МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ
КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавра

на тему: **«МОДЕРНІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ ВОДОПОСТАЧАННЯ МІСТА З УРАХУВАННЯМ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ»**

Виконала: студентка 4 курсу, група 6.1922-мім-з
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
освітньо-професійної програми «Міські інженерні мережі»
ПЕТРЕЧУК ЮЛІЯ ВАСИЛІВНА

Керівник: доцент кафедри міського будівництва і
архітектури, канд. техн. наук О. Г. Добровольська

Рецензент: завідувач кафедри міського будівництва і
архітектури
кандидат технічних наук А. В. Банах

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні

Кафедра міського будівництва і архітектури
Рівень вищої освіти бакалавр
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія
Освітньо-професійна програма міські інженерні мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____

«01» 03 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Петречук Юлії Василівні

1. Тема роботи Модернізація мережі водопостачання міста з урахуванням цілей сталого розвитку
2. затверджено наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1832-с

2. Строк подання роботи: *25.05.2026*

3. Вихідні дані до роботи: генплан міста *(додаток 1), продуктивність мережі водопостачання 80000 м^3/добу.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить розробити): 1. Аналітичні та теоретичні основи модернізації міських мереж водопостачання в умовах сталого розвитку. 1.1Аналіз стану мереж водопостачання в містах України.1.2 Світовий досвід реконструкції інженерних мереж транспортування води. 1.3 Сучасні методи діагностики та моніторингу стану мереж. 1.4 Інноваційні матеріали та технології реконструкції. 2. Визначення вихідних параметрів мережі. 2.1. Вихідні дані. 2.2. Режим водоспоживання міста. 2.3. Вибір режиму роботи насосної станції II підйому. 2.4 Розрахунок водогонів. 3. Розрахунки гідравлічних і технологічних показників мереж. 3.1 Трасування мережі транспортування води. 3.2 Початковий потокорозподіл. 3.3 Моделювання аварійних режимів роботи мережі. 3.4 Розробка розрахункових схем для аварійних режимів. 3.5 Гідравлічні розрахунки мережі для різних режимів роботи. 4. Ааналіз гідравлічних розрахунків мережі водопостачання. 4.1 Визначення п'єзометричних позначок та вільних напорів у вузлах мереж. 4.2 Визначення площ з недостатніми напорами при аварійних

режимах. 4.3 Аналіз роботи мережі в аварійних режимах. 4.4 Економічний ефект від своєчасного виявлення та усунення витоків води. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Генплан міста. 2. П'єзометрична карта вихідного варіанту та п'єзометричні лінії. 3,4 Моделювання аварійних режимів роботи та п'єзометричні карти при аваріях. 5. Графіки зон тисків для аварійних режимів. 6.Технології реконструкції мереж, діаграми витрат води та економії коштів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Добровольська О.Г., к.т.н., доцент		
2	Добровольська О.Г., к.т.н., доцент		
3	Добровольська О.Г., к.т.н., доцент		
4	Добровольська О.Г., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 01.03.2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Виконання	Примітка
1	Розділ 1. Аналітичні та теоретичні основи модернізації міських мереж водопостачання в умовах сталого розвитку.	25.03.26	
2	Розділ 2. Визначення вихідних параметрів мережі	14.04.26	
3	Листи 1-2.	25.04.26	
4	Розділ 3. Розрахунки гідравлічних і технологічних в мереж вод..	05.05.26	
5	Листи 3-4.	10.05.26	
	Розділ 4. Аналіз гідравлічних розрахунків мережі водопостачання..Лист №5.	15.05.26	
6	Лист 6.	22.05.26	
7	Презентація підготовка доповіді.	25.05.26	
8	Попередній захист	25.05.26	

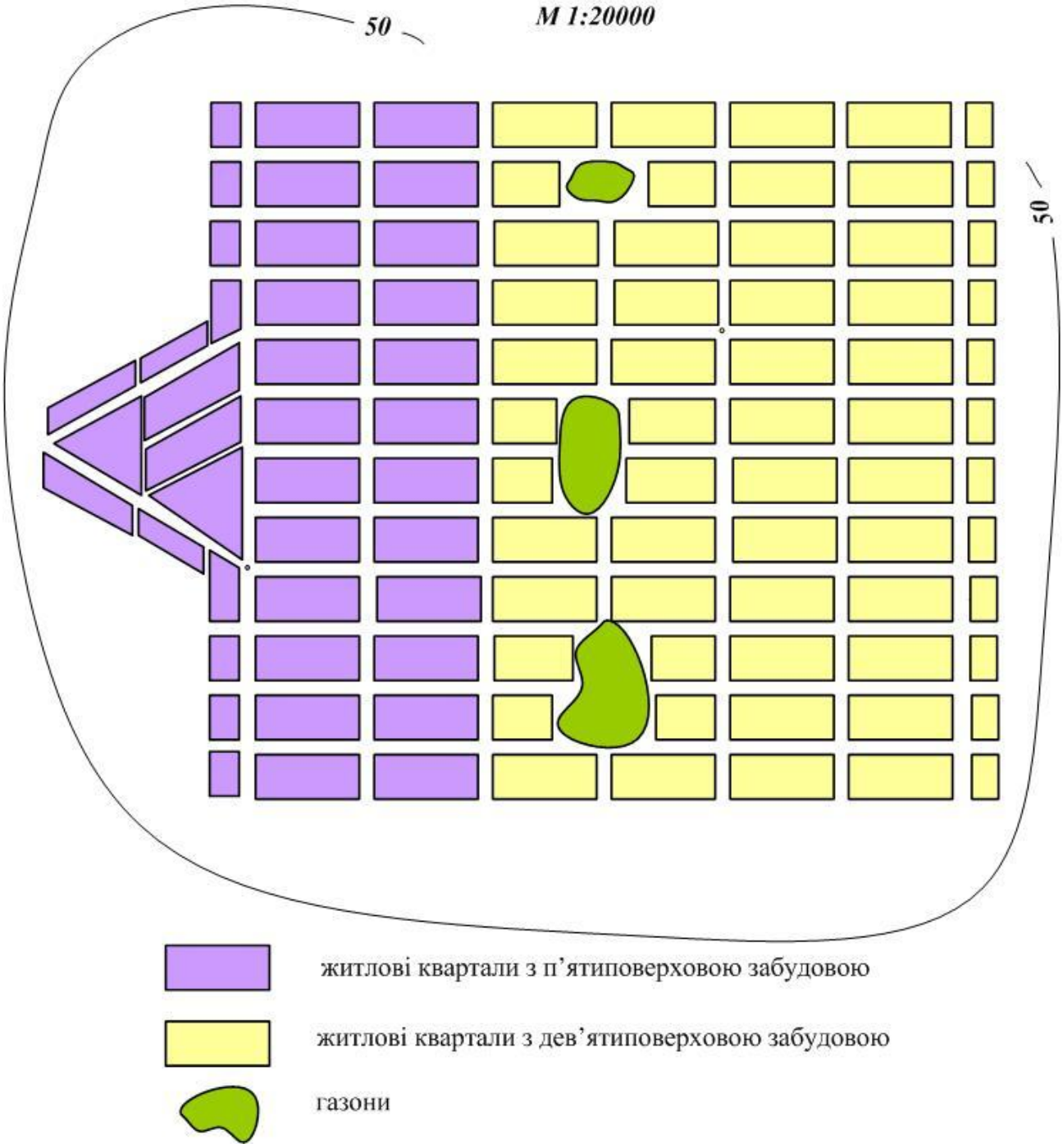
Студент _____ Ю.В. Петречук
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ О.Г. Добровольська
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ І.В. Гребенюк
(підпис) (ініціали та прізвище)

Додаток 1


М 1:20000
50
50
житлові квартали з п’ятиповерховою забудовою
житлові квартали з дев’ятиповерховою забудовою
газони

ЗМІСТ

ВСТУП……6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ МІСЬКИХ МЕРЕЖ ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ
1.1. Аналіз стану мереж водопостачання в містах України……8
1.2. Світовий досвід реконструкції інженерних мереж транспортування води...12
1.3. Сучасні методи діагностики та моніторингу стану мереж……16
1.4. Інноваційні матеріали та технології реконструкції……19
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ……..…24
2.1. Вихідні дані……..…24
2.2. Режим водоспоживання міста……26
2.3. Вибір режиму роботи насосної станції II підйому……28
2.4 Розрахунок водогонів……..……30
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ГІДРАВЛІЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МЕРЕЖ……35
3.1 Трасування мережі транспортування води……35
3.2 Початковий потокорозподіл……37
3.3 Моделювання аварійних режимів роботи мережі……39
3.4 Розробка розрахункових схем для аварійних режимів……40
3.5 Гідравлічні розрахунки мережі для різних режимів роботи……41
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ МЕРЕЖІ ВОДОПОСТАЧАННЯ……...43
4.1 Визначення п’єзометричних позначок та вільних напорів у вузлах мереж…43
4.2 Визначення площ з недостатніми напорами при аварійних режимах……44
4.3 Аналіз роботи мережі в аварійних режимах……45
4.4 Економічний ефект від своєчасного виявлення та усунення витоків води…47
ВИСНОВКИ……52

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……53
ДОДАТОК А……57
ДОДАТОК Б……63
ДОДАТОК В……76

ВСТУП

В умовах воєнних дій та масштабних руйнувань об’єктів інженерної інфраструктури питання відновлення та модернізації міських мереж водопостачання набуває особливої актуальності. Відбудова інженерних систем повинна здійснюватися не лише шляхом заміни зруйнованих ділянок, а на основі комплексного аналізу їх технічного стану, впровадження сучасних рішень, що відповідають принципам сталого розвитку.

Досвід експлуатації показує, що значна частина мереж в українських містах має високий рівень фізичного зносу, що у поєднанні з воєнними пошкодженнями підвищує ризик виникнення аварій, зон із недостатніми тисками та перебоїв у подачі води. Тому модернізація систем водопостачання повинна базуватися на попередньому аналізі аварійних режимів роботи мережі та їх гідравлічному моделюванні, що дозволяє обґрунтувати ефективні інженерні рішення щодо підвищення надійності.

Особливої важливості набуває застосування методів математичного моделювання для оцінки функціонування мережі в умовах відключення окремих ділянок, що дає можливість визначити критичні вузли системи, оцінити забезпечення нормативних вільних тисків, виявити території з ризиком дефіциту води та розробити заходи щодо оптимізації гідравлічних параметрів мережі.

Актуальність теми полягає у необхідності розроблення науково та технічно обґрунтованих підходів до модернізації мережі водопостачання міста після воєнних пошкоджень з урахуванням результатів аналізу та моделювання аварійних режимів роботи системи, а також вимог сталого розвитку.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення комплексу інженерних рішень щодо модернізації мережі водопостачання міста на основі гідравлічних

розрахунків, моделювання аварійних режимів та оцінки ефективності функціонування системи в умовах відбудови.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено вирішення таких завдань: аналіз сучасного стану мереж водопостачання та світового досвіду їх реконструкції для адаптації до українських умов; визначення вихідних параметрів мережі та режимів водоспоживання міста; трасування мережі; моделювання аварійних ситуацій та розробити відповідні розрахункові схеми; гідравлічні розрахунки для нормальних та аварійних режимів роботи мережі; аналіз п'єзометричних позначок, визначення зон з недостатніми тисками та оцінка надійності функціонування системи; обґрунтування технічних рішень щодо модернізації мережі та оцінка економічного ефекту від зменшення втрат води.

Об'єктом дослідження є мережа водопостачання міста в умовах післявоєнної відбудови.

Предметом дослідження є гідравлічні, технологічні та експлуатаційні характеристики водопровідної мережі, методи її модернізації на основі аналізу та моделювання аварійних режимів роботи.

Методи дослідження базуються на положеннях гідравліки та теорії водопровідних мереж, застосуванні інженерних методик розрахунку трубопроводів, методів математичного моделювання режимів роботи системи, графоаналітичних способів визначення п'єзометричних ліній.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених розрахункових схем, результатів моделювання аварійних режимів і запропонованих заходів модернізації під час відбудови та реконструкції міських мереж водопостачання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ МІСЬКИХ МЕРЕЖ ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

1.1 Аналіз стану мереж водопостачання в містах України

Системи централізованого водопостачання є однією з ключових складників інженерної інфраструктури міст України та забезпечують життєдіяльність населення, функціонування промисловості й об’єктів соціальної сфери. Їх технічний стан безпосередньо впливає на якість питної води, надійність її подачі та рівень екологічної безпеки міського середовища.

За даними наукових досліджень і державних звітів, більшість водопровідних мереж в Україні сформовано у другій половині XX століття, що зумовлює їхній значний фізичний і моральний знос [1, с. 18–22]. У багатьох містах трубопроводи експлуатуються понад нормативний термін, що негативно позначається на надійності систем водопостачання та призводить до зростання кількості аварій.

На сучасному етапі розвитку житлово-комунального господарства водопровідні мережі більшості міст України характеризуються високим рівнем зношеності. Згідно з Національною доповіддю про якість питної води та стан питного водопостачання і водовідведення в Україні, у середньому понад 40–50 % протяжності міських водопровідних мереж перебуває у зношеному або аварійному стані [1, с. 41].

Фахівці відзначають, що найбільша кількість відмов припадає на сталеві та чавунні трубопроводи, прокладені без належного антикорозійного захисту, що з часом призводить до втрати герметичності та погіршення гідравлічних характеристик мереж [2, с. 122–124].

Однією з характерних проблем міських систем водопостачання є значні втрати води під час транспортування. На рис. 1.1 приведено розподіл видів пошкоджень водопровідної системи на прикладі м. Кропивницький, діаграма сформована на основі фактичних даних експлуатаційних спостережень за станом мереж та відображає загальний стан транспортування води [2, с.121].

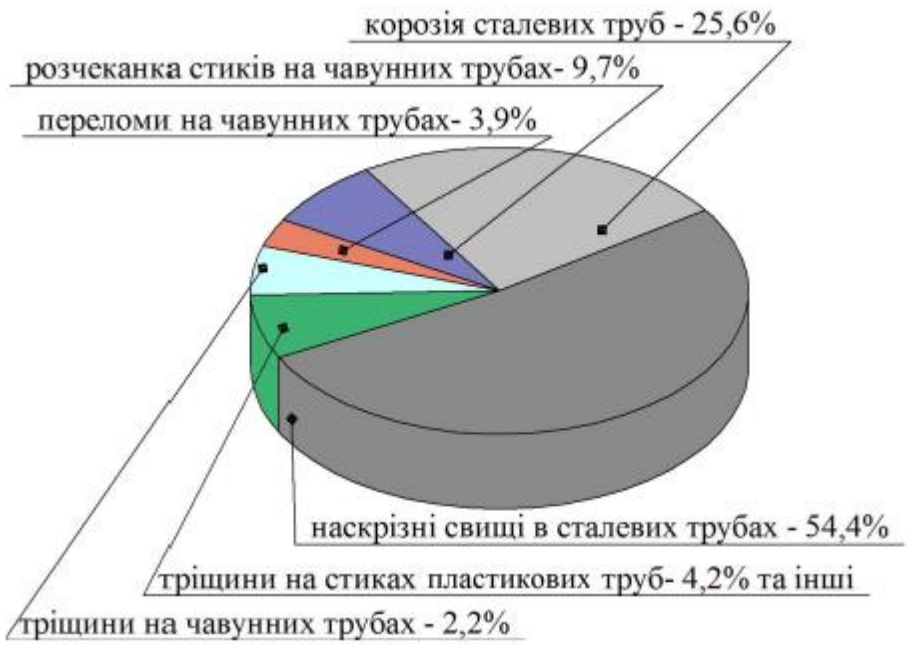


Рисунок 1.1 – Діаграма втрат води з водопровідної мережі [2, с.121]

За результатами виконаного аналізу встановлено [2, с.121], що серед пошкоджень водопровідних мереж домінують наскрізні корозійні свищі у сталевих трубопроводах — їх частка становить 54,4 %. Друге місце за поширеністю посідають прояви загальної корозії, які складають 25,6 % від загальної кількості дефектів. Суттєві втрати води також пов’язані з витоками у місцях розчеплювання стиків чавунних труб — їх питома вага дорівнює 9,7 %. Менша частка пошкоджень припадає на переломи чавунних труб (3,9 %),

тріщини в чавунних трубопроводах (2,2 %), дефекти стикових з'єднань пластикових труб, а також інші види несправностей, які сумарно становлять 4,2 %. Загалом, за результатами галузевих досліджень, втрати води в окремих містах можуть перевищувати 30 % від обсягу поданої води**,** що зумовлено як аварійним станом трубопроводів, так і неефективною системою контролю витоків [3, с. 67–69].

Високий рівень втрат води призводить до збільшення енерговитрат на перекачування, зростання собівартості послуг та додаткового навантаження на очисні споруди. Це, своєю чергою, погіршує економічну ефективність діяльності підприємств водопровідно-каналізаційного господарства [4, с. 358].

Стан мереж водопостачання в Україні значною мірою ускладнюється впливом зовнішніх чинників, серед яких особливе місце посідають військові дії та пов'язані з ними руйнування інженерної інфраструктури. Починаючи з 2014 року, а особливо з 2022 року, значна кількість водопровідних мереж у прифронтових та деокупованих містах зазнала пошкоджень або повного руйнування, що призвело до порушення цілісності трубопроводів, виходу з ладу насосних станцій, резервуарів чистої води та інших елементів систем водопостачання [5]. У багатьох населених пунктах аварійні ситуації супроводжуються тривалими перервами у подачі води або необхідністю використання тимчасових схем водозабезпечення, які не завжди відповідають нормативним вимогам.

Міжнародні та національні організації наголошують, що порушення стабільності водопостачання має не лише технічні, а й соціально-економічні наслідки, оскільки безперебійне забезпечення населення питною водою є базовою умовою санітарної безпеки. Обмежений доступ до води негативно впливає на стан здоров'я населення, функціонування закладів охорони здоров'я, освіти та об'єктів критичної інфраструктури, а також ускладнює проведення

відновлювальних робіт у постраждалих регіонах [5]. У зв’язку з цим проблема відновлення та підвищення стійкості систем водопостачання.

Функціонування та розвиток систем водопостачання в Україні регламентуються чинним законодавством. Основним нормативно-правовим актом є Закон України «Про питну воду та питне водопостачання», який визначає вимоги до якості питної води, безпеки водопровідних систем і відповідальності суб’єктів господарювання [6, розділ IV].

Водночас на практиці виконання нормативних вимог ускладнюється обмеженим фінансуванням, застарілою матеріально-технічною базою та недостатнім рівнем інвестицій у модернізацію водопровідних мереж, що підтверджується аналітичними оглядами галузі [7, розділ 1, с. 14].

Наукові дослідження вказують на необхідність комплексного підходу до оновлення мереж водопостачання, який передбачає поетапну заміну зношених трубопроводів із урахуванням їх фактичного технічного стану, впровадження сучасних матеріалів з підвищеною корозійною стійкістю та тривалим строком експлуатації, а також використання автоматизованих систем моніторингу для оперативного виявлення пошкоджень і витоків води. Важливою частиною такого підходу є впровадження енергоефективних технологій, зокрема оптимізація режимів роботи насосного обладнання та зниження питомих витрат електроенергії на транспортування води, що в цілому сприяє підвищенню економічної ефективності функціонування систем водопостачання [7, с.32].

Застосування науково обґрунтованих методів планування ремонтів і реконструкції, заснованих на аналізі надійності, прогнозуванні залишкового ресурсу елементів мережі та оцінці ризиків відмов, дозволяє зменшити рівень аварійності водопровідних мереж і скоротити обсяги непродуктивних втрат води під час її транспортування. Реалізація таких підходів забезпечує підвищення стабільності та безперебійності водопостачання міських територій, що має

особливе значення в умовах обмежених фінансових ресурсів та є вкрай актуальним у контексті післявоєнного відновлення та модернізації інженерної інфраструктури України.

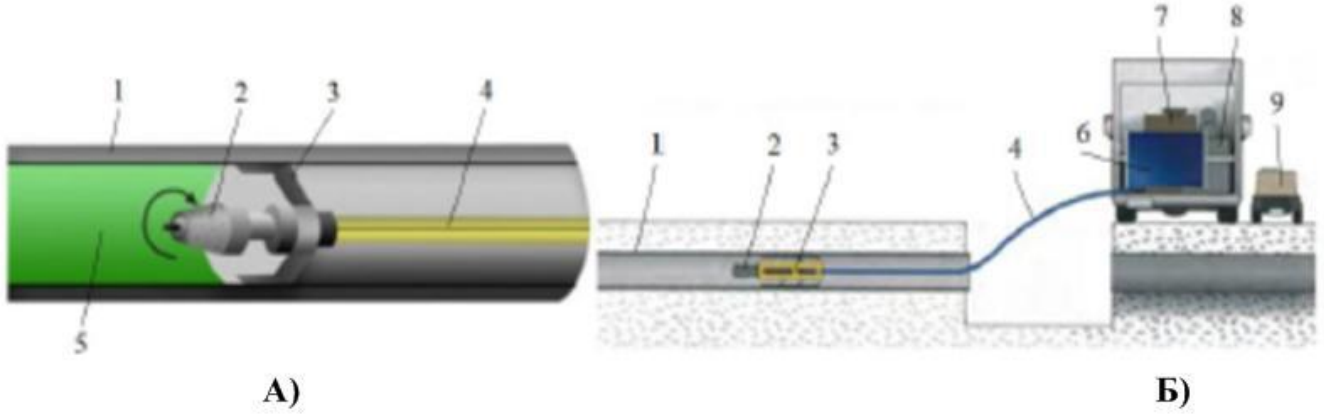
1.2 Світовий досвід реконструкції інженерних мереж транспортування води

Ефективність і надійність водопостачання у сучасних містах безпосередньо залежать від технічного стану інженерних мереж транспортування води, які, як правило, експлуатуються протягом тривалого періоду та потребують систематичного оновлення. У світовій практиці реконструкція водопровідних і водовідних мереж розглядається як складова комплексних програм модернізації міської інфраструктури з урахуванням технічних, економічних та екологічних аспектів розвитку територій [8, с. 26–28].

Аналіз світового досвіду свідчить, що реконструкція мереж водопостачання не обмежується простою заміною застарілих трубопроводів, а передбачає комплексну інтеграцію інженерних інновацій, використання багатокритеріальних моделей прийняття рішень, оцінку ризиків відмов і стратегічне планування розвитку системи в цілому [8, с. 29–31].

Так, у країнах Європейського Союзу в межах науково-практичного проєкту CARE-W було розроблено методичні підходи до вибору ділянок водопровідних мереж, що підлягають першочерговій реконструкції, з урахуванням технічного стану трубопроводів, економічної доцільності та впливу ремонтних робіт на міське середовище [9, с. 3–7]. Такий підхід дозволяє відмовитися від планування реконструкції виключно за календарним терміном експлуатації та перейти до управління мережею з урахуванням сукупних технічних, економічних і соціальних факторів.

У США та інших економічно розвинених країнах широкого поширення набули сучасні технології санації трубопроводів, зокрема безтраншейні методи реконструкції, що дають змогу мінімізувати порушення транспортної інфраструктури та забудови під час виконання ремонтних робіт [10, с. 112–116]. До таких технологій належать внутрішнє напилення захисних покриттів, відновлення труб із застосуванням полімерних матеріалів, а також конструктивне підсилення трубопроводів з метою подовження їхнього строку служби. На рис. 1.2 показана схема машинного внутрішньотрубного нанесення захисного покриття [10, с.22].



