовнішніх систем водопостачання при проектуванні сучасної житлової забудови» вміщено огляд наукових підходів щодо проблеми дослідження, наведено обґрунтування актуальності проблеми, підходів дослідження, здійснено постановку проблеми дослідження та представлено її логічно-структурну схему.

На сьогодні у світі однією із основних тенденцій розвитку суспільства задекларовано стратегії енергоефективності та запровадження підходів щодо ощадливого використання ресурсів. Розроблено глобальну стратегію розвитку «Порядок денний на XXI сторіччя», яку також підписала й Україна у 1992 році. У відповідності до даної стратегії необхідно розробити й поетапно реалізувати національний план дії зі сталого розвитку, в тому числі енергетичного. Упровадженням даної стратегії є підписання «Угоди мерів», що забезпечила в окремих містах нашої країни почати активно розробляти та впроваджувати плани дій сталого енергетичного розвитку, що охоплюють сектори житлових та громадських будинків, тепlopостачання, транспорту, водопостачання, освітлення, озеленення, твердих побутових відходів тощо.

Пріоритетними напрямками визначені розробка комплексних та системних підходів для впровадження інтегрованих енергоефективних технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації будівель і споруд в різних природно-кліматичних та екологічних умовах України.

У роботі зазначається, що протягом останніх років ведуться дослідження ефективних шляхів вирішення задач мінімізації витрат енергоресурсів на потреби будинкового фонду методами геометричного та комп'ютерного чисельного моделювання процесів тепломасообміну, польових структур (температурного та вологісного полів в рамках задач будівельної фізики) та характеру роботи будівельних конструкцій та інженерних систем будівель і споруд. При цьому застосовується переважно інструментальна база, що передбачає комплексні системні розрахунки та використання дискретних моделей сітьових структур. Проте проводяться активні дослідження у соціальних, фінансово-економічних та екологічних сферах впровадження заходів та проектів з ефективного використання енергоресурсів у всіх секторах житлово-комунального господарства, а також зі збереження екології навколишнього середовища.

У розділі наведено аналіз основних напрямків, за якими проводяться дослідження із зазначенням авторів. Переважно у наукових дослідженнях розглядаються аспекти удосконалення та реновації вже існуючих мереж та устаткування шляхом налагодження режимів постачання, встановлення більш



ефективного регулюючого обладнання та автоматики, а також запровадження заходів з моніторингу та контролю витрат водних ресурсів.

Не вирішеним залишаються питання розробки проєктних рішень інженерних систем за рахунок прийняття базових характеристик таким чином, щоб досягти мінімальних витрат на зведення/експлуатацію та/або максимальних техніко-економічних показників системи. Частіш за все, пропонуються класичні принципи проектування систем водопостачання із застосуванням переважно класичних методів лінійного програмування математичного вирішення оптимізаційних задач розподілу або перерозподілу ресурсів, що постачаються, задля забезпечення вищої продуктивності та ефективності роботи інженерних системи.

Переважна більшість задач оптимізації рішень з територіального планування районів житлових пунктів, що вирішується, опирається на шаблонне використання правил та методик скорочення енергоспоживання окремих будівель, інженерних систем і об'єктів тепlopостачання. При цьому враховуються загальні нормативні принципи побудови мікрорайонів та районів, що передбачають певні геометричні обмеження щодо областей забудови, а також обмеження, пов'язані з необхідністю транспортного сполучення окремих об'єктів будівництва, прокладання інженерних комунікацій, врахування зон впливу об'єктів енергетики й інших будівель та споруд, орієнтованих на здійснення виробничих процесів. Особливістю усіх цих методик є те, що вони вимагають дотримання у більшій мірі конструктивних рішень, аніж інженерних й аналітичних засобів проектування та передбачають попереднє задання багатьох геометричних параметрів системи, які могли б бути оптимізованими.

При наявності уже існуючої забудови, рішення щодо прокладання нових інженерних мереж або планування розміщення нових будинків може прийматися із додатковим використанням результатів енергетичного аудиту вже зведених споруд для виявлення недоліків й оцінки ефективності роботи систем тепlopостачання, електропостачання, водовідведення і каналізації. Окрім того, для територіальних одиниць щільної забудови, що не передбачають зведення нових будівель та споруд, не можуть бути застосовані принципи визначення їх оптимальних положень. В таких випадках мінімізувати енерговтрати системи тепlopостачання можна лише вдаючись до оптимізації роботи енергетичного обладнання шляхом зміни напорів та на джерелах шляхом якісно-кількісного регулювання, і, як наслідок зміни теплового навантаження. До уваги також було взято й потенціал використання відновлювальних і альтернативних джерел енергії. Невід'ємною підзадачею в ланці «джерело теплової енергії – система транспортування теплоносія – споживач» при вирішенні комплексної проблеми оптимізації та територіального планування системи тепlopостачання є пошук оптимальних заходів з термомодернізації будівель і споруд. Зменшення споживання теплової енергії кінцевим споживачем є першочерговим заходом при вирішенні задачі модернізації систем тепlopостачання.

На сьогоднішній день не існує жодної цілісної системи прийняття рішень, що дозволяла б виконувати планування розміщення нових об'єктів житлового,

громадського та енергетичного призначення на основі комплексних системних розрахунків, які б в свою чергу давали достатньо надійні результати та не вимагали внесення значних коректив у одержані проектні рішення.

