

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ОРЕЛ ЮЛІЯ МИКОЛАЇВНА

УДК 628.349

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

05.23.04 – Водопостачання, каналізація
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук вперше

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Ю.М. Орел

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник д.т.н., проф. Д.О. Чернишев

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Київ-2020

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, 2020.

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 ХХІ 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, теплопостачання, 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 проектних 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, прокладанням 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 термомодернізація 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 споживачем. 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.

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 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, 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 й усіх споживачів положення, тобто таке, при якому загальна сума відстаней від точки до усіх інших точок системи мінімальна.

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 запропоновано здійснення процесу 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.

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.

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, блок моделювання оптимального розміщення вузлів мережі систем водопостачання, та структура програмної реалізації алгоритмів моделювання ефективних зовнішніх систем водопостачання.

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

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, 2020.

The introduction substantiates the relevance of the research topic, provides data on the connection of the dissertation work with scientific topics and programs, formulated the purpose and objectives of the research, presented the object, subject and methods of research, determined the scientific novelty and practical significance of the results obtained, provides information about the personal contribution of the applicant, publications, implementation and testing of research results.

The first chapter "Analysis of existing approaches to the study of modeling external water supply systems in the design of modern residential development" contains an overview of scientific approaches to the research problem, provides a justification for the relevance of the problem, research approaches, a statement of the research problem and presents its logical and structural scheme.

Today, one of the main trends in the development of society in the world is declared energy efficiency strategies and the introduction of approaches to the economical use of resources. A global development strategy "agenda for the XXI century" has been developed, which Ukraine also signed in 1992. In accordance with this strategy, it is necessary to develop and gradually implement a National Action Plan for sustainable development, including energy. The implementation of this strategy is the signing of the "agreement of Mayors", which ensured that in some cities of our country to start actively developing and implementing action plans for sustainable energy development, covering the sectors of residential and public buildings, heat supply, transport, water supply, lighting, landscaping, solid household waste, etc.

Priority areas include the development of integrated and systematic approaches for the introduction of integrated energy-efficient technologies in the design, construction and operation of buildings and structures in various natural, climatic and environmental conditions of Ukraine.

The paper notes that in recent years, research has been conducted on effective ways to solve problems of minimizing energy costs for the needs of the house fund by methods of geometric and Computer Numerical Modeling of heat and mass transfer processes, field structures (temperature and humidity fields within the framework of construction physics problems) and the nature of the work of building structures and engineering systems of buildings and structures. At the same time, the tool base is mainly used, which provides for complex system calculations and the use of discrete models of network structures. However, active research is being conducted in the social, financial, economic and environmental spheres of implementing measures and projects for the efficient use of energy resources in all sectors of Housing and communal services, as well as for preserving the ecology of the environment.

This section provides an analysis of the main areas in which research is conducted, indicating the authors. Mainly, scientific research deals with aspects of improving and renovating existing networks and equipment by establishing supply regimes, installing more efficient regulatory equipment and automation, as well as implementing measures to monitor and control water resources consumption.

The issues of developing design solutions for engineering systems by adopting basic characteristics in such a way as to achieve minimal construction/operation costs and/or maximum technical and economic indicators of the system remain unresolved. Most often, classical principles of designing water supply systems are proposed using mainly classical methods of linear programming for mathematical solutions to optimization problems of distribution or redistribution of supplied resources to ensure higher productivity and efficiency of the engineering system.

The vast majority of problems of optimizing solutions for the territorial planning of residential areas are based on the template use of rules and techniques for reducing the energy consumption of individual buildings, engineering systems and Heat Supply

Facilities. This takes into account the general regulatory principles of building microdistricts and districts, which provide for certain geometric restrictions on building areas, as well as restrictions related to the need for transport links of individual construction objects, laying engineering communications, taking into account the zones of influence of energy facilities and other buildings and structures focused on the implementation of production processes. The peculiarity of all these methods is that they require compliance to a greater extent with design solutions than engineering and analytical design tools and provide for preliminary setting of many geometric parameters of the system that could be optimized.

If there is an existing development, the decision to lay new engineering networks or plan the placement of new houses can be made with additional use of the results of an energy audit of already erected structures to identify shortcomings and evaluate the efficiency of heat supply, electricity, drainage and sewerage systems. In addition, for territorial units of dense development that do not provide for the construction of new buildings and structures, the principles of determining their optimal positions cannot be applied. In such cases, it is possible to minimize energy losses of the Heat Supply System only by resorting to optimizing the operation of power equipment by changing the heads and sources by qualitatively and quantitatively regulating, and, as a result, changing the heat load. The potential for using renewable and alternative energy sources was also taken into account. An integral subtask in the link "heat source – heat carrier transportation system – consumer" when solving the complex problem of optimization and territorial planning of the Heat Supply System is the search for optimal measures for thermal modernization of buildings and structures. Reducing the consumption of heat energy by the end user is a priority measure in solving the problem of modernizing Heat Supply Systems.

To date, there is not a single holistic decision-making system that would allow planning the placement of new residential, public and energy facilities based on comprehensive system calculations, which in turn would give fairly reliable results and do not require significant adjustments to the resulting design decisions.

The development of new approaches and methods for designing efficient engineering systems is an extremely important applied task when planning microdistricts, districts and other units of modern residential and industrial development. At the same time, one of the key issues is providing new buildings with water resources, which means that water supply systems must meet the requirements of the required capacity, be reliable and safe. This requires design engineers to perform a large amount of preparatory work and technical and economic comparisons, which in the end does not guarantee the optimality of the accepted system configuration.

Determining the optimal positions of new objects in territorial units with dense buildings is a very difficult task. The entire planning process (or regulation, in the case of placement of new construction projects) is a whole series of approximations and edits, which usually require significant labor costs. To date, there is not a single integrated decision-making system in Ukraine that would allow planning the placement of new residential, public and energy facilities based on comprehensive system calculations, which in turn would give fairly reliable and accurate results and do not require significant adjustments to the resulting design decisions.

The analysis of Foreign Studies has shown their direction to use system methods of mathematical modeling in the process of solving the problem of minimizing heat loss when supplying heat carrier to end users. As a rule, mixed integer linear programming tools are used to determine the optimal routes for laying heating networks and the position of heat supply facilities. This mathematical apparatus can be relatively easy to apply, but the accuracy of solving problems when optimizing heat supply systems can vary significantly depending on the initial and boundary conditions of modeling. The target functions that are minimized are mainly of the most simplified linear nature and usually reflect the level of monetary costs required for the construction and operation of heat supply systems. At the same time, environmental and energy indicators often fade into the background, and measures to reduce the energy consumption of buildings are not considered at all as tools for influencing the resulting configurations of heat supply systems.

In the second chapter "Mathematical approaches to modeling the parameters of external networks of water supply systems", it is proposed to use discrete modeling of optimal parameters of external networks of water supply systems by means of Applied geometry, which make it possible to obtain the coordinates of the most efficient configuration of the water supply system from a technical and economic point of view; special target functions are constructed when optimizing geometric models of water supply systems, which allow you to significantly save both on construction and installation works, and on the cost of further maintenance and repair of this network; specific indicators of the cost of construction and operation of pipelines of efficient water supply systems are determined, allowing you to model effective water supply systems from the point of view of construction and operation of the network; geometric modeling of the construction area by indicators of specific costs when optimizing external networks of water supply systems, which allows us to solve the problem of optimizing the trajectories of laying external networks of water supply systems using discrete geometry methods based on iterative adjustment of coefficients reflecting the technical and economic feasibility of laying individual pipeline links in different territories, expressed in terms of unit cost levels.

The processes of construction, repair and further operation of external networks of water supply systems face more obstacles than similar processes associated with internal engineering systems of buildings. This is due to the fact that external engineering networks, as a rule, are laid in public areas, they are often crossed in terms of transport links, elements of other engineering systems; their presence requires the construction of additional protective engineering structures. In addition, unlike internal utilities, accidents on external networks may take longer to identify and eliminate. All these aspects actualize the issue of optimizing the placement schemes of external networks of water supply systems even at the design stage.

The most well-known classical solution to the optimization problem of allocating any resources (the so-called "transport problem") is considered to be the search for the optimal position of a single distribution point, to which the entire amount of resources from the supplier is first supplied, and from which this resource is then distributed to all

consumers. In this case, the optimal position is considered to be conditionally equidistant from the supplier and all consumers, that is, one in which the total sum of distances from the point to all other points of the system is minimal.

If we consider the target function cost of construction and further operation of the entire length of pipelines of the water supply network as the sum of costs for its individual segments between branch nodes, then to determine the cost of each such segment, it will be necessary to set specific indicators of the corresponding costs per unit length of the pipeline. However, such specific indicators will be different in different parts of the territory. To do this, it is necessary to construct a special continuous function for distributing specific indicators of the cost of work on the construction and operation of water supply system links, as a discrete geometric model on a plane – a planar or non-planar graph. Based on the corresponding objective function, it is proposed to implement the process of forming a discrete geometric model by performing successive approximations during calculations.

If the main parameters relative to which the target function is constructed are the technical and economic characteristics of the construction and operation of the water supply system, then the target function itself should reflect the distribution of the corresponding specific cost indicators in different sections of pipeline laying. As a result, the geometric layout of the network links of water supply systems should provide for the minimum cost of their construction and maintenance in accordance with the scalar field of specific costs, which will be formed during visualization by the selected target function. From a geometric point of view, such a problem is a three-dimensional interpolation or approximation (if this is allowed by a given level of calculation accuracy) based on pre-defined discrete data.

Based on research devoted to the application of radial basis functions in modeling neural networks and systematization of irregular data in general, the paper presents the mathematical foundations of three-dimensional interpolation for further optimization of a two-dimensional geometric model of a water supply network in the form of a planar or non-planar graph.

The third chapter "Practical application of the proposed mathematical models to external networks of Water Supply Systems" provides a practical testing of the main results of the dissertation research.

The first example of testing is the study of geometric modeling of the optimal trajectory of laying pipelines of the external network of water supply systems. Based on the preliminary analysis of the construction area in terms of indicators of the economic value of land plots, a model for distributing the values of specific values of these plots is constructed. Modeling of the optimized geometric shape of a discrete image of the water supply pipeline network is performed using the principles of the static-geometric method of discrete geometry. Coefficients that characterize the strength of interaction between individual nodes connecting individual pipeline links are assumed to be equal to the value of the parameters of the specific cost of laying pipelines along the length of sections of the water supply system. Functional dependences of the optimal placement of pipeline nodes are determined on the basis of the proposed basic function of distribution of specific values of land plots. The position of the branching nodes of such a system is determined as a result of solving a system of nonlinear equations.

The practical solution allows you to significantly reduce further construction and operating costs for water supply networks even at the stage of design work.

The results of practical testing of geometric modeling of the construction area by indicators of the unit cost (value) of its individual sections are also presented. The distribution of specific values of land plots has a direct impact on the results of adjusting the trajectory of pipeline links and their connection locations (branching of the pipeline network). In addition, the results of modeling the construction area by the unit values of its sections allow us to perform a preliminary pre-project analysis of the initial data, based on a graphical display of these indicators. In the final result, optimization of determining the path of tracing the pipeline network can both reduce the length of pipeline links, and reduce the cost of construction and installation work, labor resources and further operating costs.

In the fourth chapter "Software implementation of mathematical models for external networks of water supply systems", modeling blocks and the structure of software implementation of the developed algorithms are presented.

The article presents a block for modeling the distribution of specific costs of land plots of the construction territory, a block for modeling the optimal placement of nodes in the network of water supply systems, and the structure of software implementation of algorithms for modeling effective external water supply systems.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА
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: МДПУім. 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 // ІХ міжнародна наук.-практ. конференція «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція-2019». – К.: КНУБА, 2019.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Вступ..... | 24 |
| Розділ 1. Аналіз існуючих підходів до дослідження моделювання зовнішніх систем водопостачання при проектуванні сучасної житлової забудови..... | 31 |
| 1.1. Обґрунтованості теми дослідження | 31 |
| 1.2. Обґрунтованість підходів дослідження | 36 |
| 1.3. Інженерні мережі – особливості та аспекти дослідження | 39 |
| 1.5. Методи геометричного моделювання у літературі | 44 |
| 1.6. Основи аналізу структурного формоутворення мережевих об’єктів ... | 48 |
| 1.7. Структурна основа побудови інженерних мереж та процесів їх життєвого циклу | 52 |
| 1.8. Постановка проблеми дослідження та логічна схема дослідження | 58 |
| 1.9. Висновки до Розділу 1 | 61 |
| Розділ 2. Математичні підходи щодо моделювання параметрів зовнішніх мереж водопостачання..... | 64 |
| 2.1. Дискретне моделювання оптимальних параметрів зовнішніх мереж водопостачання засобами прикладної геометрії..... | 64 |
| 2.2. Побудова спеціальних цільових функцій при оптимізації геометричних моделей систем водопостачання | 69 |
| 2.3. Визначення питомих показників вартості спорудження і експлуатації трубопроводів ефективних систем водопостачання..... | 77 |
| 2.3.1. Дискретний підхід до питомого економічного показника зведення і експлуатації досліджуваної ланки трубопроводу | 78 |
| 2.3.2. Інтегральний підхід до питомого економічного показника зведення і експлуатації досліджуваної ланки трубопроводу..... | 80 |

| | |
|---|-----|
| 2.4. Геометричне моделювання території будівництва за показниками питомих вартостей при оптимізації зовнішніх мереж водопостачання..... | 82 |
| 2.5. Висновки до Розділу 2 | 87 |
| Розділ 3. Практичне застосування запропонованих математичних моделей до зовнішніх мереж водопостачання..... | 90 |
| 3.1. Геометричне моделювання оптимальної траєкторії прокладання трубопроводу ефективних систем водопостачання..... | 90 |
| 3.2. Геометричне моделювання території будівництва за показниками питомої вартості (цінності) її окремих ділянок. | 101 |
| 3.3. Висновки до Розділу 3 | 103 |
| Розділ 4. Програмна реалізація математичних моделей до зовнішніх мереж водопостачання..... | 106 |
| 4.1. Основні положення розробки інформаційної системи моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання. | 106 |
| 4.2. Етапи програмної реалізація алгоритмів моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання. | 108 |
| 4.3. Розробка програмних блоків інформаційної системи моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання | 112 |
| 4.3.1. Програмний блок «Введення даних» | 113 |
| 4.3.2. Програмний блок «Підготовки вихідних даних» | 114 |
| 4.3.3. Програмний блок «Моделювання розподілу питомих вартостей земельних ділянок» | 114 |
| 4.3.4. Програмний блок «Моделювання оптимального розміщення вузлів мережі водопостачання»..... | 116 |
| 4.3.5. Програмний блок «Формування розрахункових даних» | 117 |
| 4.3.6. Програмний блок «Аналіз даних»..... | 117 |

| | |
|---|-----|
| 4.4. Моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання в програмному середовищі MathCAD | 118 |
| 4.5. Висновки до Розділу 4 | 125 |
| Загальні висновки..... | 127 |
| Список використаних джерел | 129 |
| Додатки..... | 144 |
| Додаток А. Акти впровадження | 145 |
| Додаток Б. Список публікацій здобувача | 147 |

Вступ

Актуальність теми дослідження

Визначення та забезпечення надійності є важливою проблемою у проектуванні водопровідних, теплових, газових мереж, мереж операторів зв'язку тощо. Структури мережевого типу властиві багатьом різним протяжним територіально розподіленим системам. У комунікаційній мережі вузли з'єднуються між собою каналами, що передають потоки різного походження: інформацію (повідомлення, дані, керування), енергію (електричну або енергоресурси у вигляді нафти, газу або вугілля), матеріальні потоки, транспорт.

Сьогодні є необхідним комплекс ефективних заходів для оздоровлення галузей виробництва та окремих підприємств. При цьому існують істотні труднощі у побудові нових та оперативній реконструкції діючих систем інженерної інфраструктури і їх складових завдяки непростій економічній ситуації, незлагодженості планів та наявності обмежених ресурсів. Значна кількість діючих інженерних мереж створювалися давно і внаслідок їх довгого часу роботи закладений у них запас та можливості постійно вичерпуються. Відповідно до цього забезпечення та підвищення рівня надійності інженерних мереж, збільшення періоду їх роботи є важливою науковою проблемою.

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 сезону, гідравлічних випробуваннях тощо), а ніж на максимізацію

економічного ефекту при технічному обслуговуванні та подальшій експлуатації систем водопостачання.

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 значить, системи водопостачання повинні відповідати вимогам необхідної потужності, бути надійними та безпечними. Така необхідність вимагає від інженерів-проектувальників виконання великої кількості підготовчих робіт та техніко-економічних порівнянь, що в решті-решт не гарантує оптимальності прийнятої конфігурації системи.

Переважна більшість задач оптимізації рішень з територіального планування районів житлових пунктів, що вирішується вітчизняними вченими, опирається на шаблонне використання правил та методик скорочення енергоресурсоспоживання окремих будівель, інженерних систем і об'єктів тепlopостачання. Особливістю існуючих 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.

Визначення оптимальних положень нових об'єктів територіальних одиниць з щільною забудовою є дуже складною задачею. Наприклад, мінімізувати енерговтрати системи тепlopостачання можна лише вдаючись до оптимізації роботи енергетичного обладнання шляхом зміни параметрів подачі теплоносія, а також якісно-кількісного регулювання режимів споживання енергетичних ресурсів, і, як наслідок, зміни теплового навантаження.

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 використання 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.

При проектуванні зовнішніх інженерних систем інженери керуються досить жорсткими правилами, що спираються на державні нормативні документи. В більшості випадків прийняті проектні рішення є шаблонними, оскільки обумовлені простотою їх реалізації та звичністю в подальшій експлуатації. Однак, при сучасних містобудівних умовах та жорстких вимогах до рівня енергоефективності в будівництві, постає питання щодо відмови від шаблонних (й дуже часто абсолютно неефективних) рішень й оптимізації конфігурації інженерних систем. Зважаючи на те, що постачальники ресурсів (в тому числі енергоресурсів) та споживачі, з'єднуючись системами постачання, утворюють дискретні мережі, конфігурацію яких найпростіше змінювати ще на етапі проектування, з'являється можливість вирішувати задачі системної оптимізації відносно наперед визначених цільових функції. В якості цільових функцій можуть

виступати обсяги матеріалів, що необхідні для будівництва, обсяги втрат енергії при транспортуванні, або повні витрати на зведення і подальшу експлуатацію відповідних систем.

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:

1. проаналізувати наявні методи оптимізації територіального планування районів житлових пунктів та відповідних методів дискретного геометричного моделювання і математичних методів чисельного моделювання;
2. розробити математичні моделі функцій розподілу техніко-економічних показників доцільності будівництва та подальшої експлуатації, та оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання у графо-аналітичній формі;
3. розробити розрахункові алгоритми спільного застосування математичних моделей функцій розподілу техніко-економічних показників та оптимізації зовнішніх мереж систем водопостачання;
4. реалізувати створені розрахункові алгоритми у середовищі програм символічного та чисельного комп'ютерного моделювання;
5. провести апробацію запропонованих математичних методів та відповідних алгоритмів у практику реального проектування зовнішніх систем водопостачання;

- б. оцінити техніко-економічний та екологічний ефект питомих показників вартості спорудження та експлуатації трубопроводів ефективних систем водопостачання.

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

Предметом дослідження - методи графо-аналітичного моделювання раціональних мереж систем водопостачання в умовах нової забудови.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що реалізація стратегії сталого енергетичного розвитку України для будинкового фонду й сектору тепlopостачання потребує раціональних практичних рішень, які з одного боку будуть економічно- та ресурсо-ощадними при їх впровадженні, а з іншого матимуть високу ступінь довгострокової ефективності енергетичних заходів, якими є планування територіального розміщення інженерних споруд та об'єктів тепlopостачання.

Методи досліджень. 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 результатів дисертаційного дослідження. 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.

Розділ 1. Аналіз існуючих підходів до дослідження моделювання зовнішніх систем водопостачання при проектуванні сучасної житлової забудови

1.1. Обґрунтованості теми дослідження

Україна у 1992 році стала підписантом декларації про прийняття глобальної стратегії розвитку «Порядок денний на XXI сторіччя», у відповідності до якої необхідно розробити й поетапно реалізовувати національний план дії зі сталого розвитку, в тому числі енергетичного. На сьогоднішній день в рамках підписання «Угоди мерів», в окремих містах нашої країни почали активно розроблятися та впроваджуватися плани дій сталого енергетичного розвитку, що охоплюють сектори житлових та громадських будинків, теплопостачання, транспорту, водопостачання, освітлення, озеленення, твердих побутових відходів тощо [1].

Метою реалізації цих планів є скорочення енергоспоживання у зазначених секторах на 20%, скорочення викидів вуглекислого газу на 20% та збільшення частки використання відновлювальних джерел енергії на 20% у порівнянні з 1990 роком. Сектор цивільних будівель є головним споживачем теплової енергії в Україні (на потреби теплопостачання витрачається близько 70% від загального обсягу енергоресурсів).

Пріоритетними напрямками є 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. 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. Окрім того, активно досліджуються соціальні, фінансово-економічні та екологічні аспекти впровадження заходів та проектів з ефективного використання

енергоресурсів у всіх секторах житлово-комунального господарства, а також зі збереження екології навколишнього середовища. Виконуються техніко-економічні обґрунтування доцільності впровадження різних комплексів енергоефективних заходів, в тому числі й тих, що передбачають використання систем альтернативної енергетики та принципів глибокої утилізації вторинної енергії.

Дослідження у даній області проводяться багатьма авторами за різними підходами. Одним із напрямів є проектування и розрахунок водопроводних систем. У цьому напрямі активно пповодять дослідження М. М. Андрияшев, Н.П. Белозеров, Н.А. Карамбиров, А.А. Кемелев, Г.Е. Кикачишвили, М.В. Кирсанов, Н.В. Луговской, В.Г. Лобачев, А.П. Меренков, Е.С. Мелихов, Л.Ф. Мошнин, А.М. Никитин, М.Н. Поспелова, СВ. Сумароков, В.Я. Хасилев, Ф.А. Шевелев та ін.. Іншим напрямом є математичне моделювання та оптимізація режимів роботи системи водопостачання. У цьому напрямі визначні роботи належать Абрамову М.М., Євдокімовому А.Г., Матвієнко О.І., Петросову В.А., Рябченко І.М., Сумарокову С.В., Удовенко С.Г., Хомутецькій Т. П., Хоружному П.Д., Чернишеву Д.О., Чупіну В.Р. та ін.

Проте зазначимо, що вказані автори переважно розглядаю 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 залишається питання розробки проектних рішень інженерних систем за рахунок прийняття базових характеристик таким чином, щоб досягти мінімальних витрат на зведення/експлуатацію та/або максимальних техніко-економічних показників системи. Зазвичай, пропонуються класичні принципи проектування систем водопостачання. А також, застосовуються переважно класичні методи лінійного програмування математичного вирішення оптимізаційних задач розподілу або перерозподілу ресурсів, що постачаються,

задля забезпечення вищої продуктивності та ефективності роботи інженерних системи.

Переважає більшість задач оптимізації рішень з територіального планування районів житлових пунктів, що вирішується як вітчизняними так і закордонними вченими, опирається на шаблонне використання правил та методик скорочення енергоспоживання окремих будівель, інженерних систем і об'єктів теплопостачання. 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, прокладанням інженерних комунікацій, врахування зон впливу об'єктів енергетики (котельнь, теплогенераторних, ТЕС, ТЕЦ та ін.) 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 [2 – 7].

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 теплопостачання, електропостачання, водовідведення і каналізації [8 - 10]. 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 теплопостачання можна лише вдаючись до оптимізації роботи енергетичного обладнання шляхом зміни напорів та на джерелах шляхом якісно-кількісного регулювання, і, як наслідок зміни теплового навантаження [11 - 14]. Береться до уваги 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 термомодернізація будівель і споруд. Зменшення споживання теплової енергії кінцевим споживачем є першочерговим заходом при вирішенні задачі модернізації систем тепlopостачання.

