

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТОПОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ МІСЬКОЇ МЕРЕЖІ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Анотація. Для ефективного управління міськими мережами водопостачання комунальним підприємствам, які забезпечують водопостачання та водовідведення (надалі – КП «Водоканал») необхідне вирішення наступних задач: використання топографічних карт масштабів 1:500, 1:1000, 1:2000, у складі яких є як наземна забудова, так і суміжні підземні комунікації; гідравлічні розрахунки мережі водопостачання для визначення стану, аналізу та оптимізації структури мережі; оперативне усунення аварійних ситуацій та відновлення мережі після усунення аварії; контроль та управління якістю питної води; наявність приладів контролю тиску, витрати та п'єзометрів; автоматизоване управління насосними станціями; економія енергоресурсів; інвентаризація мережі. Комплексне вирішення цих задач здійснюється із застосуванням геоінформаційних технологій, математичного моделювання мережі водопостачання. В роботі запропоновано математичну модель топологічної структури мережі водопостачання, визначено бази геопроторових даних про об'єкти мережі та взаємозв'язки цих об'єктів з врахуванням топологічної структури цієї мережі для забезпечення геоінформаційного та математичного моделювання гідравлічного стану мережі водопостачання, вирішення задач обробки аварійних ситуацій, контролю якості питної води, оптимізації мережі, енергозбереження.

Ключові слова: мережа водопостачання, математична модель, геоінформаційна система, гідравлічний розрахунок, аналіз мережі, оптимальна структура мережі водопостачання.

Постановка завдання. В сучасному світі водопостачання міських територій стає складнішим завданням через зростання населення, зміни клімату та швидкий розвиток міської інфраструктури. Гідравлічний розрахунок та аналіз систем водопостачання стають невід'ємною частиною вирішення цих проблем. У цьому контексті розвиток геоінформаційних систем виявляється важливим інструментом для забезпечення ефективності та оптимізації функціонування міських мереж водопостачання. Застосування в комунальних підприємствах КП «Водоканал» геоінформаційної системи гідравлічного розрахунку, аналізу та оптимізації міських мереж водопостачання дозволяє комплексне вирішення

задач ефективного автоматизованого управління міськими мережами водопостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В публікаціях [1-3, 6-11] визначені:

- математична модель мережі водопостачання;
- використання топографічних карт масштабів 1:500, 1:1000, 1:2000 для отримання просторової інформації про об'єкти мережі водопостачання;
- перелік об'єктів мережі водопостачання із складом технічних та графічних параметрів;
- методики та алгоритми проведення гідравлічних розрахунків - повірного та конструкторського розрахунків;
- наведені приклади гідравлічних розрахунків із використанням традиційної математичної моделі мережі водопостачання - топологічного графа [4].

Топологічний граф, як адекватна модель відображення на площині просторової структури міської мережі водопостачання, визначає об'єкти мережі, їх взаємозв'язки, спосіб відображення топологічної структури мережі та результати гідравлічних розрахунків. Топологічний граф є орієнтованим графом з поміченими ребрами та вершинами та традиційно використовується для проведення розрахунків (рис.1). Складовими частинами мережі водопостачання в традиційній математичній моделі є наступні об'єкти: насосна станція НС-2; вузол – коло з номером вузла; ділянка водогону; абонент, позначений стрілкою із значенням відбору; додаткові об'єкти, які не вказані на рис.1, – засувка, датчик.

В попередніх роботах Д. Миросенка встановлена взаємно-однозначна відповідність умовним знакам топологічного графу відповідним об'єктам мережі, а саме:

- вершинам графа відповідають насосна станція, вузли, абоненти;
- ребрам графа відповідають ділянки водогонів;
- мітками вершин є назва насосної станції, номери вузлів. Для абонентів мітками є їх обсяги відборів Q , л/с;
- початковою вершиною цього графа є насосна станція, наступні вершини – вузли або абоненти. При цьому на вершині-абонента граф завершується, а вершини- вузли є проміжними і пов'язують ділянки водогонів в єдину мережу. Проміжні вузли відповідають колодязям/камерам, позначеним на топографічній карті своїми умовними знаками;
- на ребрах - ділянках водогонів визначені наступні мітки:

- стрілка встановлює орієнтацію графа. Напрямок стрілки вказує напрям потоків води від витоків-насосної станції до стоків-абонентів або до вершин графа - вузлів;
- зверху ребра графа вказується витрата води Q , л/с, що протікає по цій ділянці водогону і діаметр водогону;
- під ребром графа визначена довжина ділянки в кілометрах L , км, тиск Нм;
- швидкість протікання води V , м/с.