а) – внутрішньотрубне нанесення захисного покриття; б) – протягування пристрою трубопроводом; 1 – відновлюваний трубопровід; 2 – форсунка; 3 – тримальне пристосування; 4 – шланг; 5 – внутрішньотрубне покриття;6 – лебідка шлангова барабанна;7 – дозувальний насос; 8 – резервуар; 9 – компресор

Рисунок 1.2 – Схема машинного внутрішнього трубного нанесення захисного покриття Джерело: (10, с.22)

Одним із ключових напрямів світової практики реконструкції є впровадження інструментів підтримки прийняття рішень на основі аналізу даних

і комп’ютерного моделювання. Сучасні багатокритеріальні підходи дозволяють не лише оцінювати фактичний стан водопровідних мереж, а й прогнозувати наслідки різних сценаріїв реконструкції з погляду надійності, вартості та впливу на споживачів [8, с. 32–35].

Важливим складником цих підходів є розвиток концепції управління активами інфраструктури водопостачання, що базується на аналізі життєвого циклу елементів мережі, оцінці ризиків відмов і оптимальному розподілі фінансових ресурсів [11, с. 8–11]. Застосування принципів asset management дозволяє визначати обґрунтовану черговість реконструкції та підвищувати ефективність інвестицій у водогосподарський сектор.

Значну роль у реалізації проєктів реконструкції інженерних мереж транспортування води відіграють міжнародні фінансові організації, зокрема Світовий банк, Європейський інвестиційний банк та фонди Європейського Союзу. У країнах, що розвиваються, реконструкція мереж часто здійснюється в межах комплексних програм розвитку водопостачання і водовідведення. Прикладом є проєкт модернізації системи водопостачання міста Гулу (Уганда), де фінансування спрямовувалося на оновлення розподільчих мереж, зменшення втрат води та підвищення якості послуг для населення [12].

Такі міжнародні ініціативи зазвичай поєднують фінансову підтримку з технічною допомогою та впровадженням єдиних стандартів якості, що сприяє адаптації локальних систем водопостачання до сучасних міжнародних вимог.

Світовий економічний форум у своїх аналітичних звітах наголошує на стратегічній важливості інвестицій у водну інфраструктуру та необхідності подолання глобального дефіциту фінансування для забезпечення стійкості міських систем водопостачання в умовах кліматичних змін та зростання попиту на водні ресурси [13].

У практиці США реконструкція водопровідних мереж часто здійснюється шляхом поєднання санації трубопроводів із впровадженням автоматизованих систем моніторингу стану мереж. Такий підхід дозволяє підвищити надійність транспортування води без повної заміни трубопроводів, що є економічно доцільним в умовах щільної міської забудови [10, с. 118–121].

В азійських країнах прикладом комплексної інфраструктурної модернізації є система NEWater у Сінгапурі, яка, поряд із впровадженням повторного використання води, базується на високій надійності та сучасних технологіях транспортування водних ресурсів. Цей досвід демонструє ефективність інтегрованих підходів до реконструкції та розвитку водогосподарських систем у містах з обмеженими природними ресурсами.

Наукові дослідження підкреслюють доцільність застосування системного підходу до реконструкції інженерних мереж транспортування води, який враховує не лише технічні характеристики трубопроводів, а й показники довговічності, енергоефективності та екологічної безпеки [8, с. 36–38]. У світовій практиці активно розвиваються методи оптимізації мереж на основі індикаторів ризику, аналізу життєвого циклу активів і інтегрованого гідравлічного моделювання.

Системний аналіз свідчить, що реконструкція водопровідних мереж повинна розглядатися як елемент управління життєвим циклом інфраструктурних активів, що включає оцінку технічного стану, управління ризиками та довгострокове стратегічне планування використання ресурсів [11, с. 12–14]. Такий підхід дозволяє узгодити поточні потреби в ремонті з цілями сталого розвитку міських територій.

1.3 Сучасні методи діагностики та моніторингу стану мереж

Ефективне управління технічним станом мереж водопостачання вимагає застосування сучасних методів діагностики та моніторингу, що забезпечують своєчасне виявлення дефектів, витоків, корозійних ушкоджень і гідравлічних порушень. Використання таких методів дозволяє підвищити надійність систем водопостачання, зменшити втрати води та оптимізувати витрати на ремонтні роботи [14, с. 53–57].

Однією з ключових складників сучасного моніторингу є контроль гідравлічних параметрів роботи мережі, зокрема тиску та витрати води. Регулярний збір даних за допомогою датчиків дозволяє здійснювати безперервний моніторинг у реальному часі**,** що сприяє оперативному виявленню відхилень від нормативних режимів та локалізації потенційно аварійних ділянок трубопроводів [14, с. 54–56].

У міжнародній практиці широко використовується інтегрований підхід до моніторингу**,** який передбачає поєднання даних з різнорівневих датчиків, систем геоінформаційного та гідравлічного моделювання. GIS-технології дозволяють створювати цифрові карти мережі, вести просторовий облік та аналізувати зміни параметрів режиму водопостачання. Такі підходи підвищують точність діагностики та ефективність управління інженерними мережами [15, с. 2–5].

Окремим напрямом є застосування спеціалізованих сенсорних технологій, що базуються не лише на гідравлічних вимірюваннях, а й на акустичних і ультразвукових сигналах. Акустичні методи дозволяють виявляти місця втрат води, фіксуючи звукові коливання, що створюються під час витікання рідини з пошкоджених ділянок трубопроводів (рис. 1.3).

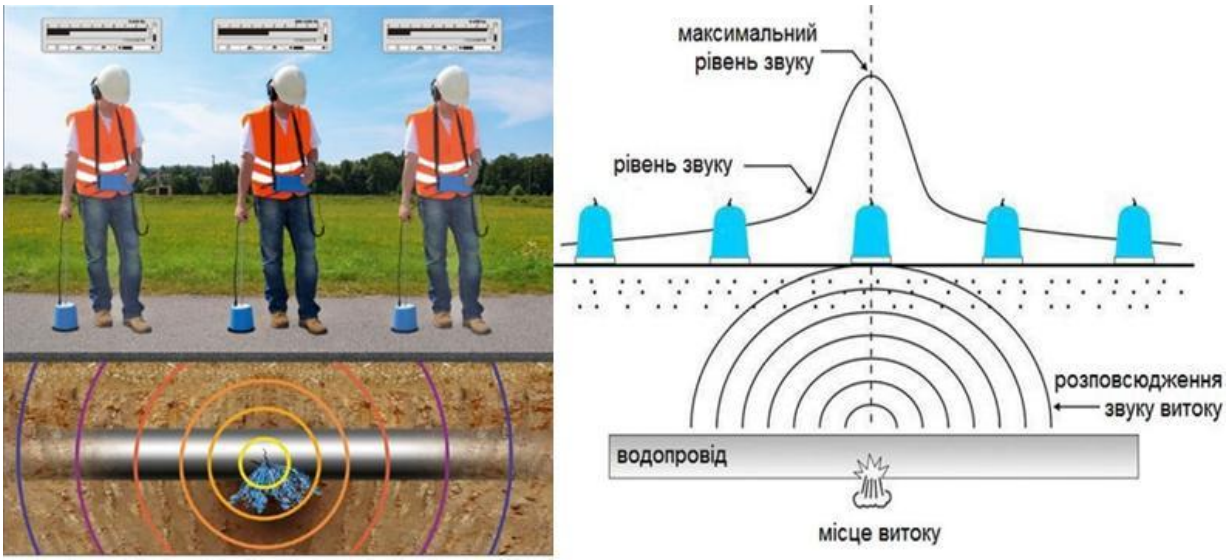


Рисунок 1.3 – Акустичні методи виявлення втрат води [16]

Ці методи можуть бути інтегровані з базою даних тиску, що дозволяє досягати високої точності локалізації дефектів [14, с. 59–61].

У багатьох мережах впроваджуються безпровідні сенсорні мережі**,** що базуються на сучасних технологіях IoT (Internet of Things). Такі мережі дозволяють здійснювати передачу даних із великої кількості датчиків у реальному часі та зберігати їх на хмарних платформах для подальшого аналізу. Це забезпечує гнучкий та масштабований моніторинг, особливо актуальний для великих і складних систем водопостачання [15, с. 3–6].

Серед технологій діагностики також використовуються методи оцінки технічного стану матеріалів і конструкцій труб**,** такі як ультразвукова дефектоскопія, внутрішнє відеообстеження (рис. 1.4) та вимірювання залишкової товщини стінок.



Рисунок 1.4 – Дистанційні методи обстеження трубопроводівр [10, с. 21]

Ці технології дозволяють виявляти корозійні ушкодження, тріщини та інші дефекти у матеріалах труб до критичних стадій розвитку, що сприяє плануванню превентивних заходів з ремонту та реконструкції [14, с. 62–64].

Іншим важливим напрямом є використання математичних моделей і алгоритмів машинного навчання для прогнозування технічного стану мереж. На основі історичних даних про аварії, режими роботи та характеристики труб формуються моделі, що дозволяють оцінювати ймовірність пошкоджень на окремих ділянках та прогнозувати їхню можливу появу з урахуванням змін навантаження та умов експлуатації. Ці підходи сприяють переходу від реактивного ремонту до превентивної стратегії управління технічним станом мереж [15, с. 4–5].

Провідні світові дослідження підтверджують, що сучасні системи моніторингу водопровідних мереж базуються на синтезі сенсорних технологій, автоматизованих систем збору даних, програмного забезпечення для обробки інформації та аналітичних моделей прогнозування. Інтеграція цих компонентів дозволяє створювати «розумні» системи, які самостійно аналізують стан мережі, сигналізують про відхилення та допомагають планувати технічні роботи [14, с. 65; 2, с. 5].

Такий підхід не лише підвищує оперативність виявлення аварій, але й оптимізує витрати на технічне обслуговування мереж, зменшує втрати води та підвищує стабільність водопостачання у містах.

1.4 Інноваційні матеріали та технології реконструкції

Сучасні підходи до реконструкції інженерних мереж водопостачання суттєво відрізняються від традиційних “розкопати-замінити” методів. У відповідь на необхідність зменшення впливу на міське середовище, скорочення строків робіт і підвищення довговічності системи, у світовій практиці активно застосовуються інноваційні матеріали та технології**,** що забезпечують підвищену надійність, довговічність і ефективність відновлення трубопроводів. Серед них важливе місце посідають безтраншейні технології реконструкції**,** композитні матеріали**,** полімерні покриття та сучасні цементні композиції (рис. 1.5)**,** які дозволяють суттєво підвищувати характеристики відновлених мереж [1, с. 1–5].



А) Б)

А) – внутрішньотрубний робот; Б) – схема безповітряного розпилення роботом захисного покриття; 1 – внутрішньотрубний робот; 2 – відновлюваний трубопровід; 3 – шланг; 4 – форсунка; 5 – внутрішньотрубне покриття

Рисунок 1.5 – Автоматизоване нанесення захисного покриття [10, с. 23]

Одним із ключових напрямів інновацій є впровадження безтраншейних технологій**,** що дозволяють виконувати реконструкцію без масштабних земляних робіт. На рис. 1.6 наведено ілюстрацію застосування CIPP методу для ремонту трійників на мережі.



А) Б) В)

А)Т-подібний рукав; Б) пакер для трійників; В) затверділий Т-подібний рукав

Рисунок 1.6 – Застосування CIPP методу для ремонту трійників [10, с. 28]

Ці методи широко застосовуються для водопостачальних та водовідвідних мереж, оскільки вони мінімізують вплив на дорожній трафік, забудову та зменшують загальні витрати на реконструкцію [2, с. 2–5].

Однією із найпоширеніших технологій є CIPP-технологія, яка передбачає формування нового трубопроводу всередині наявного без його демонтажу. Матеріали для CIPP включають просочений смолою текстильний або інший носій, який після введення в трубу полімеризується під впливом тепла, пара чи УФ-випромінювання, утворюючи жорсткий герметичний шар, що суттєво продовжує строк служби труби [5, с. 1–3]. CIPP дозволяє отримати безшовну конструкцію з високою механічною міцністю та хорошою стійкістю до корозії, що є критично важливим для довготривалої експлуатації водопровідних мереж [3, с. 1–6].

Інша технологія – spray-in-place pipe (SIPP) використовує полімерні покриття, які наносяться безпосередньо на внутрішню поверхню труби шляхом обприскування спеціальними роботизованими системами. Створена SIPP-оболонка має високу адгезію до основного матеріалу труби, запобігає подальшому корозійному руйнуванню та знижує ризики локальних протікань [3, с. 4–8]. Основною перевагою цієї технології є можливість швидкого оновлення великих ділянок труби без значного розкопування, що зменшує загальний час робіт [2, с. 5–6].

У науковій літературі відзначається, що традиційні методи ремонтів, такі як відкриті траншеї та повна заміна труб, хоч і є ефективними, проте мають суттєві недоліки у вигляді високих матеріальних та часових затрат, а також значного негативного впливу на міське середовище. У зв’язку з цим з’являються композитні матеріали для реконструкції, зокрема волокнисті армувальні полімери (FRP)**,** які використовуються як у складі CIPP та SIPP, так і окремо у вигляді вклеєних або напилених покриттів [1, с. 6–10]. FRP забезпечують високу міцність та довговічність, а також високу корозійну стійкість у агресивних середовищах [4, с. 2–5].

Сучасні дослідження також приділяють увагу класу інженерних цементних композицій – *Engineered Cementitious Composites (ECC)*, які характеризуються надзвичайно високою здатністю до розтягування, контролю тріщин та покращеною довговічністю (рис.1. 7).



Рисунок 1.7 – Нанесення цементно-полімерного покриття на внутрішню поверхню труби [17]

Ці матеріали можуть бути використані як самостійні ремонтні шари або у складі безтраншейних технологій для посилення структурної здатності труби після реконструкції [2, с. 3–6]. ECC-матеріали демонструють перевагу над традиційним бетоном завдяки своїй здатності поглинати деформації та запобігати появі критичних тріщин, що сприяє зменшенню витоків та продовженню терміну служби елементів мережі [3, с. 7–10].

Інноваційний напрям у реконструкції полягає також у використанні геополімерних сумішей та матеріалів, які мають нижчий вуглецевий слід та покращені механічні характеристики порівняно з традиційними цементними розчинами [21, с. 1]. Геополімери можуть застосовуватись для заповнення пустот, ущільнення тріщин або у вигляді облицювального шару, що забезпечує покращене захисне середовище для сталевих елементів трубопроводів [21, с. 1

Технології реконструкції також включають застосування сучасних роботизованих систем, що дозволяють не лише укладати нові матеріали, але і здійснювати автоматизоване нанесення ремонтних шарів без ручного втручання. Наприклад, *robotic spraying systems* [22] дозволяють рівномірно наносити полімерні чи цементні лінії на внутрішні поверхні труб під контролем датчиків якості покриття, що підвищує рівень контролю над процесом реконструкції.

Останнім часом увага науковців і практиків привертається до комплексних підходів у реконструкції мереж, де поєднуються сучасні матеріали з цифровим плануванням робіт та оцінкою стану мережі перед реконструкцією. Такі підходи передбачають вибір оптимального матеріалу та технології на основі даних про стан труб, умов їх експлуатації та прогнозованих навантажень. Це сприяє підвищенню рентабельності інвестицій у реконструкцію та підвищенню загальної надійності системи водопостачання.

Узагальнюючи міжнародний досвід, можна відзначити, що інноваційні матеріали та технології реконструкції стали ключовими факторами для створення

сталих, довговічних та екологічно ефективних систем водопроводів. Вони дозволяють не лише відновлювати експлуатаційні властивості мереж, а й значно знижувати загальні витрати на обслуговування та ремонт протягом тривалого періоду експлуатації.

РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ

2.1. Вихідні дані

У даній кваліфікаційній роботі виконується проєктування схеми мережі централізованого водопостачання для міста, генеральний план якого наведено на рисунку 2.1.

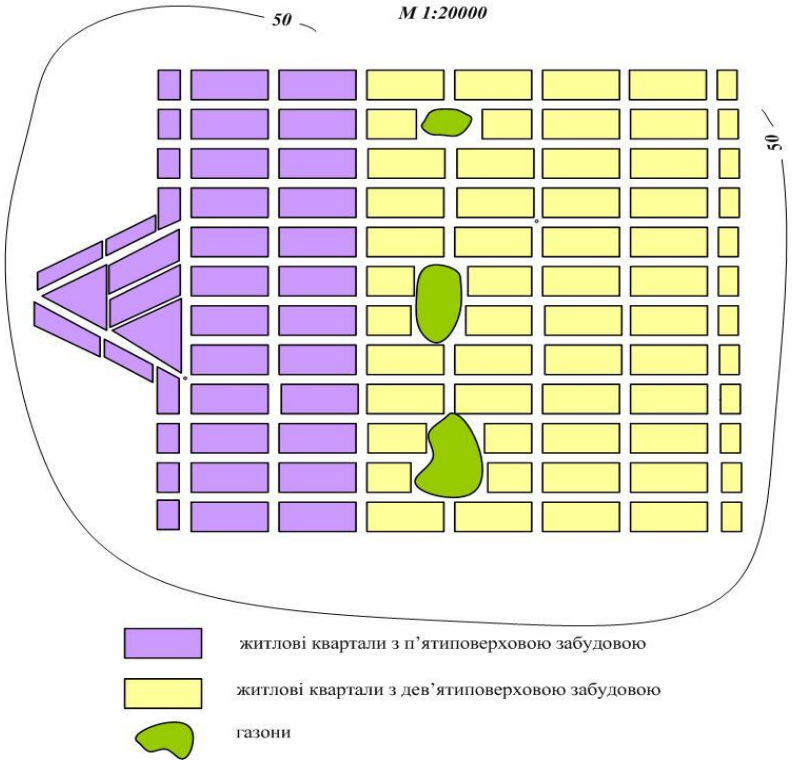


Рисунок 2.1 – Генплан міста

Проєктування системи водопостачання здійснюється відповідно до вимог чинних нормативних документів, зокрема [18, п. 8.1 – 8.3]**,** які регламентують принципи побудови, розрахунку та експлуатації міських водопровідних мереж.

Площа міста становить 576 га, що відповідає середнім за розмірами населеним пунктам. Територія міста розташована переважно на відмітці 50 м, що свідчить про відносно рівнинний рельєф. За таких умов доцільно застосовувати

кільцеві або комбіновані схеми водопровідних мереж, які забезпечують надійність водопостачання та можливість перерозподілу витрат у разі аварійних ситуацій [19, с. 50].

Максимальна добова витрата води для міста прийнята рівною 80000 м³/добу. Для врахування нерівномірності водоспоживання протягом доби прийнято максимальний коефіцієнт нерівномірності, який дорівнює 1,3. Застосування коефіцієнтів нерівномірності відповідає рекомендаціям [18, п. 6.1.2**]**, відповідно до яких при гідравлічних розрахунках необхідно враховувати максимальні режими водорозбору.

Однією з основних умов надійної роботи системи водопостачання є забезпечення нормативних тисків у споживачів. Необхідний напір у найбільш невигідній точці мережі прийнято рівним 42 м. Це значення відповідає вимогам [18, п. 6.3.1]**,** які встановлюють мінімально допустимі напори для забезпечення нормальної роботи внутрішніх водопровідних систем будівель, з урахуванням поверховості забудови та втрат напору у мережі. Для регулювання тиску та створення запасу води в системі передбачено використання водонапірної башти. Водонапірна башта розташована поблизу точки приєднання напірних водоводів і має відмітку +70 м. Таким чином висотне розташування регулювальної місткості забезпечує необхідний тиск в мережі без перевищення його допустимих значень [19, с. 134]. Довжина напірних водоводів від джерела водопостачання до міської мережі становить 5 км.

Таким чином, наведені вихідні дані та прийняті нормативні положення є основою для подальшого гідравлічного розрахунку мережі водопостачання, вибору її схеми та обґрунтування інженерних рішень при виконанні кваліфікаційної роботи.

2.2. Режим водоспоживання міста

Визначення розрахункових витрат води в окремі години доби виконано з урахуванням коефіцієнта годинної нерівномірності водоспоживання.

В кваліфікаційній роботі годинний розподіл витрат води на господарсько-питні потреби міста прийнято у відсотках від максимальної добової витрати відповідно до табличних значень коефіцієнтів годинної нерівномірності, наведених у нормативній літературі [1]. Застосування табличних значень враховує типовий режим водоспоживання, на основі відсоткового розподілу добової витрати води визначається об'єм води, що споживається у кожну годину доби. Розрахунок годинної витрати води здійснено за формулою:

$$Q_{ст.г.} = P_{ст.г.} \times Q_{і\ доб.макс} / 100, \qquad (2.1)$$

де $P_{ст.г}$ – відсоткове значення витрати води для *і*-тої години доби, %;

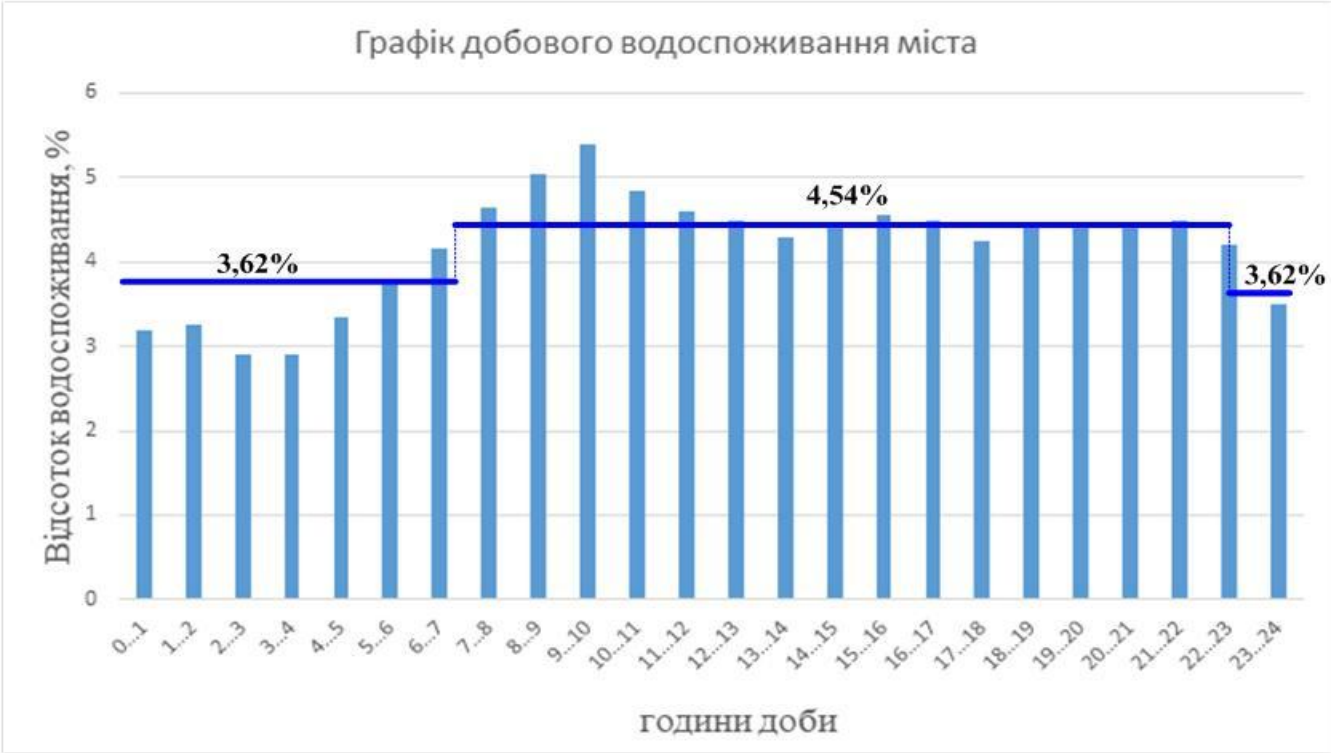
$Q_{і\ доб.макс}$ – максимальна добова витрата води для *і*-го району міста, м³/добу.