Обсяги вироблення теплоти в Україні в середньому за останні роки склали близько 270 млн. МВт•год. Із них близько 182 млн. МВт•год виробляється в котельних централізованих систем тепlopостачання, що складає майже 70 % від загального споживання. Згідно оновленої «Енергетичної стратегії України до 2030 р.» планується збільшення вироблення теплоти в котельних: до 2030 року з 270 до 426 млн. МВт•год, а з урахуванням заходів з енергозбереження до 315 млн. МВт•год – що менше на 26 % від запланованих 426 млн. Для найбільшого сектору – будинковий фонд житлово-комунальних господарств – споживання зростає з 181 млн. МВт•год до 187 млн. МВт•год – приблизно на 3.3 %. Це вказує на те, що за рахунок впровадження енергоефективних заходів у даному секторі планується майже повна зупинка зростання енерговитрат. При цьому не існує жодних рекомендацій та систематизованих комплексних вказівок по реалізації відповідних заходів у секторах будівель та тепlopостачання.

Весь процес планування (або регулювання, у випадку, коли мова не йде про розміщення нових об'єктів будівництва) представляє собою цілий ряд наближень та правок, що зазвичай вимагають значних трудовитрат. 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. Отже, *актуальність* теми дослідження не викликає сумніву.

Вирішення цієї науково-практичної проблеми стане можливим за рахунок розроблення комплексу таких технічних рішень по підвищенню рівня енергоефективності існуючих будинків та новобудов при територіальному

плануванні розміщення об'єктів теплопостачання як на районному рівні, так і на рівні окремо взятих будівель, що:

1) враховували би цілий спектр критеріїв, для виявлення яких потрібен досвід фахівців з різних галузей науки і техніки (теплотехніки, архітектури і будівництва, технічної естетики, математики й геометричного моделювання, теорії систем, геоінформатики тощо);

2) були б однозначними та обґрунтованими, чого можна досягти використавши системний підхід та оптимізаційний математичний апарат.

Таким чином, принципи територіального розміщення інженерних споруд та об'єктів теплопостачання повинні ґрунтуватись на результатах комплексного аналізу всіх складових теплового забезпечення будинкового фонду житлово-комунальних господарств, оцінці ефективності впроваджених заходів, втрат енергії теплових мереж та їх протяжності, а самі положення будівель та споруд мають визначатись на основі системного розрахунку.

1.2. Обґрунтованість підходів дослідження

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 значить, системи водопостачання повинні відповідати вимогам необхідної потужності, бути надійними та безпечними. Така необхідність вимагає від інженерів-проектувальників виконання великої кількості підготовчих робіт та техніко-економічних порівнянь, що в решті-решт не гарантує оптимальності прийнятої конфігурації системи.

Класична задача визначення оптимальної конфігурації системи водопостачання представляє собою багатоступінчатий ітераційний процес в ході якого визначаються найбільш доцільні з технічної та економічної точки зору параметри перерізів кожної прямолінійної ділянки трубопроводів (як правило це внутрішні діаметри), а також довжини та положення цих ділянок в плані з урахуванням способу прокладання. Для визначення найбільш вигідних перерізів трубопроводу постає потреба у розрахунку коефіцієнтів, що враховують роль тієї чи іншої ділянки у витрачанні енергії на подачу води, й знаходяться шляхом ув'язування мережі при пропуску через неї деякого фіктивної витрати води. Вони є частинами цих фіктивних витрат, що проходять ділянками мережі. При наближених розрахунках ці величини для окремих ділянок ліній мережі можуть бути визначені як частина загальної витрати води, переданої транзитними магістралями в основних напрямках руху води в мережі. Як правило діаметри самих транзитних перемичок визначають із конструктивних міркувань (при умові аварійної роботи), що дає досить велику похибку в гідравлічних розрахунках інших ланок мережі й системи у цілому. В результаті одержані параметри трубопроводів є далеко не ідеальними. В ході визначення довжин окремих ділянок також керуються досить примітивними конструктивними міркуваннями [15].

В загальному випадку математичною моделлю задачі є система лінійних або нелінійних рівнянь, що описують закони Кірхгофа для вузлів і контурів мережі водопостачання. При цьому, підходи до оптимізації моделі зосереджуються на двох принципових групах задач:

1) пов'язаних з підбором діаметрів трубопроводів, вирішення яких вимагає залучення економічних чинників (як зазначалося вище);

2) пов'язаних з гідравлічними розрахунками, при яких діаметри трубопроводів вважаються заданими і потрібно визначити дійсні витрати у всіх ділянках мережі, напори у всіх вузлах і оптимальні умови роботи системи й її технологічного обладнання.

Однак, найбільш раціональним і науково обґрунтованим є комбінований підхід, при якому оптимізаційний процес будуватиметься на пошуку мінімальних значень спеціальних цільових функцій, які відображатимуть обсяги витрат матеріальних ресурсів на улаштування мереж водопостачання, а також значення гідравлічних опорів трубопроводів на різних ділянках системи. Даний підхід передбачає системне визначення шуканих параметрів системи та має дозволити знизити похибки процесів числення.

Переважає більшість задач оптимізації рішень з територіального планування районів житлових пунктів, що вирішується вітчизняними вченими, опирається на шаблонне використання правил та методик скорочення енергоресурсоспоживання окремих будівель, інженерних систем і об'єктів теплопостачання. Особливістю існуючих 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 [2 – 4, 6].

Визначення оптимальних положень нових об'єктів територіальних одиниць з щільною забудовою є дуже складною задачею. Наприклад, мінімізувати енерговтрати системи теплопостачання можна лише вдаючись до оптимізації роботи енергетичного обладнання шляхом зміни параметрів подачі теплоносія, а

також якісно-кількісного регулювання режимів споживання енергетичних ресурсів, і, як наслідок, зміни теплового навантаження [16, 17].

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 тепловитрат 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 [18 - 22]. 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.

1.3. Інженерні мережі – особливості та аспекти дослідження

Визначення та забезпечення надійності є важливою проблемою у проектуванні водопровідних, теплових, газових мереж, мереж операторів зв'язку і т. ін. Структури мережевого типу властиві багатьом різним протяжним територіально розподіленим системам. У комунікаційній мережі вузли з'єднуються між собою каналами, що передають потоки різного походження: інформацію (повідомлення, дані, керування), енергію (електричну або енергоресурси у вигляді нафти, газу або вугілля), матеріальні потоки, транспорт [47 - 51].

Сьогодні є необхідним комплекс ефективних заходів для оздоровлення галузей виробництва та окремих підприємств. При цьому існують істотні труднощі у побудові нових та оперативній реконструкції діючих систем інженерної інфраструктури і їх складових завдяки непростій економічній ситуації, незлагодженості планів та наявності обмежених ресурсів. Значна кількість діючих інженерних мереж створювалися давно і внаслідок їх довгого часу роботи закладений у них запас та можливості постійно вичерпуються. Відповідно до цього забезпечення та підвищення рівня надійності інженерних мереж, збільшення періоду їх роботи є важливою науковою проблемою [52 - 63]. Ця проблема вирішується у результаті проведення досліджень та практичних заходів з метою послаблення дії різних деструктивних чинників, що викликають економічні збитки та інші негативні наслідки [64 - 68].

Проблема працездатності різних систем досліджувалася у наукових джерелах [69, 70]. У вивченні складних систем використовуються різні оптимізаційні методи [70 - 81]. Зокрема, питання оптимізації мереж опрацьовувались у роботах [82], [83], [48]. Потреба продовження періоду роботи підвищує вимоги до надійності систем та стимулює поширення області їх використання. Втрата надійності систем викликає великі негативні наслідки [67, 84, 85].

Мережі інженерно-технічного забезпечення (інженерні мережі, системи або комунікації) – комплекс систем і комунікацій, що забезпечують життєдіяльність

користувачів (населення, комунально-побутових і промислових підприємств) (рис.1.1). Вони є системами комунікацій та інших споруд, а саме:

- зовнішні та внутрішні системи водопостачання і водовідведення (джерела водопостачання, гідротехнічні споруди, водопровідні і каналізаційні очисні станції, колектори, насосні станції, внутрішньоквартальні мережі);
- зовнішні та внутрішні системи тепlopостачання (міські тепломережі, теплові пункти і внутрішньоквартальні мережі);
- системи газопостачання (газорозподільні пункти, газопроводи тощо)
- мережі зв'язку (стільникові мережі, телефонна мережа, структурована кабельна система, система автоматизованого диспетчерського управління, система контролю доступу, система візуалізації);
- зовнішні та внутрішні системи електропостачання (лінії електропередачі, трансформаторні й тягові підстанції тощо); внутрішні системи електропостачання у будинках;
- системи зовнішнього освітлення (вулиць, доріг, вітрин, стендів тощо та ліній електропередачі);
- системи вентиляції і кондиціонування повітря (житлових і громадських будівель і споруд та об'єктів інженерного забезпечення).



Рис. 1.1. Перелік мереж, що входять до систем інженерної інфраструктури

Інженерним мережам властиві ієрархічність та багаторівневність.

Необхідність відновлення інженерної мережі існує весь час її функціонування, надійність її елементів постійно знижується та підвищується, тим самим впливаючи на працездатність системи [86]. Визначною властивістю складних резервованих інженерних мереж є невідповідність об'ємів втрат від їх серйозних відмов та витрат на раціональне забезпечення їх працездатності [87 - 89]. Підтримка заданого рівня надійної діяльності цих систем є вирішальною за певних обмежень наявних для цього ресурсів. У процесі функціонування об'єкт інженерної інфраструктури як технічна система виконує свої задачі зі збереженням ряду значень важливих величин в інтервалах, указаних у нормативних документах [90]. Для підвищення певного рівня надійності та відновлення складних систем необхідно постійно вкладати великі кошти.

Зниження технічних можливостей інженерних мереж та необхідність продовження їх функціонування є актуальним та складним завданням забезпечення їх працездатного стану [87, 88]. Обсяг інтегрованого вивчення цієї проблеми незначний, тому є необхідним науковий супровід та знаходження прихованих невикористаних резервів.

Сучасним об'єктам інженерної інфраструктури властива висока технічна та функціонально-технологічна складність, багаторівневий ієрархічний та алгоритмічний функціональний зв'язки елементів, що постійно розвиваються та вдосконалюються в процесі адаптації до оточуючого середовища [91 - 94]. Ці об'єкти розвиваються в декількох напрямках:

- до систем вводиться дедалі більше складових елементів;
- ускладнюється структура систем, що утворюється технологічними і функціональними зв'язками окремих елементів;
- змінюються різні взаємодії компонентів у процесі функціонування системи.

Сьогодні інженерні мережі функціонують в умовах зростаючої складності поставлених перед ними завдань, що стають більш важливими, відповідальними та багатоваріантними. Структурна складність, ряд підвищених вимог до

працездатності, їх численні відмови викликають істотні негативні процеси, суттєві втрати коштів та часу. Дослідження цих систем включає:

- знаходження окремого підходу у їх побудові та аналізі;
- системність та застосування методик заміни чи відновлення компонентів в умовах поточного стану об'єкта у процесі їх розвитку;
- різноманітність функцій та наукове забезпечення всього періоду існування.
- задачі узгодження, інтеграції та взаємодії з суміжниками у побудові та експлуатації об'єктів;
- обмеженість об'ємів наявних ресурсів для побудови й експлуатації.

Наукові літературні джерела засвідчують, що проблема надійності складних мережевих систем інженерної інфраструктури перебуває в процесі розвитку та остаточно не вирішена [56, 60, 87, 95 - 97]. На сьогодні є актуальною загальна методологія вирішення проблеми надійності технічних систем та їх складових частин різних рівнів складності. Зокрема у наукових дослідженнях широко використовується узагальнення та спрощення системи зв'язків складових частин у структурі інженерних мереж [56, 60, 87, 96]. Через різні проблеми запровадження та деталізації теоретичних методів наукові джерела [56, 87, 96] стали підґрунтям глибокого аналізу стану справ для подальшого розроблення методик моделювання працездатності інженерних мереж. Вивчення надійності окремих частин та елементів складних систем ведеться методами аналізу надійності працюючих об'єктів та моніторингом експлуатації компонентів різних видів і розмірності у складі систем.

В умовах високого початкового рівня надійності складових частин або значного структурного резервування інженерних мереж аналіз працездатності приводить до позитивних результатів, що свідчить про його невелику інформативність [59, 60]. У вирішенні ряду практичних задач існує необхідність визначення та застосування ряду перетворень структури мережі, що знижують первинну надійність її складових частин та елементів для оперативного отримання необхідних даних про рівень працездатності і застосування обернених

структурних перетворень. Це допомагає використовувати отримувані дані комп'ютерних експериментів в обчисленні фактичних показників працездатності різних компонентів мережі інженерної інфраструктури [59, 60].

У практиці проектування методи обчислення показників працездатності інженерних мереж повинні бути достатньо доступними й нетрудомісткими [52, 560, 60, 96, 97]. Обсяги обчислень надійності об'єкта аналізу не повинні перевищувати обсяги інших необхідних інженерних обчислень, пов'язаних з даною системою для достатньої практичності методики в процесі проектування та у науковій підтримці життєдіяльності інженерних мереж.

Таким чином, аналіз стану проблеми надійності систем показує, що для розвитку досліджень працездатності мереж інженерної інфраструктури необхідні:

- побудова узагальненої методики моделювання їх структурної надійності та різних їх складових частин;
- виконання досліджень надійності окремих компонентів структур мереж різних рівнів складності.

1.5. Методи геометричного моделювання у літературі

Широке використання комп'ютерних технологій прискорює розвиток усіх галузей науки, техніки та виробництва. Відповідно зростає необхідність у використанні математичних та, зокрема, геометричних методів наукових досліджень [102, 103]. Методологія прикладної геометрії вважається однією з найбільш ефективних, так як, разом з формалізованим символічним описом, наочно представляє досліджувані явища, об'єкти та процеси у вигляді різних комплексних зображень [102, 104, 105], що допомагає охопити все поле розв'язків поставлених задач [1040].

Для реалізації взаємодії науки та виробництва потрібно розвивати теоретичні дослідження та розв'язувати практичні інженерні задачі. Сьогодні постають актуальні та складні питання побудови, вдосконалення геометричних моделей та розроблення способів геометричного моделювання відповідно до потреб різних галузей науки й техніки [102, 103]. На цьому етапі розвитку науки й техніки теоретичний досвід прикладної геометрії має своє широке практичне застосування. Сьогодні процес комп'ютеризації інтенсивно реалізує комплексне застосування математичних моделей, що спирається на геометричні методи. Розгорнутими і детально описаними є теоретичні дослідження формоутворення кривих і поверхонь, опрацювання ефективних геометричних методів візуалізації, вивчення просторів багатьох вимірів, вирішення оптимізаційних питань, успішне застосування теоретичних здобутків у практичній діяльності.

Наукове джерело [1060] представляє основи геометричного моделювання; [107] – полікоординатної методики в прикладній геометрії та комп'ютерній графіці; [108] – геометричного моделювання складових енергетичних пристроїв; [1090] – дискретного геометричного конструювання кінематичних поверхонь на основі скінчених сум; [1100] – формування дискретних моделей поверхонь просторових архітектурних конструкцій; [111] – геометричного розміщення та розбиття; [112] – автоматизації процесів згущення при варіативному дискретному геометричному моделюванні; [113] – машинних методів проектування неперервно–каркасних поверхонь; [114] – інтерференції спряжених криволінійних

поверхонь та геометричних методів їх моделювання; [115] – дискретного визначення геометричних об'єктів числовими послідовностями; [116] – формоутворення із застосуванням параметризації; [1170] – структурне моделювання; [118] – геометричне моделювання узагальнених паралельних множин; [119] – геометричне та комп'ютерне моделювання динаміки процесів зміни об'єктів під впливом заданих чинників; [Ошибка! Источник ссылки не найден.] – узагальнення синтезу моделей конструкторсько–технологічних обводів; [121] – застосування теорії графів для моделювання мереж зв'язку; [122] – моделювання маршрутів перевезень із використанням графів; [123] – геометричні моделі у аналізі хімічних систем; [124] – застосування геометричного моделювання у конструюванні коренезбиральних машин.

Наукові джерела висвітлюють задачі комбінаторної геометрії та комбінаторної теорії і алгоритмів [125 – 1370], теорії множин, графів, математичної логіки й оптимізації [55, 70, 74, 104, 138, 139, 140 – 151]. Ці роботи є теоретичною базою у практичному використанні для процесу проектування різних складних технічних систем.

Сьогодні геометричне моделювання характеризується інтегрованим використанням досвіду прикладної геометрії, системного аналізу, обчислювальних методів та інформатики [102, 103]. Наукові дослідження Київської геометричної школи відображено у роботах з конструктивної геометрії множин ліній, фундаментальних дослідженнях лінійчатих поверхонь вищих порядків, нелінійних моделях зображень та побудови нелінійних відображень. Ці роботи представляють конструктивно-синтетичний напрям у прикладній геометрії та мають своє продовження і втілення у моделюванні різних явищ, об'єктів та процесів, у розвитку диференційно-геометричних методів побудови поверхонь технічних форм, у дослідженні взаємного проникнення синтетичних та аналітичних методів у прикладну геометрію, побудові комп'ютерних моделей синтетичної геометрії. У системному науковому дослідженні [102, 103] ґрунтовно опрацьовано структурні особливості способів геометричного моделювання, їх загальносистемних властивостей, перспектив розвитку прикладної геометрії.

Значну увагу приділено дослідженню формоутворення сплайн-функцій, геометричне моделювання складених обводів, апроксимацію кривих і поверхонь, побудову систем автоматизованих геометричних обчислень, опрацьовані питання автоматизованого проектування.

Розвивається анімаційне формоутворення на основі параметричного підходу. Узагальненим напрямом цього підходу вважається структурно-параметрична методологія. Досліджено побудову структур у процесі проектування. Основна увага зосереджена на розробці геометричних моделей для складних технічних об'єктів у період їх експлуатації. Опрацьовано перехід від етапу проектування до етапу експлуатації через ряд процесів виробництва. Також звернута увага на параметричне формоутворення.

Висвітлюється концепція застосування геометричних моделей із врахуванням структурно-параметричних властивостей формоутворення структур у процесі проектування. Теорія структурно-параметричного моделювання узагальнюється та застосовується для об'єктів машинобудування, для технології їх побудови, для фігур багатовимірного простору. Опрацьовано комп'ютерні твердотільні геометричні моделі об'єктів машинобудування протягом усіх етапів їх життєвого циклу; геометричні об'єкти визначаються систематизованим рядом складових частин, котрі містять інші утворення меншої складності.

Зважаючи на постійне підвищення рівня складності технічних систем, зростання вимог до їх якості, необхідність зниження затрат ресурсів на побудову та експлуатацію інженерних мереж, залишаються проблемними питання удосконалення процесів проектування, котрі застосовують методи геометричного моделювання та комп'ютерної інженерної графіки. У оптимальному формоутворенні складних систем вирішується ряд складних задач узагальнення деяких теоретичних положень прикладної геометрії, створення нових та удосконалення відомих методів, оптимізації, побудови методик моделювання та їх програмної реалізації. Дослідження цих задач допомагає підвищувати рівень ефективності комп'ютерного геометричного моделювання складних систем, об'єктів та процесів.

Аналіз наукових праць із прикладної геометрії та інших галузей науки виконується для детального вивчення проблеми, обґрунтування її важливості, актуальності, опрацювання невирішених задач теорії та практики, можливих напрямів подальшого розвитку геометричного моделювання. Проведені дослідження актуальних та важливих практичних задач із використанням геометричного моделювання, формоутворення об'єктів та аналізу їх властивостей отримали неповне теоретичне обґрунтування та практичне запровадження. Згадані наукові праці свідчать про необхідність та можливість розвитку й удосконалення методів геометричного моделювання, і визначення нового напрямку розвитку прикладної геометрії та інженерної графіки, реалізації отриманих наукових результатів на виробництві.

1.6. Основи аналізу структурного формоутворення мережевих об'єктів

Структури мережевого типу властиві для різних територіально-розподілених систем. У комунікаційній мережі вузли з'єднуються між собою зв'язками, що передають різні потоки: інформацію (повідомлення, дані, керування), енергію (електричну або енергоресурси у вигляді нафти, газу або вугілля), матеріальні потоки, транспорт. Моделі цих систем аналогічні. Сучасні технічні системи мають високу складність, не лише технічну, а й функціонально-технологічну, складний ієрархічний та алгоритмічний функціональний зв'язок елементів, що перебуває в безперервному розвитку і вдосконаленні для адаптації до навколишнього середовища. Ускладнення технічних систем йде у декількох напрямках:

- до систем вводиться більше складових компонентів;
- ускладнюється структура систем, що утворюється технологічними і функціональними зв'язками складових частин;
- змінюються ієрархічні рівні взаємодії компонентів у процесі функціонування системи.

Ускладнення технічних систем здійснюється завдяки зростаючій складності поставлених задач, що стають все більш важливими, відповідальними та багатоваріантними. Відповідно форма структури технічних систем має різноманітні представлення та систематизується зокрема, з позицій структурного резервування. Ієрархічні рівні компонентів структури інженерної мережі представлено на рис. 1.2.

До системи входить ряд її різних рівнів ієрархії $S = \{L_1, L_2, \dots, L_{n_s}\}$, $n_s \in N$. Кожен рівень ієрархії містить певні складові L_i – компоненти i -го рівня $KL_i = \{k_1, k_2, \dots, k_{n_i}\}$, $n_i \in N$, $n_i < n_s$, $i \in N$, $2 \leq i \leq n_s$. Неподільні частини системи – елементи можуть бути окремими складовими різних рівнів ієрархії: $EL_i \in L_i$, $EL_i = \{e_1, e_2, \dots, e_{n_i}\}$, $n_i \in N$, $n_i < n_s$, $i \in N$. Або елементи можуть входити до складу компонентів відповідного рівня $EL_i \subset KL_i$.

Кількість різних компонентів системи (рис. 2. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) є підмножиною множини натуральних чисел:

$$K_s = \sum_{i=1}^n K_i, \quad (1.1)$$

де n – кількість ієрархічних рівнів системи; K_i – кількість компонентів кожного i -го рівня.



Рис. 1.2. Ієрархічні рівні об'єкта інфраструктури для системи водопостачання

Число компонентів кожного i -го рівня обчислюється відповідно так:

$$K_i = \sum_{i+1=1}^N K_{i+1}, \quad (1.2)$$

де N – число ієрархічних рівнів; K_{i+1} – число компонентів $i+1$ -го рівня, що дорівнює сумі складових i -го рівня; $K_i = K_{\zeta_{i+1}} + K_{\ddot{A}_{i+1}} + \hat{E}_{\hat{A}_{i+1}}$ – число компонентів $i+1$ -го рівня $K_{\zeta_{i+1}} \geq 0$ – кількість кілець, $K_{\ddot{A}_{i+1}} \geq 0$ – кількість ділянок, $K_{\hat{A}_{i+1}} \geq 0$ – кількість вузлів $i+1$ -го рівня.

$$K_i = \sum_{m=1}^{K_{i-1}} K_{i_m}, \quad i=1,2,\dots,k \quad (1.3)$$

$$K_{i_m} = K_{\zeta_m} + K_{\ddot{A}_m} + K_{\hat{A}_m}, \quad K_{\zeta_m} \geq 0, \quad K_{\ddot{A}_m} \geq 0, \quad K_{\hat{A}_m} \geq 0,$$

де K_{ζ_m} (кілець), $K_{\ddot{A}_m}$ (ділянок), $K_{\hat{A}_m}$ (вузлів) – це відповідно число компонентів та елементів на i -му рівні ієрархії k -го компонента $i-1$ -го рівня.

Форма, розміри компонентів та їх розміщення в утвореннях більшого рівня складності суттєво залежать від множини сполучень, що визначаються складовими частинами системи.