Для побудови цифрової моделі топологічної структури мережі водопостачання використовуються топографічні карти масштабів 1:500, 1:1000, 1:2000, на яких умовними знаками топографічних планів [5] «розташовані» елементи наземної та підземної забудови території населеного пункту. Невід'ємною частиною цих планів є складові частини – вищевказані об'єкти мережі водопостачання, а також їх картографічні та технічні параметри. Фрагмент топографічного плану у М1:1000 наведений на рис. 2.

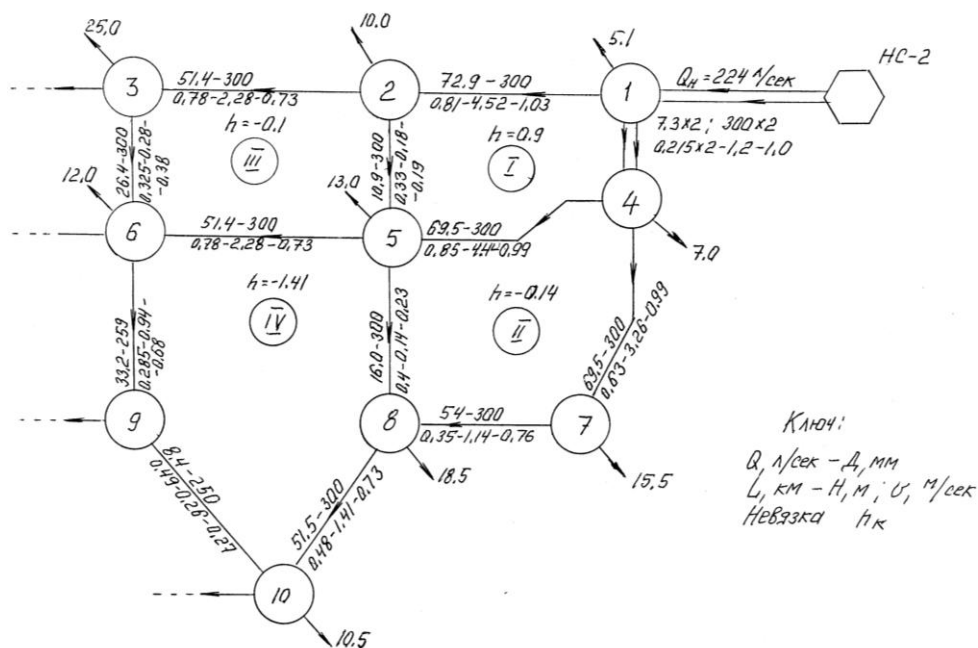


Рисунок 1 – Традиційна математична модель мережі водопостачання

Об'єкти мережі мають графічні атрибути - умовні знаки топографічних планів [5] та неграфічні атрибути – технічні параметри. Для відображення на топографічних планах об'єктів мережі водопостачання визначені персональні умовні знаки, які розташовуються в своїх шарах цифрової векторної топографічної карти масштабу 1:500, 1:1000, 1:2000 та мають координати X,Y, Z-центроїди дискретного умовного знаку (колодязь, засувка, насосна станція, да-

тчик, абонент) або координати X_i, Y_i, Z_i початку, кінця та вузлових точок полілінії для лінійного умовного знаку (ділянки водогонів).