Отримані за формулою (2.1) значення годинних витрат використані для визначення фактичних навантажень на водопровідну мережу в різні періоди доби: найбільші витрати води спостерігаються у ранкові (8–9; 9–10) та вечірні (21-22) години, що пов'язано з підвищеною активністю населення, тоді як у нічний час витрати є мінімальними. Згідно з прийнятим режимом водоспоживання для всього міста виконано розрахунок годинних витрат води, результати якого зведені в таблицю годинного розподілу водоспоживання (рис.2.2, А). У таблиці наведено відсоткові значення годинних витрат, відповідні їм об'єми води та їх суму, яка дорівнює максимальній добовій витраті води 80000 м^3/доб. За даними таблиці 2.1 побудовано ступінчастий (диференційний) графік погодинного споживання води містом, який наведено на рис. 2.2, Б.

Таблиця 2.1 – Сумарне водопостачання міста

Години доби	Загальне водоспоживання	
	%	м³
0…1	3,2	2560
1…2	3,25	2600
2…3	2,9	2320
3…4	2,9	2320
4…5	3,35	2680
5…6	3,75	3000
6…7	4,15	3320
7…8	4,65	3720
8…9	5,05	4040
9…10	5,4	4320
10…11	4,85	3880
11…12	4,6	3680
12…13	4,5	3600
13…14	4,3	3440
14…15	4,4	3520
15…16	4,55	3640
16…17	4,5	3600
17…18	4,25	3400
18…19	4,45	3560
19…20	4,4	3520
20…21	4,4	3520
21…22	4,5	3600
22…23	4,2	3360
23…24	3,5	2800
Всього	100	80000

А)



Б)

Рисунок 2.2 – Таблиця погодинних витрат (А) та сумарний графік водоспоживання міста й роботи насосної станції другого підйому

Даний графік наочно відображає зміну витрат води протягом доби та дозволяє визначити години максимального і мінімального водоспоживання: максимальна кількість води споживається о 9-10 годині ранку і становить 5,4 % від сумарного добового водоспоживання, або 4320 м^3/год, мінімальне водоспоживання відбувається з 1 до 3 години ночі – 2320 м^3/год.

Таким чином, виконаний розподіл витрат води по годинах доби дозволяє більш точно врахувати реальні умови експлуатації системи водопостачання та є необхідною складовою подальших інженерних розрахунків у даній кваліфікаційній роботі бакалавра.

2.3 Вибір режиму роботи насосної станції II підйому

За графіком сумарного водоспоживання населеного пункту (рис. 2.2, Б) визначено кількість ступенів роботи насосної станції та їх продуктивність. Кількість ступенів і режим їх роботи прийнято таким чином, щоб забезпечити подачу води відповідно до змін водоспоживання протягом доби. Для проєктованого режиму подачі води повинна виконуватись умова балансу поданої та спожитої води, яка описується залежністю

$$\Sigma Q_i \cdot T_i = 100\%, \qquad (2.2)$$

де n – кількість ступенів роботи насосної станції;

Q_i, T_i – відповідно продуктивність та час роботи і-го ступеня.

Відповідно до наміченої продуктивності кожного ступеня визначено подачу одного насосного агрегату. З урахуванням забезпечення надійності та гнучкості роботи насосної станції насоси вибрані таким чином, щоб продуктивність першого ступеня забезпечувалась роботою двох насосів. При переході на другий ступінь до двох працюючих насосів паралельно підключається третій насос такого ж типу.

Така схема дозволяє регулювати подачу води залежно від фактичних витрат та підвищує експлуатаційну надійність насосної станції.

У цьому випадку подача одного насосного агрегату з урахуванням зниження продуктивності при паралельній роботі визначається за формулою:

$$Q_н = (0{,}55...0{,}6) \cdot Q_1, \qquad (2.3)$$

де Q_1 – продуктивність найменшого ступеня насосної станції.

$$Q_н = 0{,}55 \cdot 3{,}26 = 1{,}793 \text{ від } Q_{доб.макс} = 1434 \text{ м}^3.$$

Орієнтовний напір насосів визначаємо за формулою:

$$H_н = П_i - Z_н + H_з \qquad (2.4)$$

де $П_i$ – розрахункова п'єзометрична позначка в невигідній точці;

$Z_н$ – позначка осі насосів, прийнята на 2 м нижче позначки землі;

$H_з$ – запас на витрати напору в мережі та водоводах, м.

П'єзометричну позначку у вузлі, яка розглядається визначається за формулою:

$$П_i = Z_i + H_{і.віл.}, \qquad (2.5)$$

де Z_i – позначка поверхні землі в і – му вузлі;

$H_{і.віл.}$ –- необхідний вільний напір в і – му вузлі.

$$П_i = 50 + 42 = 92 \text{ м.}$$

З урахуванням прийнятих втрат напору та позначки встановлення насосів орієнтовний розрахунковий напір становить

$$H_н = 92 - 48 + 30 = 74 \text{ м.}$$

За отриманими значеннями подачі та напору та перевірки наявності відповідних насосів у каталозі [20] встановлено, що для заданих параметрів підходить насос типу Д 1250–65, який має такі основні технічні характеристики: подача – 1250 м³/год, напір – 78 м, частота обертання робочого колеса – 1450 об/хв.

Таким чином, продуктивність першого ступеня насосної станції забезпечується роботою двох насосів типу Д 1250–65, а при переході на другий ступінь до них паралельно підключається третій насос аналогічного типу, що забезпечує необхідний режим надходження води в систему водопостачання.

2.4 Розрахунок водогонів

Для розрахунку водогонів від насосної станції II підйому до мережі вибрано сталеві водогони з діаметрами 600 мм, які прийняті за величиною економічного фактору Е = 0,75.

Втрати напору в водоводах визначено за формулою:

$$h_{вб} = 1.15 \cdot \delta \cdot S_0 \cdot l \cdot q_{вр}^2, \quad (2.6)$$

де $q_{вр}^2$, $i_{вр}$ – відповідно витрата та питомі втрати напору у водогонах;

$\cdot \delta \cdot$ – виправний коефіцієнт до значень S_0 для сталевих або чавунних водопровідних труб;

S_0 – розрахункове значення питомого опору для сталевих водопровідних труб;

$\cdot l \cdot$ – довжина ділянки.

Розраховано характеристику для водоводів від насосної станції II підйому до мережі за формулою:

$$H_{nk} = H_{гк} + h_{вб}, \quad (2.7)$$

де H_{nk} – повна витрата при n – й витраті;

$H_{гк}$ – геометрична висота підйому:

$$H_{гк} = П_к - Z, \quad (2.8)$$

де $П_к$ – п'єзометрична позначка у точці підключення водоводів до мережі для k – го режиму;

Z – позначка найнижчого рівня води в резервуарі, приймаємо на 3 м нижче позначки вісі насосів.

Значення показників для водогонів від насосної станції II підйому до мережі: Q = 0,5045 м^3/с; d = 600 мм; V = 1,79 м/с; A = 0,02262; δ = 0,958; l = 5000 м; $h_{вб}$ = 29,79 м.

Розрахунок характеристики водоводів зводено у таблицю 2.2 для нормальних умов роботи мережі, у таблицю 2.3 –для аварійних умов. За даними таблиць 2.2 – 2., побудовані графічні залежності виду H = f (q_{nk}) (рис. 2.3).

Таблиця 2.2 – Розрахунок характеристики водоводів при режимі максимального водоспоживання

Показник	Значення показників для $q_{пк}$					
	0	0,25 Qв	0,5 Qв	0,75 Qв	Qв	1,25 Qв
Q	0	0,1261	0,2523	0,3784	0,5045	0,6306
V, м/с	0	0,45	0,90	1,34	1,79	2,24
δ	0	1,192	1,021	0,946	0,958	0,869
$H_{пр}$	0	1,86	7,45	16,76	29,79	46,55
$H_{г.макс}$	66,97					
$H_{п.макс.}$	66,97	68,83	74,42	83,73	96,76	113,52

Таблиця 2.3 – Розрахунок характеристики водоводів при аварійних ситуаціях

№ аварійної ділянки	Показник	Значення показників для $q_{пк}$					
		0	0,25 Qв	0,5 Qв	0,75 Qв	Qв	1,25 Qв
	Q	0	0,1261	0,2523	0,3784	0,5045	0,6306
	V, м/с	0	0,45	0,90	1,34	1,79	2,24
	δ	0	1,192	1,021	0,946	0,958	0,869
	$H_{пр}$	0	1,86	7,45	16,76	29,79	46,55
5-1	$H_{г.макс}$	72,74					
	$H_{п.макс.}$	72,74	74,60	80,19	89,50	102,53	119,29
9-13	$H_{г.макс}$	70,37					
	$H_{п.макс.}$	70,37	72,23	77,82	87,13	100,16	116,92
1-2	$H_{г.макс}$	69,37					
	$H_{п.макс.}$	69,37	71,23	76,82	86,13	99,16	115,92
5-6	$H_{г.макс}$	90,13					
	$H_{п.макс.}$	90,13	91,99	97,58	106,89	119,92	136,68
9-10	$H_{г.макс}$	84,27					
	$H_{п.макс.}$	84,27	86,13	91,72	101,03	114,06	130,82
13-14	$H_{г.макс}$	68,10					
	$H_{п.макс.}$	68,10	69,96	75,55	84,86	97,89	114,65
2-3	$H_{г.макс}$	76,27					
	$H_{п.макс.}$	76,27	78,13	83,72	93,03	106,06	122,82
6-7	$H_{г.макс}$	72,67					
	$H_{п.макс.}$	72,67	74,53	80,12	89,43	102,46	119,22
10-11	$H_{г.макс}$	77,47					
	$H_{п.макс.}$	77,47	79,33	84,92	94,23	107,26	124,02
14-15	$H_{г.макс}$	76,44					
	$H_{п.макс.}$	76,44	78,30	83,89	93,20	106,23	122,99
6-2	$H_{г.макс}$	70,18					

	$H_{п.макс.}$	70,18	72,04	77,63	86,94	99,97	116,73
10-6	$H_{г.макс}$	66,99					
	$H_{п.макс.}$	66,99	68,85	74,44	83,75	96,78	113,54
10-14	$H_{г.макс}$	68,94					
	$H_{п.макс.}$	68,94	70,80	76,39	85,70	98,73	115,49

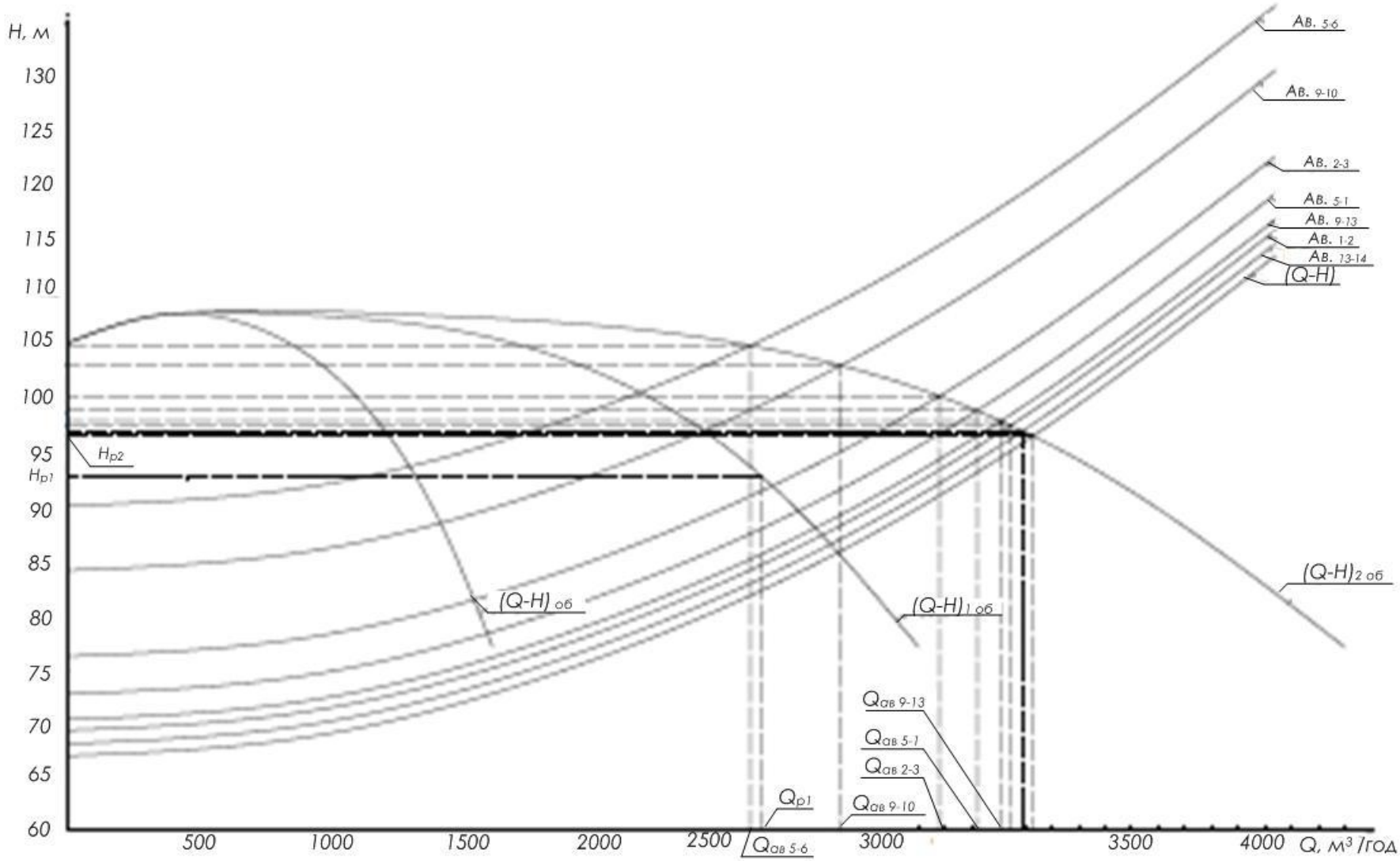


Рисунок 2.3 – Характеристики насосів та водоводів

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ГІДРАВЛІЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МЕРЕЖ

3.1 Трасування мережі транспортування води

Схема мережі показана на рис. 3.1.

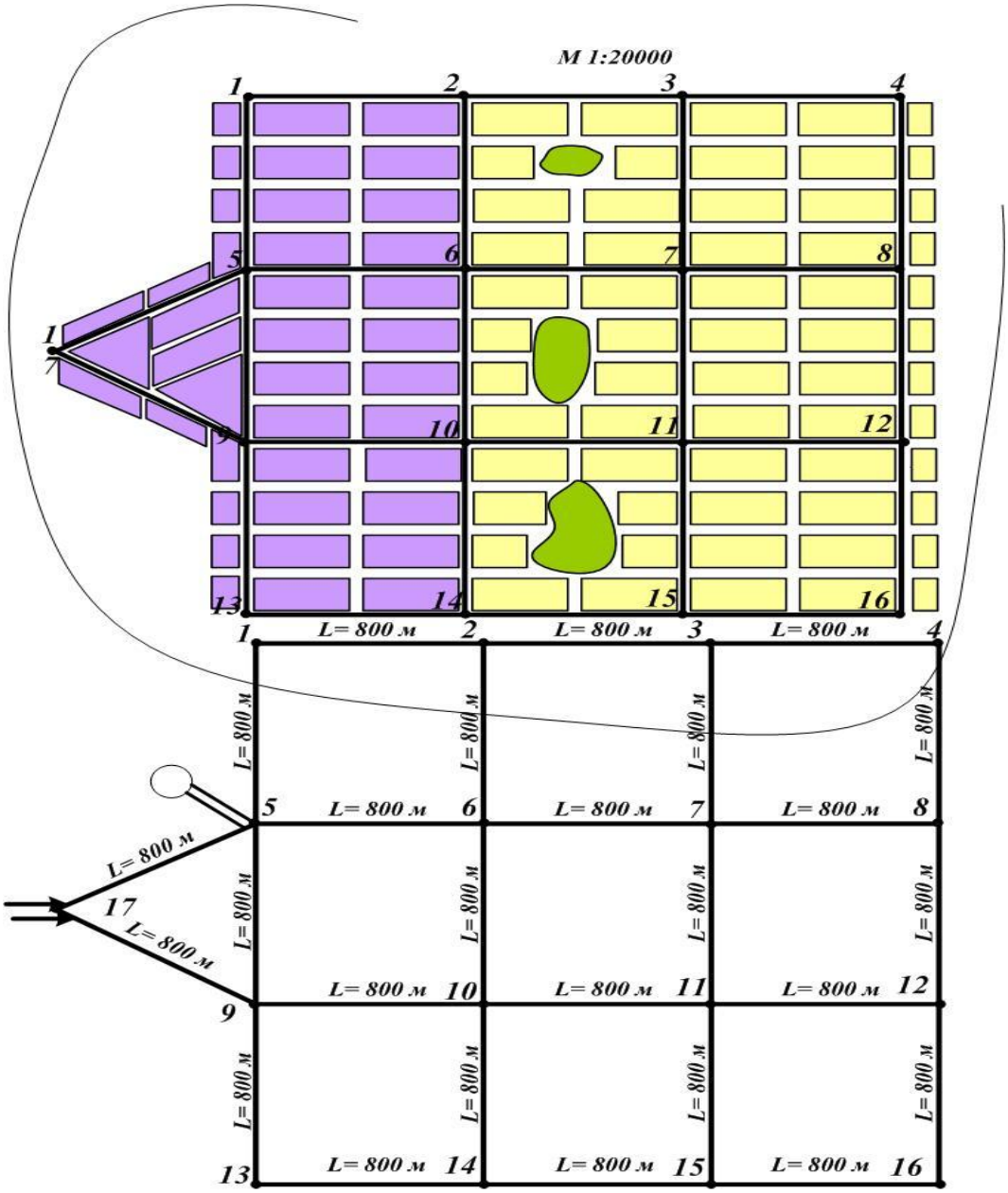


Рисунок 3.1 –Трасування водопровідної мережі

Трасування водопровідної мережі (рис. 3.1) виконано з урахуванням планувальних, топографічних та гідравлічних умов території міста, а також відповідно до розрахункових витрат води та вимог щодо надійності водопостачання. Місто має площу 576 га, що відповідає розмірам 2400 × 2400 м², та розташоване на відмітці поверхні землі 50 м. Така площа дозволяє запроєктувати кільцеву водопровідну мережу з рівномірним розподілом витрат між основними магістралями, яка складається з 10 кілець, 17 вузлів та 26 ділянок трубопроводів, як показано на рис. 3.1. Кільцева схема забезпечує можливість перерозподілу витрат води при аварійного відключення окремих ділянок, магістральні трубопроводи прокладаються вздовж головних вулиць і транспортних напрямків, що спрощує їх експлуатацію та ремонт.

Водонапірна башта розташована поблизу точки приєднання напірних водоводів на відмітці +70 м (вузол 3 5). Таке розміщення є доцільним, оскільки дозволяє ефективно використовувати геодезичну висоту для створення необхідного напору в мережі та частково вирівнювати нерівномірність водоспоживання протягом доби. Башта виконує регулювальну функцію, забезпечуючи стабільну роботу мережі в години максимального та мінімального водорозбору.

Напірні водоводи, що з’єднують насосну станцію з міською водопровідною мережею, мають загальну довжину 5 км. Їх трасування здійснено за найкоротшим можливим шляхом з урахуванням рельєфу місцевості, існуючої забудови та інженерних комунікацій. При цьому враховується необхідність мінімізації втрат напору та забезпечення надійної роботи водоводів у напірному режимі.

Таким чином, прийнята схема трасування водопровідної мережі забезпечує надійне та безперебійне водопостачання міста при заданих витратах води, необхідному тиску та умовах експлуатації, а також відповідає вимогам чинних нормативних документів [18, п. 8.2].

3.2 Початковий потокорозподіл

Для розрахунку вузлових витрат водопровідної мережі використано загальну витрату води, що відбирається із системи в період максимального водоспоживання. Це значення рівномірно розподілено між усіма вузлами мережі шляхом поділу на їх загальну кількість.

Вузлові витрати визначаються за такою формулою

$$Q_{вуз} = Q / n, \qquad (3.1)$$

де n – кількість вузлів.

Величина вузлових витрат у більшості вузлів становить 75 л/с, тоді як для п’ятого вузла вона дорівнює 75,1 л/с. Для водопровідної мережі загальний обсяг витрати розподілено рівномірно між усіма вузлами, що зумовлено однаковою довжиною ділянок мережі. Попередній розподіл витрат на окремих ділянках мережі виконано на підставі визначених вузлових витрат із дотриманням умови (3.2):

$$\sum q_{і\text{-}к} - Q_{вуз} = 0, \qquad (3.2)$$

де $\sum q_{і\text{-}к}$ – сума витрат води на ділянках, які приєднані до вузла, що розглядається;

$Q_{вуз}$ – відбір води з вузла, який розглядається.

При визначенні діаметрів ділянок водопровідної мережі прийнято значення економічного фактору Е = 0,75. На рисунку 3.2. показана схема початкового розподілу витрат на ділянках мережі.

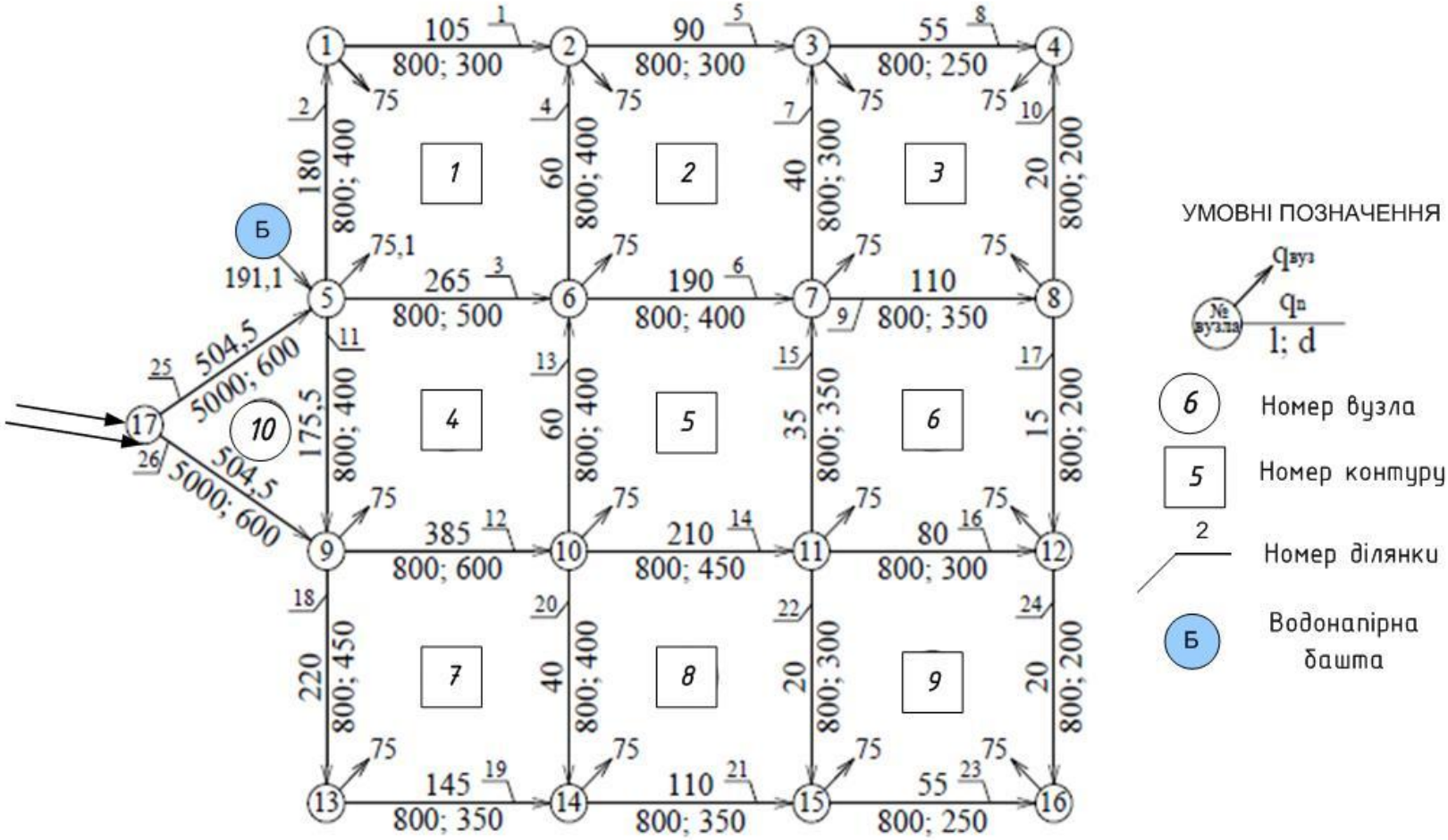


Рисунок 3.2 – Схема попереднього розподілу потоків по ділянках мережі

3.3 Моделювання аварійних режимів роботи мережі

Моделювання режимів роботи мережі виконано з урахуванням 12 варіантів аварійних режимів роботи мережі**.** Для кожного варіанта передбачалося виникнення аварійного пошкодження на окремій ділянці водопровідної мережі, що призводило до її відключення від роботи. Зокрема, були розглянуті ситуації з пошкодженням ділянок № 2, 3, 4, 5, 6, 12, 13, 14, 18, 19, 20 та 21. Схема розташування цих ділянок у структурі водопровідної мережі наведена на рисунку 3.3.