У структурній оптимізації вирішенням задачі є організація складу, розміщення елементів у структурі системи та значення їх параметрів. Вони знаходяться відповідно до заданих максимумів чи мінімумів сформульованої цільової функції. Критеріями оптимальності структури системи є ряд техніко-економічних показників та їх певні поєднання. Кращі варіанти проектів отримуються використанням цих показників. Об'єктом аналізу може бути процес проектування деякої системи та окремі її компоненти з урахуванням особливостей та умов, що накладаються на структуру системи.

Задачі формоутворення тісно пов'язані з процесами удосконалення структури інженерних мереж. Відповідно до модульного принципу система подається певними поєднаннями її форм сполучення (складності, зв'язків). Вони призначені для виконання заданих функцій та утворюють компоненти різних рівнів складності, що мають переваги: врахування особливостей конкретної системи чи компонента, поширення набору заданих властивостей, інтегрування компонентів за спільністю їх складових частин.

Застосування принципу **компонентності** спрощує постановку задачі та отримання її рішення. Дослідження структур інженерних мереж з позицій їх формоутворення допомагає виявити проблемні, найбільш вагомі та складні задачі ймовірності зв'язності інженерної інфраструктури і сформулювати постановку задач їх вирішення засобами геометричного моделювання.

1.7. Структурна основа побудови інженерних мереж та процесів їх життєвого циклу

Аналіз наукових робіт виявив актуальність задач моделювання надійності інженерних мереж та застосування для їх вирішення можливостей комп'ютерної інженерної графіки й моделей інших галузей науки й техніки.

Проаналізуємо мережеві об'єкти інженерної інфраструктури з позицій структурного формоутворення. Інженерна мережа як технічний об'єкт має певний ряд властивостей, що забезпечують її здатність виконувати задані функції у визначених умовах експлуатації. Найбільш важливими вважаються показники надійності, економічності та інші.

Системи інженерної інфраструктури незалежно від їх призначення, мають свій життєвий цикл, що містить три основні етапи: проектування, побудову та функціонування. Життєвий цикл систем є рядом пов'язаних процесів від ідеї, формування концепції проекту, створення та практичного впровадження, виконання поставленого завдання за певних умов до виведення з експлуатації після використання своїх можливостей та утилізації.

Узагалі життєвий цикл системи має ряд стадій з певними проміжками часу, умови якості та різні показники станів системи. Стадії життєвого циклу залежать від акумульованого досвіду та задач, що розв'язуються у процесах побудови системи та її практичної роботи. Стадія життєвого циклу пов'язана з певним станом системи, рядом її функцій. До життєвого циклу входять показники забезпечення та відновлення рівня надійності діючих систем. Показники життєвого циклу враховують також об'єм робіт і витрат на наукові й інженерні розробки, підготовку виробництва, експлуатацію, ремонт і утилізацію. Період існування інженерних мереж має певну структуру, внутрішню організацію, утворену рядом своїх складових частин та їх взаємозв'язків, яка реалізується через забезпечення відповідного функціонування. Ця система має змінні властивості, що визначаються своїми складовими частинами, а саме процесами проектування, побудови та функціонування (рис. 1.3).

Наукові дослідження в основному призначаються для процесів проектування та побудови, а процеси експлуатації часто представляються рядом різних умов. Корисним є зворотний зв'язок між стадіями існування системи. Він необхідний для посилення відповідності застосованих моделей та методик, аргументації проекту. Наявність зворотного зв'язку між стадіями існування системи передає відображення картини станів інженерної мережі для своєчасного реагування у забезпеченні процесу життєдіяльності. Результатом зворотного зв'язку є підвищення якості системи та її компонентів. Якість системи об'єднує певний ряд її властивостей, що реалізують здатність правильно працювати у реальних конкретних умовах. Серед інших основними вважаються такі властивості: надійність, економічність, ефективність, екологічність тощо.

Якість інженерних мереж, що проявляється у процесі функціонування, формується у всіх періодах їх життєдіяльності. Період існування системи має деяку структуру – внутрішнє влаштування та містить упорядкований перелік етапів і зв'язків між ними. Зворотний зв'язок ураховує проявлені особливості на наступних етапах. Таким чином відбувається замкнений процес підвищення рівня якості інженерної мережі. Розглянемо суть процесів об'єкта дослідження на загальних стадіях існування системи (рис. 1.3).

1. Мотивація проекту. Формування задуму та функціональне застосування, аргументація перспективності системи, встановлення області її діяльності та параметрів, визначення необхідних якісних показників і їх значень. Постановка технічного завдання.

2. Проектування системи. Ключові наукові розробки систем проводяться в процесах проектування та побудови систем, а експлуатація часто обмежується певними умовами. У наукових дослідженнях йде пошук можливостей застосування різних природних закономірностей з метою знаходження нових кращих технологій. Проект має відповідати напрямам удосконалення сучасних технологій та кращим подібним системам. Загальні властивості створюваної системи передбачаються якіснішими, ніж у її попередників. Створюються проекти організації побудови, конструкторських та технологічних документів,

виконується технічне завдання на об'єкт. Визначається оптимальна структура інженерної мережі та особливості її роботи. З'ясовуються умови рівня працездатності, які повинні виконуватися у побудові, під час функціонування та у процесі відновлення. Застосовуються науково обґрунтовані методи та практичний досвід фахівців. Знаходяться та досліджуються схожі проекти, використовуються якісні складові частини. У проектуванні весь час домінує необхідність оптимально визначати: структуру системи, форму, розміри та розташування елементів і більш складних утворень – різних складових компонентів (підсистем), а також процеси побудови, обставини функціонування, економічні характеристики. З цього випливає, що якість інженерних мереж закладається у процесі проектування, втілюється побудовою, контролюється й забезпечується на етапі функціонування.

У процесі проектування інженерних мереж використовуються як правило двовимірні геометричних моделі (ортогональні проекції). Це підвищує наочність, ефективність, якість побудови та поліпшує передумови наступного періоду життєвого циклу проектованої системи.

3. Побудова інженерної мережі. У побудові системи з урахуванням вимог, які сформульовані раніше, з дотриманням основних величин в заданих межах, важливою є технологічність складових, що визначають надійність та якість системи. На етапах реалізації проекту прогнозування технологічності допомагає підвищити точність визначення показників надійності та вартості системи. Побудова мережі організовується відповідно до концепції та плану, заданого підвищення її рівня якості і якості її компонентів, процесів уведення її у практичне функціонування.

4. Функціонування. Система готується до використання після побудови або відновлення. Працездатність системи підтримується на встановленому рівні протягом заданого періоду часу. На основі статистичних даних періоду функціонування та відповідних обчислень проводиться аналіз станів системи, її властивостей. У процесі відновлення готуються необхідні документи організації робіт та контролю після ремонту, визначається рівень працездатності системи та її

компонентів, забезпечується відповідність параметрів після відновлення встановленим умовам та нормам.

5. *Утилізація*. Плануються та реалізуються заходи зупинки функціонування системи, її демонтаж та перероблення складових частин для інших потреб.

Основне завдання полягає у побудові системи заданої якості з мінімальними затратами необхідних ресурсів. Отже, якість інженерних мереж формується у процесі проектування, реалізується побудовою, моніториться та забезпечується у процесі функціонування.



Рис. 1.3. Узагальнені умови і процеси існування резервованих інженерних мереж

Щоб отримати найкращі результати, необхідно застосувати багатоваріантний підхід до всіх частин життєвого циклу інженерної мережі. Важливим є комплексне узгодження ряду умов, що знаходяться у взаємному протиріччі.

Наприклад, властивостей надійності, економічності та технологічності, коли визначається узгодження між необхідними технічними можливостями функціонування, технологічного потенціалу та вартості створюваної системи.

Інтегровані результати обґрунтовуються та узгоджуються з принципами інших наук, зокрема теорії надійності, технології та економіки, щоб установити узгодження між заданим періодом експлуатації, наявними можливостями побудови та вартістю об'єкта. Незначне зниження затрат в одному з процесів, що викликає більші витрати ресурсів в інших, є недоцільним. Потрібно підвищувати в першу чергу основні показники якості системи. Тому оптимальними є загальні результати, що стосуються всього періоду існування системи.

Недоцільно прагнути до кращих результатів лише однієї стадії життєвого циклу за рахунок зниження загальних показників за усіма стадіями. Очевидно, що неперспективним є деяке незначне зменшення витрат на проектування, що спричиняє суттєве збільшення часу і коштів у процесах побудови та функціонування системи. Отже, необхідно прагнути до загальних оптимальних рішень, що враховують весь життєвий цикл технічної системи.

Комп'ютерні інформаційні технології суттєво скорочують період і, як наслідок, вартість створення системи. Вони підвищують якість створюваних об'єктів та знижують рівень потреби в трудових, матеріальних, фінансових засобах, джерелах. Це реалізується збільшенням імовірності отримання перспективних рішень та використанням комп'ютерного моделювання замість вартісних натурних досліджень.

Для досягнення своєї мети технічна діяльність широко застосовує геометричні властивості та різні величини, що характеризують стан об'єкта дослідження. Геометричні задачі розв'язуються на всіх етапах існування систем, тісно пов'язані з процесами проектування, побудови та функціонування. Тому геометричне моделювання відіграє роль об'єднуючої основи для інших технічних галузей науки у вирішенні поставлених задач. У період експлуатації геометричні величини часто приймаються контрольними параметрами зношування системи. Отже, прикладна геометрія та інженерна графіка існує як об'єднуюча загальна

база взаємодії з іншими галузями науки у виконанні складних комплексних завдань.

1.8. Постановка проблеми дослідження та логічна схема дослідження

На даний час основним засобом забезпечення комфортних умов у будівлі в холодні пори року є транспортування теплового носія від джерела теплопостачання у експлуатовані приміщення. При цьому, в переважній більшості проектних рішень щодо розміщення інженерних споруд та об'єктів теплопостачання (в тому числі альтернативних джерел енергії) використано стандартні шаблонні правила планування, що вирішують лише локальні функціональні задачі окремих будівель, не передбачаючи комплексну оптимізацію систем теплозабезпечення на рівні мікрорайонів та районів. Відтак, розробка універсального математичного апарату оптимізації параметрів положення компонентів системи теплопостачання та будинків-споживачів з урахуванням інженерних та містобудівних обмежень є актуальною проблемою, яка потребує вирішення.

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

Предметом дослідження - методи графо-аналітичного моделювання раціональних мереж систем водопостачання в умовах нової забудови.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що реалізація стратегії сталого енергетичного розвитку України для будинкового фонду й сектору теплопостачання потребує раціональних практичних рішень, які з одного боку будуть економічно- та ресурсо-ощадними при їх впровадженні, а з іншого матимуть високу ступінь довгострокової ефективності енергетичних заходів, якими є планування територіального розміщення інженерних споруд та об'єктів теплопостачання.

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*:

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

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

Наукова новизна 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.

Логічно-структурна схема дослідження представлена на рис. 1.2.

1.9. Висновки до Розділу 1

1. Проведено детальний аналіз теми дослідження, що показав актуальність пошуку ефективних шляхів вирішення задач мінімізації витрат енергоресурсів на потреби будинкового фонду. Аналіз продемонстрував, що вирішення поставлених проблем здійснюються шляхом застосування методів геометричного та комп'ютерного чисельного моделювання. 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.

2. Визначено основні методики 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, прокладанням 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.

3. Проведено аналіз інженерних мереж з метою широкого розуміння сучасного їх стану. З'ясовано, що інженерні мережі перебувають у поганому стані, що суттєво знижує їх рівень надійності та енергоефективності.

4. Проаналізовано наукові методи, що застосовуються при геометричному моделюванні. Показано, що геометричне моделювання широко використовується до вирішення різноманітних прикладних завдань.

5. Результат попереднього аналізу вирішення проблеми продемонстрував актуальність теми дослідження, оскільки 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.

Основні теоретичні положення розділу розкриті в таких публікаціях автора:

1. 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.

2. Орел Ю. Моделювання ефективних зовнішніх інженерних систем в умовах нової забудови / Ю.М. Орел, В. Сковчко , 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.

Розділ 2. Математичні підходи щодо моделювання параметрів зовнішніх мереж водопостачання

2.1. Дискретне моделювання оптимальних параметрів зовнішніх мереж водопостачання засобами прикладної геометрії

Процеси будівництва, ремонту та подальшої експлуатації зовнішніх мереж 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 водопостачання ще на етапі проектування.

Для вирішення зазначеної проблеми необхідно розробити загальний підхід до оптимізації схем мереж водопостачання із урахуванням техніко-економічної доцільності прокладання окремих ділянок трубопроводів на тих чи інших ділянках міжбудинкових територій.

У більшості науково-практичних досліджень, присвячених оптимізації систем водопостачання [23 - 25], 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. Однак, ці дослідження не допомагають покращити проектні рішення інженерних систем таким чином, щоб досягти мінімальних витрат на зведення/експлуатацію та/або максимальних техніко-економічних показників системи за рахунок прийняття принципово якісніших базових її характеристик. Тому інженери продовжують дотримуватися класичних принципів проектування систем водопостачання [26]. В окремих випадках, задля забезпечення вищої

продуктивності та ефективності роботи інженерних системи, фахівці вдаються до математичного вирішення оптимізаційних задач розподілу або перерозподілу ресурсів, що постачаються. При цьому застосовуються переважно класичні методи лінійного програмування [27].

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 [28], 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 (див. рис. 2.1). Тобто, має бути досягнутий мінімум функції:

$$z(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^N ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2)^{1/2}. \quad (2.1)$$

Необхідні умови досягаються системою двох нелінійних рівнянь:

$$\frac{\partial z(x_0, y_0)}{\partial x_0} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{x_0 - x_i}{((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2)^{1/2}} = 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial z(x_0, y_0)}{\partial y_0} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{y_0 - y_i}{((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2)^{1/2}} = 0. \quad (2.3)$$

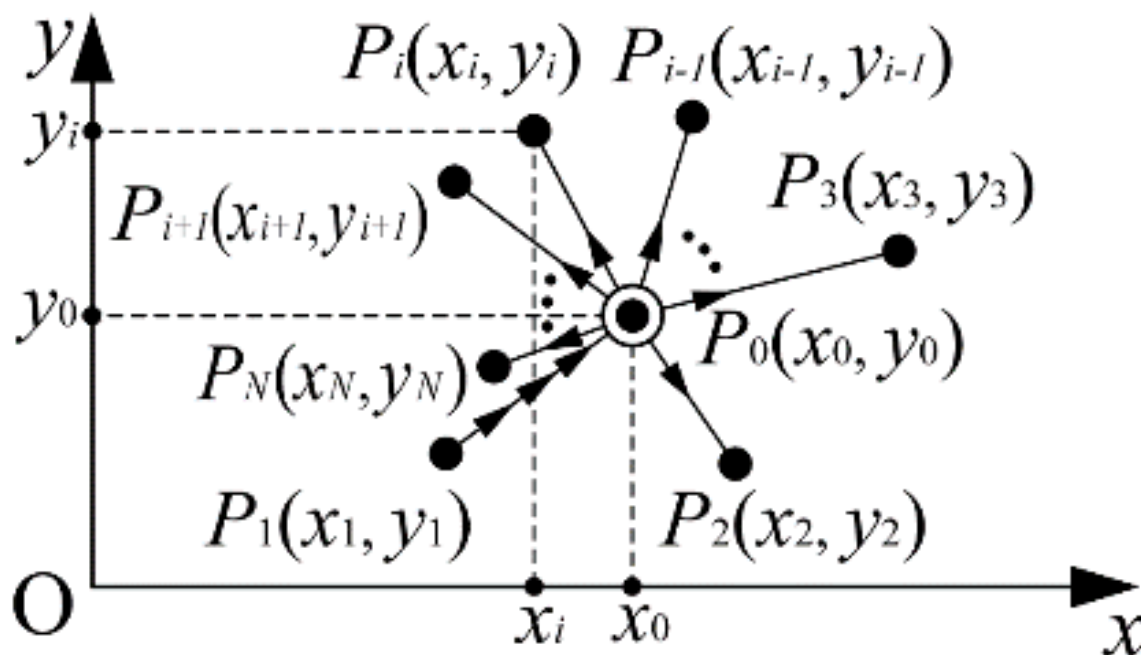


Рисунок 2.1. Пошук оптимальної точки розподілення

Розв'язання цих рівнянь відносно координат x_0 та y_0 методами ітераційного числення дозволяє визначити оптимальне положення точки розподілу ресурсів (точку розгалуження).

Однак, на практиці, через ряд містобудівних умов та обмежень, а також технологічних, інженерно-геологічних й інших факторів, таке планування системи водопостачання виявляється майже неможливим і, як правило, представляє собою складну та досить розгалужену мережу.

Найбільш точний та науково-обґрунтований підхід до оптимізації складних зовнішніх мереж тепlopостачання було зроблено в роботі [29], де була одержана система рівнянь, що визначає положення будь-якої кількості вузлів їх розгалуження:

$$\begin{cases} x_i \cdot \sum_{j=1}^n k_{i,j} - \sum_{j=1}^n (k_{i,j} \cdot x_j) = 0, \\ y_i \cdot \sum_{j=1}^n k_{i,j} - \sum_{j=1}^n (k_{i,j} \cdot y_j) = 0, \end{cases} \quad (2.4)$$

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

$$k_{i,j} = q_{l_{i,j}} \cdot K_{SUP_{i,j}} / ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1/2}. \quad (2.5)$$

Тут: $q_{l_{i,j}}$ 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.

З точки зору прикладної геометрії розв'язання системи (2.4) дозволяє визначити координати мінімальної (по загальній довжині ланок) сітки 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 [30]. Відповідно до цього методу, коефіцієнти (2.5) 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: $k_{i,j} = \text{const}_{ij}$.

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 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:

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j). \quad (2.6)$$

У найпростішому випадку, значення коефіцієнту $k_{i,j}$ може розраховуватися, як функціонал від деякої функції $f(x,y)$ (яка визначатиме поле питомих показників вартості будівництва, ремонту й експлуатації трубопроводів на площині) й, зокрема, як сума функцій $f(x,y)$ від координат i -го та j -го вузлів:

$$F(x_i, x_j, y_i, y_j) = f(x_i, y_i) + f(x_j, y_j). \quad (2.7)$$

Сама ж функція $f(x,y)$ може бути представлена сумою з M інтерполяційних або апроксимаційних радіально-базисних функцій [31], наприклад зворотних квадратичних (2.8) або мультиквадратичних (2.9) функцій:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M a_i / [1 + \varepsilon^2 \cdot ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2)] , \quad (2.8)$$

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M a_i / \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2)} . \quad (2.9)$$

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

Вирішуючи систему рівнянь типу (2.4) за допомогою ітераційного числення та уточнюючи значення коефіцієнтів $k_{i,j}$ на кожному кроці наближень, можна одержати координати найбільш ефективною з техніко-економічної точки зору конфігурацію системи водопостачання.

2.2. Побудова спеціальних цільових функцій при оптимізації геометричних моделей систем водопостачання

В процесі проектування зовнішніх систем водопостачання повинні бути враховані техніко-економічні аспекти їх зведення та подальшої експлуатації. Ці показники повинні бути максимально привабливими з фінансово-економічної точки зору. Відповідно, якщо мова йде про витрати на будівництво та обслуговування й подальший ремонт, то їх питомі значення повинні бути мінімізовані. Якщо ж мова йде про економічні характеристики, пов'язані з прогнозованими обсягами заощаджень, то вони повинні бути максимальними. При класичному підході, оптимізація системи водопостачання потребує побудови цільової функції, екстремуми якої будуть віднайдені та досліджені в процесі пошуку найкращих геометричних параметрів даної системи.

Якщо розглядати в якості цільової функції вартість будівництва й подальшої експлуатації усієї протяжності трубопроводів мережі 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, в залежності від складності рельєфу, наявності чи відсутності інших інженерних систем або споруд, а також від інженерно-геологічних умов.

З рештою, знадобиться 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 й пропонується здійснювати процес формоутворення дискретної геометричної моделі шляхом виконання послідовних наближень при обчисленнях.

Скорочення витрат на зведення й подальшу експлуатацію мереж водопостачання є основним завданням інженерів-проектувальників відповідного профілю. Нажаль, більшість принципів проектування систем водопостачання передбачають застосування шаблонних типових підходів, оснований на

стандартизації рішень та їх максимальному спрощенні. Причиною тому є простота цих рішень й зниження ймовірності допущення помилок при проектуванні та монтажі.

Однак, можливе застосування й нестандартних рішень, причому ще на етапі проектування мережі водопостачання. Це дає змогу значно зекономити, як на будівельно-монтажних роботах, так і на вартості робіт з подальшого обслуговування та ремонту даної мережі, оскільки в такому разі процес оптимізації системи здійснюється на етапі побудови її геометричної схеми й при прийнятті концептуальних і принципових рішень. При цьому процес оптимізації вимагає попереднього встановлення деякої цільової функції, спираючись на яку й будуть виконуватися усі можливі покращення. Якщо в якості основних параметрів, відносно якого 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. Це дасть змогу на основі математичних методів оптимізації розмістити усі елементи мережі таким чином, щоб досягти максимального економічного ефекту від усього життєвого циклу системи. В результаті, геометрична схема розміщення ланок мережі водопостачання повинна передбачати мінімальну вартість їх спорудження й обслуговування відповідно до скалярного поля питомих вартостей, яку й утворюватиме при візуалізації обрана цільова функція. Усе це вказує на необхідність пошуку максимально точного способу побудови цільової функції за відомими або оціночними показниками вартості робіт на окремих ділянках. З геометричної точки зору така задача представляє собою тривимірну інтерполяцію або апроксимацію (якщо це допускається заданим рівнем точності розрахунків) за наперед заданими дискретними даними.

Один із найбільш обґрунтованих з наукової точки зору підхід до вирішення задачі оптимізації геометричних моделей систем водопостачання було представлено у працях [29] та [32], де пропонувалося здійснювати системний пошук координат вільних вузлів розгалуження трубопроводів мережі шляхом

розв'язання рівнянь виду (2.4), де: 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 [32]:

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j). \quad (2.10)$$

Тут: i -й та j -й вузли відповідають початку та кінцю відповідної ланки моделі мережі.

Окрім того, у [32] було зазначено, що в найпростішому випадку, значення коефіцієнту $k_{i,j}$ може розраховуватися, як функціонал від деякої функції $f(x,y)$ (яка визначає поле питомих показників вартості будівництва, ремонту й експлуатації трубопроводів на площині) й, зокрема, як сума функцій $f(x,y)$ від координат i -го та j -го вузлів:

$$F(x_i, x_j, y_i, y_j) = f(x_i, y_i) + f(x_j, y_j). \quad (2.11)$$

В якості функції $f(x,y)$ пропонувалося розглядати суми з M інтерполяційних або апроксимаційних радіально-базисних функцій [31], зокрема зворотних квадратичних або мультікватратичних функцій.

На сьогоднішній день радіально-базисні функції формують один із головних напрямків досліджень у галузі чисельного аналізу. Зокрема, завдяки специфіці характеру їх візуального представлення та функціональної поведінки, вони набули широкого ужитку в дослідженнях та моделюванні штучних нейронних мереж [33] та штучного інтелекту в цілому.

Великою перевагою інтерполювання на основі радіально-базисних функцій є можливість відносно легкого управління їх характером у областях розміщення опорних (базових) точок інтерполяції.

Базуючись на дослідженнях, присвячених застосуванню радіально-базисних функцій у моделюванні нейромереж [33 - 35] та систематизації нерегулярних

даних у цілому [33 - 37, 39 – 44], продемонструємо математичні основи здійснення тривимірної інтерполяції для подальшої оптимізації двовимірної геометричної моделі мережі водопостачання у формі планарного або непланарного графа.