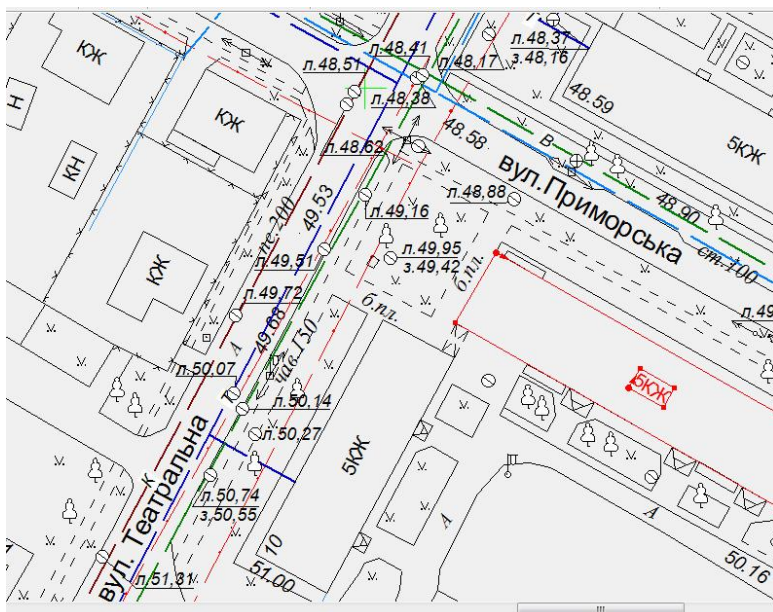


Рисунок 2 – Фрагмент електронної векторної топографічної карти М1:1000

Використання для гідравлічних розрахунків топологічного графа та топографічних карт має наступні суттєві недоліки, а саме:

- в структурі топологічного графа не передбачена наявність додаткових об'єктів – регуляторів тиску та витрати – засувки, приладів регулювання тиску та витрати, приладів контролю тиску та витрати;
- в структурі топологічного графа не визначена розгалужено-кільцева та сегментна структура мережі водопостачання;
- відображення на топографічних картах топологічної структури мережі та результатів гідравлічних розрахунків не передбачено легендою - складом умовних знаків топографічних планів [5]. Для цього необхідно складання спеціалізованих карт мережі водопостачання.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка математичної моделі топологічної структури мережі водопостачання, яка дозволить усунути зазначені недоліки, зокрема підвищить якість відображення та достовірність гідравлічних розрахунків.

Виклад основного матеріалу. Аналіз оновленої структури топологічного графа, його декомпозиція і співвіднесення із складовими частинами мережі – її об'єктами, встановлює наступну взаємно-однозначну відповідність. Складовими частинами мережі водопостачання є наступні об'єкти: насосна станція;

вузол – колодязь/камера (надалі – колодязь); ділянка водогону; регулятор Q-Н витрати Q та тиску Н (засувка, регулятор тиску/витрати, шайба, ..., надалі – регулятор); абонент; датчик (прилад) контролю тиску/витрати води (надалі – датчик). Вершинам графа відповідають насосна станція, колодязі, абоненти. Ребрам графа відповідають ділянки водогонів. Мітками вершин є назва насосної станції, номери колодязів. Для абонентів мітками є їх номери, найменування абонентів, міста врізок абонентів до мережі – «зірочки». Початковою вершиною цього графа є насосна станція, наступні вершини – колодязі або абоненти. При цьому на вершині-абонента граф завершується, а вершини-колодязі є проміжними і пов'язують ділянки водогонів в єдину мережу. На ребрах - ділянках водогонів визначені наступні мітки:

- стрілка встановлює орієнтацію графа. Напрямок стрілки вказує напрям потоків води від витоків-насосної станції до стоків-абонентів або до вершин графа - колодязів;
- зверху ребра графа вказується витрата води Q , л/с, що протікає по цій ділянці водогону і діаметр водогону;
- під ребром графа зазначаються довжина ділянки в кілометрах L , км, тиск, H_m ;
- швидкість протікання води V , м/с.