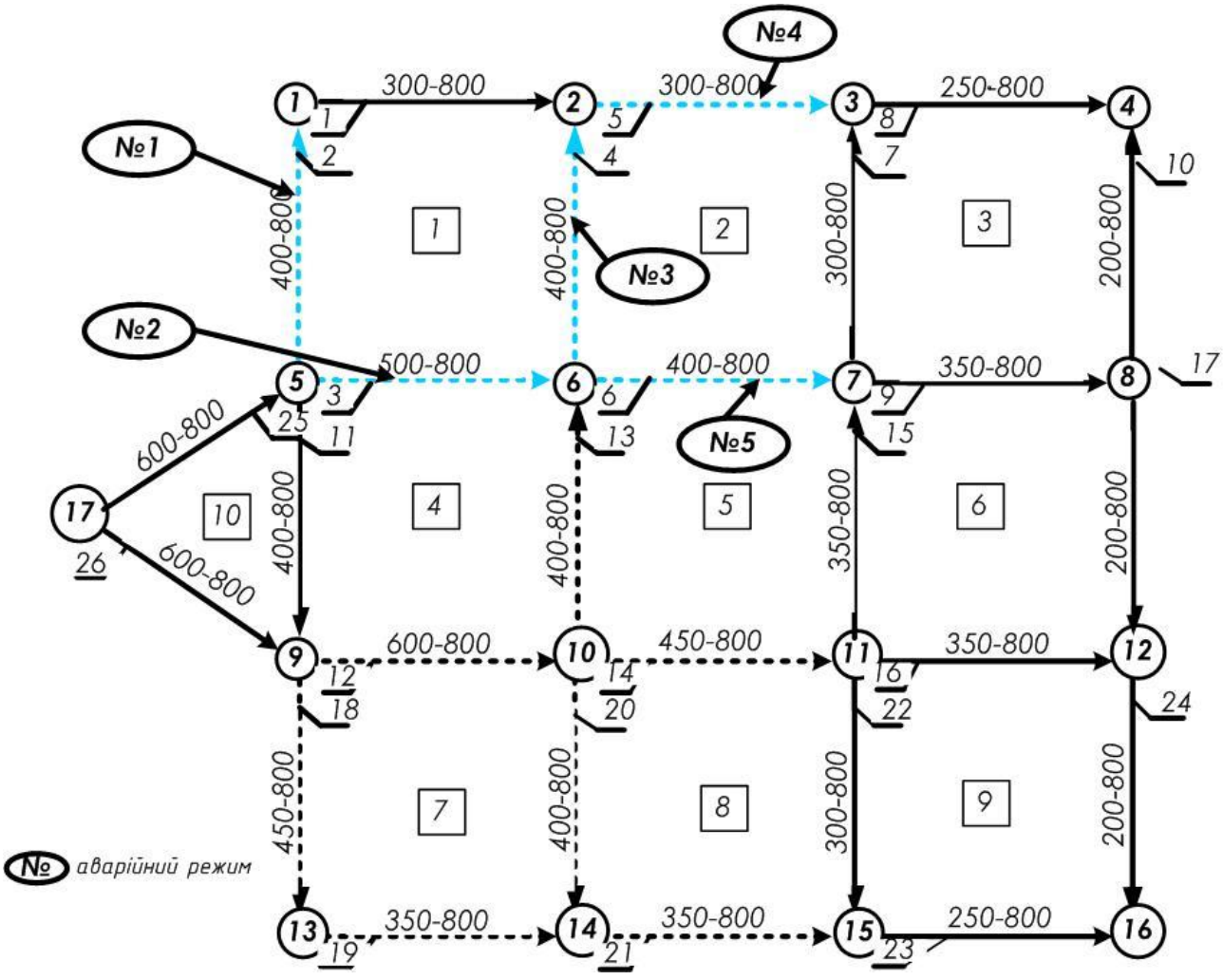


Рисунок 3.3 – Моделювання режимів роботи мережі транспортування води

Під час моделювання передбачалося, що у випадку виникнення аварії відповідна ділянка мережі відключається шляхом перекриття запірної арматури, після чого перерозподіл потоків води відбувається через інші ділянки трубопроводів. У результаті такого перерозподілу змінюються значення витрат води на ділянках мережі, а також втрати напору в трубопроводах. Це, у свою чергу, може призводити до зниження тиску у вузлах мережі або збільшення навантаження на окремі трубопроводи.

Для аналізу роботи системи було виконано гідравлічні розрахунки водопровідної мережі як для вихідного (нормального) режиму її функціонування, так і для кожного з розглянутих аварійних варіантів. Розрахунки проводилися з урахуванням зміни напрямків руху води, величини витрат на окремих ділянках, а також втрат напору в трубопроводах.

3.4 Розробка розрахункових схем для аварійних режимів

Схеми роботи водопровідної мережі з урахуванням змодельованих аварійних ситуацій були розроблені для режиму максимального водоспоживання**,** саме в цей період система водопостачання має найбільше навантаження. Розроблені розрахункові схеми відображають особливості роботи водопровідної мережі при відключенні окремих ділянок та дозволяють простежити перерозподіл потоків води в системі. Усі схеми водопровідної мережі з урахуванням змодельованих аварійних ситуацій для режиму максимального водоспоживання наведені у додатку А**.** Представлені матеріали ілюструють зміни у структурі потоків води та дозволяють більш детально проаналізувати роботу системи водопостачання за різних аварійних умов.

3.5 Гідравлічні розрахунки мережі для різних режимів роботи

За розрахунковими схемами водопровідної мережі, наведеними на рис. 3.2 та у додатку А (рис. А.1–А.12), було виконано гідравлічні розрахунки для режима максимального водоспоживання**,** що дозволило оцінити пропускну здатність трубопроводів, величину втрат напору та ефективність функціонування мережі як у нормальних умовах, так і при виникненні аварійних ситуацій.

Розрахунки виконувались для вихідного (нормального) режиму роботи мережі**,** а також для варіантів, що моделюють можливі аварійні пошкодження на окремих ділянках трубопроводів.

Отримані результати гідравлічних розрахунків наведені у таблицях Б.1–Б.13 додатка Б**,** де представлені значення витрат води на ділянках, швидкостей руху води, а також величини втрат напору для кожного з розглянутих варіантів роботи мережі.

Аналіз результатів показав, що у вихідному режимі роботи мережі втрати напору на магістральних трубопроводах змінюються в межах від 2,49 до 7,26 м**.** Такі значення відповідають допустимим межам для даного режиму водоспоживання та свідчать про достатню пропускну здатність трубопроводів при нормальних умовах експлуатації системи.

У випадку виникнення аварійних ситуацій на окремих ділянках мережі спостерігається збільшення втрат напору**,** що пояснюється перерозподілом потоків води та підвищенням навантаження на суміжні трубопроводи. Характер зміни гідравлічних параметрів залежить від місця виникнення аварії та діаметра пошкодженої ділянки.

Якщо аварія виникає на основних магістральних ділянках**,** які безпосередньо з’єднані з водоводами та мають найбільші діаметри в мережі, то втрати напору на прилеглих трубопроводах можуть зростати до 10–20 м на

кожній ділянці. Порівняно з нормальним режимом роботи це означає збільшення втрат напору приблизно на 5–15 м**.** Така ситуація пояснюється тим, що через відключення основної магістралі значна частина витрати води спрямовується альтернативними шляхами, що призводить до зростання швидкостей руху води та відповідно до збільшення гідравлічних втрат.

При виникненні аварії на магістральних ділянках з діаметрами труб 200-300 мм**,** характер змін є менш критичним. У цьому випадку втрати напору на суміжних ділянках мережі збільшуються в середньому **з** 5 м до 8 м**,** що також пов’язано з перерозподілом потоків води, але вплив таких ділянок на загальну роботу системи є дещо меншим порівняно з основними магістралями.

Якщо ж аварійна ситуація виникає на перемичках мережі**,** які виконують допоміжну функцію перерозподілу потоків води між магістральними лініями, зміни гідравлічного режиму є найменшими. У цьому випадку відбувається лише незначне збільшення втрат напору на окремих суміжних ділянках, оскільки основні потоки води продовжують проходити магістральними трубопроводами.

Проведений аналіз аварійних режимів роботи водопровідної мережі дозволяє зробити висновок, що найбільший вплив на її гідравлічний режим мають пошкодження трубопроводів великих діаметрів, які забезпечують подачу основної частини води в мережу. Саме тому під час проєктування та експлуатації систем водопостачання особливу увагу необхідно приділяти надійності таких ділянок, а також передбачати можливість резервування потоків води через інші трубопроводи мережі.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ МЕРЕЖІ ВОДОПОСТАЧАННЯ

4.1 Визначення п'єзометричних позначок та вільних напорів у вузлах мереж

Для вузла мережі, що знаходиться в найбільш несприятливих гідравлічних умовах, необхідний п'єзометричний напір визначається за виразом:

$$П_{необх.і} = Н_{віл.необх.і} + Z_i \text{ ,} \qquad (4.1)$$

де $Н_{віл.необх.і}$ – вільний напір, необхідний в і – й точці, $Н_{віл.необх.} = 42$ м для дев'яти поверхової забудови:

$$П_{необх.} = 42{,}00 + 50 = 92{,}00 \text{ м.}$$

Для водопровідної мережі в режимі максимального водоспоживання найбільш несприятливими можуть бути точки, що розташовані на найбільшій відстані від місця подачі води до мережі — зокрема вузли №4 або №16.

Далі визначаються п'єзометричні відмітки $П_{l(i)}$ у вузлі приєднання водоводів, які повинні забезпечити необхідні п'єзометричні відмітки у розглянутих вузлах мережі:

$$П_{l(i)} = П_{необх.і} + \sum h_{l\text{-}i} \text{ ,} \qquad (4.2)$$

де $\sum h_{l\text{-}i}$ – алгебраїчна сума витрат напору від точки підключення водоводів до і – ї точки:

$$П_{(4)} = 92 + 19{,}97 = 111{,}97 \text{ м;}$$

$$П_{(16)} = 92 + 17{,}10 = 109{,}10 \text{ м.}$$

$$П_{(4)} > П_{(16)},$$

тому за невигідну точку прийнято вузол № 4. П’єзометричні позначки визначено відносно вузла № 4 (лист №2 графічної частини кваліфікаційної роботи).

Для аварійних режимів функціонування водопровідної мережі виконано визначення найбільш несприятливих вузлів. Встановлено, що при аваріях на ділянках 6–2, 10–6, 1–2, 5–6, 5–1, 2–3 та 6–7 невигідним вузлом є вузол №4.

У випадку виникнення аварій на ділянках 10–11, 14–15, 10–14, 9–13, 9–10 та 13–14 найбільш несприятливим є вузол №16 (див. додаток В). П’єзометричні карти при аваріях на ділянках 13-14, 5-6, 9-10 показані на листі №3 графічної частини роботи, для аварійних випадків з урахуванням інших ділянок – в додатку В.

4.2 Визначення площ з недостатніми напорами при аварійних режимах

Для визначення зон міської території, у яких під час аварійних режимів виникають надлишкові або недостатні тиски, як вихідні дані використані схеми водопровідної мережі з урахуванням результатів гідравлічних розрахунків для різних варіантів аварійних ситуацій.

За початкове значення приймається тиск, який визначено для режима максимального водоспоживання у вузлі приєднання відводів до мережі. Далі, відповідно до напрямків потоків у мережі, враховуються втрати тиску на кожній окремій ділянці трубопроводів.

Мінімально допустимий тиск у розрахунковій (найбільш несприятливій) точці мережі становить 42 м. Ділянки мережі, в яких фактичний тиск менший за вказане значення, формують зони недостатнього тиску. Площі таких зон визначаються за допомогою геометричних залежностей.

У таблиці 4.1 наведені результати розрахунків площ міської території, де під час аварійних режимів мережі не забезпечується необхідний рівень тиску, площа міста становить 576 га.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунків площі з недостатнім тиском

№	№ аварійної ділянки	Площа зони, $м^2$	У % від загальної площі
1	1-2	50180	0,87
2	5-1	288000	5,00
3	5-6	3817000	68,0
4	9-13	311200	5,40
5	6-2	1728000	3,001
6	6-7	1037000	18,00
7	9-10	4032000	70,009
8	2-3	576000	10,00
9	10-11	2246000	39,00
10	14-15	691000	12,00
11	13-14	53500	0,93
12	10-14	45500	0,79

Графіки зон тисків для аварійних режимів роботи мережі представлені на листі № 5 графічної частини кваліфікаційної роботи.

4.3 Аналіз роботи мережі в аварійних режимах

На підставі розрахунків, наведених у таблиці 4.1, виконано аналіз впливу аварійних ситуацій на параметри водопровідної мережі міста шляхом визначення площ територій, в межах яких не забезпечується нормативний рівень тиску. Отримані результати дозволяють проаналізувати надійність функціонування

мережі та встановити найбільш критичні її ділянки стосовно забезпечення споживачів водою.

Аналіз показує, що вплив аварій на різних ділянках мережі є суттєво нерівномірним. Найменші зони недостатнього тиску спостерігаються при аваріях на ділянках 1–2, 13–14 та 10–14, де площа територій із порушеним гідравлічним режимом становить менше 1 % від загальної площі міста. Це свідчить про достатню резервованість мережі в зазначених напрямках та наявність альтернативних шляхів подачі води, що забезпечують перерозподіл потоків без значного зниження тиску для споживачів.

Помірний вплив параметри системи спостерігається при пошкодженнях ділянок 5–1, 9–13, 2–3 та 14–15, для яких частка територій з недостатнім тиском перебуває в межах 5–12 %. У цих випадках мережа зберігає працездатність, однак відчутно зростають гідравлічні втрати, що призводить до локального погіршення умов водопостачання. Такі ділянки можна віднести до зон середнього рівня ризику, які потребують підвищеної уваги під час експлуатації та планування реконструкції.

Найбільш суттєве погіршення гідравлічного режиму відбувається при аваріях на ділянках 5–6, 6–7, 10–11 та особливо 9–10. У цих випадках площі територій із недостатнім напором досягають 18–70 % загальної площі міста, що свідчить про критичне значення зазначених трубопроводів у структурі мережі. Значні масштаби зон недостатнього тиску вказують на високу залежність системи від роботи окремих магістральних напрямків і недостатній рівень кільцювання або пропускної здатності альтернативних ділянок мережі.

Особливої уваги потребує аварійна ділянка 9–10, при відключенні якої зона недостатнього тиску є максимальною та охоплює понад дві третини міської території. Подібна ситуація свідчить про формування гідравлічного «критичного місця» мережі, через що проходить значна частина транзитних витрат води.

Аналогічно, аварія на ділянці 5–6 також призводить до значного порушення режиму водопостачання, що підтверджує її значення для забезпечення стабільного функціонування мережі.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що існуюча схема водопровідної мережі характеризується достатньою надійністю лише для частини розподільчих ділянок, тоді як окремі магістральні трубопроводи мають вирішальне значення для забезпечення нормативних тисків. При їх пошкодженні відбувається різке збільшення зон із недостатнім тиском, що може призвести до перебоїв у водопостачанні значної кількості споживачів.

З метою підвищення експлуатаційної надійності системи доцільно передбачити заходи з резервування подачі води, зокрема підсилення кільцювання мережі, збільшення діаметрів окремих транзитних ділянок, а також поетапну реконструкцію найбільш навантажених трубопроводів. Додатковим напрямом удосконалення є оптимізація режимів роботи насосних станцій та впровадження систем моніторингу тиску, що дозволить оперативно реагувати на аварійні зміни гідравлічного режиму.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує необхідність модернізації окремих ключових ділянок водопровідної мережі для забезпечення стабільного та безперебійного водопостачання споживачів у аварійних режимах роботи системи.

4.4 Економічний ефект від своєчасного виявлення та усунення витоків води

Техніко-економічне обґрунтування ефективності реконструкції водопровідної мережі шляхом попередження витоків. Основним економічним ефектом реконструкції водопровідних мереж є зменшення втрат води, що виникають унаслідок аварійних пошкоджень трубопроводів. Своєчасна заміна

зношених ділянок дозволяє скоротити тривалість витоків та обсяг непродуктивних втрат очищеної питної води.

Економічний ефект визначається як вартість води, втрати якої вдалося попередити внаслідок реконструкції мережі.

Річна економія коштів визначається:

$$E = V_{non} \times T, \tag{4.3}$$

де E – економія коштів, грн/рік;

V_{non} – об’єм попереджених витоків води, м³/рік;

T – середній тариф на централізоване водопостачання, грн/м³.

Для розрахунку прийнято сучасний усереднений тариф: Т=35 грн/м^3, що відповідає діапазону тарифів станом на 2026 р.

Витрата води через аварійне пошкодження:

$$Q = \pi D^2 \times V/4 \cdot \tag{4.4}$$

де D – діаметр трубопроводу, м;

v=2,5 м/с – середня швидкість руху води.

Втрати води за одну аварію:

$$V_1 = Q \times t, \tag{4.5}$$

де t=86400 с (1 доба).

Річний об’єм попереджених втрат:

$$V_{non} = V_1 \times n, \tag{4.6}$$

де n – кількість аварійних випадків на рік.

За відсутності відкритих статистичних даних щодо аварійності водопровідних мереж за діаметрами труб, кількість аварій прийнята за узагальненими показниками експлуатації міських водопровідних систем України. Середня аварійність мереж становить близько 0,6 аварій на 1 км трубопроводу за рік, при цьому зі збільшенням діаметра трубопроводу інтенсивність пошкоджень зменшується. Значення аварійності для окремих діаметрів прийняті з урахуванням статистичних залежностей надійності водопровідних мереж та умов експлуатації індустріальних міст України.

За теорією надійності водопровідних мереж кількість аварій визначається:

$$N=\lambda_D \times L, \tag{4.7}$$

де N – очікувана кількість аварій за рік;

λ_D – аварійність трубопроводу певного діаметра, аварій/(км·рік);

L – довжина ділянки, км.

За нормативно-статистичними даними узагальнені значення аварійності для міст України з високим зносом мереж зазначені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Узагальнені значення аварійності для водопровідних мереж

Діаметр	Аварійність λ, аварій/(км·рік)
300 мм	0,80
350 мм	0,75
400 мм	0,65
450 мм	0,55
500 мм	0,50
600 мм	0,4

Для кожної ділянки довжиною 0,8 км кількість аварій визначалась за залежністю (4.7). Сумарна очікувана кількість аварій для розрахункової мережі становить приблизно 6 аварій на рік, що прийнято у подальших техніко-економічних розрахунках. Виходячи з наступних даних: кількість аварій: 6 аварій/рік; тривалість витоку 1 доба (86400 с); швидкість руху води v=2,5 м/с; тариф на воду Т=35 грн/м³; довжина кожної ділянки 0,8 км, визначені втрати води для аварійних ділянок. У таблиці 4.3 представлені результати розрахунку економії коштів шляхом своєчасної реконструкції аварійних ділянок.

Таблиця 4.3 – Розрахунок економії коштів шляхом попередження втрат води по ділянках мережі

Ділянка	D, мм	Попереджені втрати за рік, м³	Економія, грн/рік
1–5	400	162 780	5 697 300
5–6	500	254 466	8 906 310
2–6	400	162 780	5 697 300
2–3	300	91 608	3 206 280
9–10	600	366 432	12 825 120
6–7	400	162 780	5 697 300
14–15	350	124 686	4 364 010
10–11	450	206 118	7 214 130
9–13	450	206 118	7 214 130
13–14	350	124 686	4 364 010
10–14	400	162 780	5 697 300
14–15	350	124 686	4 364 010

Своєчасна реконструкція водопровідної мережі дозволяє попередити втрати води обсягом понад 2 млн м³ на рік. Сумарний економічний ефект становить близько 75,2 млн грн/рік, що підтверджує технічну та економічну доцільність модернізації мережі водопостачання.

ВИСНОВКИ

1. У роботі виконано аналіз стану системи водопостачання та визначено основні проблеми її функціонування, пов’язані зі зношеністю трубопроводів, підвищеними втратами води та аварійністю мережі.
2. Проведено гідравлічний розрахунок водопровідної мережі для розрахункових режимів роботи, визначено розподіл витрат води, втрати напору на ділянках та встановлено невигідні точки системи, що дозволило оцінити ефективність її роботи.
3. Виконано моделювання аварійних ситуацій та проаналізовано результати гідравлічних розрахунків в аварійних режимів роботи мережі.
4. Розроблено проєктні рішення щодо реконструкції водопровідної мережі із заміною зношених труб на сучасні полімерні трубопроводи, що мають кращі гідравлічні характеристики, довговічність та корозійну стійкість.
5. Перерахунок економічного ефекту з урахуванням статистично обґрунтованої кількості аварій (6 аварій на рік) показав, що реконструкція мережі дозволяє запобігти втратам води понад 2 млн м³ на рік.
6. Сумарний економічний ефект від впровадження запропонованих заходів становить близько 75,2 млн грн на рік, що підтверджує економічну доцільність модернізації системи водопостачання.
7. Впровадження запропонованих технічних рішень забезпечить підвищення надійності роботи мережі, зменшення експлуатаційних витрат, покращення якості водопостачання споживачів та ефективне функціонування системи в довгостроковій перспективі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міністерство розвитку громад та територій України. *Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 році*. Київ, 2024. 134 с. URL: https://mindev.gov.ua (дата звернення: 25.04.2026).
2. Клименко В. В., Ковальчук Н. О., Гуцул В. М. Надійність систем водопостачання міських територій . *MAPIEA*. 2021. № 4 (35). С. 120–126. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/eng/archive/35/35_Klymenko.html (дата звернення: 25.04.2026).
3. Третьяков О. В., Шевченко Т. О., Безсонний В. Л. Підвищення екологічної безпеки систем питного водопостачання // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 6. С. 65–71. URL: https://journals.uran.ua/eejet/article/view/51398 (дата звернення: 25.04.2026).
4. Burak M., Yurchenko V. Overhauls in water supply systems in Ukraine: A hydro-economic model // *Journal of Cleaner Production*. 2018. P.358–369.URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618304694 (дата звернення: 25.04.2026).
5. UNICEF Ukraine. Water supply in Ukraine. URL: https://www.unicef.org/ukraine/en/topics/water-supply (дата звернення: 25.02.2026).
6. Закон України «Про питну воду та питне водопостачання». URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2918-14 (дата звернення: 25.04.2026).
7. BRDO. *Зелена книга. Регулювання ринку водопостачання та водовідведення в Україні*. Київ, 2024. URL: https://www.slideshare.net/slideshow/ss-250890656/250890656 (дата звернення: 25.04.2026).
8. Potapenko S., Kravchenko O. Analysis of world experience and scientific approaches to optimization of drinking water supply and sanitation systems // Problemy

vodopostachannya, vodovidvedennya ta hidravliky. 2025. № 49. С. 25–38. DOI: https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.49.25-37(дата звернення: 25.04.2026).