Загалом, задачу інтерполяції у тривимірному просторі можна сформулювати наступним чином: для заданої множини з N точок $\{\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^m \mid i=1,2,\dots,N; m=3\}$ та відповідної множини з N дійсних чисел $\{d_i \in \mathbb{R}^1 \mid i=1,2,\dots,N\}$ знайти функцію $f: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^1$, яка задовольнятиме наступній інтерполяційній умові:

$$f(\mathbf{x}_i) = d_i, (i = 1,2,\dots,N). \quad (2.12)$$

Для визначеної таким чином задачі інтерполяційна поверхня (тобто функція скалярного поля f) має проходити через усю множину N базових точок, що міститимуть інформацію про питомі вартісні показники зведення та експлуатації елементів системи водопостачання d_i . Застосування методу радіально-базисних функцій [33] зводиться до підбору функції f , що матиме вид:

$$f(\mathbf{x}_i) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_i, \quad (2.13)$$

де:

$$\varphi_i = \zeta(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|) = \zeta(r_i). \quad (2.14)$$

У формулах (2.13) та (2.14):

w_i – вагові коефіцієнти, які мають на меті забезпечення проходження інтерполяційної поверхні через усі базові точки;

$\{\varphi_i \mid i=1,2,\dots,N\}$ – множина з N нелінійних (й при необхідності довільних) радіально-базисних функцій;

$\mathbf{x} = (x, y)$ – координати досліджуваної точки на площині;

$\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ – наперед задані координати точок із відомими показниками питомих вартостей d_i , які обираються в якості умовних центрів радіально-базисних функцій;

$\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| = r_i$ – Евклідова норма (хоча в загальному випадку й не обов'язково Евклідова).

Прирівнюючи праві складові тотожностей (2.12) та (2.13), та складаючи систему з одержаних рівнянь, отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{1,i} = d_1, \\ \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{2,i} = d_2, \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{j,i} = d_j, \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{N-1,i} = d_{N-1}, \\ \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_{N,i} = d_N, \end{array} \right. \quad (2.15)$$

де функції $\varphi_{j,i}$ у кожному рівнянні матимуть таку форму:

$$\varphi_{j,i} = \zeta(\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|) = \zeta(r_{j,i}), \quad (i, j) = 1, 2, \dots, N. \quad (2.16)$$

Систему (2.17) можна записати у матричній формі наступним чином:

$$\mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{w} = \mathbf{d}. \quad (2.17)$$

де: \mathbf{w} – вектор вагових коефіцієнтів, розмірності N , що має наступний вид:

$$\mathbf{w} = \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{Bmatrix}; \quad (2.18)$$

\mathbf{d} – вектор питомих вартостей, розмірності N , що має такий вид:

$$\mathbf{d} = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{Bmatrix}; \quad (2.19)$$

Φ – матриця інтерполяційних складових, розмірності $N \times N$, яка містить радіально-базисні функції $\phi_{j,i}$:

$$\Phi = \{\phi_{j,i} \mid (i, j) = 1, 2, \dots, N\}, \quad (2.20)$$

та, інакше кажучи, має такий вид:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \phi_{1,2} & \cdots & \phi_{1,N} \\ \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \cdots & \phi_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N,1} & \phi_{N,2} & \cdots & \phi_{N,N} \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Розв'язання системи (2.17) можна записати у наступній формі:

$$\mathbf{w} = \Phi^{-1} \cdot \mathbf{d}. \quad (2.22)$$

В результаті будуть віднайдені вагові коефіцієнти w_i , використовуючи які можна побудувати єдину інтерполяційну радіально-базисну функцію (2.13).

Для застосування продемонстрованого підходу рекомендується застосовувати одну із найбільш універсальних та добре досліджених радіально-

базисних функцій, зокрема мультікватричної (2.23), зворотної квадратичної (2.24) або зворотної мультікватричної функції у наступній модифікованій формі:

$$\phi_{j,i} = a_i \cdot \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot r_{j,i}^2}, (\varepsilon > 0; a_i \geq 0; r_{j,i} \in \mathfrak{R}); \quad (2.23)$$

$$\phi_{j,i} = \frac{a_i}{(1 + \varepsilon^2 \cdot r_{j,i}^2)}, (\varepsilon > 0; a_i \geq 0; r_{j,i} \in \mathfrak{R}); \quad (2.24)$$

$$\phi_{j,i} = \frac{a_i}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot r_{j,i}^2}}, (\varepsilon > 0; a_i \geq 0; r_{j,i} \in \mathfrak{R}). \quad (2.25)$$

Даний інтерполяційний підхід є точним, але може вимагати витрат значних обчислювальних потужностей комп'ютерного обладнання. В результаті цього ітераційний процес розв'язання системи (2.4) може бути значно ускладнений, оскільки його реалізація потребує написання додаткових розрахункових алгоритмів.

Відтак, доцільно розглянути й інший – апроксимаційний – підхід, що може передбачати практично будь-яку точність визначення показників питомих витрат на будівництво й експлуатацію трубопроводів мережі водопостачання при її оптимізації.

Для цього пропонується замість розв'язання системи рівнянь типу (2.15) одразу задавати апроксимаційні поверхні (або скалярні поля f) у формі наступних середньозважених радіально-базисних зворотних мультікватричних модифікованих функцій:

$$f(x_i, y_i) = \frac{\sum_{i=1}^N d_i \cdot [a_i / (r_i + \varepsilon)]}{\sum_{i=1}^N [a_i / (r_i + \varepsilon)]}, (\varepsilon > 0; a_i \geq 0; d_i \geq 0; r_i \in \mathfrak{R}), \quad (2.26)$$

$$f(x_i, y_i) = \frac{\sum_{i=1}^N d_i \cdot [a_i / (r_i^k + \varepsilon)]}{\sum_{i=1}^N [a_i / (r_i^k + \varepsilon)]}, (k > 0; \varepsilon > 0; a_i \geq 0; d_i \geq 0; r_i \in \mathfrak{R}). \quad (2.27)$$

Функції (2.26) властивий досить плавний характер викривлення і вона являється частковим випадком функції (2.27), коли параметр $k = 1$. Однак, зі зростанням параметру k , характер функції (2.27) стає більш різким у місцях переходу між значеннями даної функції, близькими до двох різних параметрів a_i та a_j ($[(i,j) = 1,2,\dots,M] \wedge [i \neq j]$); \wedge – кон'юнкція.

Очевидно, що чим нижчими є значення параметру ε , тим вища точність застосування апроксимаційної функції, й тим ближчим процес апроксимації стає до процесу інтерполяції. Зокрема, при $\varepsilon \rightarrow 0$ функції (2.26) та (2.27) 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.

2.3. Визначення питомих показників вартості спорудження і експлуатації трубопроводів ефективних систем водопостачання

Розглянемо визначення питомої вартості спорудження трубопроводів на різних ділянках досліджуваної області забудови при моделюванні ефективних з точки зору будівництва і експлуатації мереж систем водопостачання.

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.

В роботах [32] та [29] було запропоновано відносно просту методику пошуку оптимальних геометричних параметрів досліджуваної інженерної системи на основі використання заданих цільових функції. При цьому, рівняння, що визначають координати усіх вузлів розгалуження або зміни напрямку (повороту) ланок інженерних систем описується формулою (2.4), де 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 (2.6), 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, як це представлено у (2.7).

Згідно з [1] 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.

2.3.1. Дискретний підхід до питомого економічного показника зведення і експлуатації досліджуваної ланки трубопроводу

Як уже було сказано вище, найпростіший випадок відповідного показника може бути представлений функціоналом (2.7) $k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j)$ 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:

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j) = \frac{f(x_i, y_i) + f(x_j, y_j)}{2}. \quad (2.28)$$

Однак, такий підхід може дати лише дуже грубе уявлення про вартість спорудження й обслуговування відповідної лани, 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 (2.28) щонайменше одну контрольну точку посередині ланки:

$$k_{i,j} = \frac{f(x_i, y_i) + f\left(\frac{x_j + x_i}{2}, \frac{y_j + y_i}{2}\right) + f(x_j, y_j)}{3}. \quad (2.29)$$

Вираз (2.29) можна переписати у наступній формі:

$$k_{i,j} = \frac{f(x_i, y_i) + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{2}, y_i + \frac{y_j - y_i}{2}\right) + f(x_j, y_j)}{3}. \quad (2.30)$$

В такому разі, ланка буде розділена контрольною точкою на два відрізки, рівні за довжиною.

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:

$$k_{i,j} = \left(\begin{array}{l} f(x_i, y_i) + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{3}, y_i + \frac{y_j - y_i}{3}\right) + \\ + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{3} \cdot 2, y_i + \frac{y_j - y_i}{3} \cdot 2\right) + f(x_j, y_j) \end{array} \right) / 4. \quad (2.31)$$

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:

$$k_{i,j} = \frac{\left(f(x_i, y_i) + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot 1, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot 1\right) + \right.}{n} \quad (2.32)$$

$$\left. + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot 2, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot 2\right) + \right.$$

$$\left. + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot 3, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot 3\right) + \dots \right.$$

$$\left. \dots + f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot (n-2), y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot (n-2)\right) + f(x_j, y_j) \right)$$

У скороченій формі формула (2.32) матиме наступний вид:

$$k_{i,j} = \left(f(x_i, y_i) + \sum_{r=1}^{n-2} f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot r, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot r\right) + f(x_j, y_j) \right) / n, \quad (2.33)$$

або:

$$k_{i,j} = \left(f(x_i, y_i) + \sum_{r=1}^{n-1} f\left(x_i + \frac{x_j - x_i}{n} \cdot r, y_i + \frac{y_j - y_i}{n} \cdot r\right) \right) / n. \quad (2.34)$$

Очевидно, що точність формул (2.33) та (2.34) залежить від кількості точок досліджуваної ланки, і чим більше цих точок, тим вона вища.

2.3.2. Інтегральний підхід до питомого економічного показника зведення і експлуатації досліджуваної ланки трубопроводу

Цей підхід полягає у знаходженні інтегралу в полі функції $f(x,y)$ уздовж ланки, віднесеного до її довжини $L_{i,j}$:

$$k_{i,j} = \int_{L_{i,j}} f(x, y) dl / L_{i,j}. \quad (2.35)$$

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.

2.4. Геометричне моделювання території будівництва за показниками питомих вартостей при оптимізації зовнішніх мереж водопостачання

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 тощо. Всі ці аспекти актуалізують питання оптимізації схем розміщення зовнішніх мереж водопостачання ще на етапі проектування.

Основна увага науково-практичних досліджень з оптимізації систем водопостачання [23 – 25], 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 [27]. В той же час принципи проектування мереж зовнішнього водопостачання, рекомендовані для інженерів-проектувальників є стандартними [26] 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 [28].

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 [29], де була одержана система рівнянь, що визначає положення будь-якої кількості вузлів їх розгалуження (2.4), де $k_{i,j}$ – коефіцієнт, що дорівнює величині параметрів питомих тепловтрат, віднесених до довжин окремих ділянок, й визначається за формулою (2.5).

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 відобразатиме рівень питомої вартості прокладання трубопроводів на різних ділянках досліджуваної території.

Таким чином, виглядає більш доцільним 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.

Розглянемо систему рівнянь (2.4), з точки зору прикладної геометрії. Таким чином, розв'язання системи (2.4) дозволяє визначити координати мінімальної (по загальній довжині ланок) сітки із урахуванням коефіцієнтів щільності взаємодії між окремими вузлами (k_{ij}). Якщо ж до (2.4) застосувати апроксимацію зрівноваженою сіткою, сформованою відповідно до статико-геометричного методу дискретної геометрії [30], то в результаті отримаємо координати сітки, яка буде мати достатньо високу точність та наблизитись до мінімальної. Відповідно до цього методу, коефіцієнти (2.5) у більшості випадках приймаються сталими величинами, тобто: $k_{ij} = \text{const}$. В даному випадку k_{ij} 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_{ij} величину, яка відобразить рівень питомої вартості прокладання трубопроводів на різних ділянках досліджуваної території під будівництво. Отже, коефіцієнт пропорційності k_{ij} буде залежати від координат початку і кінця кожної ланки, тобто деякого i -го та j -го вузлів і може бути поданий функціональною залежністю (2.36):

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j). \quad (2.36)$$

Для найпростішого випадку можемо записати:

$$F(x_i, x_j, y_i, y_j) = f(x_i, y_i) + f(x_j, y_j). \quad (2.37)$$

Відповідно до (2.37) 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 [45] свідчить про доцільність використання у якості апроксимаційних функцій для даного типу задач саме радіально-базисних функцій [31]. Прикладом найбільш вживаних радіально-базисних функцій є зворотні квадратичні (2.38) або мультікватичні (2.39) функції:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M z_i / [1 + \varepsilon^2 \cdot ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2)], \quad (2.38)$$

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M z_i / \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2)}. \quad (2.39)$$

В формулах (2.38) та (2.39) використані наступні позначення: z_i – значення питомих показників вартості у опорних точках з координатами x_i та y_i ; ε – коефіцієнт гладкості апроксимації між опорними точками функції $f(x,y)$; M – кількість опорних точок.

В якості основної радіально-базисної функції приймемо функцію (2.39). 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

мультикватрична радіально-базисна функція може бути записана у вигляді функції (2.40).

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M z_i / \left(\left[\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right]^r + \varepsilon \right) . \quad (2.40)$$

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

2.5. Висновки до Розділу 2

1. Вирішуючи систему рівнянь типу (2.4) за допомогою ітераційного числення та уточнюючи значення коефіцієнтів k_{ij} на кожному кроці наближень, можна одержати координати найбільш ефективної з техніко-економічної точки зору конфігурацію системи водопостачання.

2. Продемонстровано підходи до побудови цільових функцій техніко-економічних показників систем водопостачання, що дозволяють відносно просто описувати розподіл їх питомих вартісних показників у формі поверхонь або скалярних полів, утворених на основі радіально-базисних функцій. Користуючись даними полями можна здійснювати оптимізацію геометричних моделей відповідних систем ще на етапі проектування. Це дає змогу в подальшому уникати перевитрат матеріальних, фінансових та трудових ресурсів під час будівництва, обслуговування, ремонту та експлуатації мереж.

3. 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.

4. Запропоновано 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, пропонована 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). Результати моделювання території будівництва за показниками питомих вартостей її ділянок дозволяють виконати попередній передпроектний аналіз вихідних даних, на основі графічного відображення цих показників. 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.

Основні теоретичні положення розділу розкриті в таких публікаціях автора:

1. 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.

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.

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.

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

Розділ 3. Практичне застосування запропонованих математичних моделей до зовнішніх мереж водопостачання

3.1. Геометричне моделювання оптимальної траєкторії прокладання трубопроводу ефективних систем водопостачання

На етапі проектування трасування трубопроводів зовнішніх інженерних мереж, в тому числі і мережі водопостачання, виникає необхідність врахування ряду критеріїв. Це пов'язано із тим, що зовнішні інженерні мережі, як правило, прокладаються у чітко обмежених межах територій загального користування, суміщаються з траєкторіями інших інженерних мереж та транспортних сполучень, їх обслуговування вимагає зведення додаткових експлуатаційних та захисних інженерних споруд. Окрім того, подальші економічні збитки на проведення планових ремонтних робіт та усунення наслідків аварій на зовнішніх мережах значною мірою будуть залежати від цінності самих ділянок, на яких проектується їх розташування, довжин трубопроводів, їх розгалуження тощо. Всі ці аспекти актуалізують питання оптимізації схем розміщення зовнішніх мереж водопостачання ще на етапі проектування.

Дослідження [23 - 25], як і більшість науково-практичних досліджень, присвячених оптимізації систем водопостачання зосереджені на аспектах удосконалення та реновації вже існуючих мереж та устаткування шляхом налагодження режимів постачання, модернізації систем автоматизації та моніторингу і контролю витрат водних ресурсів. В той же час проектні рішення інженерних систем щодо мінімізації витрат на зведення/експлуатацію та/або підвищення техніко-економічних показників системи за рахунок прийняття принципово якісніших базових її характеристик залишаються поза належною увагою. Рекомендації щодо проектування систем водопостачання [26] ґрунтуються на класичних підходах. Досвід практичної реалізації проектів прокладання інших зовнішніх інженерних мереж показує, що задля забезпечення вищої продуктивності та ефективності роботи інженерних системи, інженерам-проектувальникам доводиться вирішувати оптимізаційні задачі розподілу або

перерозподілу ресурсів, що постачаються, класичними методами математики. Наприклад, методами лінійного програмування [27, 28].

Пошуку оптимальних геометричних параметрів досліджуваної інженерної системи на основі використання заданих цільових функції присвячено роботу [29] та описано дослідження у підрозділі 2.1 Розділу 2 даного дисертаційного дослідження. Було розглянуто основні методичні принципи щодо визначення оптимальних параметрів їх геометричних моделей при проектуванні систем водопостачання та теплопостачання. У підрозділі 2.2 Розділу 2 розглядаються питання визначення коефіцієнтів, що відображають питомі показники вартості будівництва й експлуатації окремих ланок трубопроводів теплопостачання на відповідних ділянках їх прокладання. Ці коефіцієнти виражаються через деяку функцію $f(x,y)$, яка може бути побудованою як на основі інтерполяції, так і апроксимації із застосуванням радіально-базисних функцій [31, 34, 35, 38 - 40, 43]. Ці ідеї набули подальшого дослідження в [26], де було запропоновано підходи до визначення питомих економічних показників спорудження й подальшої експлуатації трубопроводів на різних ділянках досліджуваної області забудови; також обґрунтовується дискретний підхід до обчислення відповідних показників.

Нехай відомі результатами аналізу території будівництва мережі водопостачання за показниками вартості (цінності) земельних ділянок. Прийmemo наступні значення питомих вартостей земельних ділянок:

Таблиця 3.1

Вихідні значення питомих вартостей земельних ділянок

| Позначення визначеної ділянки за показниками питомої вартості | Показники питомої вартості (цінності) земельних ділянок | Координатами центру ваг ділянки | |
|---|---|---------------------------------|----------------|
| | | $x_{0,i}$ | $y_{0,i}$ |
| ділянка А | $z_{0,A} = 5$ | $x_{0,A} = 80$ | $y_{0,A} = 60$ |
| ділянка В | $z_{0,B} = 4$ | $x_{0,B} = 40$ | $y_{0,B} = 70$ |
| ділянка С | $z_{0,C} = 3$ | $x_{0,C} = 100$ | $y_{0,C} = 50$ |
| ділянка D | $z_{0,D} = 2$ | $x_{0,D} = 50$ | $y_{0,D} = 20$ |

| | | | |
|-----------|----------------|----------------|----------------|
| ділянка E | $z_{0,E} = 11$ | $x_{0,E} = 60$ | $y_{0,E} = 50$ |
|-----------|----------------|----------------|----------------|

Для візуалізації розподілу питомих вартостей земельних ділянок по досліджуваній території доцільно використати зважені функції згідно з формулою (3.1):

$$z_0(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N z_{0,i} \cdot f(x_{0,i}, y_{0,i})}{\sum_{i=1}^N f(x_{0,i}, y_{0,i})} = \frac{\sum_{i=1}^N z_{0,i} \cdot 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,i} - x)^2 + (y_{0,i} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right)}{\sum_{i=1}^N 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,i} - x)^2 + (y_{0,i} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right)}, \quad (3.1)$$

де $z_0(x, y)$ – функція, що задає вихідну поверхню розподілу вартостей земельних ділянок;

$x_{0,i}, y_{0,i}, z_{0,i}$ – координати центрів ваг i -ї визначеної ділянки;

$i=1, \dots, N$, де N – кількість визначених ділянок з різною цінністю;

x, y – координати довільної точки в межах заданої області значень;

ε – коефіцієнт гладкості апроксимації між опорними точками функції $f(x, y)$;

k – ступінь мультіквадратичної базисної функції, найоптимальніше значення для вирішення поставленої задачі при $k=20$.

Перепишемо (3.1) для заданого вище випадку з п'яти ділянок різної питомої вартості, при цьому введемо наступні обмеження $x \in (0;150)$ та $y \in (0;150)$:

$$z_0(x, y) = \frac{z_{0,A} \cdot 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,A} - x)^2 + (y_{0,A} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right) + z_{0,B} \cdot 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,B} - x)^2 + (y_{0,B} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right) +}{1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,A} - x)^2 + (y_{0,A} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right) + 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,B} - x)^2 + (y_{0,B} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right) +} \\ + \frac{z_{0,C} \cdot 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,C} - x)^2 + (y_{0,C} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right) + z_{0,D} \cdot 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,D} - x)^2 + (y_{0,D} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right) +}{+ 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,C} - x)^2 + (y_{0,C} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right) + 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,D} - x)^2 + (y_{0,D} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right) +} \\ + \frac{z_{0,E} \cdot 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,E} - x)^2 + (y_{0,E} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right)}{+ 1 / \left(\left[\sqrt{(x_{0,E} - x)^2 + (y_{0,E} - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right)}.$$

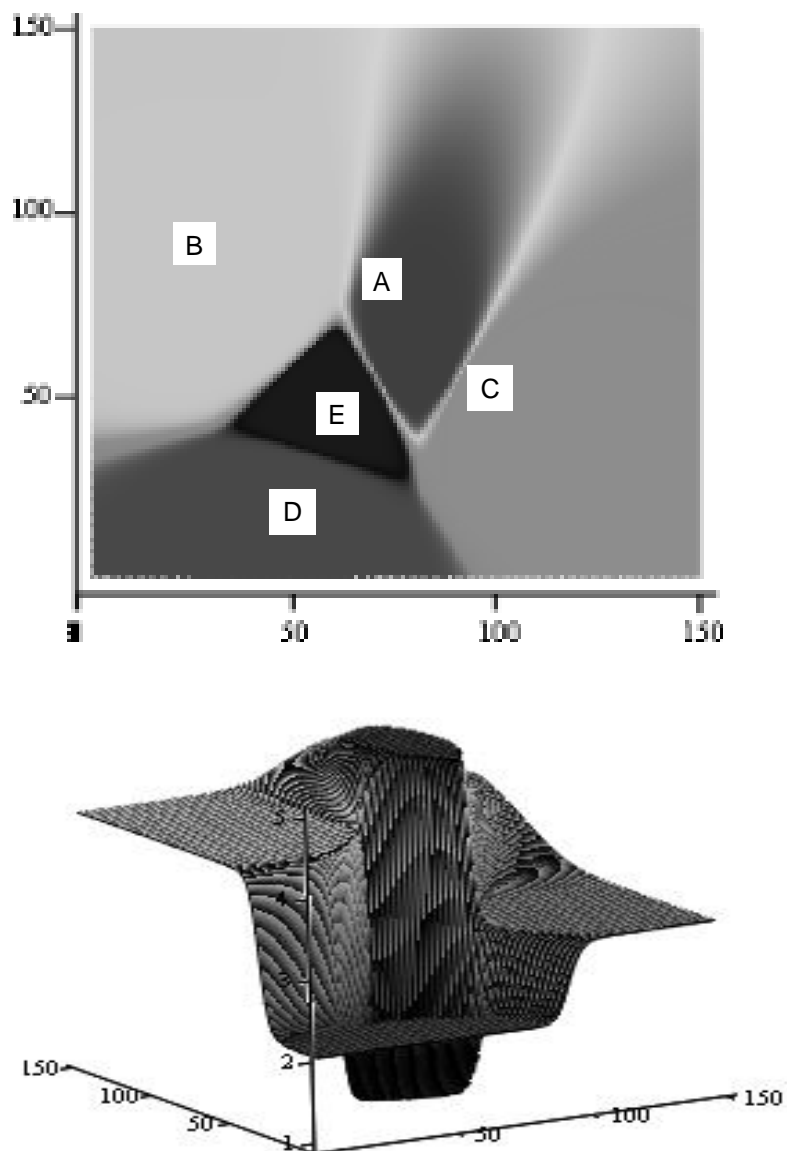


Рис. 3.1. Поверхня $z_0(x, y)$ значень питомих вартостей земельних (містобудівних) ділянок

На рисунку 3.2 задана топологічна схема прокладання трубопроводу мережі водопостачання між домогосподарствами. На практиці такі схеми виконуються інженерами-проектувальниками на основі стандартних рекомендацій [26]. Початкові координати вузлів вводу системи водопостачання зведено в табл. 3.2.