Розробка нових підходів та методів проектування ефективних інженерних систем є вкрай важливою прикладною задачею при плануванні мікрорайонів, районів та інших одиниць сучасної житлової й промислової забудови. При цьому одним із ключових питань є забезпечення нової забудови водними ресурсами, а отже, системи водопостачання повинні відповідати вимогам необхідної потужності, бути надійними та безпечними. Це вимагає від інженерів-проектувальників виконання великої кількості підготовчих робіт та техніко-економічних порівнянь, що в решті-решт не гарантує оптимальності прийнятої конфігурації системи.

Визначення оптимальних положень нових об'єктів територіальних одиниць з щільною забудовою є дуже складною задачею. Весь процес планування (або регулювання, у випадку розміщення нових об'єктів будівництва) представляє собою цілий ряд наближень та правок, що зазвичай вимагають значних трудовитрат. На сьогоднішній день в Україні не існує жодної цілісної системи прийняття рішень, що дозволяла б виконувати планування розміщення нових об'єктів житлового, громадського та енергетичного призначення на основі комплексних системних розрахунків, які б в свою чергу давали достатньо надійні й точні результати та не вимагали внесення значних коректив у одержані проектні рішення.

Аналіз закордонних досліджень показав їх спрямування до використанню саме системних методів математичного моделювання в процесі вирішення задачі мінімізації тепловтрат при постачанні теплоносія кінцевим споживачам. Як правило, для визначення оптимальних маршрутів прокладання теплових мереж та положення об'єктів теплопостачання використовуються інструменти змішаного цілочисельного лінійного програмування. Даний математичний апарат може бути відносно просто застосованим, однак точність розв'язання задач при оптимізації систем теплопостачання може суттєво коливатися в залежності від початкових та крайових умов моделювання. Цільові функції, що мінімізуються, переважно мають максимально спрощений лінійний характер і відображають як правило рівень грошових затрат, необхідних для будівництва та експлуатації систем теплопостачання. При цьому, часто екологічні та енергетичні показники відходять на другий план, а заходи зі зменшення енергоспоживання будівель, взагалі не розглядаються як інструменти впливу на результуючі конфігурації систем теплопостачання.

Логічно-структурна схема дослідження наведено на рис.1

**У другому розділі «Математичні підходи щодо моделювання параметрів зовнішніх мереж систем водопостачання»** запропоновано застосування дискретного моделювання оптимальних параметрів зовнішніх мереж систем водопостачання засобами прикладної геометрії, що дозволяють одержати координати найбільш ефективної з техніко-економічної точки зору конфігурацію системи водопостачання; побудовано спеціальні цільові функції при оптимізації геометричних моделей систем водопостачання, що дозволяють