9. CARE-W Project. Rehabilitation of water supply networks in urban areas. Brussels, 2006. 42 p. URL: https://www.petus.eu.com/graphics/case_30.pdf (дата звернення: 25.04.2026).

10.Najafi M. Trenchless Technology: Planning, Equipment, and Methods. New York: McGraw-Hill, 2010. 512 p. https://weblibrary.mila.edu.my/bib/917 (дата звернення: 25.04.2026).

10. Дорошенко Я.В., Стецюк С.М., Бондаренко Р.В., Данів З.В. Технології безтраншейної реновації трубопровідних систем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023. № 2(87).С.17-32. DOI: 10.31471/1993-9973-2023-2(87)-17-32. (дата звернення: 25.02.2026).

11.ISO 55000:2014. Asset management — Overview, principles and terminology. Geneva: ISO, 2014. 15 p. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/55000_2019_1.pdf (дата звернення: 25.02.2026).

12.Gulu Water Supply and Sanitation Project. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Gulu_Water_Supply_and_Sanitation_Project (дата звернення: 25.02.2026).

13.World Economic Forum. Water Infrastructure Resilience: Bridging the Global Investment Gap. Geneva, 2025. URL: https://www.weforum.org (дата звернення: 25.02.2026).

14.Kwietniewski M., Świercz P., Chudzicki J. Modern methods for monitoring water leakages in water networks // *Studia Geotechnica et Mechanica*. Vol. 44, Issue 1, March 2022, pp. 53–65. DOI: https://doi.org/10.2478/sgem-2022-0001. URL: https://repo.pw.edu.pl/docstore/download/WUTc5edd759d9f8436f91b3d116a4532fd1

/10.2478_sgem-2022-0001.pdf?entityId=WUT3784e7daa9754f46a80665eb0622c522 (дата звернення: 26.02.2026).

15. Latif J., Shakir M. Z., Edwards N. R. et al. Review on condition monitoring techniques for water pipelines // *Measurement*. 2022, Vol. 193, Article 110895, pp. 2–6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110895. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224122001762 (дата звернення: 26.02.2026).

16. Виявлення прихованих витоків в зовнішніх трубопроводів мереж водопостачання та теплових мереж. URL: https://dtruba.jimdofree.com/%D0%B2%D0%B8%D1%8F%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%85%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%85-%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%BA%D1%96%D0%B2-%D0%B2-%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%96%D1%88%D0%BD%D1%96%D1%85-%D1%82%D1%80%D1%83%D0%B1%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%96%D0%B2/

17. Цементно-піщано-полімерні покриття. . URL: https://tubescoating.com/product/tsementno-peschano-polimernoe-pokryitie-izolyatsiya-tspi-tspp (дата звернення: 26.02.2026).

18. ДБН В.2.5 – 74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 172 с. (Інформація та документація). URL: https://document.vobu.ua/wp-content/uploads/DBN/101.1.-DBN-V.2.5-742013.-Vodopostachannya.-Zovnishni-merezhi.pdf (дата звернення: 28.02.2026).

19. Добровольська О.Г., Водопровідні мережі : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» освітньо-професійної програми «Міські інженерні мережі». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2022. 221 с. URL: https://surl.li/knhiln (дата звернення: 28.02.2026).

20. Промислові насоси для води : каталог відцентрових насосів. URL : https://konsolnik.com.ua/uk/ (дата звернення: 28.02.2026).

21. Наумов Я.О., Шамрай В.І. Дослідження впливу дрібнодисперсних відходів каменю на властивості геополімерних матеріалах. URL : https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/02/93.pdf (дата звернення: 28.02.2026).

22. How a robotic spraying system can change spray technology. URL : https://www.spray.com/en-gb/blog/how-a-robotic-spraying-system-can-change-spray-technology

Додаток А

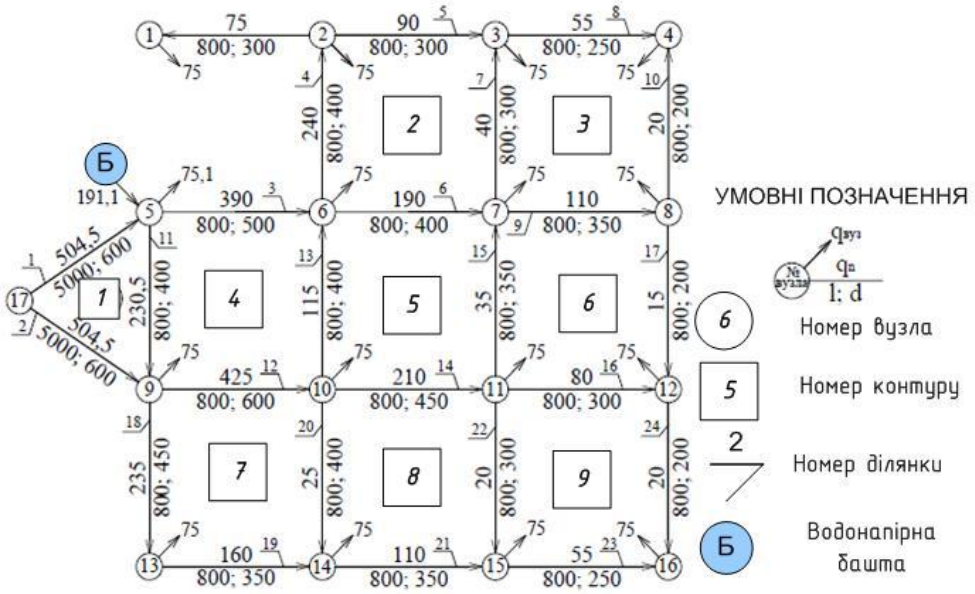


Рисунок А.1 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №2 1-5.