Цифрова математична модель топологічної структури мережі має розгалужено-кільцеву структуру, яка складається із:

- розгалужених (тупікових) ділянок, які доставляють воду абонентам від ділянок магістральних або закільцованих водоводів;
- магістральних ділянок, які забезпечують доставку води від насосної станції до ділянок кільцевих підграфів або по розгалуженим ділянкам до абонентів;
- кільцевих підграфів, які складаються із ділянок водоводів, об'єднаних в кільцеву структуру, яка забезпечує постачання води по всій території населеного пункту. Абоненти отримують воду по розгалуженим ділянкам, підключеним до кільцевих ділянок.

Укрупнена схема розгалужено-кільцевої структури приведена на Рис.3. та складається із наступних частин:

- кола з цифрами 1,2,3,4,5 – вузли мережі. Початковий вузол – Насосна станція;
- всі лінії, які з'єднують вузли мережі між собою та абонентами, мають «стрілки», які визначають напрям току води;

- подвоєна лінія синього кольору між Насосною станцією та Вузлом_1 – магістральний водопровід;
- товста лінія червоного кольору – траси ділянок кілець;
- одинарні тонкі лінії чорного кольору – розгалужені ділянки до абонентів;
- A1.1, A1.2, ..., A5.2 – абоненти;
- «зірочки» - міста врізок абонентів до мережі;
- коло з перехрестям всередині визначає наявність на ділянці, підключений до вузла, регуляторів тиску та витрати – засувок, приладів регулювання тиску/витрати, шайб, тощо;
- буква К – ключ Q-D-L-H-v-hk розрахункових значень гідравлічного розрахунку згідно рис.1;
- буква F – значення фактичного обсягу відбору води абонентом.

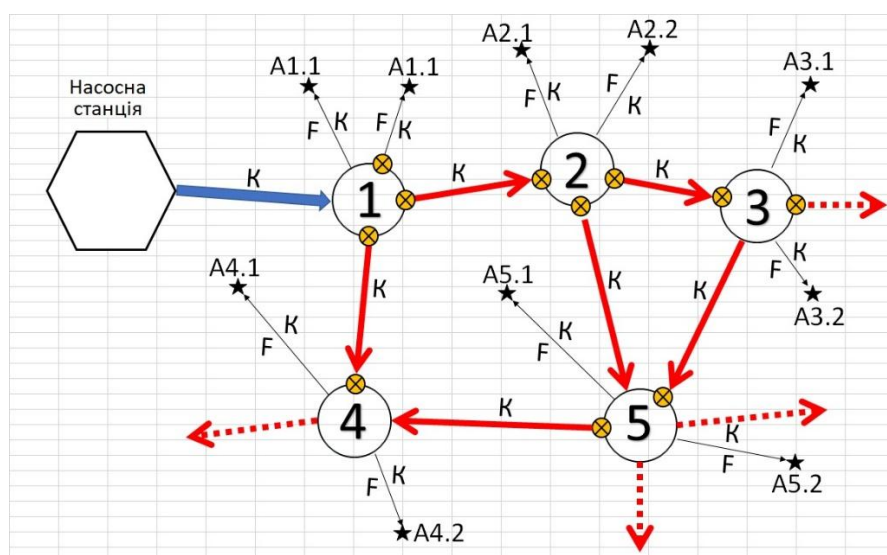


Рисунок 3 – Укрупнена схема розгалужено-кільцевої структури топологічного графу

Траси трубопроводів мають сегментну структуру, де кожний сегмент у складі: «Вузол-Виток»-ділянка трубопровода-«Вузол-сток» у відповідності до орієнтації тока води. Перший Вузел-Виток – насосна станція, кінцеві Вузели-Стоки – абоненти, проміжні Вузели-Витоки або Вузели-Стоки – колодязі/камери.

Інформаційно-графічна схема деталіровки колодязя є його графічним атрибутом, який визначає розгалуження в топологічній структурі мережі водопостачання, а також склад запірної арматури та приладів.