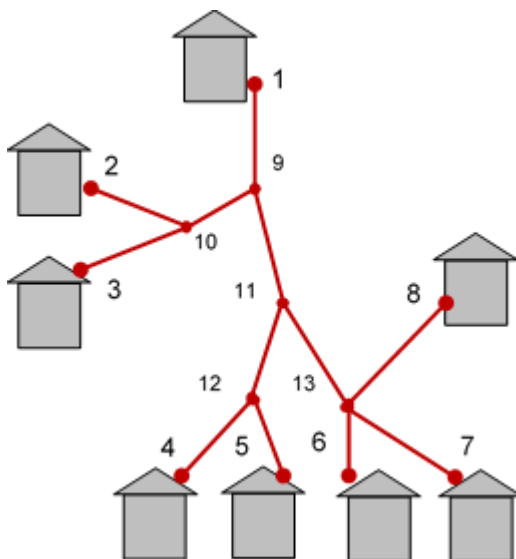


Рис. 3.2. Топологічна схема прокладки трубопроводу

Таблиця 3.2

Значення вихідних координат вузлів системи водопостачання

| Номер вузла | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-------------|-----|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|
| x (м) | 70 | 20 | 20 | 50 | 80 | 100 | 130 | 130 | 70 | 50 | 80 | 70 | 100 |
| y (м) | 100 | 100 | 80 | 20 | 20 | 20 | 20 | 70 | 100 | 90 | 70 | 40 | 40 |

З метою визначення рівнів питомої вартості прокладання трубопроводів по довжині ділянок системи водопостачання застосуємо підхід до оптимізації прокладання трубопроводів системи водопостачання, запропонований в [29]. Отже, маємо систему рівнянь, що визначає положення будь-якої кількості вузлів їх розгалуження:

$$\begin{cases} x_i \cdot \sum_{j=1}^n k_{i,j} - \sum_{j=1}^n (k_{i,j} \cdot x_j) = 0, \\ y_i \cdot \sum_{j=1}^n k_{i,j} - \sum_{j=1}^n (k_{i,j} \cdot y_j) = 0, \end{cases} \quad (3.2)$$

де $k_{i,j}$ – коефіцієнт, що дорівнює величині параметрів питомої вартості прокладання трубопроводів по довжині ділянок системи водопостачання.

Відповідно до статико-геометричного методу дискретної геометрії [30], коефіцієнти $k_{i,j}$ характеризують силу взаємодії між окремими вузлами, що їх сполучають. Як запропоновано в [46], в якості коефіцієнта $k_{i,j}$ варто прийняти величину, яка відобразить рівень питомої вартості прокладання трубопроводів на різних ділянках досліджуваної міжбудинкової території. Тобто коефіцієнт $k_{i,j}$ буде залежати від координат початку і кінця кожної ділянки, тобто деякого i -го та j -го вузлів:

$$k_{i,j} = F(x_i, x_j, y_i, y_j). \quad (3.3)$$

Функціональні залежності оптимального розміщення вузлів приймаються на основі базисної функції розподілу питомих вартостей ділянок $z_0(x, y)$.

$$k_{i,j} = \frac{z_0(c) + z_0\left(\frac{x_j + x_i}{2}, \frac{y_j + y_i}{2}\right) + z_0(x_j, y_j)}{3} \quad (3.4)$$

Відповідно до рис. 3.2 визначаємо функціональні залежності коефіцієнтів пропорційності $k_{i,j}$ для кожного вузла відносно сполучних до нього ланок трубопроводу з індексом i, j .

Для вузла 9 маємо 3 ділянки 9-1, 9-10 та 9-11, отже коефіцієнти пропорційності приймуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned} k_{9,1} &= \frac{z_0(x_9, y_9) + z_0\left(\frac{x_1 + x_9}{2}, \frac{y_1 + y_9}{2}\right) + z_0(x_1, y_1)}{3}; \\ k_{9,10} &= \frac{z_0(x_9, y_9) + z_0\left(\frac{x_{10} + x_9}{2}, \frac{y_{10} + y_9}{2}\right) + z_0(x_{10}, y_{10})}{3}; \\ k_{9,11} &= \frac{z_0(x_9, y_9) + z_0\left(\frac{x_{11} + x_9}{2}, \frac{y_{11} + y_9}{2}\right) + z_0(x_{11}, y_{11})}{3}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Далі виконуємо аналогічні підстановки для решти вузлів.

Для вузла 10 маємо 3 ланки трубопроводу 10-2, 10-3 та 10-9 та коефіцієнти пропорційності:

$$\begin{aligned}
 k_{10,2} &= \frac{z_0(x_{10}, y_{10}) + z_0\left(\frac{x_2 + x_{10}}{2}, \frac{y_2 + y_{10}}{2}\right) + z_0(x_2, y_2)}{3}; \\
 k_{10,3} &= \frac{z_0(x_{10}, y_{10}) + z_0\left(\frac{x_3 + x_{10}}{2}, \frac{y_3 + y_{10}}{2}\right) + z_0(x_3, y_3)}{3}; \\
 k_{10,9} &= \frac{z_0(x_{10}, y_{10}) + z_0\left(\frac{x_9 + x_{10}}{2}, \frac{y_9 + y_{10}}{2}\right) + z_0(x_9, y_9)}{3}.
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Для вузла 11 маємо 3 ланки трубопроводу 11-9, 11-12 та 11-13 та коефіцієнти пропорційності:

$$\begin{aligned}
 k_{11,9} &= \frac{z_0(x_{11}, y_{11}) + z_0\left(\frac{x_9 + x_{11}}{2}, \frac{y_9 + y_{11}}{2}\right) + z_0(x_9, y_9)}{3}; \\
 k_{11,12} &= \frac{z_0(x_{11}, y_{11}) + z_0\left(\frac{x_{12} + x_{11}}{2}, \frac{y_{12} + y_{11}}{2}\right) + z_0(x_{12}, y_{12})}{3}; \\
 k_{11,13} &= \frac{z_0(x_{11}, y_{11}) + z_0\left(\frac{x_{13} + x_{11}}{2}, \frac{y_{13} + y_{11}}{2}\right) + z_0(x_{13}, y_{13})}{3}.
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Для вузла 12 маємо 3 ланки трубопроводу 12-4, 12-5 та 12-11 та коефіцієнти пропорційності:

$$\begin{aligned}
k_{12,4} &= \frac{z_0(x_{12}, y_{12}) + z_0\left(\frac{x_4 + x_{12}}{2}, \frac{y_4 + y_{12}}{2}\right) + z_0(x_4, y_4)}{3}; \\
k_{12,5} &= \frac{z_0(x_{12}, y_{12}) + z_0\left(\frac{x_5 + x_{12}}{2}, \frac{y_5 + y_{12}}{2}\right) + z_0(x_5, y_5)}{3}; \\
k_{12,11} &= \frac{z_0(x_{12}, y_{12}) + z_0\left(\frac{x_{11} + x_{12}}{2}, \frac{y_{11} + y_{12}}{2}\right) + z_0(x_{11}, y_{11})}{3}.
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Для вузла 12 маємо 4 ланки трубопроводу 13-6, 13-7, 13-8 та 13-11 та коефіцієнти пропорційності:

$$\begin{aligned}
k_{13,11} &= \frac{z_0(x_{13}, y_{13}) + z_0\left(\frac{x_{11} + x_{13}}{2}, \frac{y_{11} + y_{13}}{2}\right) + z_0(x_{11}, y_{11})}{3}; \\
k_{13,6} &= \frac{z_0(x_{13}, y_{13}) + z_0\left(\frac{x_6 + x_{13}}{2}, \frac{y_6 + y_{13}}{2}\right) + z_0(x_6, y_6)}{3}; \\
k_{13,7} &= \frac{z_0(x_{13}, y_{13}) + z_0\left(\frac{x_7 + x_{13}}{2}, \frac{y_7 + y_{13}}{2}\right) + z_0(x_7, y_7)}{3}; \\
k_{13,8} &= \frac{z_0(x_{13}, y_{13}) + z_0\left(\frac{x_8 + x_{13}}{2}, \frac{y_8 + y_{13}}{2}\right) + z_0(x_8, y_8)}{3}.
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Отримані коефіцієнти пропорційності підставляємо в (3.2) та складаємо систему рівнянь (3.10) для визначення рівнів питомої вартості прокладання трубопроводів по довжині ланок мережі водопостачання:

$$\begin{aligned}
k_{9,1} \cdot (x_9 - x_1) + k_{9,10} \cdot (x_9 - x_{10}) + k_{9,11} \cdot (x_9 - x_{11}) &= 0 \\
k_{10,2} \cdot (x_{10} - x_2) + k_{10,3} \cdot (x_{10} - x_3) + k_{10,9} \cdot (x_{10} - x_9) &= 0 \\
k_{11,9} \cdot (x_{11} - x_9) + k_{11,12} \cdot (x_{11} - x_{12}) + k_{11,13} \cdot (x_{11} - x_{13}) &= 0 \\
k_{12,4} \cdot (x_{12} - x_4) + k_{12,5} \cdot (x_{12} - x_5) + k_{12,11} \cdot (x_{12} - x_{11}) &= 0 \\
k_{13,11} \cdot (x_{13} - x_{11}) + k_{13,6} \cdot (x_{13} - x_6) + k_{13,7} \cdot (x_{13} - x_7) + k_{13,8} \cdot (x_{13} - x_8) &= 0
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
 k_{9,1} \cdot (y_9 - y_1) + k_{9,10} \cdot (y_9 - y_{10}) + k_{9,11} \cdot (y_9 - y_{11}) &= 0 \\
 k_{10,2} \cdot (y_{10} - y_2) + k_{10,3} \cdot (y_{10} - y_3) + k_{10,9} \cdot (y_{10} - y_9) &= 0 \\
 k_{11,9} \cdot (y_{11} - y_9) + k_{11,12} \cdot (y_{11} - y_{12}) + k_{11,13} \cdot (y_{11} - y_{13}) &= 0 \\
 k_{12,4} \cdot (y_{12} - y_4) + k_{12,5} \cdot (y_{12} - y_5) + k_{12,11} \cdot (y_{12} - y_{11}) &= 0 \\
 k_{13,11} \cdot (y_{13} - y_{11}) + k_{13,6} \cdot (y_{13} - y_6) + k_{13,7} \cdot (y_{13} - y_7) + k_{13,8} \cdot (y_{13} - y_8) &= 0
 \end{aligned}$$

Дана система рівнянь вирішується ітераційним способом, а точність розрахунку визначається як абсолютна максимальна похибка між початковими та ітераційними значеннями. Результати розрахунку зведено в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3

Результати визначення рівнів питомої вартості прокладання трубопроводів по довжині ланок мережі водопостачання

| № вузла | Вихідні умови | | 1-а ітерація | | 2-а ітерація | | 3-я ітерація | | 4-а ітерація | |
|--------------------------------------|---------------|-------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|------------------------|--------|
| | x_i | y_i | x_i | y_i | x_i | y_i | x_i | y_i | x_i | y_i |
| 1 | 70 | 130 | 70 | 130 | 70 | 130 | 70 | 130 | 70 | 130 |
| 2 | 20 | 100 | 20 | 100 | 20 | 100 | 20 | 100 | 20 | 100 |
| 3 | 20 | 80 | 20 | 80 | 20 | 80 | 20 | 80 | 20 | 80 |
| 4 | 50 | 20 | 50 | 20 | 50 | 20 | 50 | 20 | 50 | 20 |
| 5 | 80 | 20 | 80 | 20 | 80 | 20 | 80 | 20 | 80 | 20 |
| 6 | 100 | 20 | 100 | 20 | 100 | 20 | 100 | 20 | 100 | 20 |
| 7 | 130 | 20 | 130 | 20 | 130 | 20 | 130 | 20 | 130 | 20 |
| 8 | 130 | 70 | 130 | 70 | 130 | 70 | 130 | 70 | 130 | 70 |
| 9 | 70 | 100 | 62,498 | 93,814 | 62,151 | 93,448 | 62,148 | 93,439 | 62,148 | 93,44 |
| 10 | 50 | 90 | 34,639 | 91,314 | 34,08 | 91,152 | 34,073 | 91,148 | 34,073 | 91,149 |
| 11 | 80 | 70 | 79,832 | 63,536 | 79,31 | 63,221 | 79,31 | 63,218 | 79,311 | 63,219 |
| 12 | 70 | 40 | 72,508 | 43,633 | 72,313 | 43,565 | 72,229 | 43,574 | 72,299 | 43,577 |
| 13 | 100 | 40 | 107,648 | 44,935 | 108,223 | 44,354 | 108,223 | 44,354 | 108,223 | 44,354 |
| Максимальна абсолютна похибка | | | 15,361 | | 0.581 | | 0.014 | | 3,518x10 ⁻³ | |

Даний метод продемонстрував добру збіжність ітераційного розрахунку. Значення максимальної абсолютної похибки склали – 3,518·10⁻³ свідчить про те,

що подальші ітерації не потрібні, оскільки значення похибки далі буде лише зменшуватись.

За отриманими результатами розрахунку на рисунку 3.3 побудовано нову оптимальну схему розміщення вузлів системи водопостачання з урахуванням питомих вартостей прокладання трубопроводу.

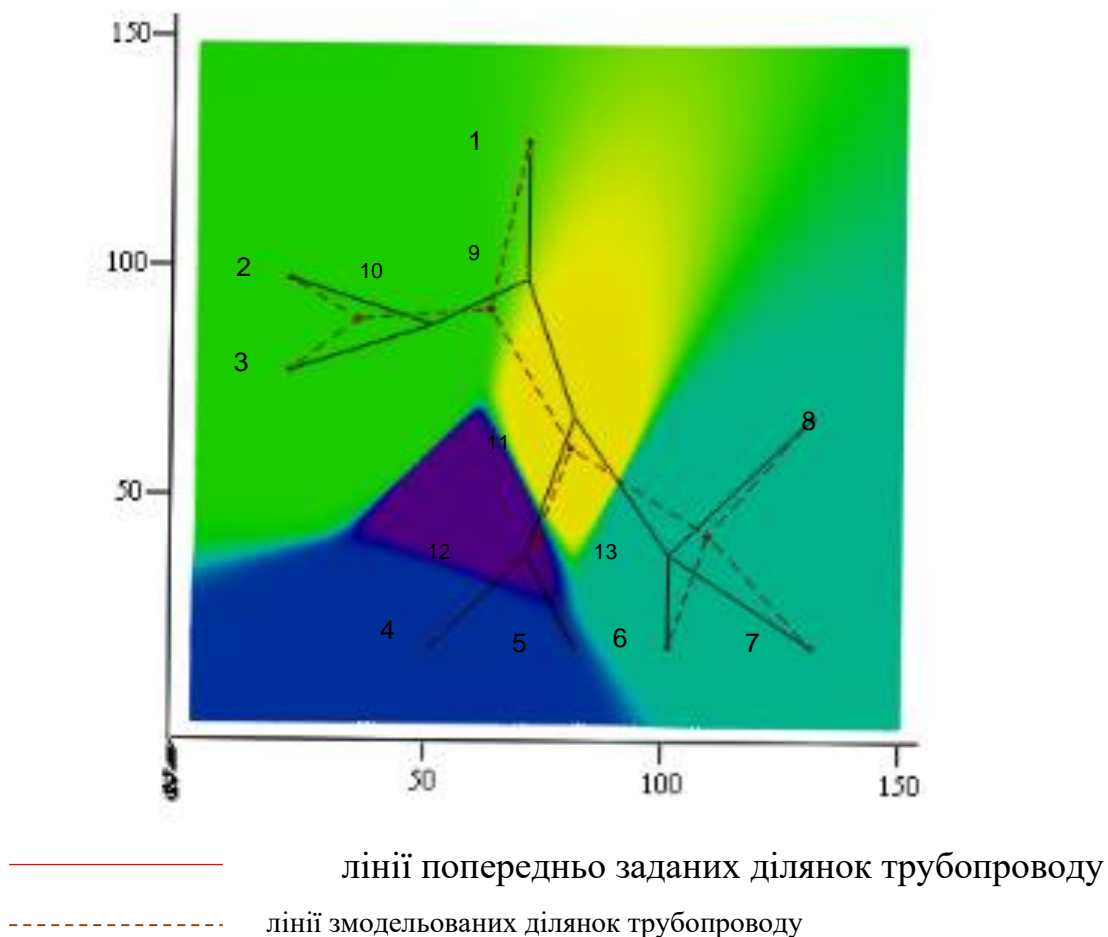


Рис. 3.3. Візуалізація результатів моделювання оптимізації траєкторій прокладки трубопроводів

Величина витрат матеріалів залежить від довжини кожної з прокладеної ділянки трубопроводу водопостачання. Тому економію прокладки трубопроводу можна виразити через різницю довжин вихідної системи трубопроводу та змодельованої, а саме:

$$\sum \delta_{0,ij} - \sum \delta_{ij} = 24.486,$$

$$\frac{\sum \delta_{0,ij} - \sum \delta_{ij}}{\sum \delta_{0,ij}} \cdot 100\% = 6,73\% , \quad (3.11)$$

де $\delta_{0,ij} = \sqrt{(x_{0,i} - x_{0,j})^2 + (y_{0,i} - y_{0,j})^2}$ – довжина ділянки трубопроводу з індексом ij вузлів її меж,

$\delta_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ – довжини отриманих під час моделювання ділянок трубопроводу,

i та j – індекси вузлів на межах ділянок, що розглядається.

Питомі вартості прокладання трубопроводів водопостачання визначаються довжиною прокладеної ділянки δ_{ij} з урахуванням коефіцієнту пропорційності питомої вартості положення вузла на містобудівній ділянці k_{ij} . Тобто:

$$q_{ij} = \delta_{ij} \cdot k_{ij} . \quad (3.12)$$

Формула для визначення початкових вартостей буде аналогічною, тільки в цьому випадку приймаються до розрахунку значення початкової довжини та коефіцієнту пропорційності.

Економія витрат прокладки трубопроводу за розрахунковими даними порівняно з вихідними складе:

$$\sum q_{0,ij} - \sum q_{ij} = 130,93 ,$$

$$\frac{\sum q_{0,ij} - \sum q_{ij}}{\sum q_{0,ij}} \cdot 100\% = 10,34\% . \quad (3.13)$$

Результати моделювання оптимальної траєкторії прокладки трубопроводу показали ефективність запропонованого підходу. Загальна економія витрат на прокладання системи трубопроводів при заданих економічних показниках розподілу вартостей на певній ділянці місцевості склала більше 10% при зменшенні загальної протяжності системи трубопроводів майже на 7%. Тобто при незначних корегуваннях положення вузлів розгалуження системи трубопроводів, економічний ефект доцільного використання містобудівних площ матиме достатньо високий показник.

3.2. Геометричне моделювання території будівництва за показниками питомої вартості (цінності) її окремих ділянок.

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 3.4.

Таблиця 3.4

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 Е | $z_E = 1,3$ | $x_E = 67$ | $y_E = 52$ |

Для візуалізації геометричної моделі (рис. 3.4) розподілу питомих вартостей ділянок будівельної території використаємо зважені функції згідно з (29):

$$z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N z_i \cdot f(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i, y_i)} = \frac{\sum_{i=1}^N z_i \cdot 1 / \left(\left[\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right)}{\sum_{i=1}^N 1 / \left(\left[\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right]^k + \varepsilon \right)}. \quad (3.12)$$

Перепишемо (3.12) 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 $\varepsilon = 0,00001$.

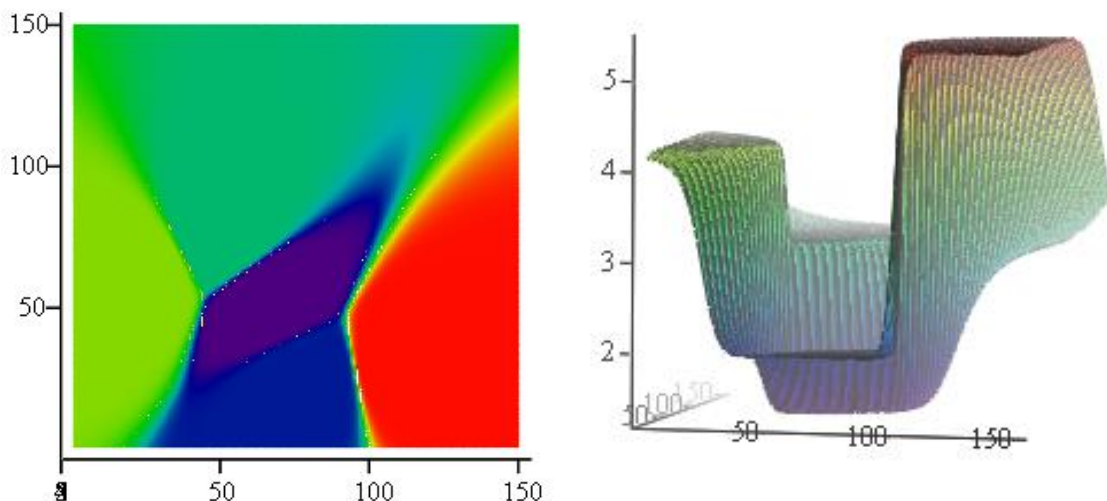


Рис. 3.4. Поверхня $z(x, y)$ значень питомих вартостей земельних (містобудівних) ділянок: а) в плані; б) в аксонометрії

3.3. Висновки до Розділу 3

В розділі представлено результати практичної апробації отриманих основних результатів дослідження:

1. Здійснено практичну апробацію застосування геометричного моделювання оптимальної траєкторії прокладання трубопроводу ефективних 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 виконується із застосуванням принципів статико-геометричного методу дискретної геометрії. Коефіцієнти, що характеризують силу взаємодії між окремими вузлами, що сполучають окремі ланки трубопроводу, приймаються рівними величині параметрів питомої вартості прокладання трубопроводів по довжині ділянок системи водопостачання. Функціональні залежності оптимального розміщення вузлів трубопроводів визначаються на основі запропонованої базисної функції розподілу питомих вартостей земельних ділянок. Положення вузлів розгалуження такої системи визначаються в результаті вирішення системи нелінійних рівнянь. Практичне вирішення дозволить значно скоротити подальші як будівельні, так і експлуатаційні витрати на мережі водопостачання ще на етапі виконання проектних робіт.
2. Проведено практичну апробацію геометричного моделювання території будівництва за показниками питомої вартості (цінності) її окремих ділянок, що демонструє вплив розподілу питомих вартостей земельних ділянок 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.

Основні теоретичні положення розділу розкриті в таких публікаціях автора:

1. 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.

2. 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

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

Розділ 4. Програмна реалізація математичних моделей до зовнішніх мереж водопостачання

Даний розділ присвячено розробці алгоритмів програмної реалізації методу графо-аналітичного моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання. Сукупність алгоритмічних засобів передбачає створення системи підтримки прийняття рішення [98 – 101] з метою вдосконалення процесу автоматизації проектування мереж водопостачання за рахунок визначення траєкторій прокладки трубопроводів та вузлів їх розгалуження для досягнення максимальної економічної та технологічної ефективності.

4.1. Основні положення розробки інформаційної системи моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання.

Сформулюємо основні вимоги, що повинні бути пред'явлені до інформаційної системи моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання:

1. Користувачеві інформаційної системи необхідно надавати можливість отримання необхідного набору оцінок характеристик моделі з необхідною точністю і достовірністю. Дана вимога повинна забезпечуватись повнотою опису моделі.
2. Система повинна давати користувачеві можливість відтворення різних ситуацій при варіюванні структури, алгоритмів і параметрів моделі. Дана вимога повинна забезпечуватись гнучкістю системи.
3. Загальна тривалість процесу отримання результатів моделювання повинна бути по можливості мінімальною при обліку обмежень на наявні ресурси.
4. Створена інформаційна система моделювання повинна допускати можливість заміни, додавання і виключення деяких частин без переробки всієї системи. Дана вимога до системи може бути забезпечена використанням блокової структури.