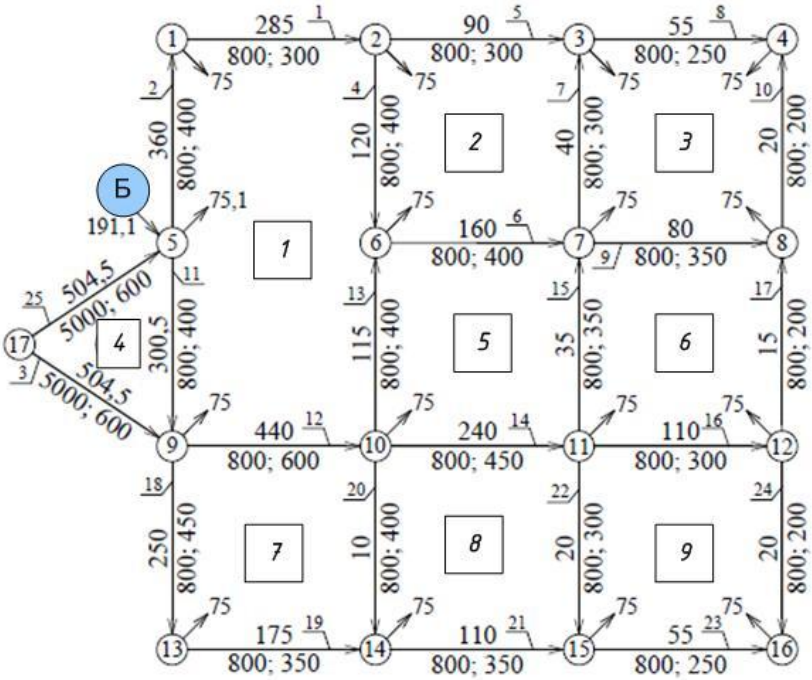


Рисунок А.2 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №3 5-6

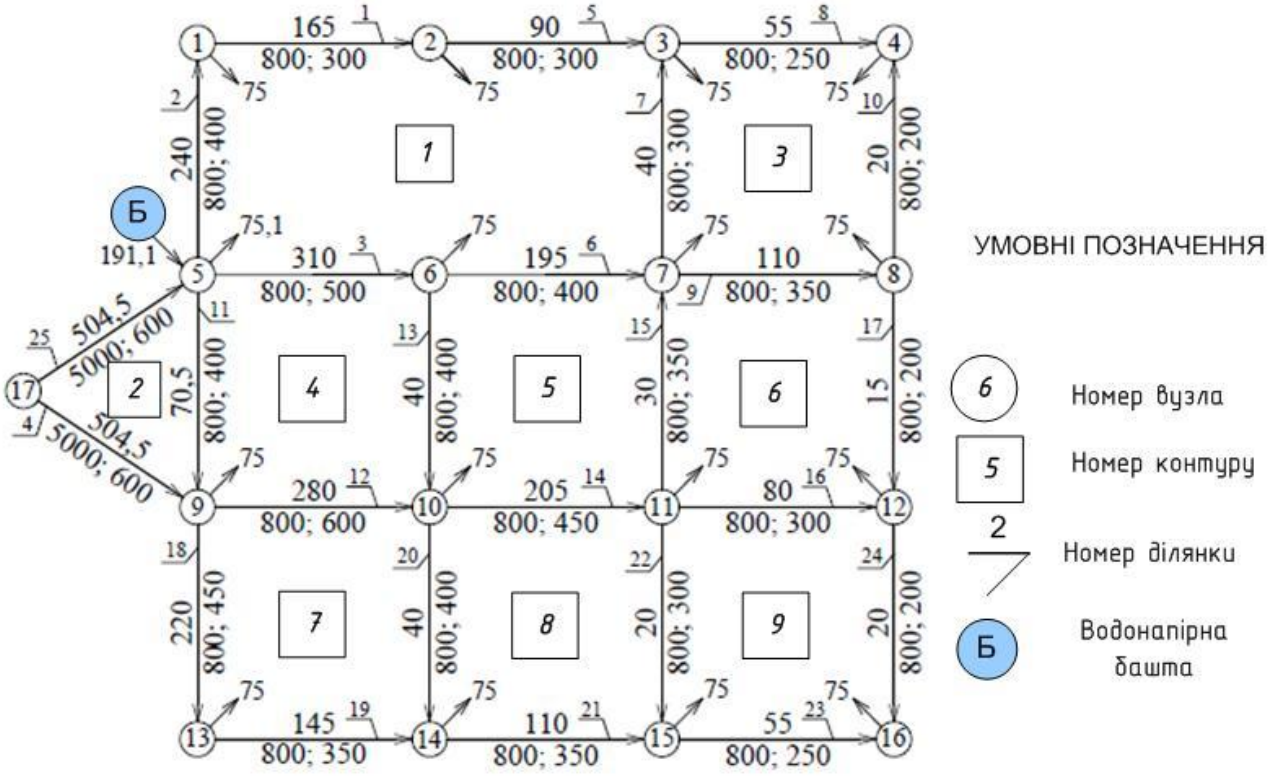


Рисунок А.3 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №4 2-6

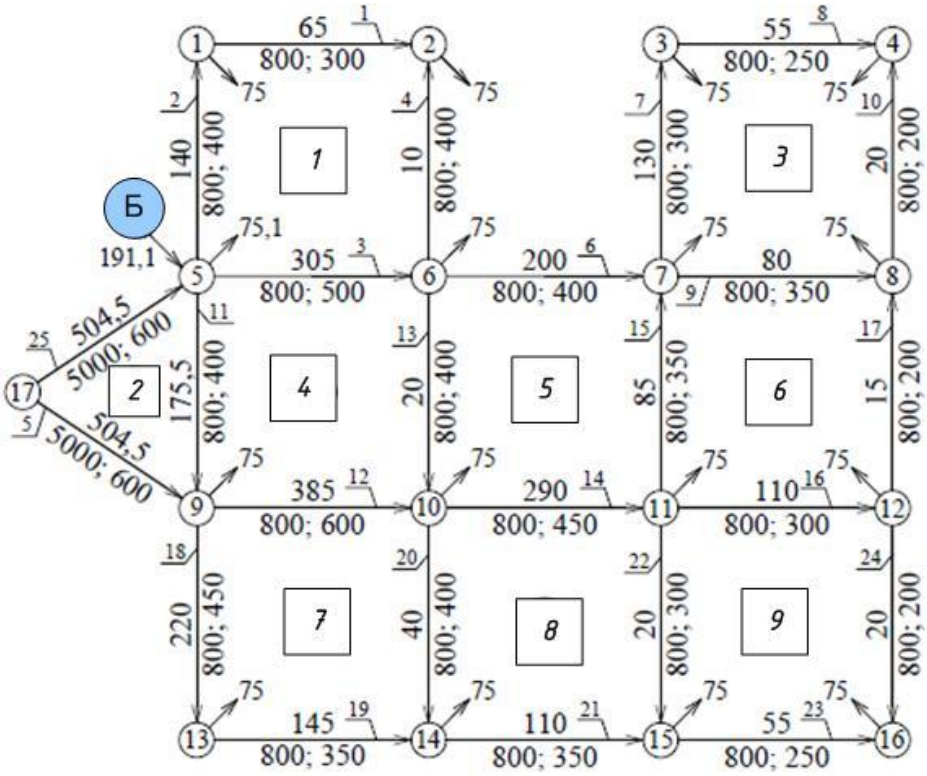


Рисунок А.4 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №5 2-3

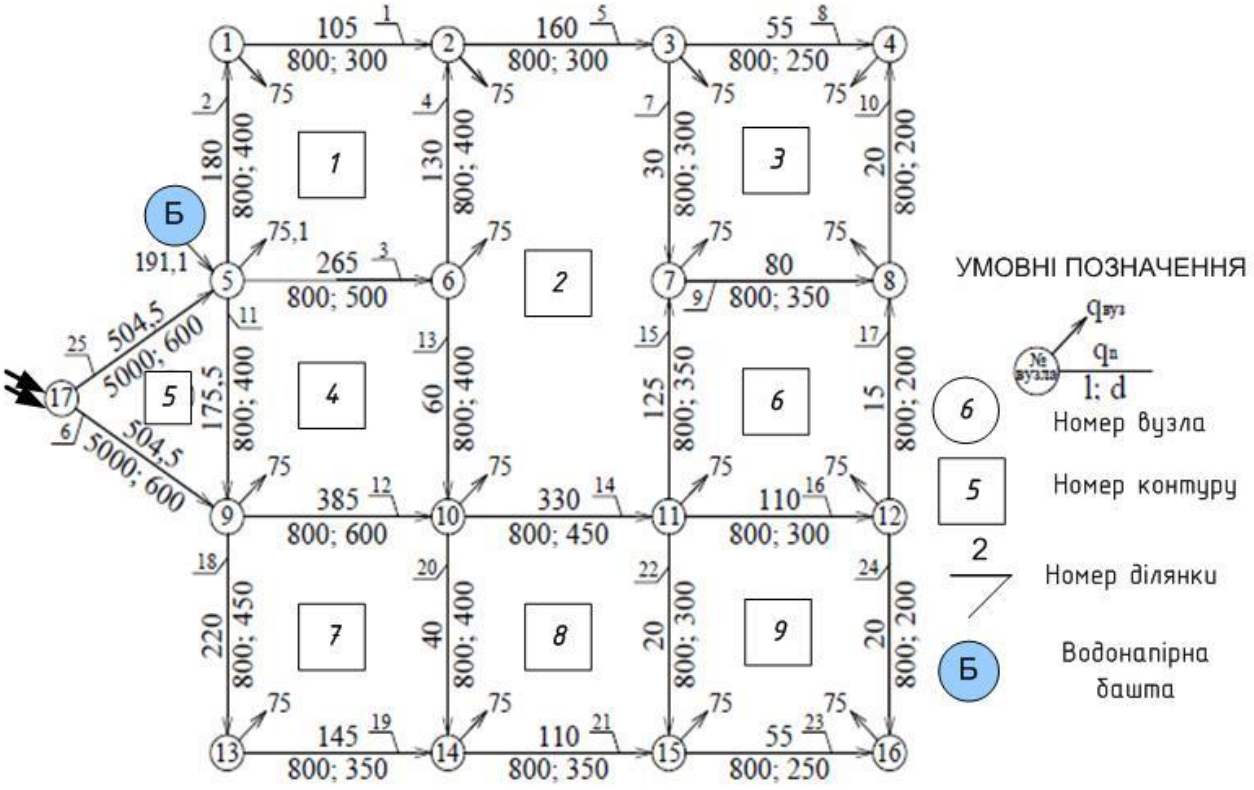


Рисунок А.5 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №6 6-7

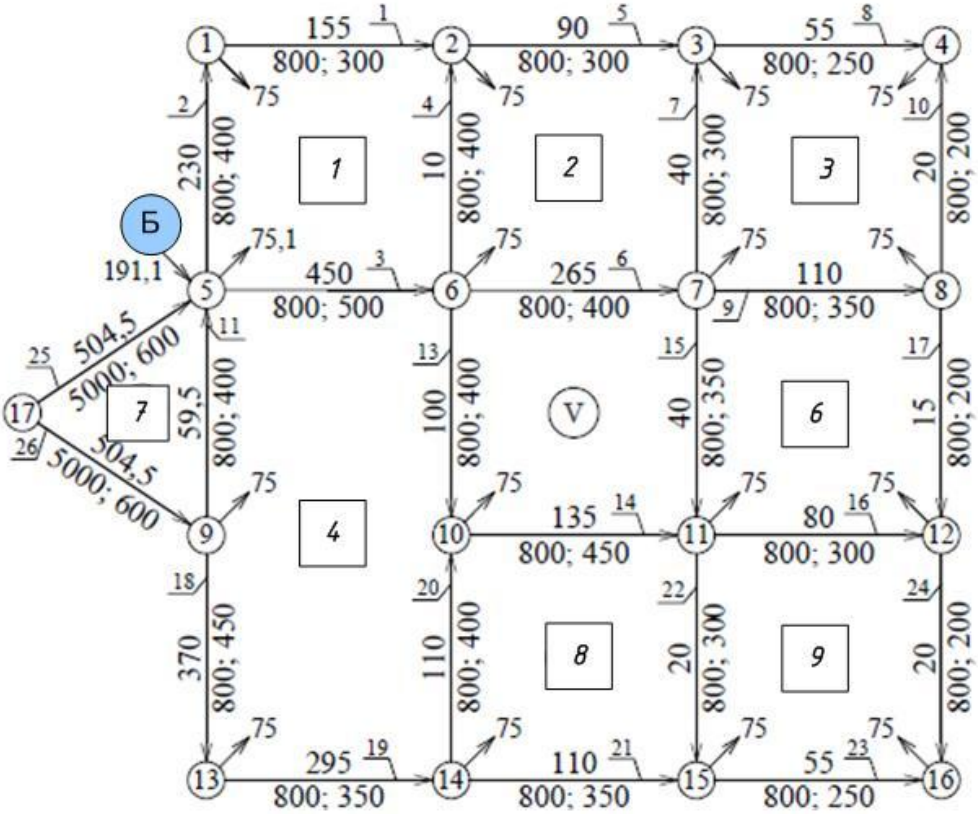


Рисунок А.6 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №12 9-10

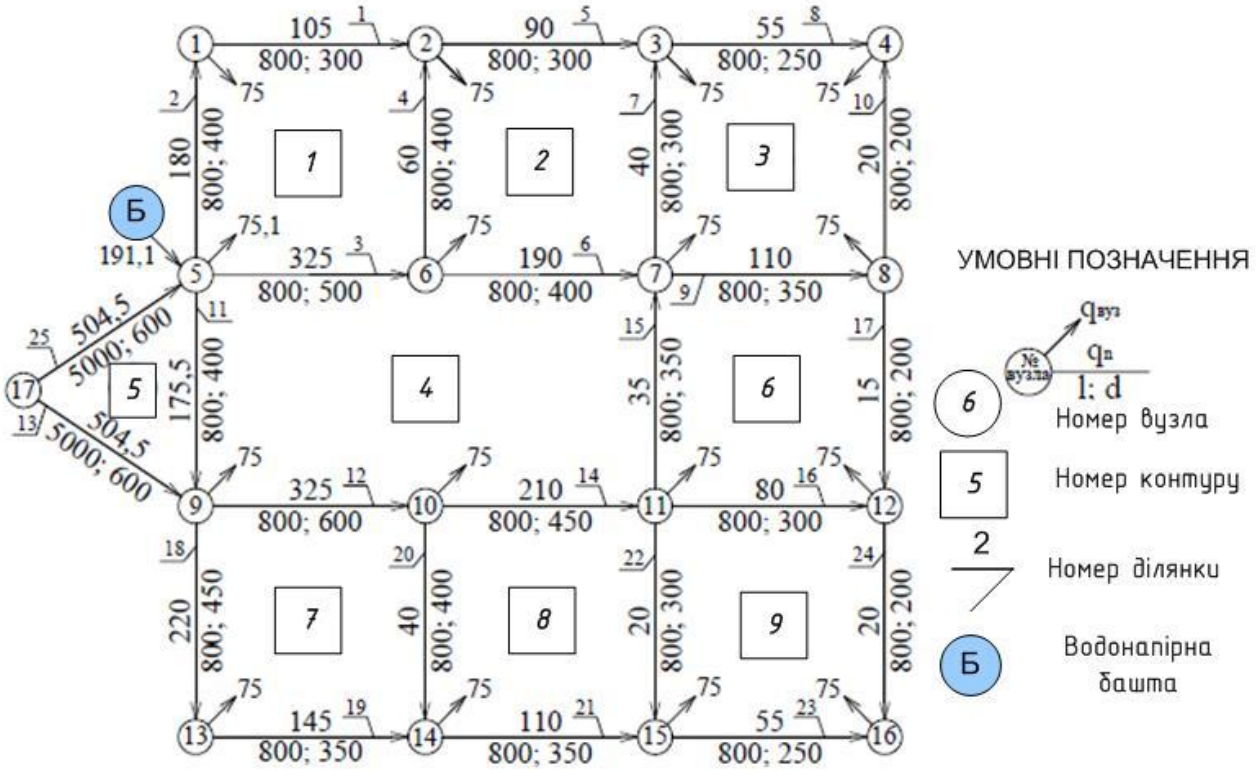


Рисунок А.7 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №13 6-10

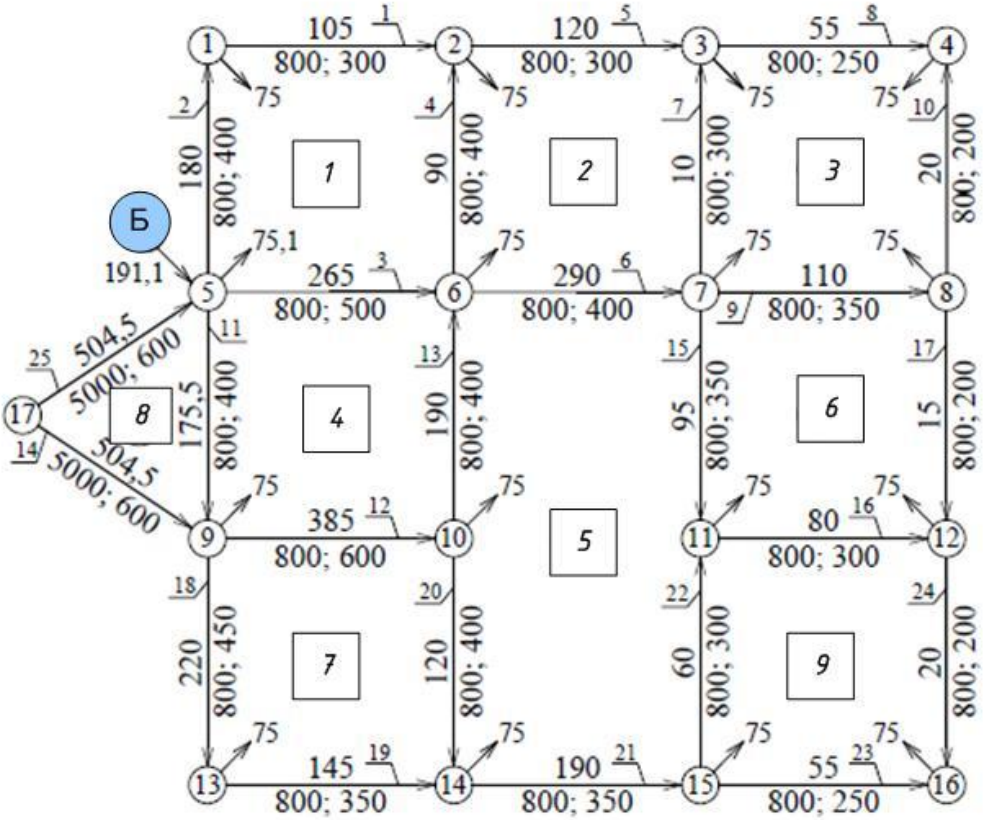


Рисунок А.8 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №14 11-10

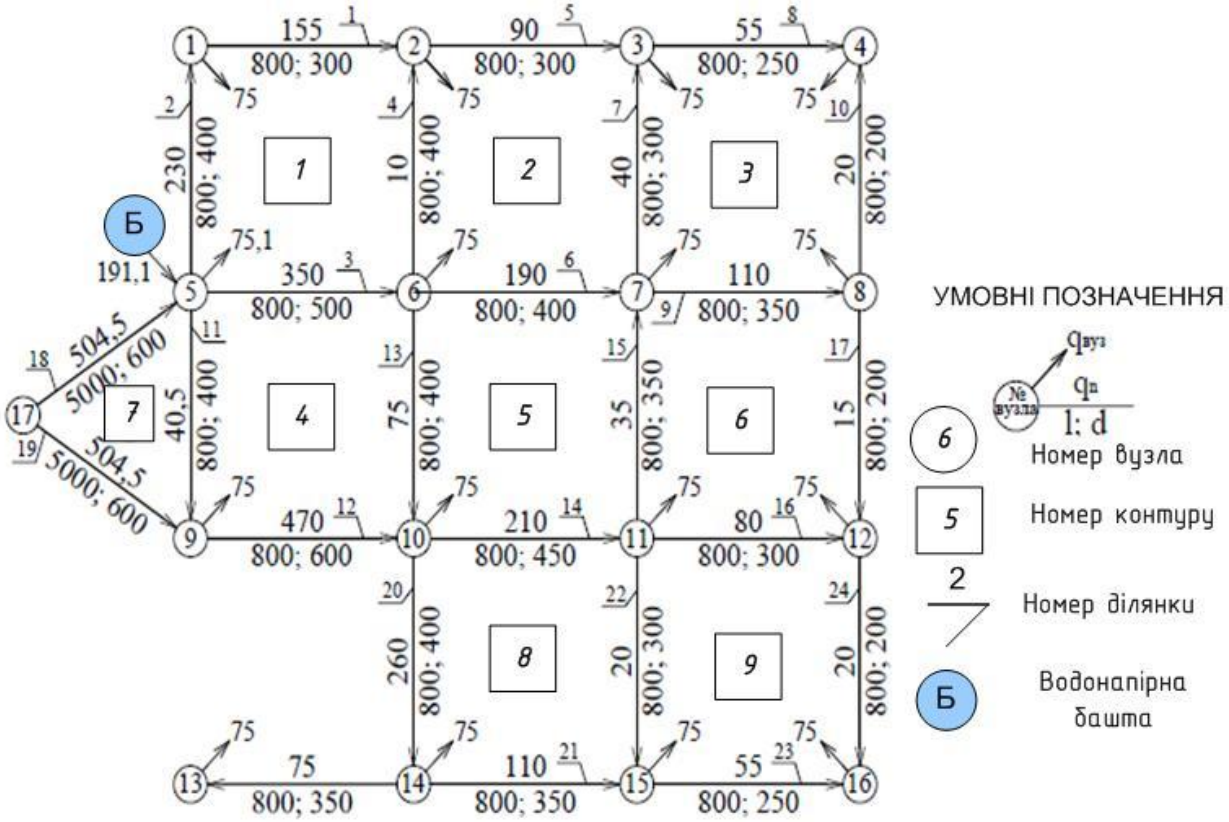


Рисунок А.9 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №18 9-13

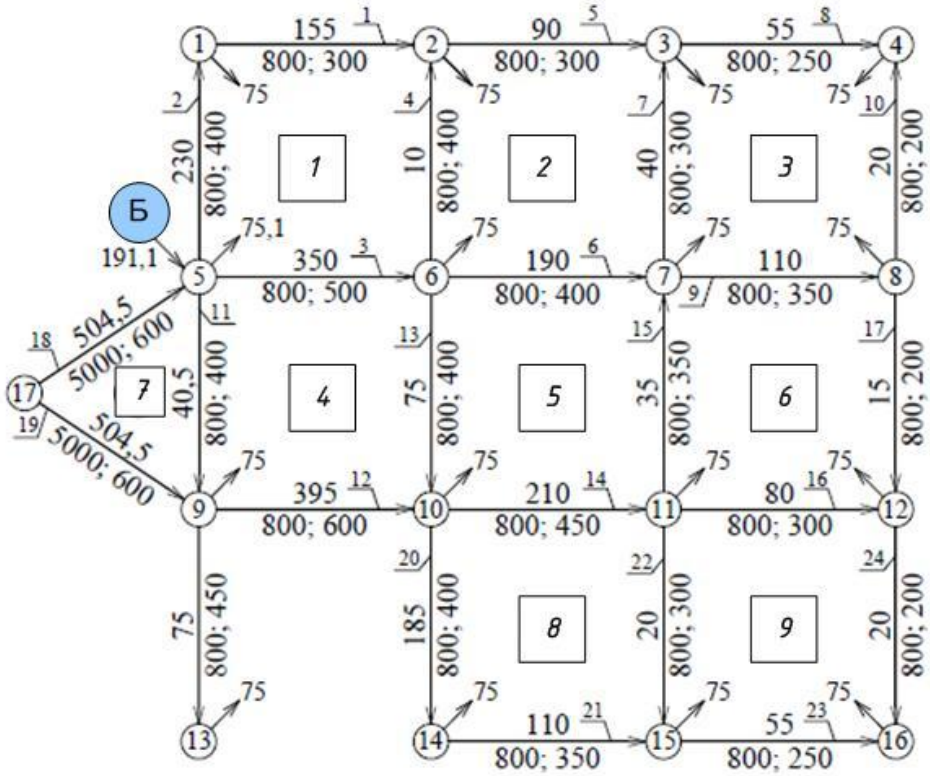


Рисунок А.10 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №19 13-14

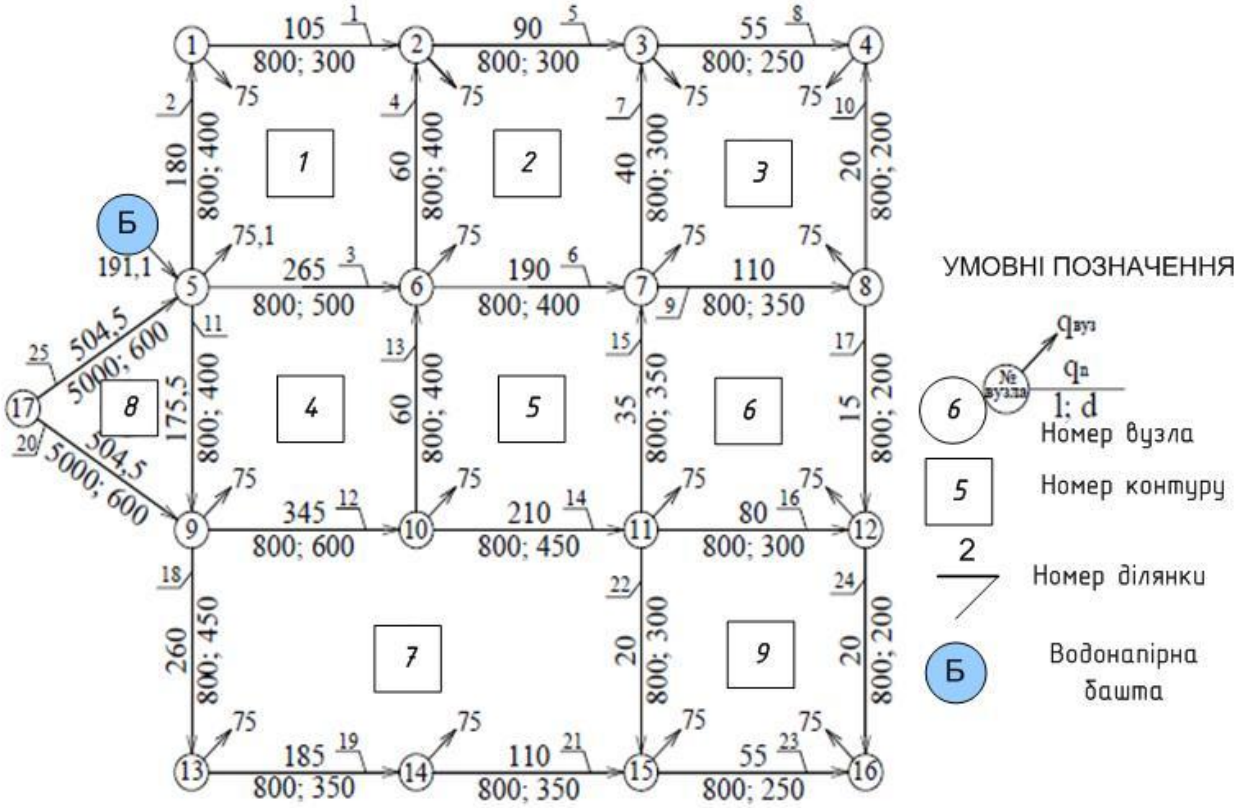


Рисунок А.11 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №20 10-14

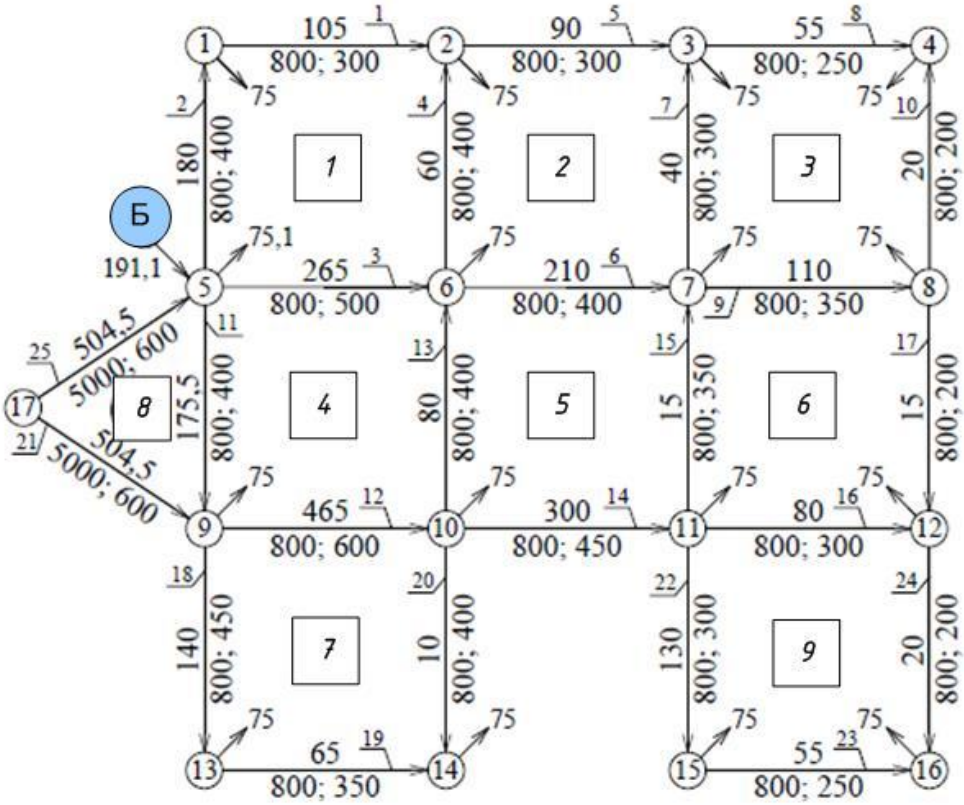


Рисунок А.12 – Схема початкового розподілу потоків при аварії на ділянці №21 14-15

Додаток Б

```
                                  e=  .01000  nk= 10  ny= 26
  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt
m   1  800.00 105.00 300.00 c   2  800.00 180.00 400.00 c   3  800.00 265.00 500.00
c
   4  800.00  60.00 400.00 c   5  800.00  90.00 300.00 c   6  800.00 190.00 400.00
c
   7  800.00  40.00 300.00 c   8  800.00  55.00 250.00 c   9  800.00 110.00 350.00
c
  10  800.00  20.00 200.00 c  11  800.00 175.50 400.00 c  12  800.00 385.00 600.00
c
  13  800.00  60.00 400.00 c  14  800.00 210.00 450.00 c  15  800.00  35.00 350.00
c
  16  800.00  80.00 300.00 c  17  800.00  15.00 200.00 c  18  800.00 220.00 450.00
c
  19  800.00 145.00 350.00 c  20  800.00  40.00 400.00 c  21  800.00 110.00 350.00
c
  22  800.00  20.00 300.00 c  23  800.00  55.00 250.00 c  24  800.00  20.00 200.00
c
  25 5000.00 504.50 600.00 c  26 5000.00 504.50 600.00 c  27     .00    .00    .00
```

Таблиця Б.1 - Результати розрахунку (вихідний варіант)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	69.78	.99	4.11
2	0- 1	400.00	800.00	144.78	1.15	3.78
3	1- 4	500.00	800.00	339.81	1.73	6.31
4	1- 2	400.00	800.00	90.27	.72	1.57
5	0- 2	300.00	800.00	85.05	1.20	5.93
6	2- 5	400.00	800.00	180.64	1.44	5.82
7	2- 3	300.00	800.00	42.94	.61	1.68
8	0- 3	250.00	800.00	52.99	1.08	6.16
9	3- 6	350.00	800.00	106.10	1.10	4.14
10	3- 0	200.00	800.00	22.01	.70	3.70
11	4-10	400.00	800.00	124.98	.99	2.87
12	4- 7	600.00	800.00	406.21	1.44	3.43
13	4- 5	400.00	800.00	6.10	.05	.01
14	5- 8	450.00	800.00	229.39	1.44	5.03
15	5- 6	350.00	800.00	43.40	.45	.80
16	6- 9	300.00	800.00	83.05	1.17	5.69
17	0- 6	200.00	800.00	9.09	.29	.75
18	7- 0	450.00	800.00	159.20	1.00	2.49
19	7- 0	350.00	800.00	84.20	.88	2.69
20	8- 7	400.00	800.00	95.73	.76	1.75
21	8- 0	350.00	800.00	104.92	1.09	4.05
22	9- 8	300.00	800.00	27.94	.40	.77
23	9- 0	250.00	800.00	57.86	1.18	7.26
24	0- 9	200.00	800.00	17.14	.55	2.34
25	0-10	600.00	5000.00	493.57	1.75	31.68
26	10- 0	600.00	5000.00	515.43	1.82	34.55

```
      ---------------------------------------------------------------------
                                e=  .01000  nk=  9  ny= 24
                                Вихідні дані
  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt
m
   1 5000.00 504.50 600.00 c   2 5000.00 504.50 600.00 c   3  800.00 390.00 500.00
c
   4  800.00 240.00 400.00 c   5  800.00  90.00 300.00 c   6  800.00 190.00 400.00
c
   7  800.00  40.00 300.00 c   8  800.00  55.00 250.00 c   9  800.00 110.00 350.00
c
  10  800.00  20.00 200.00 c  11  800.00 230.50 400.00 c  12  800.00 425.00 600.00
c
  13  800.00 115.00 400.00 c  14  800.00 210.00 450.00 c  15  800.00  35.00 350.00
c
  16  800.00  80.00 300.00 c  17  800.00  15.00 200.00 c  18  800.00 235.00 450.00
c
  19  800.00 160.00 350.00 c  20  800.00  25.00 400.00 c  21  800.00 110.00 350.00
c
  22  800.00  20.00 300.00 c  23  800.00  55.00 250.00 c  24  800.00  20.00 200.00
c
```

Таблиця Б.2 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №2 1-5)

```
 ---------------------------------------------------------------------
      : номер :  код  : діаметр  :   L     : витрата  : швидкість:  втрати  :
      :ділянки:ділянки: труби,мм :ділянки,м: води,л/с : води,м/с : напору,м
---------------------------------------------------------------------
      ---------------------------------------------------------------------
      :    1  :  0- 1 :   600.00 :  5000.00 :   484.34 :     1.71 :    30.51 :
      :    2  :  1- 0 :   600.00 :  5000.00 :   524.66 :     1.86 :    35.79 :
      :    3  :  0- 4 :   500.00 :   800.00 :   428.16 :     2.18 :    10.02 :
      :    4  :  0- 2 :   400.00 :   800.00 :   206.55 :     1.64 :     7.61 :
      :    5  :  0- 2 :   300.00 :   800.00 :    56.55 :      .80 :     2.79 :
      :    6  :  2- 5 :   400.00 :   800.00 :   191.19 :     1.52 :     6.52 :
      :    7  :  2- 3 :   300.00 :   800.00 :    67.53 :      .96 :     3.87 :
      :    8  :  0- 3 :   250.00 :   800.00 :    49.08 :     1.00 :     5.34 :
      :    9  :  3- 6 :   350.00 :   800.00 :   107.00 :     1.11 :     4.20 :
      :   10  :  3- 0 :   200.00 :   800.00 :    25.92 :      .83 :     5.00 :
      :   11  :  4- 1 :   400.00 :   800.00 :   172.19 :     1.37 :     5.29 :
      :   12  :  4- 7 :   600.00 :   800.00 :   454.25 :     1.61 :     4.29 :
      :   13  :  4- 5 :   400.00 :   800.00 :    44.58 :      .35 :      .44 :
      :   14  :  5- 8 :   450.00 :   800.00 :   241.67 :     1.52 :     5.58 :
      :   15  :  5- 6 :   350.00 :   800.00 :    58.34 :      .61 :     1.37 :
      :   16  :  6- 9 :   300.00 :   800.00 :    85.11 :     1.20 :     5.94 :
      :   17  :  0- 6 :   200.00 :   800.00 :     6.08 :      .19 :      .37 :
      :   18  :  7- 0 :   450.00 :   800.00 :   167.59 :     1.05 :     2.74 :
      :   19  :  7- 0 :   350.00 :   800.00 :    92.59 :      .96 :     3.21 :
      :   20  :  8- 7 :   400.00 :   800.00 :    93.00 :      .74 :     1.66 :
      :   21  :  8- 0 :   350.00 :   800.00 :   110.59 :     1.15 :     4.47 :
      :   22  :  9- 8 :   300.00 :   800.00 :    23.23 :      .33 :      .56 :
      :   23  :  9- 0 :   250.00 :   800.00 :    58.82 :     1.20 :     7.49 :
      :   24  :  0- 9 :   200.00 :   800.00 :    16.18 :      .52 :     2.11 :
      ---------------------------------------------------------------------
```

e= .01000 nk= 9 ny= 25

Вихідні дані

ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m
1	800.00	285.00	300.00	c	2	800.00	360.00	400.00	c	3	5000.00	504.50	600.00	c
4	800.00	120.00	400.00	c	5	800.00	90.00	300.00	c	6	800.00	160.00	400.00	c
7	800.00	40.00	300.00	c	8	800.00	55.00	250.00	c	9	800.00	80.00	350.00	c
10	800.00	20.00	200.00	c	11	800.00	260.50	400.00	c	12	800.00	440.00	600.00	c
13	800.00	115.00	400.00	c	14	800.00	240.00	450.00	c	15	800.00	35.00	350.00	c
16	800.00	110.00	300.00	c	17	800.00	15.00	200.00	c	18	800.00	250.00	450.00	c
19	800.00	175.00	350.00	c	20	800.00	10.00	400.00	c	21	800.00	110.00	350.00	c
22	800.00	20.00	300.00	c	23	800.00	55.00	250.00	c	24	800.00	20.00	200.00	c
25	5000.00	504.50	600.00	c	26	.00	.00	.00		27	.00	.00	.00	

Таблиця Б.3 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №3 5-6)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість: води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	163.94	2.32	22.03
2	0- 1	400.00	800.00	238.94	1.90	10.19
3	4- 0	600.00	5000.00	571.69	2.02	42.50
4	2- 1	400.00	800.00	10.24	.08	.03
5	0- 2	300.00	800.00	78.70	1.11	5.15
6	2- 5	400.00	800.00	129.91	1.03	3.08
7	2- 3	300.00	800.00	47.55	.67	2.03
8	0- 3	250.00	800.00	51.25	1.04	5.79
9	3- 6	350.00	800.00	97.81	1.02	3.56
10	3- 0	200.00	800.00	23.75	.76	4.25
11	1- 4	400.00	800.00	314.37	2.50	17.63
12	1- 7	600.00	800.00	614.29	2.17	7.85
13	1- 5	400.00	800.00	194.66	1.55	6.76
14	5- 8	450.00	800.00	266.06	1.67	6.77
15	5- 6	350.00	800.00	90.45	.94	3.07
16	6- 9	300.00	800.00	89.80	1.27	6.61
17	6- 0	200.00	800.00	.94	.03	.01
18	7- 0	450.00	800.00	196.77	1.24	3.70
19	7- 0	350.00	800.00	121.77	1.27	5.37
20	8- 7	400.00	800.00	78.56	.63	1.22
21	8- 0	350.00	800.00	125.33	1.30	5.69
22	9- 8	300.00	800.00	10.81	.15	.14
23	9- 0	250.00	800.00	61.15	1.25	8.05
24	0- 9	200.00	800.00	13.85	.44	1.59
25	0- 4	600.00	5000.00	437.31	1.55	24.87

```
e=  .01000  nk=  9  ny= 25
                                  вихідні дані
  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt
m
   1  800.00 165.00 300.00 c   2  800.00 240.00 400.00 c   3  800.00 310.00 500.00
c
   4 5000.00 504.50 600.00 c   5  800.00  90.00 300.00 c   6  800.00 195.00 400.00
c
   7  800.00  40.00 300.00 c   8  800.00  55.00 250.00 c   9  800.00 110.00 350.00
c
  10  800.00  20.00 200.00 c  11  800.00  70.50 400.00 c  12  800.00 280.00 600.00
c
  13  800.00  40.00 400.00 c  14  800.00 205.00 450.00 c  15  800.00  30.00 350.00
c
  16  800.00  80.00 300.00 c  17  800.00  15.00 200.00 c  18  800.00 220.00 450.00
c
  19  800.00 145.00 350.00 c  20  800.00  40.00 400.00 c  21  800.00 110.00 350.00
c
  22  800.00  20.00 300.00 c  23  800.00  55.00 250.00 c  24  800.00  20.00 200.00
c
  25 5000.00 504.50 600.00 c  26     .00    .00    .00    27     .00    .00    .00
```