Для побудови цифрової моделі розгалужено-кільцевої структури топологічного графу використовуються цифрові векторні топографічні карти наступним чином:

- за результатами геодезичних вишукувань на топографічну карту наносяться об'єкти мережі водопостачання вищевказаними умовними знаками;
- за аналізом інформаційно-графічних схем деталіровок колодязів виявляється наявність регуляторів тиску/витрати та гідрантів. При наявності регуляторів їх умовні знаки наносяться на полілінію ділянки водогону біля умовного знаку колодязя в місці врізки труби водогону в колодязі, вказуються їх діаметри та процент відкриття;
- при наявності гідранту умовний знак колодязя без гідранта замінюється на умовний знак колодязя з гідрантом;
- для всіх об'єктів мережі водопостачання визначаються значення технічних та графічних параметрів;
- визначається орієнтація графа - напрямок потоку води. Напрямок потоку вказується стрілкою над полілінією ділянки водогону в напрямку від Вузла-витоку - насосної станції/колодязя до Вузла-стоку - колодязя/абонента;
- формується матриця інцидентій вершин і контурів.

Традиційно матриця інцидентій вершин і контурів використовується для розрахунку кільцевих підграфів та має вигляд [4]:

$$\begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1l} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2l} & v_{2\ l+1} \\ t_{31} & t_{32} & \dots & t_{3l} & v_{3\ l+1} \\ & & \dots & & \\ t_{k+1\ 1} & t_{k+1\ 2} & \dots & t_{k+1\ l} & t_{k+1\ l+1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

де k - число вершин, l - число ділянок мережі, u_{ij} ($j = 1, \dots, l$) - номери ділянок, $v_{i,l+1}$ ($i = 2, \dots, k + 1$) - номери вершин, $t_{ij} = 1$, якщо ділянка $u_{i,j}$ з'єднана з вершиною $v_{i,l+1}$ та з'єднання не регулюється; $t_{ij} = 2$, якщо ділянка $u_{i,j}$ з'єднана з вершиною $v_{i,l+1}$ та регулюється засувкою.

У матриці інцидентій встановлюється зв'язок між ділянками (контурами) і вузлами (вершинами) мережі з урахуванням фактичної площі поперечного перерізу засувок, визначається орієнтація топологічного графа - спрямування потоків води від виходів насосної станції до вершин, безпосередньо пов'язаних з насосною станцією ребрами, визначається структура розподілених та кільцевих підграфів.

Для побудови спеціалізованої карти мережі водопостачання із розгалужено-кільцевою топологічною структурою мережі та її використання для проведення гідравлічних розрахунків легенда топографічної карти змінюється на наступне: -на топографічній карті остаються тільки шари наземної забудови, об'єкти мережі, пікети та ізолінії рельєфу, всі інші шари закриваються; -всі ділянки мережі кольорами розподіляються на розгалужені – зеленого кольору, кільцеві – красні, магістральні - сині; -в містах врізки абонентів до мережі встановлюється позначка «зірочка»; - над кожною ділянкою встановлюється позначкою «стрілка» орієнтація топологічного графу в напрямку від «Вузла-Витока» до «Вузла-Стоку». Начальний «Вузол-Виток» – насосна станція; - надписи над об'єктами мережі – їх технічні або розрахункові параметри.

Фрагмент цифрової моделі розгалужено-кільцевої топологічної структури мережі водопостачання міста Дніпрорудне наведений на рис.4, де синім кольором визначені магістральні ділянки, червоним кольором визначені ділянки кільця, зеленим кольором визначені ділянки розгалужених частин мережі, «зірочками» визначені врізки мережі до абонентів. Із рис.4 видно, що постачання води по мережі провадиться послідовно в напрямку току води по ділянкам магістральних та кільцевих частин мережі; доставка води до абонентів провадиться по ділянкам розгалужених частин, які підключаються у вузлах-колодязях магістральних або кільцевих частин мережі.