5. Інформаційне забезпечення повинно надавати можливість ефективної роботи моделі з базою даних.

6. Програмні та технічні засоби повинні забезпечувати ефективну реалізацію моделі і зручне спілкування з нею користувача.

7. Повинно бути реалізовано зручний спосіб вводу вхідних даних та виведення початкових, проміжних та кінцевих результатів моделювання.

Урахування вищевказаних вимог є справедливим при розробці як цілісної системи, а також її підсистем та елементів. Процес розробки комп'ютерної програми, включаючи розробку і машинну реалізацію моделі, є ітераційним. Цей ітераційний процес повинен тривати до тих пір, поки не буде отримана така система, яку можна вважати адекватною в рамках вирішення поставленого завдання.

При машинному моделюванні системи характеристики процесу її функціонування визначаються на основі запропонованої математичної моделі, побудованої виходячи з наявної вихідної інформації про об'єкт моделювання – мережі трубопроводів системи водопостачання. При отриманні нової інформації про об'єкт модель може бути переглянута і уточнена з урахуванням нової інформації.

Таким чином, моделювання системи передбачає вирішення додаткових задач:

а) для дослідження системи щодо її чутливості до змін структури, алгоритмів і параметрів об'єкта моделювання і зовнішнього середовища;

б) для аналізу і синтезу різних варіантів системи і вибору серед конкуруючих такого варіанту, який задовольняв би заданому критерію оцінки ефективності системи при прийнятих обмеженнях;

в) для отримання інформації, з метою доповнення результатів натурних випробувань або експлуатаційних показників мереж водопостачання.

4.2. Етапи програмної реалізація алгоритмів моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання.

Створення автоматизованої системи підтримки прийняття рішення щодо проектування ресурсоефективних зовнішніх мереж системи водопостачання передбачає розробку комплексу програм, ядром якого повинна стати система програмного моделювання на основі запропонованого графо-аналітичного методу моделювання мереж трубопроводів систем водопостачання. Для успішного виконання програмної реалізації алгоритмів моделювання необхідним є застосування системного підходу [98, 99]. Отже, пропонується виконувати розробку відповідної програми за етапами наведеними нижче.

1. Перевірка достовірності моделі інформаційної системи.

Перевірка достовірності моделі інформаційної системи є першою з перевірок, які виконуються на етапі її реалізації.

Інформаційна система, що розглядається вище, виконує лише інтерпретацію математичної моделі, яка є, в свою чергу, лише наближеним описом процесу функціонування реальної системи водопостачання. Таким чином, до тих пір, поки не доведена достовірність моделі, не можна стверджувати, що з її допомогою будуть отримані результати, що збігаються з тими, які могли б бути отримані при проведенні натурного експерименту з реальною системою. Тому визначення достовірності моделі можна вважати найбільш важливою проблемою при розробці систем програмного моделювання. Від вирішення цієї проблеми залежить ступінь довіри до результатів, отриманих методом моделювання.

На цьому етапі перевіряються:

- а) послідовність вирішення поставленого завдання;
- б) точність алгоритмічних схем реалізації моделі;
- в) повнота логічної схеми моделі;
- г) правильність використовуваних математичних співвідношень.

Відповідна перевірка всіх цих положень слугує підтвердженням правильності прийнятих рішень. Тобто можна вважати, що є логічна схема реалізації моделі, придатна для подальшої роботи з її реалізації на ЕОМ.

2. Вибір інструментальних засобів для моделювання

На цьому етапі приймається рішення щодо використання технічних засобів та програмного забезпечення для реалізації моделі системи, в т.ч. мови програмування.

Питання зводиться до забезпечення таких вимог:

- а) наявність необхідних програмних і технічних засобів;
- б) доцільність прийнятих характеристик технічних засобів та програмного забезпечення;
- в) можливість забезпечення всіх етапів реалізації моделі;
- г) можливість інтегрування отриманих результатів в інші системи.

3. Складання специфікації і побудова схеми програми

На цьому етапі виконується формалізоване представлення вимог (складання специфікації), що висуваються до програми, які повинні бути задоволені при її розробці, а також опис завдання, умови та ефекту дії без вказівки способу його досягнення [98]. Також виконується побудова самої схеми програми, яка повинна відображати:

- її архітектуру (розбиття моделі на блоки, підблоки, модулі тощо), особливості програмування, передбачення проведення можливих змін;
- можливості тестування програми;
- форму представлення вхідних і вихідних даних.

При цьому окрема увага повинна бути приділена особливостям обраної для реалізації моделі мови програмування. Зокрема, в даній дисертаційній роботі програмна реалізація запропонованої математичної моделі виконана в програмному середовищі MathCAD. Проте така програмна реалізація моделі має певні функціональні обмеження та потребує від користувача високого рівня професійної підготовки та вимагає ручного керування процесом моделювання.

Універсальною формою подання алгоритмів моделювання незалежно від мови програмування, що буде використана для її реалізації, є форма логічної структури процесів функціонування системи – логічна схема програми.

Інтерпретацією логічної схеми алгоритму моделювання є схема програми на базі конкретної алгоритмічної мови (з використанням конкретних програмно-технічних засобів моделювання) [98, 99].

Схеми алгоритмів моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання наведені нижче в підрозділі 4.3 даної роботи. Для їх зображення використано символи на основі ГОСТ 19.701-90 (ИСО 5807-85) «Єдина система програмної документації. Схеми алгоритмів, програм, даних та систем», а саме:



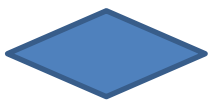
«процес»

– символ відображає функцію обробки даних будь-якого виду, що передбачає виконання певної операції або групи операцій;



«підготовка»

– символ відображає модифікацію команди або групи команд з метою впливу на деяку подальшу функцію;



«рішення»

– символ відображає рішення або функцію перемикача, що має один вхід і ряд альтернативних виходів, один і тільки один з яких може бути активізований;



«ручна операція»

– символ відображає будь-який процес, що виконується людиною (процес прийняття рішення);



«дані»

– символ відображає отримання результату виконання будь-якого процесу, що може супроводжуватись виводом результатів в зовнішнє середовище;



«термінатор»

– символ відображає вихід в або вхід із зовнішнього середовища (початок або кінець схеми алгоритму, зовнішнє використання або пункт призначення даних);



«носій»

– символ відображає середовище збереження даних з можливістю виконання дій над ними – базу даних.

4. Верифікація і перевірка достовірності схеми програми

На цьому етапі виконується перевірка виконання вимог, що висуваються до програми, які повинні бути задоволені при її розробці та відповідає специфікації на програму.

Необхідним є перевірка відповідності кожної операції в логічній схемі моделі відповідної їй операції в схемі програмної реалізації. При проходженні верифікації схеми програми, яка відображає всі операції логічної схеми моделі, виконується перехід до етапу програмування. При використанні пакетів прикладних програм моделювання, може проводитися безпосередня генерація робочих програм для моделювання конкретного об'єкта [98].

5. Перевірка достовірності програми

На цьому етапі виконується остання перевірка програмної реалізації моделі. Дана перевірка може виконуватись різними способами. Найбільш вживаними є:

- цілісна перевірка програми на контрольному прикладі моделювання системи (у нашому випадку, мереж систем водопостачання). На цьому етапі окрім точності і достовірності результатів моделювання, бажаним є перевірка оцінки витрат машинного часу на моделювання (в т.ч. можливих безмежних циклів), перевірка звітів щодо системних помилок;

- часткова перевірка окремих частин (модулів) програми під час вирішення різних тестових завдань;

- за необхідності виконання зворотного перекладу програми в вихідну логічну схему, що дає можливість відслідкувати причини збоїв, відхилень розрахунків від тестових значень.

Після успішного проходження перевірок достовірності програмної реалізації моделі складається технічна документація, яка повинна містити: логічну схему моделі і схему програм; повний текст програми; перелік вхідних і вихідних величин з поясненнями; інструкцію по роботі з програмою; зазначення необхідних ресурсів для конкретних програмно-технічних засобів.

4.3. Розробка програмних блоків інформаційної системи моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання

Програмна реалізація алгоритмів моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання забезпечується у формі сукупності взаємопов'язаних між собою структурних блоків (підпрограм). Структура загальної комплексної програми подана на рисунку 4.1.

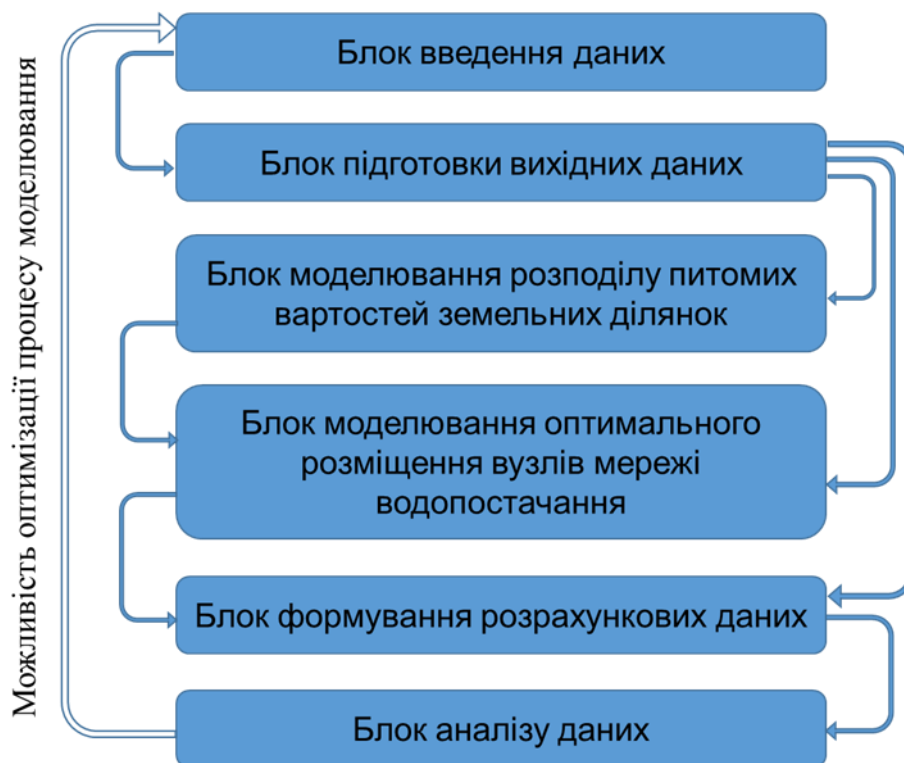


Рис. 4.1. Логічна схема взаємозв'язку між структурними блоками програмного комплексу моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання

Програмний комплекс моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання містить 6 блоків. Кожен блок є окремим модулем з визначеним функціональним призначенням: Цими блоками є:

1. Блок «Введення даних»;
2. Блок «Підготовки вихідних даних»;

3. Блок «Моделювання розподілу питомих вартостей земельних ділянок»;
4. Блок «Моделювання оптимального розміщення вузлів мережі водопостачання»;
5. Блок «Формування розрахункових даних»;
6. Блок «Аналіз даних».

Блоки складаються з модулів допоміжних програм для введення вихідних даних та параметрів, розрахунку значень функціональних характеристик та виведення результатів розрахунків.

4.3.1. Програмний блок «Введення даних»

Блок введення даних призначений для ручного внесення у систему початкових параметрів та характеристик моделей будівельної території та мережі трубопроводів системи водопостачання.

Вихідними даними є:

- загальні дані про проект (назва проекту, індикатор місця будівництва, примітки тощо);
- параметри та умовні одиниці вимірювань розрахункової моделі;
- характеристики території будівництва мережі водопостачання:
 - генеральний план території будівництва;
 - контури (координати) ділянок території, які можуть відноситись до різного типу, мати відмінні показники вартості (цінності) земельних ділянок;
 - лінії та контури (координати) будівель та інженерних споруд.
- характеристики мережі водопостачання:
 - індексація та координати стаціонарних (положення визначено) та проектних (положення яких необхідно визначити) вузлів трубопроводу;
 - топологічна схема прокладання трубопроводу у вигляді таблиць відношень (зв'язків) кожного вузла;

- додаткові вихідні параметри вузлів трубопроводу.

Введення даних в цьому блоці відбувається через «стандартні» вікна з наперед заданими активними полями для внесення відповідно значення обраного параметра або характеристики.

Також повинні бути передбачені функціональні кнопки, за допомогою яких надається можливість створювати та зберігати внесену інформацію, завантажувати раніше підготовлену (збережену) інформацію із зовнішніх файлів.

4.3.2. Програмний блок «Підготовки вихідних даних»

Блок підготовки вихідних даних призначений для виконання допоміжних процедур отримання вихідних даних задля їх подальшого внесення у систему початкових параметрів та характеристик моделей будівельної території та мережі трубопроводів системи водопостачання.

Даний блок може містити різні набори програмних інструментів і повинен визначатися технічним завданням на розробку програмного комплексу моделювання ефективних мереж систем водопостачання. До прикладів найбільш затребуваних підпрограм слід віднести графічний інтерфейс для побудови та визначення координат точок контурів, відрізків, окремо розташованих точок на плані місцевості; графічний інтерфейс для завдання топологічної структури мережі трубопроводів системи водопостачання, що моделюється; калькулятор відстаней; калькулятор площ та інші.

4.3.3. Програмний блок «Моделювання розподілу питомих вартостей земельних ділянок»

Блок моделювання розподілу питомих вартостей земельних ділянок, як зрозуміло із назви, призначений для виконання розрахунку поля характеристик цінності (питомої вартості) ділянок будівельної території.

Даний блок є окремою підпрограмою, що складається із трьох функціональних програмних модулів.



Рис. 4.2. Блок-схема програмного блоку «Моделювання розподілу питомих вартостей земельних ділянок» програмного комплексу моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання

1. Модуль введення даних містить наступні складові:

- «введення вхідних параметрів»;
- «задання методу аналізу»;
- «задання зважених базисних функцій»;
- «задання крайових умов».

2. Розрахунковий модуль:

- «формування вихідних даних щодо території будівництва»;
- «аналіз території за показниками вартості земельних ділянок»;
- «привласнення показників питомих вартостей центрам ваг ділянок»;
- моделювання поверхні розподілу показників вартостей ділянок».

3. Модуль виводу даних:

- «Банк даних»;

- «формування дискретної моделі поверхні розподілу вартості земельних ділянок»;
- «візуалізація поверхні розподілу вартості земельних ділянок».

4.3.4. Програмний блок «Моделювання оптимального розміщення вузлів мережі водопостачання»

Даний блок є також окремою підпрограмою, що складається із трьох функціональних програмних модулів.

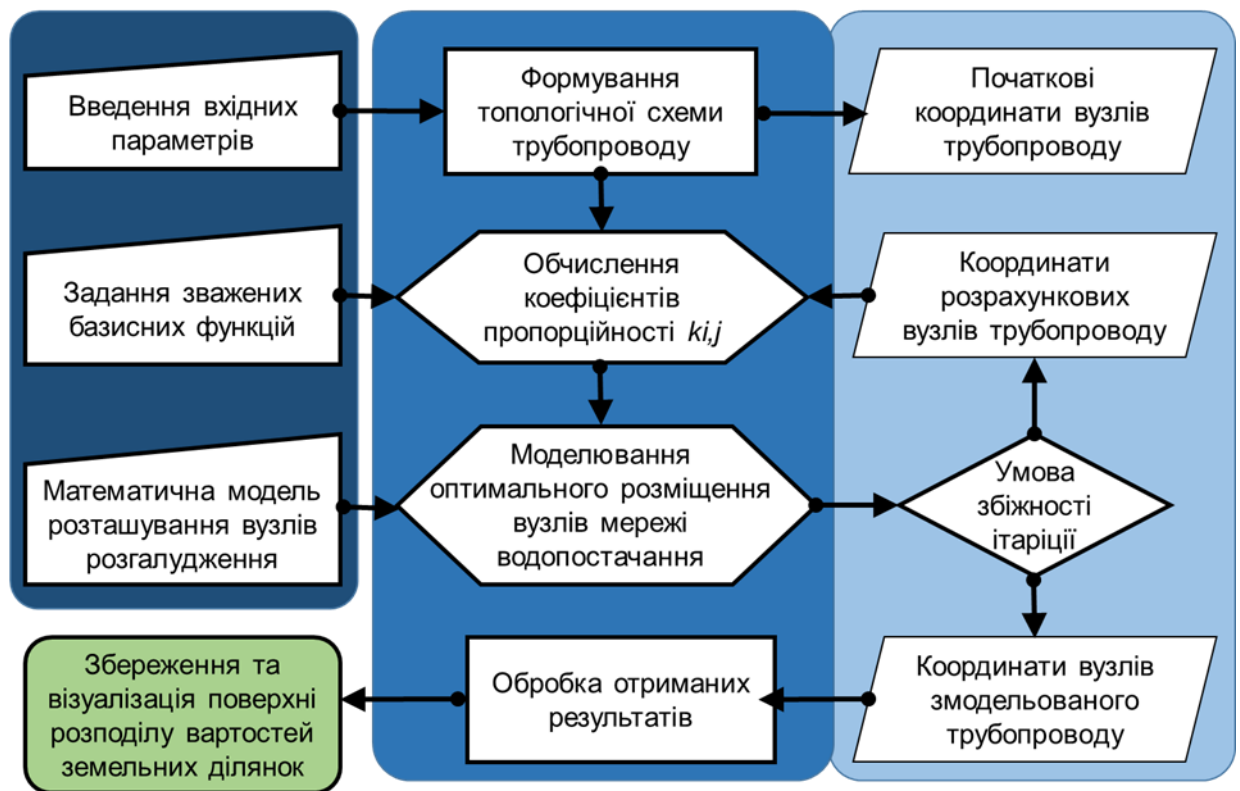


Рис. 4.3. Блок-схема програмного блоку «Моделювання оптимального розміщення вузлів мережі водопостачання» програмного комплексу моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання

1. Модуль введення даних містить наступні складові:

- «введення вхідних параметрів»;
- «задання зважених базисних функцій»;
- «задання математичної моделі розташування вузлів розгалудження»;

2. Розрахунковий модуль:

- «формування топологічної схеми трубопроводу»;
- «обчислення коефіцієнтів пропорційності»;
- «моделювання оптимального розміщення вузлів мережі трубопроводів системи водопостачання»;
- «обробка отриманих результатів».

3. Модуль виводу даних:

- «початкові координати вузлів трубопроводу»;
- «координати розрахункових координат трубопроводу»;
- «умова збіжності ітерацій»;
- «координати вузлів змодельованого трубопроводу».

4. Модуль збереження та візуалізації мережі трубопроводів на поверхні розподілу вартості земельних ділянок.

4.3.5. Програмний блок «Формування розрахункових даних»

Блок має функціональну можливість збереження, конвертації та візуалізації отриманих результатів моделювання для подальшого виводу інформації на дисплей та друк.

4.3.6. Програмний блок «Аналіз даних»

Блок аналізу даних має функціональні можливості оцінки отриманих результатів моделювання з метою проведення контрольних перевірок точності та достовірності системи, а також передачі результатів аналізу даних на запит виконання корегування або повторної оптимізації процесу моделювання.

4.4. Моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання в програмному середовищі MathCAD

З точки зору зручності, наочності, дотримання точності розрахунків та швидкості виконання програмної реалізації досліджуваної вище математичної моделі мереж водопостачання у програмному середовищі було обрано математичний пакет програм MathCAD. Основною перевагою пакета є те, що відсутня необхідність володіння користувачем окремої мови програмування, а вирішення розрахункових задач виконується на звичній «математичній мові». Програмна реалізація моделі виконується у вигляді документу, сформованого текстовим редактором, в якому використані загальноприйняті математичні записи рівнянь та стандартні елементи програмного коду, що мають функціональність, тобто є активними програмними операторами. Це дозволяє одночасно виконувати математичні розрахунки, отримувати результати розрахунків у різних формах та форматах подання, в тому числі графічних, супроводжувати їх відповідним текстом, коментарями та роз'ясненнями.

На рисунках 4.4 - 4.9 наведено окремі фрагменти програмної реалізації алгоритмів моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання в програмному середовищі MathCAD. Проведені розрахунки у програмному середовищі MathCAD мають хорошу збіжність ітераційного розрахунку. Окрім цього, такий підхід продемонстрував вірність запропонованих логічних схем програмування.

Однак в той же час виявились певні функціональні обмеження та складності такої реалізації. Основним недоліком є те, що у випадку зміни початкових даних моделі виникає необхідність проведення корегування документу програми (наприклад, якщо мережа трубопроводів, що проектується, буде мати топологічну схему відмінну від топологічної схеми раніше реалізованої мережі, з іншою кількістю вузлів розгалуження та ін.), що вимагає від користувача високого рівня професійної підготовки та вимагає ручного керування процесом моделювання.