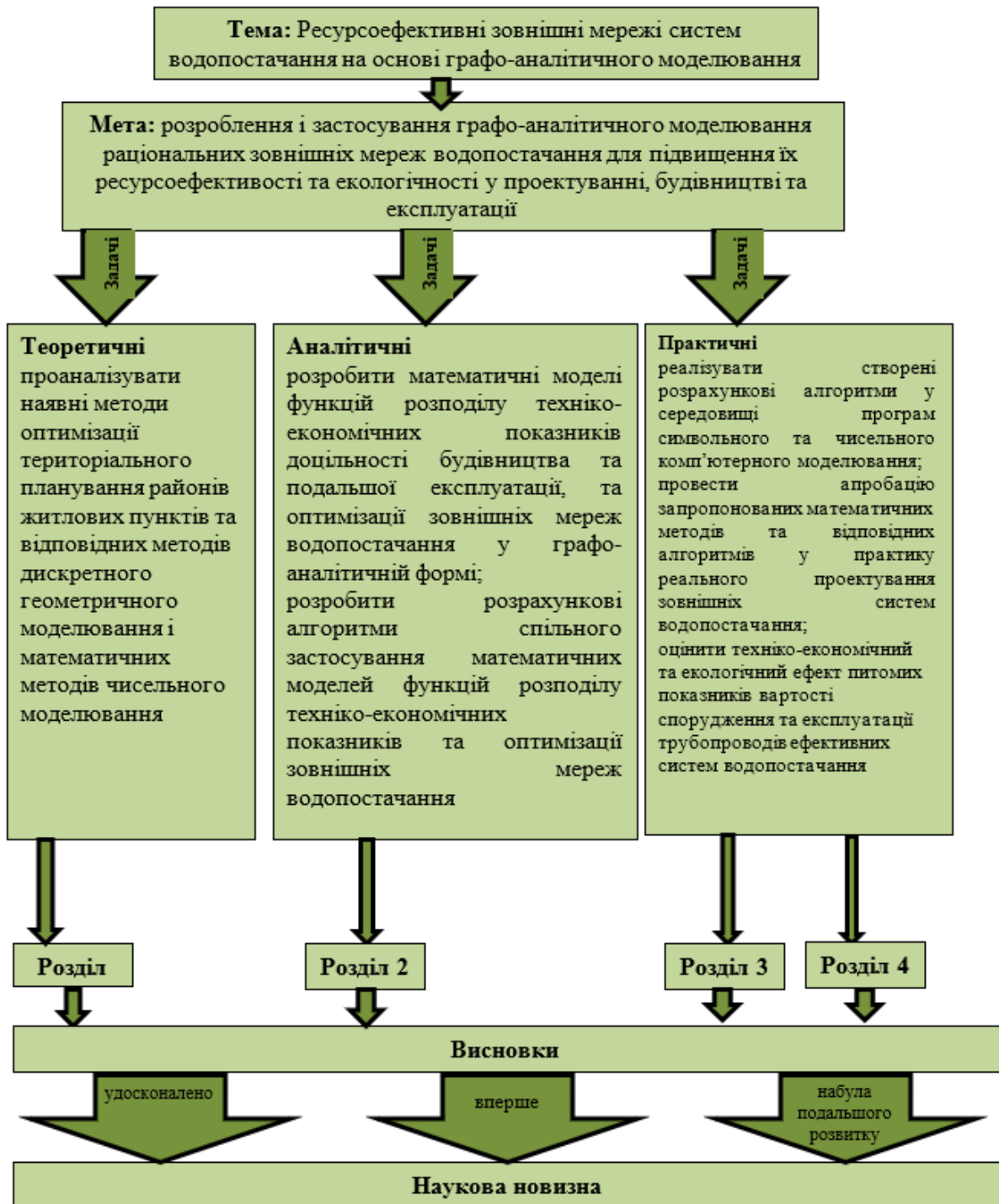


Рисунок 1. Структурно-логічна схема дослідження

значно зекономити, як на будівельно-монтажних роботах, так і на вартості робіт з подальшого обслуговування та ремонту даної мережі; визначено питомі показники вартості спорудження і експлуатації трубопроводів ефективних систем водопостачання, що дозволяють моделювати ефективні з точки зору будівництва і експлуатації мережі систем водопостачання; геометричне моделювання території будівництва за показниками питомих вартостей при оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання, що дозволяє вирішити задачу оптимізації траєкторій прокладання зовнішніх мереж систем 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.

Процеси будівництва, ремонту та подальшої експлуатації зовнішніх мереж систем водопостачання стикаються з більшою кількістю перешкод, ніж аналогічні процеси, що пов'язані із внутрішніми інженерними системами будівель. Це пов'язано із тим, що зовнішні інженерні мережі, як правило, прокладаються у місцях загального користування, їх часто перетинають в плані транспортні сполучення, елементи інших інженерних систем; їх наявність вимагає зведення додаткових захисних інженерних споруд. Окрім того, на відміну від внутрішніх інженерних комунікацій, аварії на зовнішніх мережах можуть потребувати більшого часу для їх ідентифікації та усунення. Всі ці аспекти актуалізують питання оптимізації схем розміщення зовнішніх мереж систем водопостачання ще на етапі проектування.

Найбільш відомим класичним вирішенням оптимізаційної задачі розподілу будь-яких ресурсів (так звана «транспортна задача») вважається пошук оптимального положення єдиної точки розподілу  $P_0(x_0, y_0)$ , до якої спочатку подається весь обсяг ресурсів від постачальника, й від якої потім цей ресурс розподіляється до усіх споживачів. При цьому оптимальним вважається умовно рівновіддалене від постачальника  $P_1(x_1, y_1)$  й усіх споживачів ( $P_i(x_i, y_i)$ ;  $i = 2, 3, \dots, N$ ) положення, тобто таке, при якому загальна сума  $z(x_0, y_0)$  відстаней від точки  $P_0(x_0, y_0)$  до усіх інших точок системи мінімальна (рис. 2).

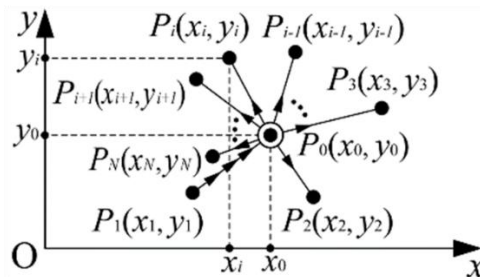


Рисунок 2. Пошук оптимальної точки розподілення

Найбільш точний та науково-обґрунтований підхід до оптимізації складних зовнішніх мереж тепlopостачання може бути представлений за допомогою системи рівнянь, що визначають 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:

$$k_{i,j} = q_{l_{i,j}} \cdot K_{i,j} / l_{i,j} \quad (2)$$

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 відображатиме рівень питомої вартості прокладання трубопроводів на різних ділянках досліджуваної міжбудинкової території. В такому разі коефіцієнт  $k_{i,j}$  носитиме функціональний характер та буде залежати від координат початку і кінця кожної ділянки, тобто деякого  $i$ -го та  $j$ -го вузлів:

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

Вирішуючи систему рівнянь типу (1) за допомогою ітераційного числення та уточнюючи значення коефіцієнтів  $k_{i,j}$  на кожному кроці наближень, можна одержати координати найбільш ефективної з техніко-економічної точки зору конфігурацію системи водопостачання.