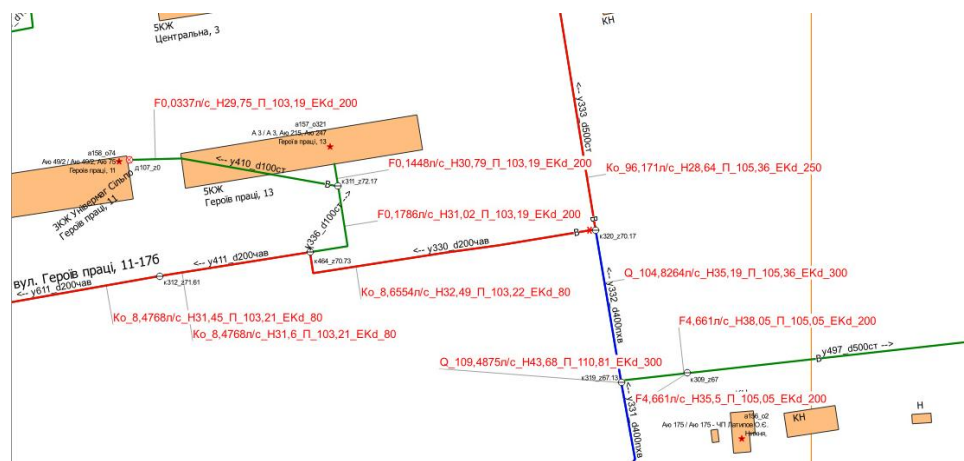


Рисунок 4 – Фрагмент цифрової моделі топологічної структури мережі водопостачання

На рис.5 наведений приклад розгалужень мережі водопостачання на діючій мережі м.Вільнянськ. Стрілка коричневого кольору – умовний знак засувки,

який розташований біля колодязя на водоводі з боку підключення. Цифри +500, +50 над стрілками - діаметри засувок.

На електронній векторній цифровій карті забезпечується одночасне отримання геопросторової інформації про розташування мережі водопостачання, графічного атрибуту – схеми деталіровки колодязя та технічних параметрів (рис.6).

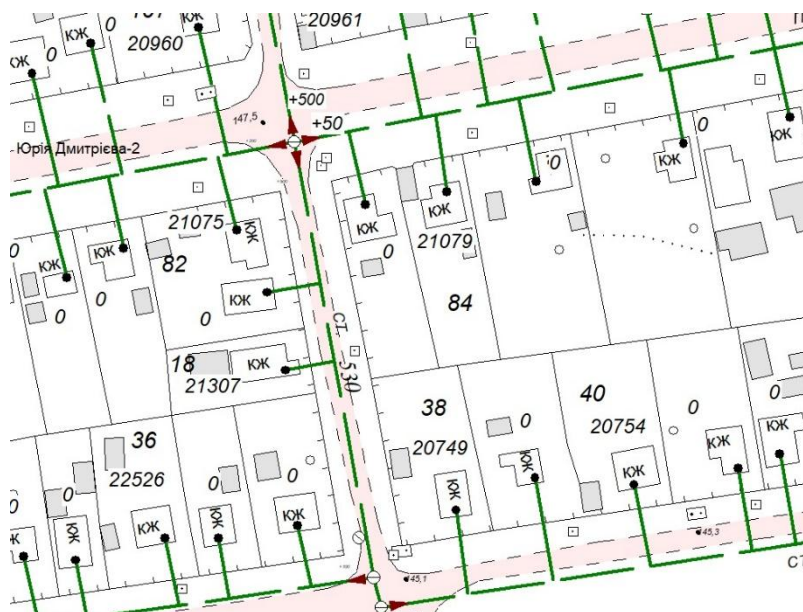


Рисунок 5 – Приклад розгалужень мережі водопостачання на діючій мережі



Рисунок 6 – Приклад застосування електронної векторної цифрової карти

Висновки і перспективи подальших досліджень. В роботі запропоновано математичну модель топологічної структури мережі водопостачання, визначено бази геопросторових даних про об'єкти мережі та взаємозв'язки цих об'єктів з врахуванням топологічної структури цієї мережі для забезпечення геоінформаційного та математичного моделювання гідравлічного стану мережі