Mathcad - [Безымянный:1]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Обычный Arial 10 B I U

ORIGIN := 1

Given

1. Початкові умови моделювання:

Координати центру ваг ділянки

xA := 80 yA := 60
 xB := 40 yB := 70
 xC := 100 yC := 50
 xD := 50 yD := 20
 xE := 60 yE := 50

Показники питомої вартості (цінності) земельних ділянок

zA := 5
 zB := 4
 zC := 3
 zD := 2
 zE := 1

Коефіцієнт гладкості апроксимації між опорними точками функції $f(x,y)$

$\epsilon := 0.000001$

Ступінь мультікватратичної базисної функції

k := 20

Прийнята базисна функція

$$z1(x,y) := \frac{zA \cdot \frac{1}{\sqrt{(xA-x)^2 + (yA-y)^2}^k + \epsilon} + zB \cdot \frac{1}{\sqrt{(xB-x)^2 + (yB-y)^2}^k + \epsilon} + zC \cdot \frac{1}{\sqrt{(xC-x)^2 + (yC-y)^2}^k + \epsilon} + zD \cdot \frac{1}{\sqrt{(xD-x)^2 + (yD-y)^2}^k + \epsilon} + zE \cdot \frac{1}{\sqrt{(xE-x)^2 + (yE-y)^2}^k + \epsilon}}{\frac{1}{\sqrt{(xA-x)^2 + (yA-y)^2}^k + \epsilon} + \frac{1}{\sqrt{(xB-x)^2 + (yB-y)^2}^k + \epsilon} + \frac{1}{\sqrt{(xC-x)^2 + (yC-y)^2}^k + \epsilon} + \frac{1}{\sqrt{(xD-x)^2 + (yD-y)^2}^k + \epsilon} + \frac{1}{\sqrt{(xE-x)^2 + (yE-y)^2}^k + \epsilon}}$$

Нажмите F1, чтобы открыть справку. АВТО NUM Страница 1

Рис. 4.4. Фрагмент реалізації Блоку «Введення даних» в програмному середовищі MathCAD

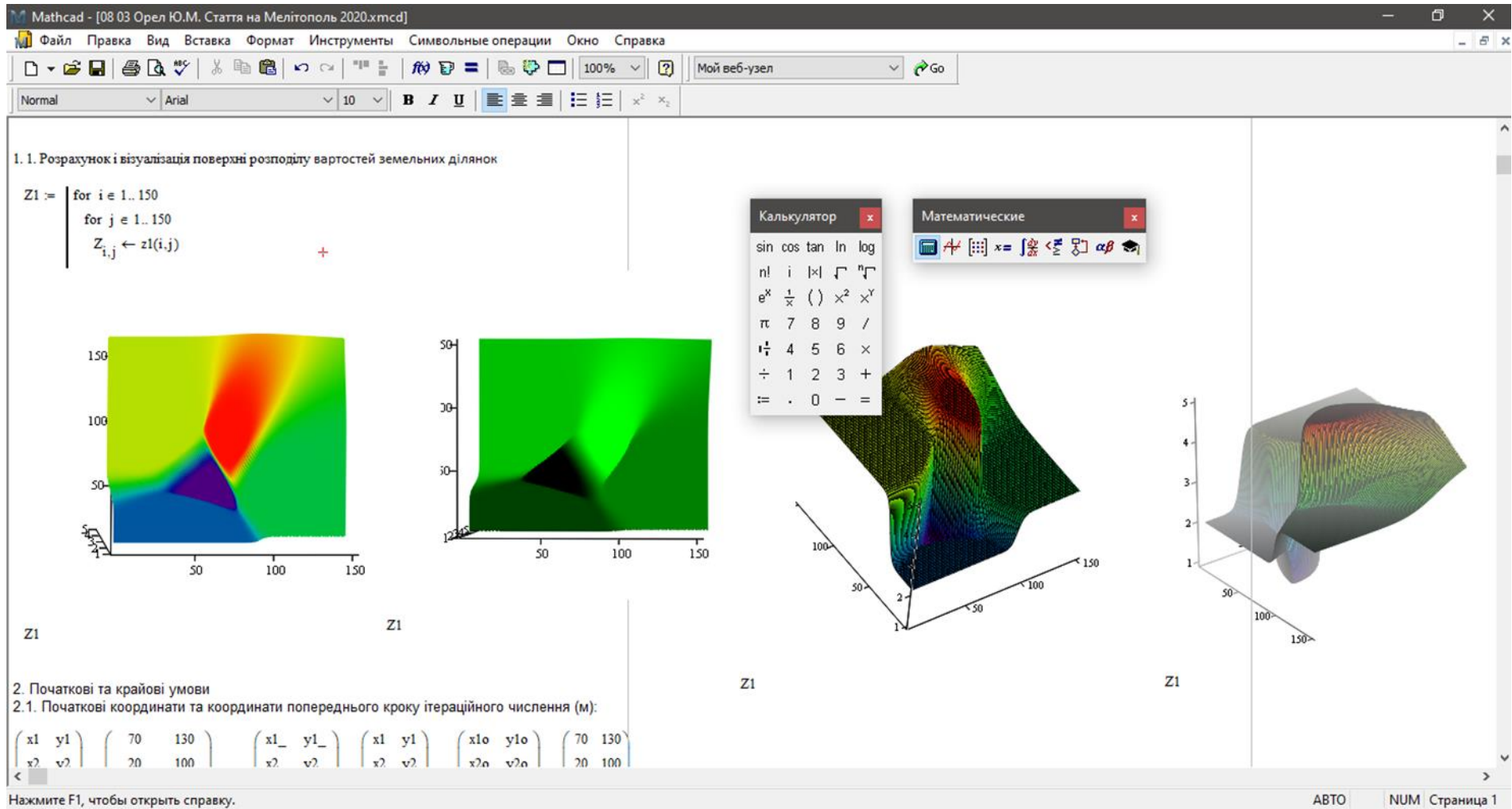


Рис. 4.5. Фрагмент реалізації Блоку «Моделювання розподілу питомих вартостей земельних ділянок» в програмному середовищі MathCAD

Mathcad - [08 03 Орел Ю.М. Стаття на Мелітополь 2020.xmcd]

Файл Правка Вид Вставка Формат Інструменти Символьні операції Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

2. Початкові та крайові умови
 2.1. Початкові координати та координати попереднього кроку ітераційного числення (м):

| | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|---------|--------|------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-----|-----|
| x_1 | y_1 | 70 | 130 | $x_{1_}$ | $y_{1_}$ | x_1 | y_1 | x_{1o} | y_{1o} | 70 | 130 |
| x_2 | y_2 | 20 | 100 | $x_{2_}$ | $y_{2_}$ | x_2 | y_2 | x_{2o} | y_{2o} | 20 | 100 |
| x_3 | y_3 | 20 | 80 | $x_{3_}$ | $y_{3_}$ | x_3 | y_3 | x_{3o} | y_{3o} | 20 | 80 |
| x_4 | y_4 | 50 | 20 | $x_{4_}$ | $y_{4_}$ | x_4 | y_4 | x_{4o} | y_{4o} | 50 | 20 |
| x_5 | y_5 | 80 | 20 | $x_{5_}$ | $y_{5_}$ | x_5 | y_5 | x_{5o} | y_{5o} | 80 | 20 |
| x_6 | y_6 | 100 | 20 | $x_{6_}$ | $y_{6_}$ | x_6 | y_6 | x_{6o} | y_{6o} | 100 | 20 |
| x_7 | y_7 | 130 | 20 | $x_{7_}$ | $y_{7_}$ | x_7 | y_7 | x_{7o} | y_{7o} | 130 | 20 |
| x_8 | y_8 | 130 | 70 | $x_{8_}$ | $y_{8_}$ | x_8 | y_8 | x_{8o} | y_{8o} | 130 | 70 |
| x_9 | y_9 | 62.148 | 93.439 | $x_{9_}$ | $y_{9_}$ | x_9 | y_9 | x_{9o} | y_{9o} | 70 | 100 |
| x_{10} | y_{10} | 34.073 | 91.148 | $x_{10_}$ | $y_{10_}$ | x_{10} | y_{10} | x_{10o} | y_{10o} | 50 | 90 |
| x_{11} | y_{11} | 79.31 | 63.218 | $x_{11_}$ | $y_{11_}$ | x_{11} | y_{11} | x_{11o} | y_{11o} | 80 | 70 |
| x_{12} | y_{12} | 72.299 | 43.574 | $x_{12_}$ | $y_{12_}$ | x_{12} | y_{12} | x_{12o} | y_{12o} | 70 | 40 |
| x_{13} | y_{13} | 108.223 | 44.353 | $x_{13_}$ | $y_{13_}$ | x_{13} | y_{13} | x_{13o} | y_{13o} | 100 | 40 |

3. Питомі коефіцієнти пропорційності питомої вартості прокладання трубопроводів по довжині ділянок теплотрас:

$$K_{9_1} := \frac{z_1(x_9, y_9) + z_1\left[\left(\frac{x_9 + x_1}{2}\right), \left(\frac{y_9 + y_1}{2}\right)\right] + z_1(x_1, y_1)}{3} = 4.117$$

$$K_{9_10} := \frac{z_1(x_9, y_9) + z_1\left[\left(\frac{x_9 + x_{10}}{2}\right), \left(\frac{y_9 + y_{10}}{2}\right)\right] + z_1(x_{10}, y_{10})}{3} = 4.01$$

$$K_{9_11} := \frac{z_1(x_9, y_9) + z_1\left[\left(\frac{x_9 + x_{11}}{2}\right), \left(\frac{y_9 + y_{11}}{2}\right)\right] + z_1(x_{11}, y_{11})}{3} = 4.676$$

$$K_{10_2} := \frac{z_1(x_2, y_2) + z_1\left[\left(\frac{x_2 + x_{10}}{2}\right), \left(\frac{y_2 + y_{10}}{2}\right)\right] + z_1(x_{10}, y_{10})}{3} = 4$$

$$K_{10_3} := \frac{z_1(x_3, y_3) + z_1\left[\left(\frac{x_3 + x_{10}}{2}\right), \left(\frac{y_3 + y_{10}}{2}\right)\right] + z_1(x_{10}, y_{10})}{3} = 4$$

$$K_{10_9} := \frac{z_1(x_9, y_9) + z_1\left[\left(\frac{x_9 + x_{10}}{2}\right), \left(\frac{y_9 + y_{10}}{2}\right)\right] + z_1(x_{10}, y_{10})}{3} = 4.01$$

$$K_{11_9} := \frac{z_1(x_9, y_9) + z_1\left[\left(\frac{x_9 + x_{11}}{2}\right), \left(\frac{y_9 + y_{11}}{2}\right)\right] + z_1(x_{11}, y_{11})}{3} = 4.676$$

$$K_{11_12} := \frac{z_1(x_{12}, y_{12}) + z_1\left[\left(\frac{x_{12} + x_{11}}{2}\right), \left(\frac{y_{12} + y_{11}}{2}\right)\right] + z_1(x_{11}, y_{11})}{3} = 3.673$$

$$K_{11_13} := \frac{z_1(x_{13}, y_{13}) + z_1\left[\left(\frac{x_{13} + x_{11}}{2}\right), \left(\frac{y_{13} + y_{11}}{2}\right)\right] + z_1(x_{11}, y_{11})}{3}$$

Нажмите F1, чтобы открыть справку. АВТО NUM Страница 2

Рис. 4.6. Фрагмент реалізації Блоку «Моделювання оптимального розміщення вузлів мережі водопостачання» в програмному середовищі MathCAD

Mathcad - [08 03 Орел Ю.М. Стаття на Мелітополь 2020.xmcd]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

5. Розв'язання та максимальна абсолютна похибка:

$$\begin{pmatrix} x_9 & y_9 \\ x_{10} & y_{10} \\ x_{11} & y_{11} \\ x_{12} & y_{12} \\ x_{13} & y_{13} \end{pmatrix} = \text{Find} \left(\begin{pmatrix} x_9 & y_9 \\ x_{10} & y_{10} \\ x_{11} & y_{11} \\ x_{12} & y_{12} \\ x_{13} & y_{13} \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 62.148 & 93.44 \\ 34.073 & 91.149 \\ 79.311 & 63.219 \\ 72.299 & 43.577 \\ 108.223 & 44.354 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \\ x_5 & y_5 \\ x_6 & y_6 \\ x_7 & y_7 \\ x_8 & y_8 \\ x_9 & y_9 \\ x_{10} & y_{10} \\ x_{11} & y_{11} \\ x_{12} & y_{12} \\ x_{13} & y_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 70 & 130 \\ 20 & 100 \\ 20 & 80 \\ 50 & 20 \\ 80 & 20 \\ 100 & 20 \\ 130 & 20 \\ 130 & 70 \\ 62.148 & 93.44 \\ 34.073 & 91.149 \\ 79.311 & 63.219 \\ 72.299 & 43.577 \\ 108.223 & 44.354 \end{pmatrix} \quad \max \left(\begin{pmatrix} x_{1_} & y_{1_} \\ x_{2_} & y_{2_} \\ x_{3_} & y_{3_} \\ x_{4_} & y_{4_} \\ x_{5_} & y_{5_} \\ x_{6_} & y_{6_} \\ x_{7_} & y_{7_} \\ x_{8_} & y_{8_} \\ x_{9_} & y_{9_} \\ x_{10_} & y_{10_} \\ x_{11_} & y_{11_} \\ x_{12_} & y_{12_} \\ x_{13_} & y_{13_} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \\ x_5 & y_5 \\ x_6 & y_6 \\ x_7 & y_7 \\ x_8 & y_8 \\ x_9 & y_9 \\ x_{10} & y_{10} \\ x_{11} & y_{11} \\ x_{12} & y_{12} \\ x_{13} & y_{13} \end{pmatrix} \right) = 3.518 \times 10^{-4}$$

6 Ітерації

Нажмите F1, чтобы открыть справку.

АВТО NUM Страница 2

Калькулятор

Математические

Рис. 4.7. Фрагмент реалізації Блоку «Формування розрахункових даних» в програмному середовищі MathCAD

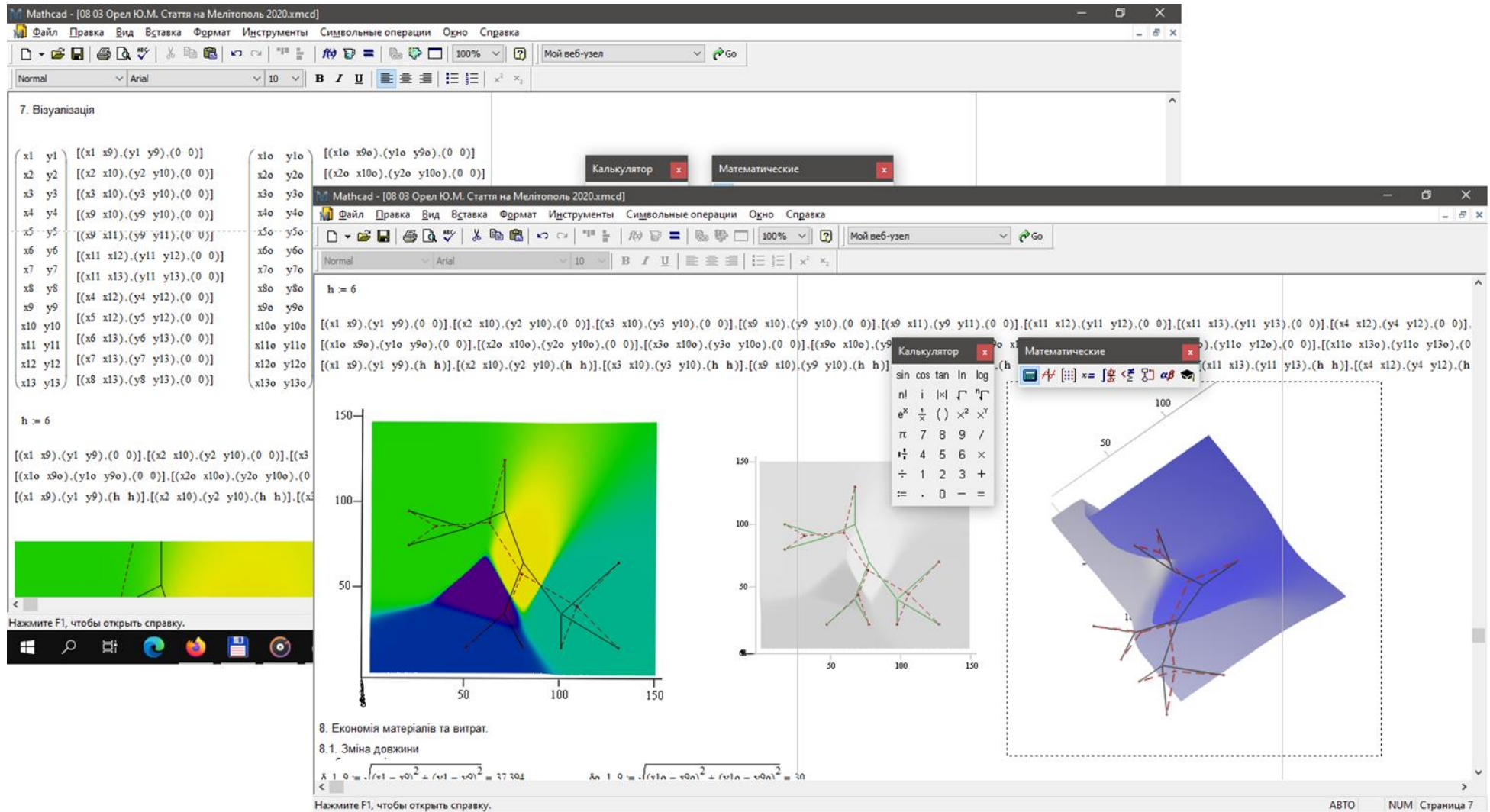


Рис. 4.8. Фрагмент реалізації «збереження та візуалізації мережі трубопроводів на поверхні розподілу вартості земельних ділянок» в програмному середовищі MathCAD

Mathcad - [08 03 Орел Ю.М. Стаття на Мелітополь 2020.xmcd]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

8. Економія матеріалів та витрат.

8.1. Зміна довжини

| | |
|--|---|
| $\delta_{1_9} := \sqrt{(x1 - x9)^2 + (y1 - y9)^2} = 37.394$ | $\delta_{o_1_9} := \sqrt{(x1o - x9o)^2 + (y1o - y9o)^2} = 30$ |
| $\delta_{2_10} := \sqrt{(x2 - x10)^2 + (y2 - y10)^2} = 16.625$ | $\delta_{o_2_10} := \sqrt{(x2o - x10o)^2 + (y2o - y10o)^2} = 31.623$ |
| $\delta_{3_10} := \sqrt{(x3 - x10)^2 + (y3 - y10)^2} = 17.954$ | $\delta_{o_3_10} := \sqrt{(x3o - x10o)^2 + (y3o - y10o)^2} = 31.623$ |
| $\delta_{9_10} := \sqrt{(x9 - x10)^2 + (y9 - y10)^2} = 28.168$ | $\delta_{o_9_10} := \sqrt{(x9o - x10o)^2 + (y9o - y10o)^2} = 22.361$ |
| $\delta_{9_11} := \sqrt{(x9 - x11)^2 + (y9 - y11)^2} = 34.754$ | $\delta_{o_9_11} := \sqrt{(x9o - x11o)^2 + (y9o - y11o)^2} = 31.623$ |
| $\delta_{11_12} := \sqrt{(x11 - x12)^2 + (y11 - y12)^2} = 20.856$ | $\delta_{o_11_12} := \sqrt{(x11o - x12o)^2 + (y11o - y12o)^2} = 31.623$ |
| $\delta_{11_13} := \sqrt{(x11 - x13)^2 + (y11 - y13)^2} = 34.523$ | $\delta_{o_11_13} := \sqrt{(x11o - x13o)^2 + (y11o - y13o)^2} = 36.056$ |
| $\delta_{4_12} := \sqrt{(x4 - x12)^2 + (y4 - y12)^2} = 32.452$ | $\delta_{o_4_12} := \sqrt{(x4o - x12o)^2 + (y4o - y12o)^2} = 28.284$ |
| $\delta_{5_12} := \sqrt{(x5 - x12)^2 + (y5 - y12)^2} = 24.803$ | $\delta_{o_5_12} := \sqrt{(x5o - x12o)^2 + (y5o - y12o)^2} = 22.361$ |
| $\delta_{6_13} := \sqrt{(x6 - x13)^2 + (y6 - y13)^2} = 25.704$ | $\delta_{o_6_13} := \sqrt{(x6o - x13o)^2 + (y6o - y13o)^2} = 20$ |
| $\delta_{7_13} := \sqrt{(x7 - x13)^2 + (y7 - y13)^2} = 32.67$ | $\delta_{o_7_13} := \sqrt{(x7o - x13o)^2 + (y7o - y13o)^2} = 36.056$ |
| $\delta_{8_13} := \sqrt{(x8 - x13)^2 + (y8 - y13)^2} = 33.645$ | $\delta_{o_8_13} := \sqrt{(x8o - x13o)^2 + (y8o - y13o)^2} = 42.426$ |

$\Sigma := \delta_{1_9} + \delta_{2_10} + \delta_{3_10} + \delta_{9_10} + \delta_{9_11} + \delta_{11_12} + \delta_{11_13} + \delta_{4_12} + \delta_{5_12} + \delta_{6_13} + \delta_{7_13} + \delta_{8_13} = 339.548$

$\Sigma_o := \delta_{o_1_9} + \delta_{o_2_10} + \delta_{o_3_10} + \delta_{o_9_10} + \delta_{o_9_11} + \delta_{o_11_12} + \delta_{o_11_13} + \delta_{o_4_12} + \delta_{o_5_12} + \delta_{o_6_13} + \delta_{o_7_13} + \delta_{o_8_13} = 364.034$

$\frac{\Sigma_o - \Sigma}{\Sigma_o} \cdot 100 = 6.726$ $\Sigma_o - \Sigma = 24.486$ +

Нажмите F1, чтобы открыть справку. АВТО NUM Страница 8

Рис. 4.9. Фрагмент реалізації Блоку «Аналіз даних» в програмному середовищі MathCAD

4.5. Висновки до Розділу 4

1. В даному розділі розглянуті питання розробки алгоритмів програмної реалізації методу графо-аналітичного моделювання ресурсоефективних зовнішніх мереж систем водопостачання.
2. Надано основні положення розробки інформаційної системи моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання.
3. Проаналізовано основні етапи програмної реалізації алгоритмів моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання.
4. Розроблена догідна схема програмного комплексу моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання.
5. Виконано опис програмних складових як окремих блоків підпрограм з різними функціональними призначеннями.
6. Розроблена блок-схема програмного блоку «Моделювання розподілу питомих вартостей земельних ділянок» моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання.
7. Розроблена блок-схема програмного блоку «Моделювання оптимального розміщення вузлів мережі водопостачання» програмного комплексу моделювання ресурсоефективних мереж систем водопостачання.
8. Вибір мови програмування для реалізації моделі ресурсоефективних мереж систем водопостачання потребує окремої уваги та проведення додаткового аналізу.
9. Виконана програмна реалізація запропонованої математичної моделі у програмному середовищі MathCAD.
10. Використання програмного середовища MathCAD показало працездатність математичної моделі та хорошу збіжність ітераційного розрахунку. Проте використання такої програмної реалізації є недостатньо універсальним, хоча і володіє високим ступенем наочності за рахунок символічного програмного запису математичної моделі.

Основні теоретичні положення розділу розкриті в таких публікаціях автора:

1. 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.

Загальні висновки

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема – розроблення і застосування графо-аналітичного моделювання раціональних зовнішніх мереж систем водопостачання для підвищення їх ресурсоефективності та екологічності у проектуванні, будівництві та експлуатації.

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».

Список використаних джерел

1. 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.
2. Мітрахович М. М., Герасимчук І. С. Методика розрахунку основних показників енергоефективності підприємства [Електронний ресурс]. *Наукоємні технології*. 2009. № 3. URL : http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/nt/2009_3/20.pdf
3. Khosla Shristi, Singh S.K. Shristi Khosla Energy Efficient Buildings. *International Journal of Civil Engineering Research*. ISSN 2278-3652 Volume 5, Number 4 (2014), pp. 361–366.
4. Білоцерківський О. Б. Використання економіко-математичного моделювання для оптимізації систем теплопостачання. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Соціально-економічний розвиток країн: досвід та перспективи»*, 30-31 травня 2014 р. Львів : у 3 ч. Ч. 2. Львів : ЛЕФ, 2014. С. 82–85.
5. Андреев С. Ю., Федоров А. П., Бондаренко А. И. Увеличение эффективности отпущенного тепла при оптимальном выборе количества жилых домов и полной реконструкции системы централизованного горячего водоснабжения квартала [Електронний ресурс] *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2014. № 8. С. 22–27. URL : <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/28197>
6. Benker H. *Mathematik-Problemlösungen mit MATHCAD und MATHCAD PRIME*. Benker. Berlin : Springer-Verlag, 2013. 303 p.
7. Theofanis Psomas Overheating assessment of energy renovations. *The REHVA European HVAC Journal Brussels*. Volume 53. Issue 1. January 2016
8. Мица Н.В. Сутність та проблеми енергозбереження в Україні. *Сталий розвиток економіки. Всеукраїнський науково-виробничий журнал*. Хмельницький, 2011 р. № 4.

9. Скібіна Т. І. Енергоаудит як основа для підвищення енергоефективності та енергозбереження в системах централізованого теплопостачання. *Економіка і регіон*. 2015. № 2 (66). С. 23–27

10. Радомська М. М. Енергетичний аудит як основа підвищення енергоефективності виробничих та житлових об'єктів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2013. № 8. С. 172-178. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vldubzh_2013_8_27

11. Збараз Л. И. Моделирование децентрализованного источника теплоснабжения и выбор оптимальных параметров его работы. *Комунальне господарство міст*. Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. Харків, 2015. Вип. 23. С. 91–97.

12. Збараз Л. І. Математичне моделювання та оптимізація роботи теплових мереж з урахуванням теплових втрат. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Харків, 2016. Вип. 8 (221). С. 42–50.

13. Ганжа А. Н., Подкопай В. Н. Оптимизация параметров системы теплоснабжения с учетом потерь теплоты при транспортировании теплоносителя. Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды. *II межотраслевая научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения и защиты окружающей природной среды (27–28 марта 2013 г., Харьков)* : сб. тр. / Гос. предприятие "Укр. науч.-техн. центр маталлург. пром-сти "Энергосталь". Харьков, 2013. С. 89–94.

14. Стоянов Ф. А., Андреев С. Ю., Шевченко Л. П. Методы системного анализа в задачах оптимального проектирования централизованных систем теплоснабжения : *Учеб. пособие для студ. вузов. Харьк. гос. техн. ун-т стр-ва и archit. X.* : Золотые страницы, 2005. 140 с.