Якщо розглядати цільову функцію вартість будівництва й подальшої експлуатації усієї протяжності трубопроводів мережі систем водопостачання, як суми затрат на окремі її відрізки між вузлами розгалуження, то для визначення вартості кожного такого відрізка необхідно буде задатися питомими показниками відповідних витрат на одиницю довжини трубопроводу. Однак, такі питомі показники будуть різними на різних ділянках території. Для цього необхідно побудувати спеціальну неперервну функцію розподілу питомих показників вартості робіт зі зведення й експлуатації ланок системи водопостачання, як дискретної геометричної моделі на площині – планарного або непланарного графа. На основі відповідної цільової функції було здійснено процес формоутворення дискретної геометричної моделі шляхом виконання послідовних наближень при обчисленнях.

Якщо основні параметри, відносно яких будується цільова функція, виступають техніко-економічні характеристики будівництва й експлуатації системи водопостачання, то сама цільова функція повинна відображати розподіл відповідних питомих вартісних показників на різних ділянках прокладання трубопроводів. В результаті, геометрична схема розміщення ланок мережі систем водопостачання повинна передбачати мінімальну вартість їх спорудження й обслуговування відповідно до скалярного поля питомих вартостей, яку й утворюватиме при візуалізації обрана цільова функція. З геометричної точки зору така задача представляє собою тривимірну інтерполяцію або апроксимацію (якщо це допускається заданим рівнем точності розрахунків) за наперед заданими дискретними даними.

Базуючись на дослідженнях, присвячених застосуванню радіально-базисних функцій у моделюванні нейромереж та систематизації нерегулярних даних у цілому, у роботі представлені математичні основи здійснення тривимірної інтерполяції для подальшої оптимізації двовимірної геометричної моделі мережі систем водопостачання у формі планарного або непланарного графа.

Загалом, задачу інтерполяції у тривимірному просторі сформульовано наступним чином: для заданої множини з  $N$  точок  $\{\mathbf{x}_i \in \mathcal{R}^m \mid i=1,2,\dots,N; m=3\}$  та

відповідної множини з  $N$  дійсних чисел  $\{d_i \in \mathfrak{R}^1 \mid i=1,2,\dots,N\}$  знайти функцію  $f: \mathfrak{R}^N \rightarrow \mathfrak{R}^1$ , яка задовольнятиме наступній інтерполяційній умові:

$$f(x_i) = d_i, (i = 1, 2, \dots, N). \quad (4)$$

Для визначеної таким чином задачі інтерполяційна поверхня має проходити через усю множину  $N$  базових точок, що міститимуть інформацію про питомі вартісні показники зведення та експлуатації елементів системи водопостачання  $d_i$ .

Даний інтерполяційний підхід є точним, але може вимагати витрат значних обчислювальних потужностей комп'ютерного обладнання. В результаті цього ітераційний процес може бути значно ускладнений, оскільки його реалізація потребує написання додаткових розрахункових алгоритмів.

Проте може бути розглянуто й інший апроксимаційний підхід.

Для цього запропоновано замість розв'язання системи рівнянь (5)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{1,i} = d_1, \\ \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{2,i} = d_2, \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{j,i} = d_j, \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{N-1,i} = d_{N-1}, \\ \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{N,i} = d_N, \end{array} \right. \quad (5)$$

одразу задавати апроксимаційні поверхні у формі наступних середньозважених радіально-базисних зворотних мультиквадратичних модифікованих функцій:

$$f(x_i, y_i) = \frac{\sum_{i=1}^N d_i \cdot [a_i / (r_i + \varepsilon)]}{\sum_{i=1}^N [a_i / (r_i + \varepsilon)]}, (\varepsilon > 0; a_i \geq 0; d_i \geq 0; r_i \in \mathfrak{R}), \quad (6)$$

$$f(x_i, y_i) = \frac{\sum_{i=1}^N d_i \cdot [a_i / (r_i^k + \varepsilon)]}{\sum_{i=1}^N [a_i / (r_i^k + \varepsilon)]}, (k > 0; \varepsilon > 0; a_i \geq 0; d_i \geq 0; r_i \in \mathfrak{R}). \quad (7)$$

Функції (6) властивий досить плавний характер викривлення і вона являється частковим випадком функції (7), коли параметр  $k=1$ . Однак, зі зростанням параметру  $k$ , характер функції (7) стає більш різким у місцях переходу між значеннями даної функції, близькими до двох різних параметрів  $a_i$  та  $a_j$  ( $[(i,j) = 1,2,\dots,N] \wedge [i \neq j]$ );  $\wedge$  – кон'юнкція.

Очевидно, що чим нижчими є значення параметра  $\varepsilon$ , тим вища точність застосування апроксимаційної функції, й тим ближчим процес апроксимації

стає до процесу інтерполяції. Зокрема, при  $\varepsilon \rightarrow 0$  функції (6) та (7) стають інтерполяційними. Однак, в такому разі значення даної функції є невизначеними у точках розміщення базових вузлів, оскільки у цих точках відбувається операція ділення на 0.

Визначення питомої вартості спорудження трубопроводів на різних ділянках досліджуваної області забудови при моделюванні ефективних з точки зору будівництва і експлуатації мереж систем водопостачання пропонується здійснювати на основі застосування дискретного або інтегрального підходів, що передбачають визначення усереднених значень спеціальних цільових функцій, 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.

Запропоновано використовувати дискретний підхід до визначення питомого економічного показника зведення і експлуатації досліджуваної ланки трубопроводу, який може бути представлений функціоналом  $k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j)$  від деякої функції  $f(x, y)$ .