водопостачання, вирішення задач обробки аварійних ситуацій, контролю якості питної води, оптимізації мережі, енергозбереження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бахрушін В.Є., Миросенко Д.О. Дослідження та розробка геоінформаційної підсистеми повірочного розрахунку міської мережі водопостачання // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(46). - Дніпропетровск, 2006. – С. 73-80.
2. Бахрушін В.Є., Миросенко Д.О., Савін В.В. Розробка і дослідження геоінформаційної системи обробки аварійних ситуацій міської мережі водопостачання // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(24). - Дніпропетровск, 2003. – С. 62-68.
3. Бахрушін В.Є., Миросенко Д.О. Дослідження та розробка геоінформаційної підсистеми конструкторського розрахунку міської мережі водопостачання // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(50). - Дніпропетровск, 2007. – С. 55-61.
4. Розрахунок водопровідних мереж. Навчальний посібник для вузів / Н.Н. Абрамов, М.М. Поспелова, М.А. Сомов и др. - М.: Будіздат, 1983.
5. Умовні знаки для топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. - К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, 2001, С. 268.
6. Миросенко Д.О. Геоінформаційна система енергозберігаючого управління міськими мережами водопостачання // ЕТЕВК-2017 Міжнародний конгрес та технічна виставка. Збірка доповідей. - м.Чорноморськ, 2017. - С.221 - 224.
7. Миросенко Д.О. Геоінформаційна система моделювання та управління міськими мережами водопостачання // ЕТЕВК-2019 Міжнародний конгрес та технічна виставка. Збірка доповідей. - м.Чорноморськ, 2019. - С.276 - 283.
8. Миросенко Д.О. Геоінформаційна система оптимального управління міськими мережами водопостачання // Водопостачання та водовідведення. Вип.5 - Київ, 2020. - С. 29 - 35.
9. Миросенко Д.О. Дослідження і розробка геоінформаційної підсистеми повірочного розрахунку міської мережі водопостачання // Водопостачання та водовідведення. Вип.6 - Київ, 2020. - С. 21 - 25.
10. Горбань О.М., Миросенко Д.О. Дослідження, математичне моделювання й розробка геоінформаційної системи оперативного енергоощаджуючого управління міською мережею водопостачання // Держава та регіони. Серія “Державне управління”. - Вип. №2. – Запоріжжя, 2006. – С.31-46.

11. Математичні методи та інформаційні технології в управлінні земельними ресурсами. Монографія / Д.І. Левінзон, О.М.Горбань, Д.О.Миросенко та інші. - Запоріжжя: КПУ, 2009. - 132с.

REFERENCES

1. Bakhrushin V.Ie., Myrosenko D.O. Doslidzhennia ta rozrobka heoinformatsiinoi pidsystemy povirochnoho rozrakhunku miskoi merezhi vodopostachannia // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskiyi zbirnyk naukovykh prats. - Vypusk 5(46). - Dnipropetrovsk, 2006. – S. 73-80.
2. Bakhrushin V.Ie., Myrosenko D.O., Savin V.V. Rozrobka i doslidzhennia heoinformatsiinoi systemy obrobky avariinykh sytuatsii miskoi merezhi vodopostachannia // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskiyi zbirnyk naukovykh prats. - Vypusk 1(24). - Dnipropetrovsk, 2003. – S. 62-68.
3. Bakhrushin V.Ie., Myrosenko D.O. Doslidzhennia ta rozrobka heoinformatsiinoi pidsystemy konstruktorskoho rozrakhunku miskoi merezhi vodopostachannia // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskiyi zbirnyk naukovykh prats. - Vypusk 3(50). - Dnipropetrovsk, 2007. – S. 55-61.
4. Rozrakhunok vodoprovidnykh merezh. Navchalnyi posibnyk dlia vuziv / N.N. Abramov, M.M. Pospelova, M.A. Somov y dr. - M.: Budizdat, 1983.
5. Umovni znaky dlia topohrafichnykh planiv masshtabiv 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. - K.: Ministerstvo ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy, 2001, S. 268.
6. Myrosenko D.O. Heoinformatsiina systema enerhozberihaiuchoho upravlinnia miskymy merezhamy vodopostachannia // ETEVK-2017. Zbirka dopovidei. - m.Chornomorsk, 2017. - S.221 - 224.
7. Myrosenko D.O. Heoinformatsiina systema modeliuвання та управління miskymy merezhamy vodopostachannia // ETEVK-2019 Mizhnarodnyi konhres ta tekhnichna vystavka. Zbirka dopovidei. - m.Chornomorsk, 2019. - S.276 - 283.
8. Myrosenko D.O. Heoinformatsiina systema optymalnoho upravlinnia miskymy merezhamy vodopostachannia // Vodopostachannia ta vodovidvedennia. Vyp.5 - Kyiv, 2020. - S. 29 - 35.
9. Myrosenko D.O. Doslidzhennia i rozrobka heoinformatsiinoi pidsystemy povirochnoho rozrakhunku miskoi merezhi vodopostachannia // Vodopostachannia ta vodovidvedennia. Vyp.6 - Kyiv, 2020. - S. 21 - 25.
10. Horban O.M., Myrosenko D.O. Doslidzhennia, matematyчне modeliuвання y rozrobka heoinformatsiinoi systemy operatyvnoho enerhooshchadzhuiuchoho upravlinnia miskoiu merezhoiu vodopostachannia // Derzhava ta rehiony. Seriiia “Derzhavne upravlinnia”. - Vyp. № 2. – Zaporizhzhia, 2006. – S.31-46.