Таблиця Б.4 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №4 2-6)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	113.90	1.61	10.63
2	0- 1	400.00	800.00	188.90	1.50	6.37
3	1- 4	500.00	800.00	311.04	1.58	5.29
4	2- 0	600.00	5000.00	513.37	1.82	34.27
5	0- 1	300.00	800.00	38.90	.55	1.41
6	1- 5	400.00	800.00	205.09	1.63	7.51
7	1- 3	300.00	800.00	82.36	1.17	5.60
8	0- 3	250.00	800.00	46.25	.94	4.78
9	3- 6	350.00	800.00	108.67	1.13	4.33
10	3- 0	200.00	800.00	28.75	.92	6.05
11	4- 2	400.00	800.00	111.69	.89	2.33
12	4- 7	600.00	800.00	391.44	1.38	3.19
13	5- 4	400.00	800.00	30.95	.25	.23
14	5- 8	450.00	800.00	246.02	1.55	5.79
15	5- 6	350.00	800.00	60.94	.63	1.49
16	6- 9	300.00	800.00	86.00	1.22	6.06
17	0- 6	200.00	800.00	4.93	.16	.26
18	7- 0	450.00	800.00	158.62	1.00	2.47
19	7- 0	350.00	800.00	83.62	.87	2.66
20	8- 7	400.00	800.00	101.37	.81	1.95
21	8- 0	350.00	800.00	109.99	1.14	4.43
22	9- 8	300.00	800.00	24.08	.34	.59
23	9- 0	250.00	800.00	59.07	1.20	7.52
24	0- 9	200.00	800.00	15.93	.51	2.05
25	0- 2	600.00	5000.00	495.63	1.75	31.94

e= .01000 nk= 9 ny= 25

Вихідні дані

ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m
1	800.00	65.00	300.00	c	2	800.00	140.00	400.00	c	3	800.00	305.00	500.00	c
4	800.00	10.00	400.00	c	5	5000.00	504.50	600.00	c	6	800.00	200.00	400.00	c
7	800.00	130.00	300.00	c	8	800.00	55.00	250.00	c	9	800.00	80.00	350.00	c
10	800.00	20.00	200.00	c	11	800.00	175.50	400.00	c	12	800.00	385.00	600.00	c
13	800.00	20.00	400.00	c	14	800.00	290.00	450.00	c	15	800.00	85.00	350.00	c
16	800.00	110.00	300.00	c	17	800.00	15.00	200.00	c	18	800.00	220.00	450.00	c
19	800.00	145.00	350.00	c	20	800.00	40.00	400.00	c	21	800.00	110.00	350.00	c
22	800.00	20.00	300.00	c	23	800.00	55.00	250.00	c	24	800.00	20.00	200.00	c
25	5000.00	504.50	600.00	c	26	.00	.00	.00		27	.00	.00	.00	

Таблиця Б.5 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №5 2-3)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	60.33	.85	3.14
2	0- 1	400.00	800.00	135.33	1.08	3.33
3	1- 4	500.00	800.00	342.32	1.74	6.41
4	1- 0	400.00	800.00	14.67	.12	.06
5	2- 0	600.00	5000.00	516.43	1.83	34.68
6	0- 5	400.00	800.00	223.35	1.78	8.90
7	0- 3	300.00	800.00	113.44	1.60	10.55
8	0- 3	250.00	800.00	38.44	.78	3.40
9	3- 6	350.00	800.00	110.60	1.15	4.47
10	3- 0	200.00	800.00	36.56	1.16	9.47
11	4- 2	400.00	800.00	130.92	1.04	3.13
12	4- 7	600.00	800.00	409.53	1.45	3.49
13	5- 4	400.00	800.00	29.30	.23	.21
14	5- 8	450.00	800.00	260.51	1.64	6.49
15	5- 6	350.00	800.00	75.68	.79	2.21
16	6- 9	300.00	800.00	90.23	1.28	6.67
17	6- 0	200.00	800.00	.97	.03	.02
18	7- 0	450.00	800.00	162.81	1.02	2.60
19	7- 0	350.00	800.00	87.81	.91	2.91
20	8- 7	400.00	800.00	103.33	.82	2.02
21	8- 0	350.00	800.00	116.14	1.21	4.88
22	9- 8	300.00	800.00	19.60	.28	.41
23	9- 0	250.00	800.00	60.74	1.24	7.95
24	0- 9	200.00	800.00	14.26	.45	1.68
25	0- 2	600.00	5000.00	492.57	1.74	31.55

e= .01000 nk= 9 ny= 25

Вихідні дані

ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m
1	800.00	105.00	300.00	c	2	800.00	180.00	400.00	c	3	800.00	265.00	500.00	c
4	800.00	130.00	400.00	c	5	800.00	90.00	300.00	c	6	5000.00	504.50	600.00	c
7	800.00	40.00	300.00	c	8	800.00	55.00	250.00	c	9	800.00	80.00	350.00	c
10	800.00	20.00	200.00	c	11	800.00	175.50	400.00	c	12	800.00	385.00	600.00	c
13	800.00	60.00	400.00	c	14	800.00	330.00	450.00	c	15	800.00	125.00	350.00	c
16	800.00	110.00	300.00	c	17	800.00	15.00	200.00	c	18	800.00	220.00	450.00	c
19	800.00	145.00	350.00	c	20	800.00	40.00	400.00	c	21	800.00	110.00	350.00	c
22	800.00	20.00	300.00	c	23	800.00	55.00	250.00	c	24	800.00	20.00	200.00	c
25	5000.00	504.50	600.00	c	26	.00	.00	.00		27	.00	.00	.00	

Таблиця Б.6 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №6 6-7)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість: води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	83.21	1.18	5.71
2	0- 1	400.00	800.00	158.21	1.26	4.47
3	1- 4	500.00	800.00	316.46	1.61	5.48
4	1- 2	400.00	800.00	162.42	1.29	4.71
5	0- 2	300.00	800.00	100.62	1.42	8.30
6	5- 0	600.00	5000.00	516.87	1.83	34.74
7	3- 2	300.00	800.00	48.08	.68	2.07
8	0- 3	250.00	800.00	57.54	1.17	7.18
9	3- 6	350.00	800.00	84.31	.88	2.70
10	3- 0	200.00	800.00	17.46	.56	2.42
11	4- 5	400.00	800.00	133.46	1.06	3.24
12	4- 7	600.00	800.00	408.44	1.44	3.47
13	2- 4	400.00	800.00	79.05	.63	1.23
14	2- 8	450.00	800.00	298.64	1.88	8.52
15	2- 6	350.00	800.00	121.23	1.26	5.32
16	6- 9	300.00	800.00	95.09	1.35	7.41
17	6- 0	200.00	800.00	8.14	.26	.62
18	7- 0	450.00	800.00	166.89	1.05	2.72
19	7- 0	350.00	800.00	91.89	.96	3.17
20	8- 7	400.00	800.00	113.85	.91	2.41
21	8- 0	350.00	800.00	130.74	1.36	6.19
22	9- 8	300.00	800.00	7.31	.10	.07
23	9- 0	250.00	800.00	63.05	1.28	8.56
24	0- 9	200.00	800.00	11.95	.38	1.22
25	0- 5	600.00	5000.00	492.13	1.74	31.49

e= .01000 nk= 9 ny= 25

вихідні дані

ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m
1	800.00	155.00	300.00	c	2	800.00	230.00	400.00	c	3	800.00	450.00	500.00	c
4	800.00	10.00	400.00	c	5	800.00	90.00	300.00	c	6	800.00	265.00	400.00	c
7	800.00	40.00	300.00	c	8	800.00	55.00	250.00	c	9	800.00	110.00	350.00	c
10	800.00	20.00	200.00	c	11	800.00	59.50	400.00	c	12	5000.00	504.50	600.00	c
13	800.00	100.00	400.00	c	14	800.00	135.00	450.00	c	15	800.00	40.00	350.00	c
16	800.00	80.00	300.00	c	17	800.00	15.00	200.00	c	18	800.00	370.00	450.00	c
19	800.00	295.00	350.00	c	20	800.00	110.00	400.00	c	21	800.00	110.00	350.00	c
22	800.00	20.00	300.00	c	23	800.00	55.00	250.00	c	24	800.00	20.00	200.00	c
25	5000.00	504.50	600.00	c	26	.00	.00	.00		27	.00	.00	.00	

Таблиця Б.7 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №12 9-10)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість: води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	117.66	1.66	11.35
2	0- 1	400.00	800.00	192.66	1.53	6.62
3	1- 4	500.00	800.00	560.29	2.85	17.17
4	1- 2	400.00	800.00	62.50	.50	.80
5	0- 2	300.00	800.00	105.16	1.49	9.06
6	2- 5	400.00	800.00	227.56	1.81	9.24
7	2- 3	300.00	800.00	25.03	.35	.63
8	0- 3	250.00	800.00	55.19	1.12	6.64
9	3- 6	350.00	800.00	107.34	1.12	4.23
10	3- 0	200.00	800.00	19.81	.63	3.05
11	7- 4	400.00	800.00	122.00	.97	2.74
12	7- 0	600.00	5000.00	494.04	1.75	31.74
13	5- 4	400.00	800.00	195.23	1.55	6.80
14	5- 8	450.00	800.00	164.35	1.03	2.64
15	6- 5	350.00	800.00	20.19	.21	.21
16	6- 9	300.00	800.00	80.41	1.14	5.36
17	0- 6	200.00	800.00	12.53	.40	1.33
18	4- 0	450.00	800.00	297.04	1.87	8.43
19	4- 0	350.00	800.00	222.04	2.31	17.85
20	4- 8	400.00	800.00	44.12	.35	.43
21	8- 0	350.00	800.00	102.92	1.07	3.91
22	9- 8	300.00	800.00	29.13	.41	.83
23	9- 0	250.00	800.00	57.06	1.16	7.07
24	0- 9	200.00	800.00	17.94	.57	2.55
25	0- 7	600.00	5000.00	514.96	1.82	34.48

```
                                e=  .01000  nk=  9  ny= 25
                                вихідні дані
  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt
m
   1  800.00 105.00 300.00 c   2  800.00 180.00 400.00 c   3  800.00 325.00 500.00
c
   4  800.00  60.00 400.00 c   5  800.00  90.00 300.00 c   6  800.00 190.00 400.00
c
   7  800.00  40.00 300.00 c   8  800.00  55.00 250.00 c   9  800.00 110.00 350.00
c
  10  800.00  20.00 200.00 c  11  800.00 115.50 400.00 c  12  800.00 325.00 600.00
c
  13 5000.00 504.50 600.00 c  14  800.00 210.00 450.00 c  15  800.00  35.00 350.00
c
  16  800.00  80.00 300.00 c  17  800.00  15.00 200.00 c  18  800.00 220.00 450.00
c
  19  800.00 145.00 350.00 c  20  800.00  40.00 400.00 c  21  800.00 110.00 350.00
c
  22  800.00  20.00 300.00 c  23  800.00  55.00 250.00 c  24  800.00  20.00 200.00
c
  25 5000.00 504.50 600.00 c  26     .00    .00    .00    27     .00    .00    .00
```

Таблиця Б.8 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №13 6-10)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	70.30	.99	4.17
2	0- 1	400.00	800.00	145.30	1.16	3.80
3	1- 4	500.00	800.00	342.87	1.75	6.43
4	1- 2	400.00	800.00	89.20	.71	1.54
5	0- 2	300.00	800.00	84.49	1.20	5.88
6	2- 4	400.00	800.00	178.67	1.42	5.70
7	2- 3	300.00	800.00	43.41	.61	1.72
8	0- 3	250.00	800.00	52.91	1.08	6.14
9	3- 6	350.00	800.00	105.93	1.10	4.13
10	3- 0	200.00	800.00	22.09	.70	3.72
11	4- 5	400.00	800.00	121.90	.97	2.74
12	4- 7	600.00	800.00	402.96	1.43	3.38
13	5- 0	600.00	5000.00	514.93	1.82	34.48
14	4- 8	450.00	800.00	231.42	1.46	5.12
15	4- 6	350.00	800.00	45.67	.47	.88
16	6- 9	300.00	800.00	83.22	1.18	5.71
17	0- 6	200.00	800.00	8.84	.28	.71
18	7- 0	450.00	800.00	158.87	1.00	2.48
19	7- 0	350.00	800.00	83.87	.87	2.67
20	8- 7	400.00	800.00	96.54	.77	1.78
21	8- 0	350.00	800.00	105.41	1.10	4.09
22	9- 8	300.00	800.00	27.53	.39	.75
23	9- 0	250.00	800.00	57.94	1.18	7.28
24	0- 9	200.00	800.00	17.06	.54	2.32
25	0- 5	600.00	5000.00	494.07	1.75	31.74

```
                                e=  .01000  nk=  9  ny= 25
                                Вихідні дані
  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt    m  ny   ly     q      dt
m
   1  800.00 105.00 300.00 c   2  800.00 180.00 400.00 c   3  800.00 265.00 500.00
c
   4  800.00  90.00 400.00 c   5  800.00 120.00 300.00 c   6  800.00 290.00 400.00
c
   7  800.00  10.00 300.00 c   8  800.00  55.00 250.00 c   9  800.00 110.00 350.00
c
  10  800.00  20.00 200.00 c  11  800.00 175.50 400.00 c  12  800.00 385.00 600.00
c
  13  800.00 190.00 400.00 c  14 5000.00 504.50 600.00 c  15  800.00  95.00 350.00
c
  16  800.00  80.00 300.00 c  17  800.00  15.00 200.00 c  18  800.00 220.00 450.00
c
  19  800.00 145.00 350.00 c  20  800.00 120.00 400.00 c  21  800.00 190.00 350.00
c
  22  800.00  60.00 300.00 c  23  800.00  55.00 250.00 c  24  800.00  20.00 200.00
c
  25 5000.00 504.50 600.00 c  26     .00    .00    .00    27     .00    .00    .00
```

Таблиця Б.9 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №14 10-11)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість: води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	80.14	1.13	5.33
2	0- 1	400.00	800.00	155.14	1.23	4.29
3	1- 4	500.00	800.00	359.86	1.83	7.08
4	1- 2	400.00	800.00	117.10	.93	2.54
5	0- 2	300.00	800.00	122.24	1.73	12.25
6	2- 5	400.00	800.00	286.80	2.28	14.68
7	2- 3	300.00	800.00	9.61	.14	.12
8	0- 3	250.00	800.00	56.85	1.16	7.02
9	3- 6	350.00	800.00	111.55	1.16	4.54
10	3- 0	200.00	800.00	18.15	.58	2.60
11	4- 8	400.00	800.00	98.46	.78	1.85
12	4- 7	600.00	800.00	354.68	1.25	2.62
13	4- 5	400.00	800.00	119.04	.95	2.62
14	8- 0	600.00	5000.00	511.54	1.81	34.03
15	6- 5	350.00	800.00	90.64	.94	3.09
16	6- 9	300.00	800.00	69.91	.99	4.13
17	0- 6	200.00	800.00	18.40	.59	2.67
18	7- 0	450.00	800.00	180.32	1.13	3.14
19	7- 0	350.00	800.00	105.32	1.09	4.08
20	5- 7	400.00	800.00	160.65	1.28	4.60
21	5- 0	350.00	800.00	190.96	1.98	13.20
22	5- 9	300.00	800.00	54.27	.77	2.58
23	9- 0	250.00	800.00	61.69	1.26	8.20
24	0- 9	200.00	800.00	13.31	.42	1.48
25	0- 8	600.00	5000.00	497.46	1.76	32.18

e= .01000 nk= 9 ny= 24
Вихідні дані

ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m
1	800.00	155.00	300.00	c	2	800.00	230.00	400.00	c	3	800.00	350.00	500.00	c
4	800.00	10.00	400.00	c	5	800.00	90.00	300.00	c	6	800.00	190.00	400.00	c
7	800.00	40.00	300.00	c	8	800.00	55.00	250.00	c	9	800.00	110.00	350.00	c
10	800.00	20.00	200.00	c	11	800.00	40.50	400.00	c	12	800.00	470.00	600.00	c
13	800.00	75.00	400.00	c	14	800.00	210.00	450.00	c	15	800.00	35.00	350.00	c
16	800.00	80.00	300.00	c	17	800.00	15.00	200.00	c	18	5000.00	504.50	600.00	c
19	5000.00	504.50	600.00	c	20	800.00	260.00	400.00	c	21	800.00	110.00	350.00	c
22	800.00	20.00	300.00	c	23	800.00	55.00	250.00	c	24	800.00	20.00	200.00	c

Таблиця Б.10 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №18 9-13)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	76.42	1.08	4.87
2	0- 1	400.00	800.00	151.42	1.20	4.09
3	1- 4	500.00	800.00	369.24	1.88	7.46
4	1- 2	400.00	800.00	88.08	.70	1.50
5	0- 2	300.00	800.00	89.50	1.27	6.57
6	2- 5	400.00	800.00	192.91	1.54	6.64
7	2- 3	300.00	800.00	39.28	.56	1.43
8	0- 3	250.00	800.00	53.78	1.10	6.33
9	3- 6	350.00	800.00	108.25	1.13	4.30
10	3- 0	200.00	800.00	21.22	.68	3.46
11	4- 7	400.00	800.00	93.46	.74	1.68
12	4- 0	600.00	800.00	529.34	1.87	5.83
13	5- 4	400.00	800.00	13.25	.11	.05
14	5- 8	450.00	800.00	254.18	1.60	6.18
15	5- 6	350.00	800.00	29.62	.31	.41
16	6- 9	300.00	800.00	85.12	1.20	5.94
17	0- 6	200.00	800.00	12.03	.38	1.24
18	0- 7	600.00	5000.00	498.12	1.76	32.27
19	7- 0	600.00	5000.00	510.88	1.81	33.94
20	8- 0	400.00	800.00	213.41	1.70	8.13
21	8- 0	350.00	800.00	63.41	.66	1.60
22	9- 8	300.00	800.00	64.44	.91	3.55
23	9- 0	250.00	800.00	52.85	1.08	6.13
24	0- 9	200.00	800.00	22.15	.71	3.74

e= .01000 nk= 9 ny= 24
вихідні дані

ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m
1	800.00	155.00	300.00	c	2	800.00	230.00	400.00	c	3	800.00	350.00	500.00	c
4	800.00	10.00	400.00	c	5	800.00	90.00	300.00	c	6	800.00	190.00	400.00	c
7	800.00	40.00	300.00	c	8	800.00	55.00	250.00	c	9	800.00	110.00	350.00	c
10	800.00	20.00	200.00	c	11	800.00	40.50	400.00	c	12	800.00	395.00	600.00	c
13	800.00	75.00	400.00	c	14	800.00	210.00	450.00	c	15	800.00	35.00	350.00	c
16	800.00	80.00	300.00	c	17	800.00	15.00	200.00	c	18	5000.00	504.50	600.00	c
19	5000.00	504.50	600.00	c	20	800.00	185.00	400.00	c	21	800.00	110.00	350.00	c
22	800.00	20.00	300.00	c	23	800.00	55.00	250.00	c	24	800.00	20.00	200.00	c

Таблиця Б.11 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №19 14-13)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість: води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	73.03	1.03	4.48
2	0- 1	400.00	800.00	148.03	1.18	3.94
3	1- 4	500.00	800.00	354.60	1.81	6.88
4	1- 2	400.00	800.00	89.05	.71	1.53
5	0- 2	300.00	800.00	87.08	1.23	6.22
6	2- 5	400.00	800.00	186.08	1.48	6.18
7	2- 3	300.00	800.00	41.27	.58	1.56
8	0- 3	250.00	800.00	53.35	1.09	6.24
9	3- 6	350.00	800.00	107.09	1.11	4.21
10	3- 0	200.00	800.00	21.65	.69	3.59
11	4- 7	400.00	800.00	109.35	.87	2.24
12	4- 0	600.00	800.00	472.37	1.67	4.64
13	5- 4	400.00	800.00	4.46	.04	.01
14	5- 8	450.00	800.00	241.10	1.52	5.56
15	5- 6	350.00	800.00	37.28	.39	.61
16	6- 9	300.00	800.00	83.70	1.18	5.78
17	0- 6	200.00	800.00	10.44	.33	.96
18	0- 7	600.00	5000.00	495.97	1.75	31.99
19	7- 0	600.00	5000.00	513.03	1.81	34.23
20	8- 0	400.00	800.00	160.73	1.28	4.61
21	8- 0	350.00	800.00	85.73	.89	2.78
22	9- 8	300.00	800.00	45.13	.64	1.84
23	9- 0	250.00	800.00	55.86	1.14	6.80
24	0- 9	200.00	800.00	19.14	.61	2.87

e= .01000 nk= 9 ny= 25
вихідні дані

ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m
1	800.00	105.00	300.00	c	2	800.00	180.00	400.00	c	3	800.00	265.00	500.00	c
4	800.00	60.00	400.00	c	5	800.00	90.00	300.00	c	6	800.00	190.00	400.00	c
7	800.00	40.00	300.00	c	8	800.00	55.00	250.00	c	9	800.00	110.00	350.00	c
10	800.00	20.00	200.00	c	11	800.00	175.50	400.00	c	12	800.00	345.00	600.00	c
13	800.00	60.00	400.00	c	14	800.00	210.00	450.00	c	15	800.00	35.00	350.00	c
16	800.00	80.00	300.00	c	17	800.00	15.00	200.00	c	18	800.00	260.00	450.00	c
19	800.00	185.00	350.00	c	20	5000.00	504.50	600.00	c	21	800.00	110.00	350.00	c
22	800.00	20.00	300.00	c	23	800.00	55.00	250.00	c	24	800.00	20.00	200.00	c
25	5000.00	504.50	600.00	c	26	.00	.00	.00		27	.00	.00	.00	

Таблиця Б.12 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №20 10-14)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	68.98	.98	4.03
2	0- 1	400.00	800.00	143.98	1.15	3.74
3	1- 4	500.00	800.00	332.93	1.70	6.06
4	1- 2	400.00	800.00	94.27	.75	1.70
5	0- 2	300.00	800.00	88.25	1.25	6.38
6	2- 5	400.00	800.00	192.07	1.53	6.58
7	2- 3	300.00	800.00	40.38	.57	1.50
8	0- 3	250.00	800.00	53.63	1.09	6.30
9	3- 6	350.00	800.00	108.29	1.13	4.30
10	3- 0	200.00	800.00	21.37	.68	3.51
11	4- 8	400.00	800.00	131.56	1.05	3.16
12	4- 7	600.00	800.00	360.76	1.28	2.71
13	4- 5	400.00	800.00	28.41	.23	.20
14	5- 7	450.00	800.00	257.35	1.62	6.33
15	5- 6	350.00	800.00	31.59	.33	.45
16	6- 9	300.00	800.00	85.35	1.21	5.97
17	0- 6	200.00	800.00	11.91	.38	1.22
18	7- 0	450.00	800.00	212.33	1.34	4.31
19	7- 0	350.00	800.00	137.33	1.43	6.83
20	8- 0	600.00	5000.00	516.54	1.83	34.70
21	7- 0	350.00	800.00	62.33	.65	1.55
22	9- 7	300.00	800.00	65.41	.93	3.65
23	9- 0	250.00	800.00	52.74	1.07	6.10
24	0- 9	200.00	800.00	22.26	.71	3.78
25	0- 8	600.00	5000.00	492.46	1.74	31.54

e= .01000 nk= 9 ny= 25

вихідні дані

ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m	ny	ly	q	dt	m
1	800.00	105.00	300.00	c	2	800.00	180.00	400.00	c	3	800.00	265.00	500.00	c
4	800.00	60.00	400.00	c	5	800.00	90.00	300.00	c	6	800.00	210.00	400.00	c
7	800.00	40.00	300.00	c	8	800.00	55.00	250.00	c	9	800.00	110.00	350.00	c
10	800.00	20.00	200.00	c	11	800.00	175.50	400.00	c	12	800.00	465.00	600.00	c
13	800.00	80.00	400.00	c	14	800.00	300.00	450.00	c	15	800.00	15.00	350.00	c
16	800.00	80.00	300.00	c	17	800.00	15.00	200.00	c	18	800.00	140.00	450.00	c
19	800.00	65.00	350.00	c	20	800.00	10.00	400.00	c	21	5000.00	504.50	600.00	c
22	800.00	130.00	300.00	c	23	800.00	55.00	250.00	c	24	800.00	20.00	200.00	c
25	5000.00	504.50	600.00	c	26	.00	.00	.00		27	.00	.00	.00	

Таблиця Б.13 - Результати розрахунку (аварійна ділянка №21 15-14)