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:

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j) = \frac{f(x_i, y_i) + f(x_j, y_j)}{2}. \quad (8)$$

Узагальнену формулу для визначення показника економічної ефективності з будь-якою точністю для  $n$  точок представимо у вигляді (9):

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

Точність формули залежить від кількості точок досліджуваної ланки, і чим більше цих точок, тим вона вища.

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

$$k_{i,j} = \int_{L_{i,j}} f(x, y) dl / L_{i,j}. \quad (10)$$

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

Як відомо, більшість інтегралів не можуть бути обчислені точно. При їх чисельному визначенні застосовується розкладання підінтегрального виразу в ряди (до певного члену).

Як показали попередні дослідження з точки зору прикладної геометрії розв'язання системи рівнянь (1), що визначають положення будь-якої кількості вузлів їх розгалуження дозволяє визначити координати *мінімальної сітки* (по загальній довжині ланок) із урахуванням коефіцієнтів щільності взаємодії між окремими вузлами ( $k_{i,j}$ ).

Однак, з практики моделювання мінімальних сіток відомо, що вони можуть бути з нижчою, але все ж високою, точністю *апроксимовані зрівноваженою сіткою*, сформованою відповідно до *статико-геометричного методу дискретної геометрії*.

Відповідно до цього методу, коефіцієнти можуть бути прийняті сталими величинами і характеризувати силу взаємодії між окремими вузлами або умовну жорсткість ланок (чи стрижнів, з механічної точки зору), що їх сполучають, будучи наперед заданими коефіцієнтами пропорційності. Тобто,  $k_{i,j} = \text{const}_{i,j}$ .

Запропоновано в якості коефіцієнта  $k_{i,j}$  прийняти величину, яка відображатиме рівень питомої вартості прокладання трубопроводів на різних ділянках. В такому разі коефіцієнт  $k_{i,j}$  носитиме функціональний характер та буде залежати від  $i$ -го та  $j$ -го вузлів:

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j). \quad (11)$$

Таким чином, значення коефіцієнта  $k_{i,j}$  буде розраховуватися, як функціонал від деякої функції  $f(x,y)$  (яка визначатиме поле питомих показників вартості будівництва, ремонту й експлуатації трубопроводів на площині).

Сама ж функція  $f(x,y)$  прийнята як сума з  $M$  апроксимаційних радіально-базисних функцій, а саме на основі підбраної в ході досліджень, модифікованої мультікватратичної радіально-базисної функції:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M z_i / \left( \left[ \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right]^r + \varepsilon \right). \quad (12)$$

де  $z_i$  – значення питомих показників вартості у опорних точках з координатами  $x_i$  та  $y_i$ ;  $\varepsilon$  – коефіцієнт гладкості апроксимації між опорними точками функції  $f(x,y)$ .

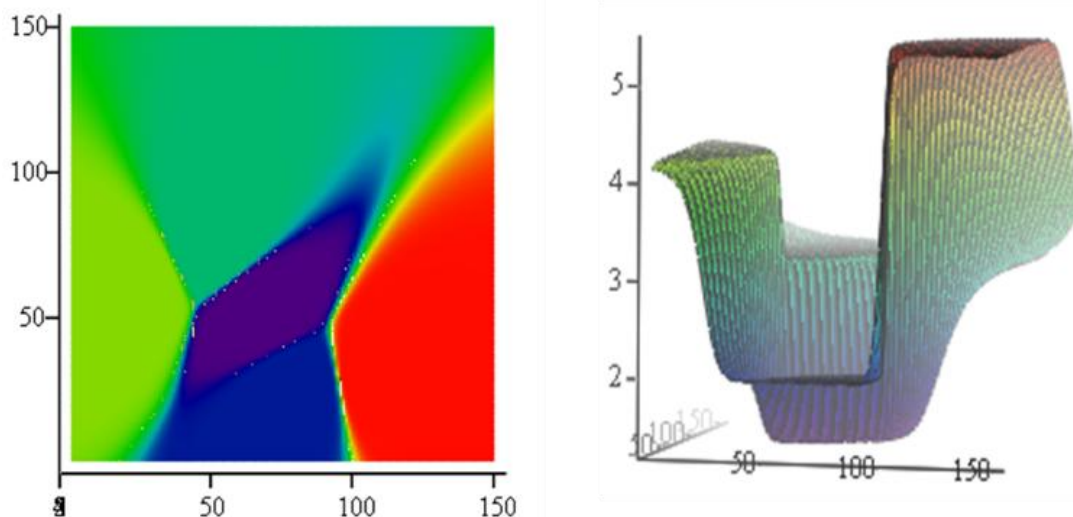
**У третьому розділі «Практичне застосування запропонованих математичних моделей до зовнішніх мереж систем водопостачання»** наведено практичну апробацію основних результатів дисертаційного дослідження.

Першим прикладом апробації є дослідження геометричного моделювання оптимальної траєкторії прокладання трубопроводів зовнішньої мережі систем водопостачання. На основі попереднього аналізу території будівництва за показниками економічної цінності земельних ділянок проведено побудову моделі розподілу значень питомих вартостей цих ділянок. Моделювання оптимізованої геометричної форми дискретного образу мережі трубопроводів системи водопостачання виконано із застосуванням принципів статико-геометричного методу дискретної геометрії. Коефіцієнти, що характеризують силу взаємодії між окремими вузлами, що сполучають окремі ланки трубопроводу, прийняті рівними величині параметрів питомої вартості прокладання трубопроводів по довжині ділянок системи водопостачання.