11. Matematychni metody ta informatsiini tekhnolohii v upravlinni zemelnymy resursamy. Monohrafiia / D.I.Levinzon, O.M.Horban, D.O.Myrosenko ta inshi. - Zaporizhzhia: KPU, 2009. - 132s.

Received 03.01.2024.

Accepted 08.01.2024.

Mathematical model of the topological structure of the urban water supply network

To effectively manage urban water supply networks, utility companies providing water supply and drainage (hereinafter referred to as KP "Vodokanal") need to solve the following problems: - use of topographic maps of scales 1:500, 1:1000, 1:2000, which include both ground-based buildings, as well as adjacent underground communications - water supply and sewerage, electrical networks, gas supply networks, heat supply, communications, etc.; - hydraulic calculations of the water supply network to determine the condition, analysis and optimization of the network structure; - prompt elimination of emergency situations and resumption of the network after the emergency is eliminated; - control and management of drinking water quality; - availability of pressure, flow and piezometer monitoring devices; - automated control of pumping stations; - saving energy resources; - network inventory. A comprehensive solution to these problems is provided by a geoinformation automated water supply network management system. Automated network management is carried out using geoinformation technologies, mathematical and geoinformation models of the water supply network. The work proposes a mathematical model of the topological structure of the water supply network, defines geospatial data bases about network objects and the interrelationships of these objects, taking into account the topological structure of the network to provide geoinformation and mathematical modeling of the hydraulic state of the water supply network, solving problems of emergency processing, monitoring the quality of drinking water, and optimizing the network, energy saving. To construct a digital model of the branched-ring structure of a topological graph, digital vector topographic maps are used as follows: - based on the results of geodetic surveys, water supply network facilities are marked on the topographic map with symbols; - analysis of information-graphic diagrams of well details indicates the presence of pressure/flow regulators and hydrants. If there are regulators, their symbols are applied to the polyline of the water supply section at the symbol of the well at the point where the water pipe is inserted into the well, their diameters and the percentage of opening are indicated; - if there is a hydrant, the symbol for a well without a hydrant is replaced with the symbol for a well with a hydrant; - for all objects of the water supply network, the values of technical and graphic parameters are determined; - the orientation of the graph is determined - the direction of water flow; - a matrix of incidents of vertices and contours is formed.

Гнатушенко Володимир Володимирович - д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро).

Миросенко Дмитро Олексійович - аспірант кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро), головний програміст Концерну «Міські теплові мережі» (м. Запоріжжя).

Hnatushenko Volodymyr - doctor of technical science, professor, head of department of information technologies and computer engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Myrosenko Dmytro - postgraduate of department of information technologies and computer engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.