15. 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.

16. Збараз Л. И. Моделирование децентрализованного источника теплоснабжения и выбор оптимальных параметров его работы. Комунальне господарство міст. Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. Харків, 2015. Вип. 23. С. 91–97.

17. Збараз Л. І. Математичне моделювання та оптимізація роботи теплових мереж з урахуванням теплових втрат. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. Харків, 2016. Вип. 8 (221). С. 42–50.

18. Jarmo Soderman, Frank Pettersson. Structural and operational optimisation of distributed energy systems. Applied Thermal Engineering. 26 (2006) 1400–1408. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.05.034

19. Arturo Alarcon-Rodriguez, Graham Ault, Stuart Galloway. Multi-objective planning of distributed energy resources: A review of the state-of-the-art. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14 (2010) 1353–1366. doi:10.1016/j.rser.2010.01.006

20. Theofanis Psomas Overheating assessment of energy renovations. The REHVA European HVAC Journal Brussels. Volume 53. Issue 1. January 2016

21. Akomeno Omu, Ruchi Choudhary, Adam Boies. Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming. Energy Policy. 61 (2013) 249–266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.009>

22. Andreas Rieder, Andreas Christidis, George Tsatsaronis. Multi criteria dynamic design optimization of a small scale distributed energy system. Energy. (2014) 1–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.007>

23. Rak J. Selected problems of water supply safety / J. Rak // Environment Protection Engineering, 35, 2, 2009. – P. 23-28.

24. Nahman J. M. Dependability of engineering systems – modeling and evaluation / J. M. Nahman // Springer, 2002.

25. Avi Ostfeld. Reliability simulation of water distribution systems – single and multiquality / Avi Ostfeld, Dimitri Kogan, Uri Shamir // Urban Water, 2002. – №4. – P. 53–61

26. Тугай А.М., Терновцев В.О., Тугай Я.А. Розрахунок і проектування споруд систем водопостачання. Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2001. – 256 с.

27. Гюльштейн Е.Г. Задачи линейного программирования транспортного типа: учебник / Е.Г. Гюльштейн, Д.Б. Юдин / Издательство "Наука", Москва, 1969. — 384 с.

28. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инж. и учащихся вузов. 1980. – 976.

29. Скочко В.І. Скорочення тепловтрат систем теплопостачання шляхом оптимізації їх геометричних моделей при проектуванні / В.І. Скочко, В.О. Плоский, А.Д. Гегер, Л.О. Скочко // Наук. тех. журн.: Енергоефективність в будівництві та архітектурі. Вип. 10. 2018. – с. 15-28.

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

31. Iske A. Radial basis functions: basics, advanced topics and meshfree methods for transport problems / A. Iske // Rend. Sem. Mat. Univ. Pol., Torino, 2003. – № 61 (3). – P. 247–284.

32. 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.

33. Haykin S.: Neural Networks. A Comprehensive Foundation. Upper Saddle River – New Jersey, 2006, 1105.

34. 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), 253–270.

35. Sarra S.A., Accurate derivative approximations using radial basis functions, preprint, Marshall University, 2003.

36. 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, 9–18.
37. Baxter B.J.C., Preconditioned conjugate gradients, radial basis functions, and Toeplitz matrices, *Comput. Math. Appl.* 43 (2002), 305–318.
38. 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.
39. Driscoll T.A. and Fornberg B., Interpolation in the limit of increasingly flat radial basis functions, *Comput. Math. Appl.* 43 (2002), 413–422.
40. 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, 211–234.
41. Hon Y.C. and Schaback R., On nonsymmetric collocation by radial basis functions, *Appl. Math. Comput.* 119 (2001), 177–186.
42. Rudin W., *Functional Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1973.
43. Schaback R., *Multivariate interpolation by polynomials and radial basis functions*, preprint, Universität Göttingen, 2002.
44. Wendland H., Sobolev-type error estimates for interpolation by radial basis functions, in *Surface Fitting and Multiresolution Methods*, A. Le Méhauté, C. Rabut, and L. L. Schumaker (eds.), Vanderbilt University Press, Nashville TN, 1997, 337–344.
45. 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.
46. 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
47. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем / К. Райншке. – М.: Мир, 1979. – 452 с.

48. Райншке К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райншке, И.А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1988. – 209 с.
49. Рогинский В.Н. Теория сетей связи / В.Н. Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс и др. – М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.
50. Reinschke, K. J. Multivariable Control. A Graph Theoretic Approach. 1988. <https://doi.org/10.1007/BFb0051585>.
51. Reinschke K. Zuverlässigkeitsstrukturen. Modellbildung – Modellauswertung / К. Reinschke, I. A. Ušakov. In ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics (p. 312). 1987. (in German) DOI:[10.1002/zamm.19890690922](https://doi.org/10.1002/zamm.19890690922).
52. Абрамов Н.Н. Надежность систем водоснабжения / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1984. – 216 с.
53. Гадасин В. А. Методы расчета структурной надежности сетей связи / В.А. Гадасин. – М.: Сов. радио, 1986. – 191 с.
54. Григоровский Е.П. Автоматизация расчета многоконтурных сетевых систем / Е.П. Григоровский, Н.У. Койда. – К.: Вища школа, 1977. – 192 с.
55. Евдокимов А.Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев, В.В. Дубровский. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.
56. Ильин Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования / Ю.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.
57. Меренков А.П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
58. Рогинский В.Н. Теория сетей связи / В.Н. Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс и др. – М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.
59. Усенко І.С. Аналіз надійності структур водопровідних мереж / І.С. Усенко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава: ПолтНТУ, 2002. – Вип. 9. – С. 46 – 48.
60. Усенко І.С. Методика синтезу та оптимізації трасувань магістральних водопровідних мереж / І.С. Усенко // Збірник наукових праць (галузеве

машинобудування, будівництво) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка; Вип. 11 . – Полтава: ПНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2003. – С. 83 – 86.

61. Ozger S. Optimal location of isolation valves in water distribution systems: a reliability / optimization approach / S. Ozger, L.W. Mays // Chapter 7. – Pp. 7.1 – 7.27. http://www.public.asu.edu/~lwmais/Ch07_Mays_144381-9.pdf

62. Satyanarayana A. Multi-terminal Network Reliability. – Berkeley, 1980. – Oper. Res. Center, Univ. of Calif., N 80 – 6.

63. Tung Y.K. Evaluation of water distribution network reliability / Y.K. Tung, Proceedings of the Specialty Conference ASCE, 1, pp. 1 – 6. 1985. <http://library.wrds.uwyo.edu/wrp/85-38/85-38.pdf>.

64. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций / Ю.Б. Гермейер. – М.: Наука, 1971. – 383 с.

65. Котляревский В.А. Аварии и катастрофы: предупреждение и ликвидация последствий: учеб. пособие / В.А. Котляревский, А.В. Забегаев, Ю.И. Глазунов. – М.: Изд-во Ассоц. строит. ВУЗов, 1995. – 319 с.

66. Кофф Г.Л. Оценка последствий чрезвычайных ситуаций / Г.Л. Кофф, А.А. Гусев, Ю.Л. Воробьев, С.Н. Козьменко. – М.: РЭФИА, 1997. – 364 с.

67. Патон Б.Є. Стан природно-техногенної безпеки України та основні напрями підвищення її рівня. Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи. НАН України / Б.Є. Патон, В.В. Дурдинець. – Київ, 2001. – 96 с.

68. Соціально-економічні наслідки техногенних та природних катастроф: експертне оцінювання / Відп. ред. Дурдинець В.В., Саєнко Ю.І. – К.: «Стилос», 2000. – 260 с.

69. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Изд. СПб университета, 2007. – 278 с.

70. Волкович В.Л. Модели и алгоритмы оптимизации надежности сложных систем / В.Л. Волкович, А.Ф. Волошин, В.А. Заславский, И.А. Ушаков / Под ред. академика В.С. Михалевича. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с.

71. Алексеев О.Г. Комплексное применение методов дискретной оптимизации / О.Г. Алексеев. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
72. Банди Б.Д. Методы оптимизации. Пер. с англ. / Б.Д. Банди – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
73. Бейко И.В. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации / И.В. Бейко, Б.Н. Бублик, П.Н. Зинько. – К.: Вища школа, 1983. – 512 с.
74. Гилл Ф. Практическая оптимизация: пер. с англ. / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
75. Коваленко И.Н. Приближенный расчет и оптимизация надежности / И.Н. Коваленко, А.Н. Наконечный. – К.: Наук. думка, 1989. – 182 с.
76. Корнійчук М. Складні системи з випадковою зв'язністю: ймовірнісне моделювання та оптимізація: монографія // М. Корнійчук, І. Совтус. – К.: КНЕУ, 2003. – 374 с.
77. Сергиенко И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации / И.В. Сергиенко. – К.: Наукова думка, 1988. – 472 с.
78. Alberto S. Recent Advances in Optimization / S. Alberto. – Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 455 p.
79. Burton R.M. Optimal system reliability for a mixed series and parallel structures / R.M. Burton, G.T. Howard // J. Math. Anal. and Appl. – 1969. –28. – P.370 – 382.
80. Coit D. Reliability optimization of series–parallel systems using genetic algorithm / D. Coit, A. Smith // IEEE Trans. reliab. – 45(2). – 1996. – P. 254 – 266.
81. Combinatorial Optimization / Edited by Nicos Christofides – John Wiley & Sons, New York, 1980. – 423 p.
82. Евдокимов А.Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев, В.В. Дубровский. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.
83. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майника. – М.: Мир, 1981. – 323 с.

84. Кофф Г.Л. Оценка последствий чрезвычайных ситуаций / Г.Л. Кофф, А.А. Гусев, Ю.Л. Воробьев, С.Н. Козьменко. – М.: РЭФИА, 1997. – 364 с.

85. Соціально-економічні наслідки техногенних та природних катастроф: експертне оцінювання / Відп. ред. Дурдинець В.В., Сасенко Ю.І. – К.: «Стилос», 2000. – 260 с.

86. Усенко В.Г. Оцінювання надійності структури водопровідної мережі м. Полтава / В.Г. Усенко, В.Г. Новохатній, О.І. Кретович // Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – Вип. 2(44). – С. 195 – 202.

87. Абрамов Н.Н. Надежность систем водоснабжения / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1984. – 216 с.

88. Ильин Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования / Ю.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.

89. Рябченко И.Н. Использование методов топологического анализа при решении задачи локализации аварий на инженерных сетях // Новые решения в современных технологиях. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХПГУ, 1999. – № 46. – С. 28 – 30.

90. Надійність техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860-94. – К.: Держстандарт України, 1994. – 92 с.

91. Новохатній В.Г. О топологических характеристиках анализа надежности трубопроводных сетей / В.Г. Новохатній, Э.Б. Яворский, С.С. Запорожец // Деп. во ВНИИИС, Рег. № 2302. – М.: ВНИИИС, 1981. – 13 с.

92. Новохатній В.Г. Побудова еквідистанти в задачі трасування водопровідних мереж / В.Г. Новохатній, І.С. Усенко, В.Г. Усенко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПДТУ імені Юрія Кондратюка, 2000. – Вип. 5. – С. 212-217.

93. Новохатній В.Г. Сітка домінуючих напрямків для синтезу трасувань магістральної водопровідної мережі / В.Г. Новохатній, І.С. Усенко, В.Г. Усенко //

Збірник наукових праць «Науковий вісник будівництва». – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2001. – Вип. 12. – С. 294 – 297.

94. Новохатній В.Г. Трансформація сітки домінуючих напрямків у задачі трасування водопровідних мереж / В.Г. Новохатній, І.С. Усенко, В.Г. Усенко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПДТУ імені Юрія Кондратюка, 2001. – Вип. 7. – С. 82 – 85.

95. Евдокимов А.Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев, В.В. Дубровский. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.

96. Новохатній В.Г. Аналіз впливу топології на надійність структури водопровідних мереж / В.Г. Новохатній, І.С. Усенко // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Наук.-техн. зб. Вип. 1. – К.: КНУБА, 2003. – С. 36 – 40.

97. Рогинский В.Н. Теория сетей связи / В.Н. Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс и др. – М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.

98. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб. для вузов — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 2001. — 343 с: ил

99. Стеценко, І.В. Моделювання систем: навч. посіб. [Електронний ресурс, текст] / І.В. Стеценко ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.

100. Табунщик Г. В. Проектування та моделювання програмного забезпечення сучасних інформаційних систем / Г. В. Табунщик, Т.І. Каплієнко, О.А. Петрова – Запоріжжя : Дике Поле, 2016. – 250 с.

101. Эванс Э. Предметно-ориентированное проектирование (DDD): структуризация сложных программных систем. [Текст] / Эванс Э. – М.:Вильямс, 2010. – 448 с.

102. Плоский В.О. Дослідження структурних особливостей методів геометричного моделювання та тенденцій розвитку прикладної геометрії: дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка / В.О. Плоский. – К.: КНУБА, 2007. – 277 с.

103. Плоский В.О. Інтерпретації як елемент методології та інструментальний засіб прикладної геометрії / В.О. Плоский // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Вип. 83. – К.: КНУБА, 2010. – С. 18 – 25.

104. Гумен Н.С. Геометрические основы теории многообразий евклидоваго n-пространства применительно к геометрическому моделированию многопараметрических систем: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.01.01 – прикладная геометрия, инженерная графика / Н.С. Гумен. – К.: КНУБА, 1992. – 53 с.

105. Гумен О.М. Комп'ютерна візуалізація I-багатовидів фазових n-просторів / О.М. Гумен, С.Є. Мартин // Праці Тавр. держ. агротех. університету. – Вип. 4. Прикл. геом. та інж. граф. – Т. 39. – Мелітополь: ТДАТУ, 2008. – С. 101–106.

106. Вальков К.И. Лекции по основам геометрического моделирования / К.И. Вальков. – Л.: ЛГУ, 1975. – 180 с.

107. Бадаев Ю. И. Поликоординатный метод в прикладной геометрии и компьютерной графике / Ю.И. Бадаев. – К.: Просвіта, 2006. – 173 с.

108. Борисенко В.Д. Геометричне моделювання компонентів енергетичного обладнання із застосуванням функцій SolidWorks API / В.Д. Борисенко, С.А. Устенко, І.В. Устенко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Вип. 75. – К.: КНУБА, 2005. – С. 29 – 35.

109. Грибов С.М. Дискретна геометрія інтерактивного конструювання кінематичних поверхонь на основі скінченних сум: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка / С.М. Грибов. – К.: 1994. – 37 с.

110. Ковальов С.Н. Формирование дискретных моделей поверхностей пространственных архитектурных конструкций: дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.01.01 – прикладная геометрия, инженерная графика / С.М. Ковальов. – М.: 1986. – 348 с.

111. Комяк В.М. Задачи геометрического проектирования: размещения, покрытия, разбиения / В.М. Комяк // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Вип. 86. – К.: КНУБА, 2010. – С. 37 – 48.

112. Малкіна В.М. Автоматизація процесу згущення при варіативному дискретному геометричному моделюванні / В.М. Малкіна, Д.О. Сосновських, Н.М. Андрущенко // Праці Тавр. держ. агротех. університету. – Вип. 5. Інформаційні технології в прикладній геометрії. – Т. 3. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – С. 21 – 29.

113. Осипов В.А. Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей / В.А. Осипов. – М.: Машиностроение, 1979. – 248 с.

114. Подкорытов А.Н. Теоретические основы автоматизированных методов геометрического моделирования сопряженных криволинейных поверхностей, исключаящих интерференцию: автореф. дис. ... докт. техн. наук спец. 05.01.01 – прикладная геометрия, инженерная графика / А.Н. Подкорытов. – К.: КНУБА, 1995. – 38 с.

115. Пустюльга С.І. Дискретне визначення геометричних об'єктів числовими послідовностями: дис. ... докт. техн. наук спец. 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка / С.І. Пустюльга. – К.: КНУБА, 2006. – 322 с.

116. Скидан І.А. Загальна аналітична теорія прикладного формоутворення на основі глобальної параметризації / І.А. Скидан // Праці Тавр. держ. агротех. академії. – Вип. 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка – Т. 13. – Мелітополь: ТДАТА, 2001. – С. 22 – 28.

117. Ткачевський Я.І. Структурне моделювання складних геометричних об'єктів у літакобудуванні: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка / Я.І. Ткачевський. – К.: КНУБА, 2007. – 25 с.

118. Шоман О.В. Геометричне моделювання узагальнених паралельних множин: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка / О.В. Шоман. – К.: КНУБА, 2007. – 36 с.

119. Черніков О.В. Геометричне та комп'ютерне моделювання динаміки процесів зміни об'єктів під впливом заданих чинників (на прикладі фільтрування): автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка / О.В. Черніков. – К.: 2008. – 37 с.

120. Шенен П. Математика и САПР. В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с франц. / П. Шенен, М. Коснар, И. Гардан и др. – М.: Мир, 1988. – 204 с.

121. Рогинский В.Н. Теория сетей связи / В.Н. Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс и др. – М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.

122. Убайдуллаев Ю.Н. Моделювання маршрутів автомобільних перевезень методом графопобудови / Ю.Н. Убайдуллаев, О.А. Сорва // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Вип. 77. – К.: КНУБА, 2007. – С. 164 – 169.

123. Чередниченко Л.С. Геометрическое моделирование некоторых многопараметрических систем химической технологии / Л.С. Чередниченко, Н.С. Гумен, В.С. Гумен. – К.: Вища школа, 1977. – 108 с.

124. Юрчук В.П. Спряжені поверхні в геометричних моделях формотворення робочих органів коренезбиральних машин: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка / В.П. Юрчук – К.: 2002. – 37 с.

125. Айгнер М. Комбинаторная теория: Пер. с англ. / М. Айгнер. – М.: Мир, 1982. – 558 с.

126. Беккербах Э. Прикладная комбинаторная математика. Пер. с англ. / Э. Баккербах. – М.: Мир, 1968. – 361 с.

127. Грюнбаум Б. Этюды по комбинаторной геометрии и теории выпуклых тел / Б. Грюнбаум. – М.: Наука, 1971. – 95 с.

128. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация: алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – М.: Мир, 1985. – 512 с.

129. Прасолов В.В. Элементы комбинаторной и дифференциальной топологии / В.В. Прасолов. – М.: Издательство МЦНМО, 2004. – 352 с.

130. Рейнгольд Э. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика / Э. Рейнгольд, Ю. Нивергельт, Н. Део. – М.: Мир, 1980. – 476 с.

131. Хадвигер Г. Комбинаторная геометрия плоскости / Г. Хадвигер, Г. Дебруннер – М.: Наука, 1965. – 170 с.
132. Холл М. Комбинаторный анализ: Пер. с англ. / М. Холл. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 98 с.
133. Akiyama J. Combinatorial Geometry and Graph Theory / J. Akiyama, E. Baskoro, M. Kano. – Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 225 p.
134. Combinatorial Optimization / Edited by Nicos Christofides – John Wiley & Sons, New York, 1980. – 423 p.
135. Crapo H. H. On the Foundations of Combinatorial Theory: Combinatorial Geometries / H. H. Crapo, G. C. Rota. – Cambridge: M.I.T. Press, 1970. – 293 p.
136. Edelsbrunner H. Algorithms in Combinatorial Geometry / H. Edelsbrunner – Berlin: Springer–Verlag, 1987. – 422 p.
137. Goodman J. E. Combinatorial and Computational Geometry / J. E. Goodman, J. Pach, E. Welzl – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 623 p.
138. Алгоритмы: построение и анализ: Пер. с англ. / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – М.: Издательский дом «Вильямс». – 2005, 1296 с.
139. Асанов М.О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы / М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 288 с.
140. Асельдеров З.М. Представление и восстановление графов / З.М. Асельдеров, Г.А. Донец. – Киев: Наук. думка, 1991. – 192 с.
141. Банди Б.Д. Методы оптимизации. Пер. с англ. / Б.Д. Банди – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
142. Белов В.В. Теория графов / В.В. Белов, Е.М. Воробьев, В.Е. Шаталов. – М.: Высшая школа, 1976. – 392 с.
143. Берж К. Теория графов и ее применения / К. Берж. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 320 с.
144. Бондаренко М.Ф. Комп'ютерна дискретна математика / М.Ф. Бондаренко, Н.В. Білоус, А.Г. Руткас. – Харків: «Компанія СМІТ», 2004. – 480 с.

145. Бурбаки Н. Теория множеств / Н. Бурбаки. – М.: Мир, 1965. – 456 с.
146. Вирт Н. Алгоритмы и структуры данных: пер. с англ. / Н. Вирт. – М.: Мир, 1989. – 360 с.
147. Захарова Л.Е. Алгоритмы дискретной математики / Л.Е. Захарова. – М.: МГИЭМ, 2002. – 120 с.
148. Згуровский М.З. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. – К.: Наукова думка, 2005. – 744 с.
149. Зеликин М.И. Оптимальное управление и вариационное исчисление / М.И. Зеликин. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 160 с.
150. Касьянов В.Н. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение / В.Н. Касьянов, В.А. Евстигнеев. – СПб: БХВ – Петербург, 2003. – 1104 с.
151. Клини С.К. Математическая логика / С.К. Клини. – М.: Мир, 1973. – 480 с.

Додатки

Акти впровадження

Вих. № _____ від _____

АКТ

про впровадження результатів кандидатської дисертації
здобувача ОРЕЛ Юлії Миколаївни
«МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ЗОВНІШНІХ СИСТЕМ
ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ НОВОЇ ЗАБУДОВИ»

Результати дисертаційного дослідження ОРЕЛ Юлії Миколаївни «МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ЗОВНІШНІХ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ НОВОЇ ЗАБУДОВИ» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.04 – Водопостачання та каналізація, прийняті до впровадження на підприємстві ТОВ «СМУ 2194».

Розроблені автором математичний апарат оптимізації параметрів положення компонентів системи водопостачання, в тому числі постачальників та будинків – споживачів, з урахуванням техніко-економічної доцільності будівництва та подальшої експлуатації відповідних систем, відповідні алгоритми, методики та засоби комп'ютерного проектування дозволяють підвищити об'єктивність та ступінь економічної обґрунтованості прийняття рішень при проектуванні зовнішніх водопровідних мереж.

Директор ТОВ «СМУ 2194»



(Брюханов В.В.)



ТОВ «ПЕК ІНЖИНІРИНГ»

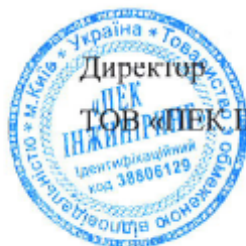
02081, Україна, м. Київ, вул. Дніпровська набережна, буд. 25-Б, офіс 30
 тел.: +38 (044) 577 54 55
 тел./факс: +38 (044) 577 54 54
 email: pekin.ukr@gmail.com

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
 аспіранта ОРЕЛ Юлії Миколаївни
 «МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ЗОВНІШНІХ СИСТЕМ
 ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ НОВОЇ ЗАБУДОВИ»
 на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
 05.23.04 – Водопостачання та каналізація

Даним Актом стверджується, що результати кандидатської дисертації
 ОРЕЛ Юлії Миколаївни «Моделювання ефективних зовнішніх систем
 водопостачання в умовах нової забудови» прийняті до впровадження на
 підприємстві ТОВ «ПЕК ІНЖИНІРИНГ».

Розроблені автором універсальний математичний апарат оптимізації
 параметрів положення компонентів системи водопостачання, в тому числі
 постачальників та будинків-споживачів, з урахуванням техніко-економічної
 доцільності будівництва та подальшої експлуатації відповідних систем,
 відповідні алгоритми та розрахункові програмні засоби використані при
 розробці технічних завдань та проектуванні зовнішніх водопровідних систем.



Директор
 ТОВ «ПЕК ІНЖИНІРИНГ»

Бункін Є.В.

Список публікацій здобувача**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: МДПУім. 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 // ІХ міжнародна наук.-практ. конференція «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція-2019». – К.: КНУБА, 2019.