Функціональні залежності оптимального розміщення вузлів трубопроводів визначені на основі запропонованої базисної функції розподілу питомих вартостей земельних ділянок. Положення вузлів розгалуження такої системи визначення в результаті вирішення системи нелінійних рівнянь.

Практичне вирішення дозволяє значно скоротити подальші як будівельні, так і експлуатаційні витрати на мережі систем водопостачання ще на етапі виконання проектних робіт.



*Рисунок 3. Поверхня  $z(x,y)$  значень питомих земляних (містобудівних ділянок) в плані та аксонометрії*

Також представлено результати практичної апробації геометричного моделювання території будівництва за показниками питомої вартості (цінності) її окремих ділянок. Розподіл питомих вартостей земельних ділянок має 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 дозволяють як зменшити довжини ланок трубопроводів, так і зменшити вартість будівельно-монтажних робіт, трудових ресурсів та подальших експлуатаційних витрат.

**У четвертому розділі «Програмна реалізація математичних моделей до зовнішніх мереж систем водопостачання»** наведено блоки моделювання та структуру програмної реалізації розроблених алгоритмів.

Представлено блок моделювання розподілу питомих витрат вартостей земельних ділянок будівельної території (рис. 4), блок моделювання оптимального розміщення вузлів мережі систем водопостачання (рис. 5), та структура програмної реалізації алгоритмів моделювання ефективних зовнішніх систем водопостачання (рис. 6).

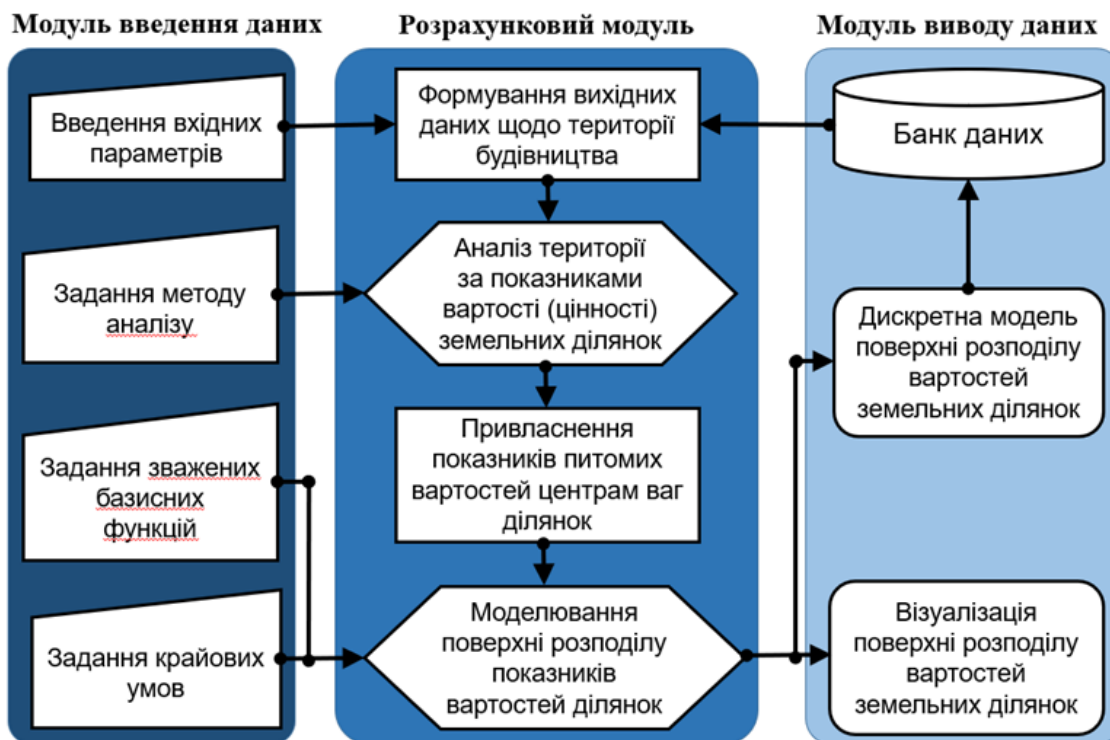


Рисунок 4. Блок моделювання розподілу питомих вартостей земельних ділянок будівельної території



Рисунок 5. Блок моделювання оптимального розміщення вузлів мережі системи водопостачання

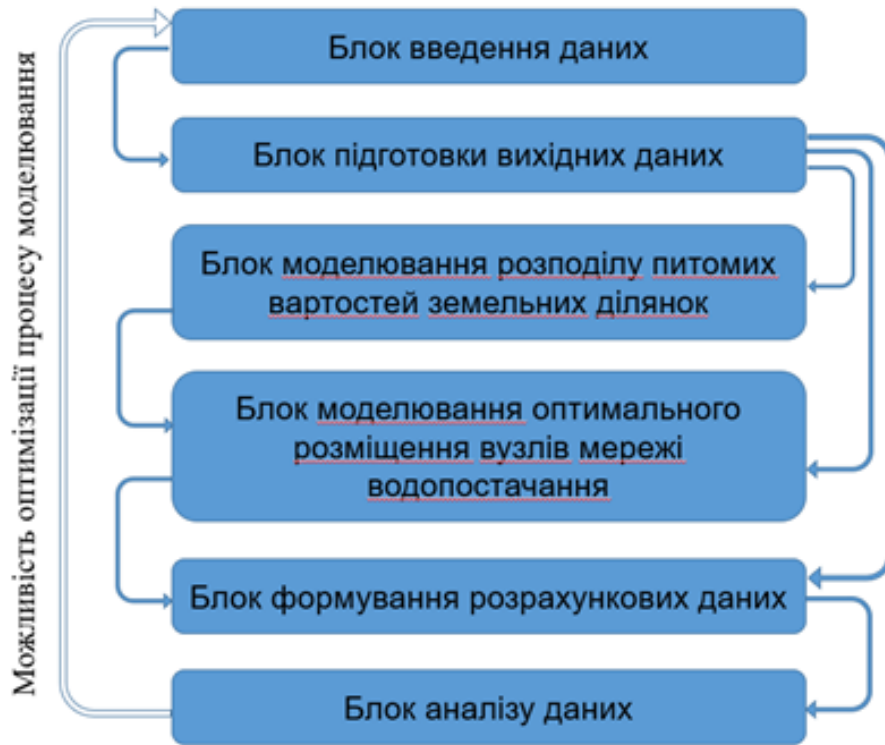


Рисунок 6. Структура програмної реалізації алгоритмів моделювання ефективних зовнішніх систем водопостачання

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних джерел, в яких розглядаються існуючі методи оптимізації територіального планування районів житлових пунктів та відповідних методів дискретного геометричного моделювання та математичних методів чисельного моделювання.

2. На підставі проведеного аналізу обґрунтовано розробку математичних моделей функцій розподілу техніко-економічних показників доцільності будівництва та подальшої експлуатації, яка дозволяє виконати попередній передпроектний аналіз вихідних даних, та оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання у графо-аналітичній формі.

3. На основі запропонованих математичних моделей реалізовано розрахункові алгоритми спільного застосування математичних моделей функцій розподілу техніко-економічних показників та оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання, які реалізовані у символічному та чисельному комп'ютерному моделюванні.

4. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень проведено апробацію запропонованих математичних методів та відповідних алгоритмів у практику реального проектування зовнішніх систем водопостачання.

5. Запропоновані удосконалені математичні методи та відповідні алгоритми дозволили зменшити використання природного ресурсу води та покращити техніко-економічні та екологічні показники функціонування систем водопостачання.

6. Розроблено відповідні алгоритми, методики та засоби комп'ютерного проектування дозволили підвищити об'єктивність та ступінь економічної обґрунтованості прийняття рішень при проектуванні зовнішніх мереж систем водопровідних на основі застосування графо-аналітичного моделювання.

7. Проведено оцінку техніко-економічного та екологічного ефектів питомих показників вартості спорудження та експлуатації трубопроводів при проектуванні мереж систем водопостачання.

8. Розроблений універсальний математичний апарат оптимізації параметрів положення компонентів системи водопостачання, в тому числі постачальників та будинків-споживачів, використані при розробці технічних завдань та проектуванні зовнішніх мереж систем водопостачання в робочі проекти ТОВ «СМУ 2194», а також в проекти ТОВ «ПЕК Інжиніринг».

## ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО В РОБОТАХ

### *Публікації у періодичних наукових виданнях інших держав:*

1. Orel J. Methods for determining the optimal trajectories of transport routes for different types of transport and types of relief /Orel J., Mishchenko O., Magalov A., Skochko V.// *Budownictwo o zoptymalizowanym Potencjale energetycznym. Construction of optimized Energy potential.* Wydział Budownictwa Politechniki Częstochowskiej, №1(11), 2016. P. 71-79.

*Автору належить алгоритм визначення оптимальної траєкторії шляхів на рельєфі місцевості.*

### **Публікації у фахових виданнях:**

2. Орел Ю.М. Побудова спеціальних цільових функцій при оптимізації геометричних моделей систем водопостачання / Ю.М. Орел, Д.О. Чернишев, В.О. Плоский, В.І. Скочко // Збірник наукових праць: Сучасні проблеми моделювання. Вип. 17. 2020. – С. 66-74.

*Автору належить розробка процесу формоутворення дискретної геометричної моделі шляхом виконання послідовних наближень при обчисленнях.*

3. Орел Ю.М. Визначення питомих показників вартості спорудження і експлуатації трубопроводів ефективних систем водопостачання /Ю.М. Орел, Магалов А.М. // Збірник наукових праць: Сучасні проблеми моделювання. Вип. 18. 2020. – С. 130-137.

*Автору належить розробка дискретний або інтегральний підходів до визначення питомих економічних показників спорудження й подальшої експлуатації трубопроводів на різних ділянках досліджуваної області забудови.*

4. Орел Ю.М. Геометричне моделювання оптимальної траєкторії прокладання трубопроводу ефективних систем водопостачання / Ю.М. Орел // Містобудування та територіальне планування. Вип. 74. 2020. – С. 232-247.

5. Орел Ю.М. Геометричне моделювання території будівництва за показниками питомих вартостей при оптимізації зовнішніх мереж водопостачання / Ю.М. Орел // Сучасні проблеми архітектури та містобудування/ Вип. 57, 2020. – С. 206 — 216.

### **Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

6. Орел Ю.М. Дискретне моделювання оптимальних параметрів зовнішніх мереж водопостачання засобами прикладної геометрії / Ю.М. Орел, Д.О. Чернишев, В.І. Скочко, С.А. Кожедуб // International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2019": Conference Proceedings. 2019. – С. 288-289.

*Автору належить розробка нового підходу до оптимізації геометричних параметрів схем зовнішніх мереж водопостачання на основі ітераційного корегування коефіцієнтів.*

7. Орел Ю.М. Дискретне моделювання геометричних параметрів зовнішніх інженерних систем при новому будівництві / Ю.М. Орел // XXI міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми геометричного моделювання»: тези доп. – Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2019. – С. 24-26

8. Орел Ю.М. Оптимізація систем водопостачання при проектуванні сучасної житлової забудови / Ю.М. Орел // VIII міжнародна наук.-практ. конференція «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція-2018» : тези доп. – К.: КНУБА, 2018. – С.74-76.

9. Орел Ю. Моделювання ефективних зовнішніх інженерних систем в умовах нової забудови / Ю.М. Орел, В. Скочко, С. Кожедуб, С. Шарапа, А. Гегер // International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2018": тези доп. – К.: КНУБА, 2018. – С.114-116.

*Автору належить підхід використання оптимізаційного математичного апарату при територіальному плануванні розміщення цивільних будівель та об'єктів теплопостачання, а також при реконструкції тепломереж, як на районному рівні, так і на рівні невеликої кількості окремих будівель.*

10. Орел Ю. Проектування ефективних систем водопостачання в існуючих містобудівних умовах і обмеженнях / Ю.М. Орел // IX міжнародна наук.-практ. конференція «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція-2019». – К.: КНУБА, 2019.

## АНОТАЦІЯ

**Орел Ю. М. Ресурсоефективні зовнішні мережі систем водопостачання на основі графо-аналітичного моделювання.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.04 – Водопостачання, каналізація. – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної задачі розробки універсального підходу до оптимізації положення компонентів системи водопостачання. Розроблено математичні підходи щодо моделювання параметрів зовнішніх мереж систем водопостачання, запропоновано спеціальні цільові функції при оптимізації геометричних моделей систем водопостачання, визначено питомі показники вартості спорудження і експлуатації трубопроводів ефективних систем водопостачання, запропоновано геометричне моделювання території будівництва за показниками питомих вартостей при оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання.

*Ключові слова:* системи водопостачання, дискретне геометричне моделювання, радіально-базисні функції, зовнішні мережі водопостачання, інтерполяційні та апроксимаційні функції, оптимальна траєкторія, цільові функції

## АННОТАЦИЯ

**Орел Ю. Н. Ресурсоэффективные наружные сети систем водоснабжения на основе графо-аналитического моделирования.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.04 – Водоснабжение, канализация. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, МОН Украины, Киев, 2021.

Разработаны математические подходы к моделированию параметров наружных сетей систем водоснабжения, предложены специальные целевые функции при оптимизации геометрических моделей систем водоснабжения, определены удельные показатели стоимости сооружения и эксплуатации трубопроводов эффективных систем водоснабжения, предложено

геометрическое моделирование территории строительства по показателям удельных стоимостей при оптимизации наружных сетей систем водоснабжения.

*Ключевые слова:* системы водоснабжения, дискретное геометрическое моделирование, радиально-базисные функции, внешние сети водоснабжения, интерполяционные и аппроксимационные функции, оптимальная траектория, целевые функции

## ABSTRACT

**Orel Yu. M. Resource-efficient external networks of water supply systems based on graph-analytical modelling. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. – Manuscript.**

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences in the specialty 05.23.04 "Water supply and sewerage". - Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and technical problem of an approach development to the universal mathematical methods of parameters optimization of water supply system components position. This approach includes suppliers and houses-consumers. It takes into account technical and economic approaches of construction and further corresponding systems operation. It aims to the complex raising of the technical and economic indicators of project decisions, both at the design stage and at the operation stage.

Mathematical approaches are created for external water service networks parameters modeling. These methods are based on the discrete modeling application of external water service networks optimal parameters by means of applied geometry. These means allow to obtain the most efficient configuration coordinates of the water service system. Special target functions at geometrical models' optimization of water service systems are offered. They allow essential savings both on construction and installation works and on the work cost of the further service and network repair. The relative indicators of the cost of construction and operation of pipelines of efficient water service systems are determined. Geometric modeling of the construction territory according to relative cost indicators at external water service networks optimization is offered.

The modeling block of relative expenses values distribution of land plots of the building territory is developed. The modeling block of optimum placement of knots of a water service network is created. The structure of algorithms program realization of modeling of effective external systems of water service is developed.

*Key words:* water service systems, discrete geometric modeling, radial-basis functions, external water service networks, interpolation and approximation functions, optimal trajectory, target functions

Для нотаток



Підписано до друку 21.01.2021 р.  
Формат 60x90/16. Папір офсетний. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид.арк. 1,0.  
Наклад 100 прим. Зам. № 29  
ВПВТД ПАТ «ПТІ «Київоргбуд»  
01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 4/6