номер ділянки	код ділянки	діаметр труби,мм	L ділянки,м	витрата води,л/с	швидкість: води,м/с	втрати напору,м
1	0- 1	300.00	800.00	72.48	1.03	4.42
2	0- 1	400.00	800.00	147.48	1.17	3.91
3	1- 4	500.00	800.00	345.35	1.76	6.52
4	1- 2	400.00	800.00	97.18	.77	1.80
5	0- 2	300.00	800.00	94.66	1.34	7.35
6	2- 5	400.00	800.00	211.52	1.68	7.98
7	2- 3	300.00	800.00	35.16	.50	1.17
8	0- 3	250.00	800.00	54.82	1.12	6.56
9	3- 6	350.00	800.00	111.98	1.16	4.58
10	3- 0	200.00	800.00	20.18	.64	3.15
11	4- 8	400.00	800.00	117.86	.94	2.57
12	4- 7	600.00	800.00	416.97	1.47	3.62
13	4- 5	400.00	800.00	38.35	.31	.34
14	5- 0	450.00	800.00	293.81	1.85	8.25
15	5- 6	350.00	800.00	10.62	.11	.07
16	6- 9	300.00	800.00	91.80	1.30	6.91
17	0- 6	200.00	800.00	16.81	.53	2.26
18	7- 0	450.00	800.00	140.19	.88	1.97
19	7- 0	350.00	800.00	65.19	.68	1.68
20	0- 7	400.00	800.00	9.81	.08	.03
21	8- 0	600.00	5000.00	514.30	1.82	34.40
22	9- 0	300.00	800.00	116.40	1.65	11.11
23	9- 0	250.00	800.00	41.40	.84	3.89
24	0- 9	200.00	800.00	33.60	1.07	8.09
25	0- 8	600.00	5000.00	494.70	1.75	31.82

Додаток В

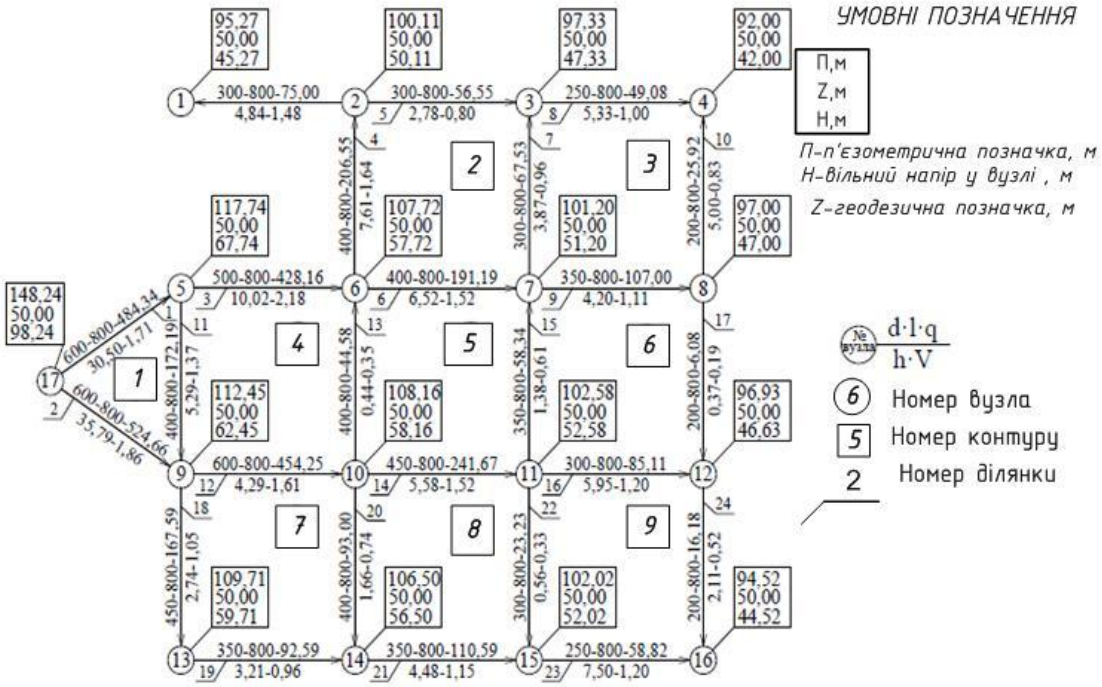


Рисунок В.1 – П'єзометрична карта при аварії на ділянці №2 1-5.

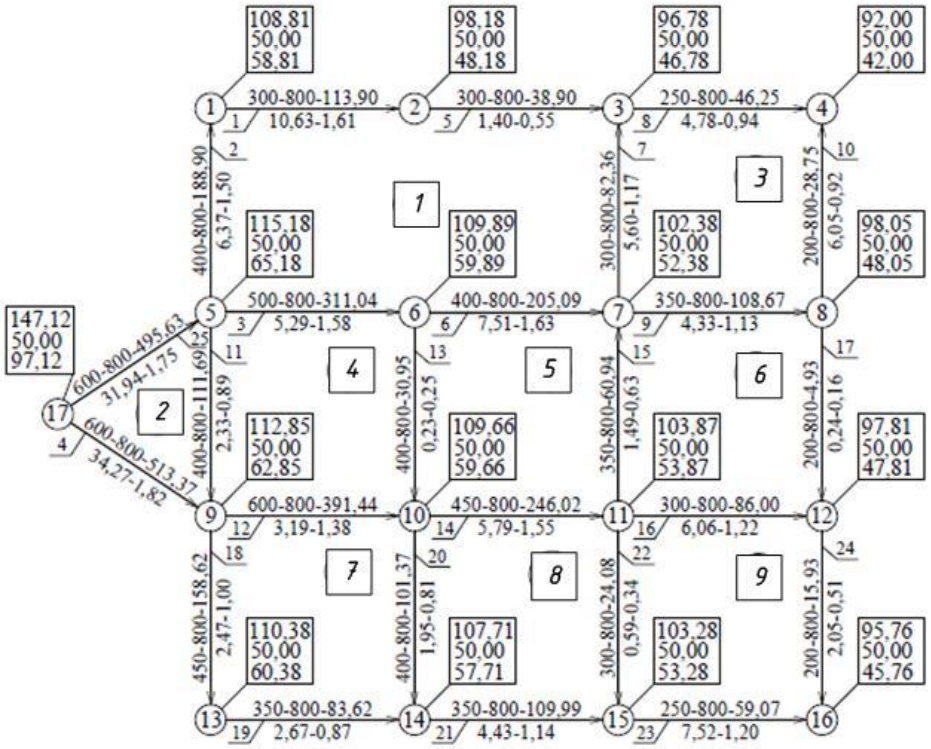


Рисунок В.2 – П'єзометрична карта при аварії на ділянці №4 2-6

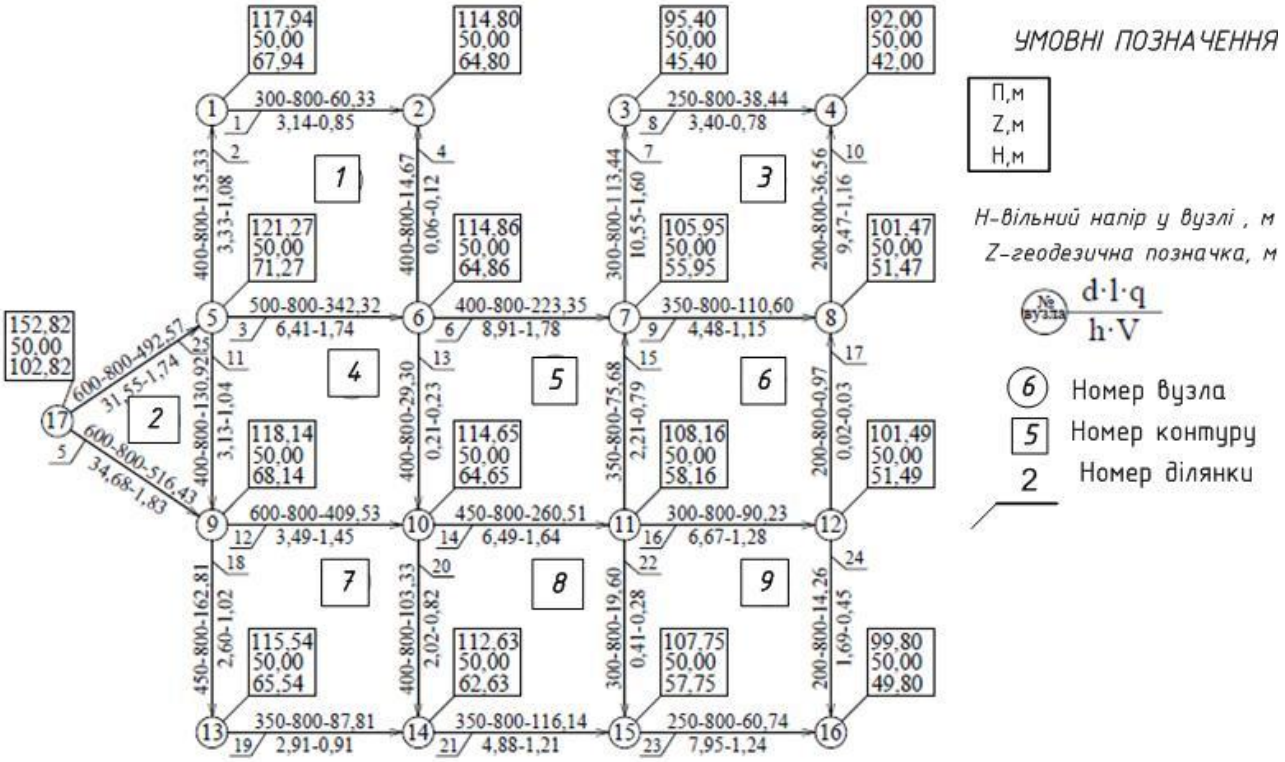


Рисунок В.3 – П'єзометрична карта при аварії на ділянці №5 2-3

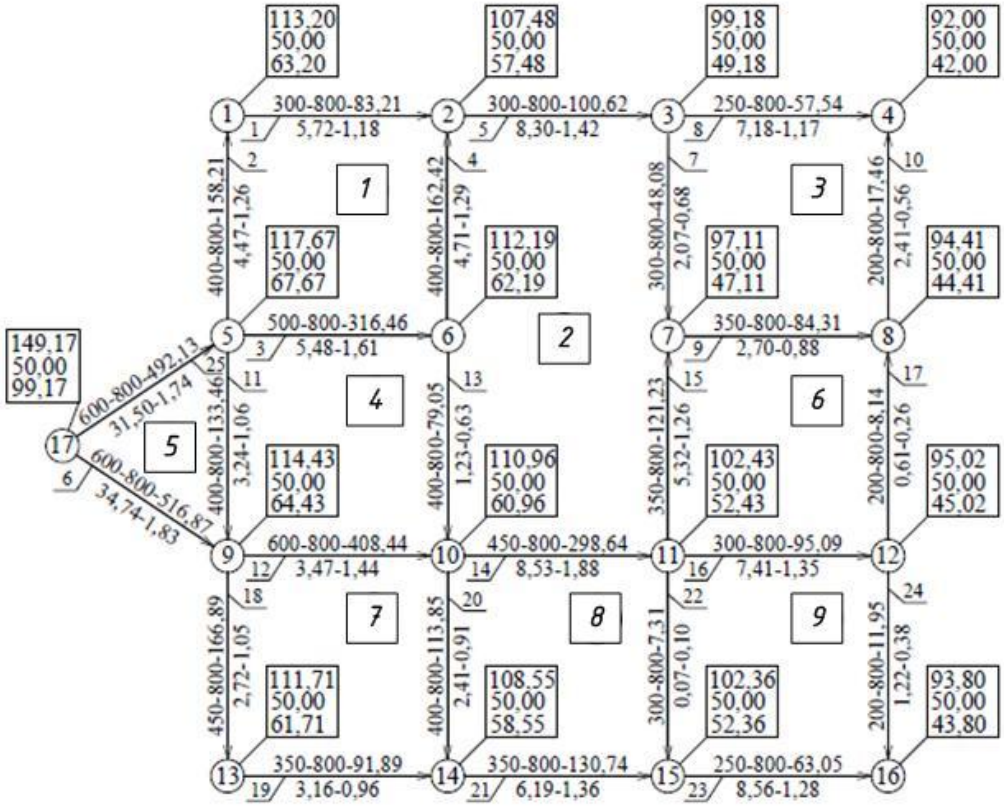


Рисунок В.4 – П'єзометрична карта при аварії на ділянці №6 6-7

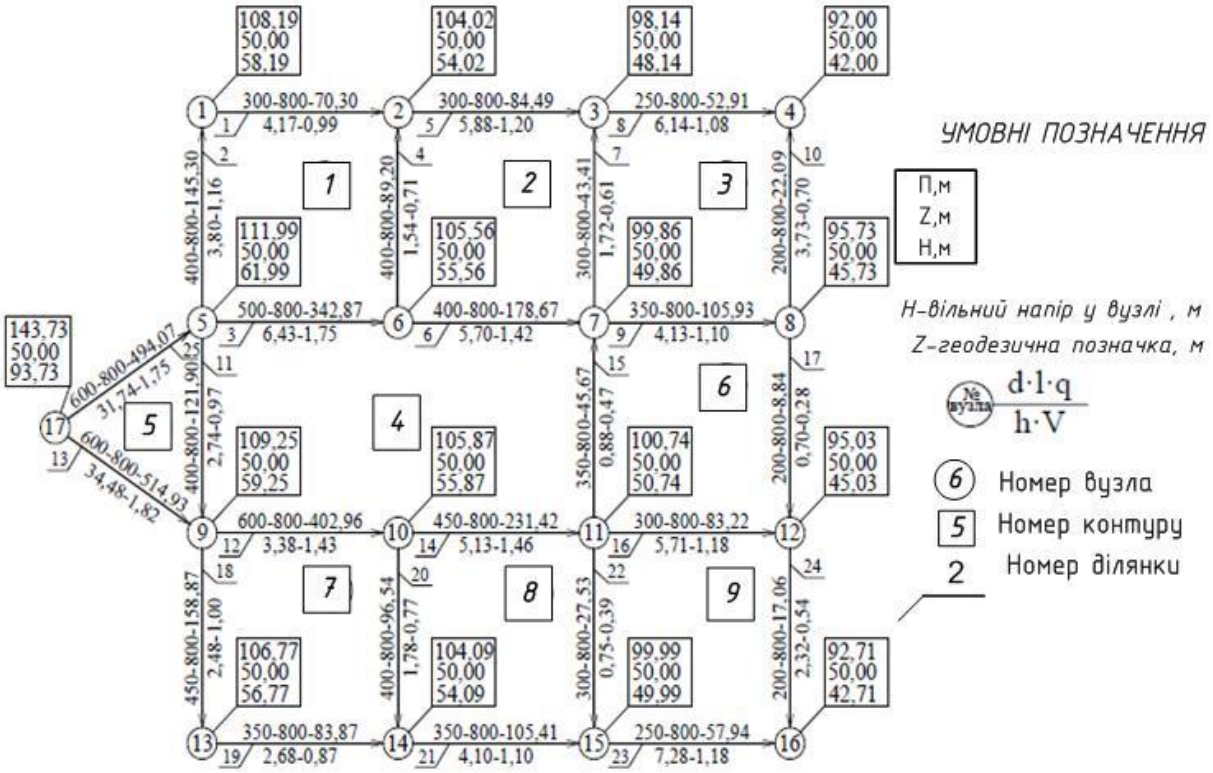


Рисунок В.5 – П'єзометрична карта при аварії на ділянці №13 6–10

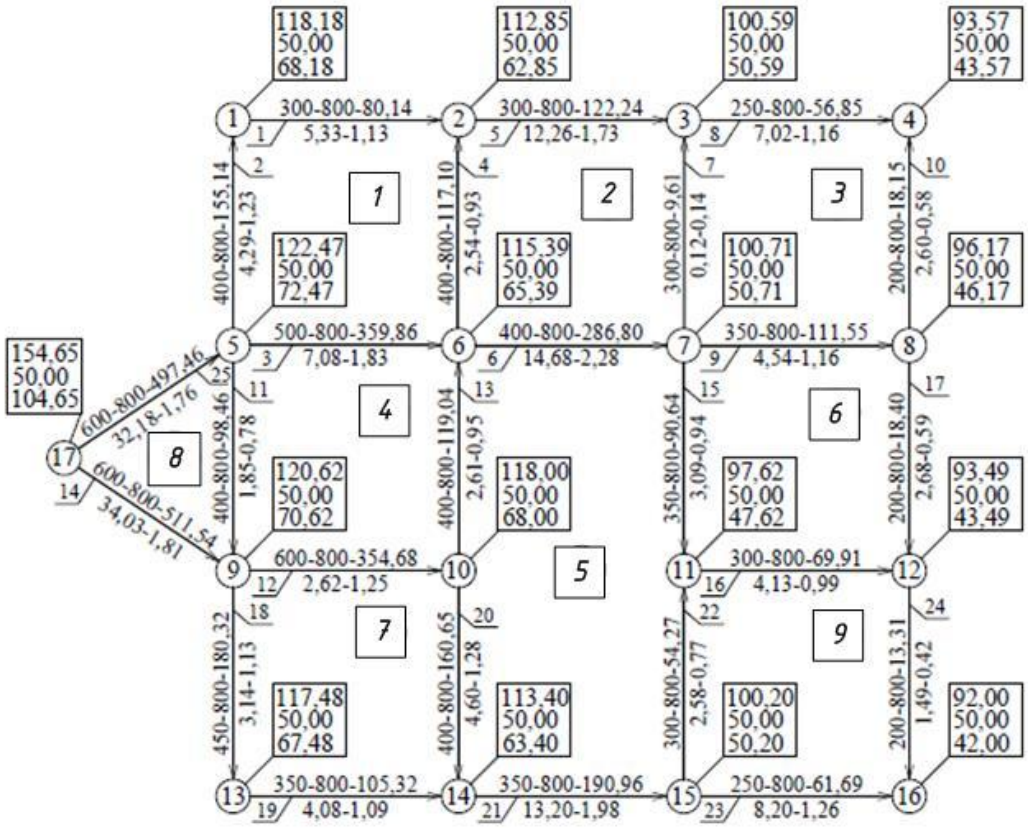


Рисунок В.6 – П'єзометрична карта при аварії на ділянці №14 10–11

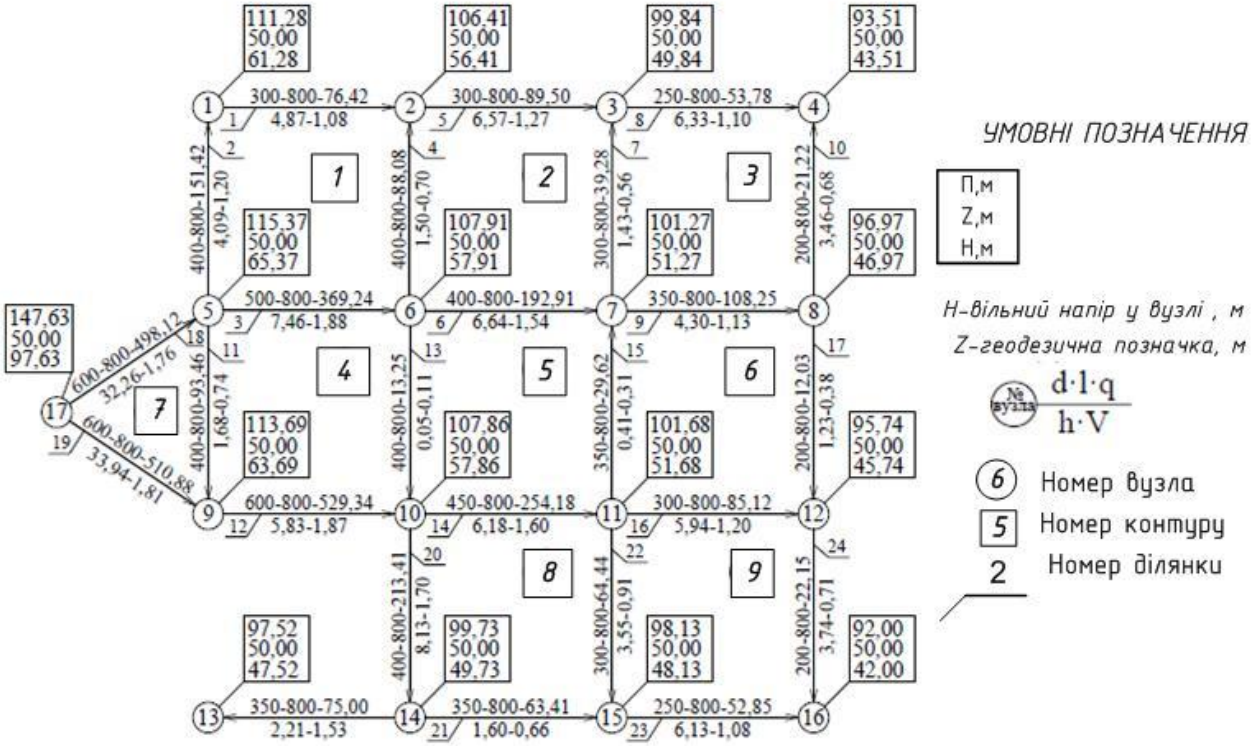


Рисунок В.7 – П'єзометрична карта при аварії на ділянці №18 9-13

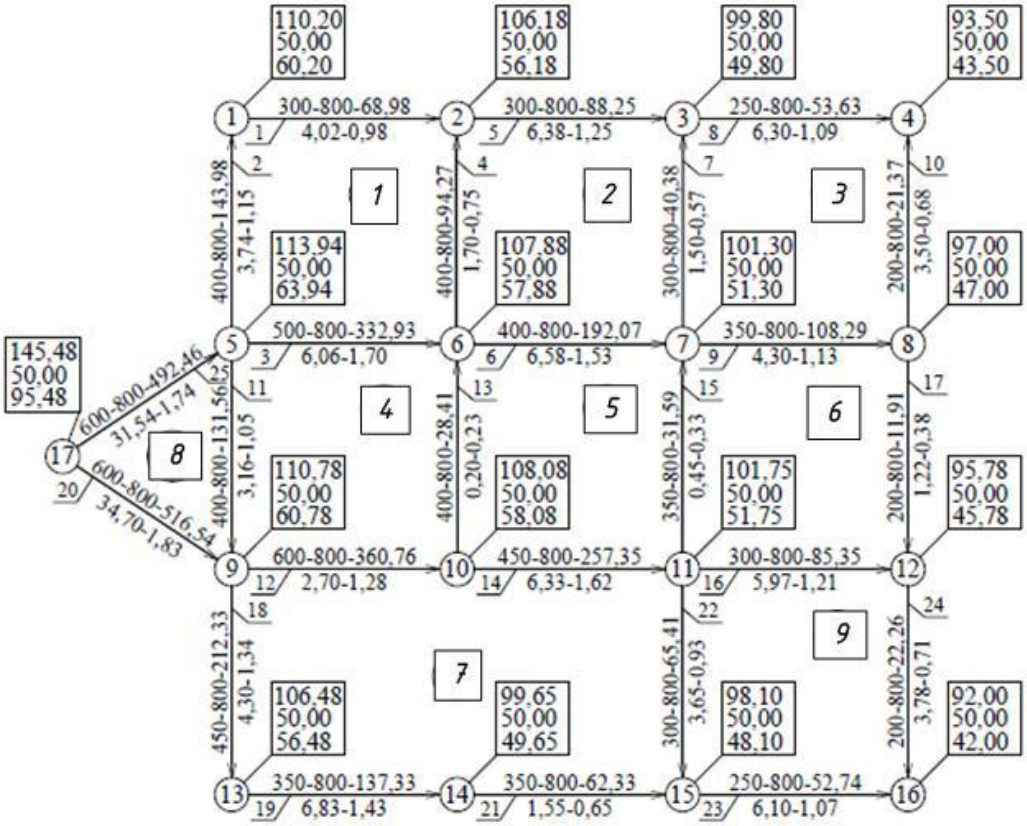
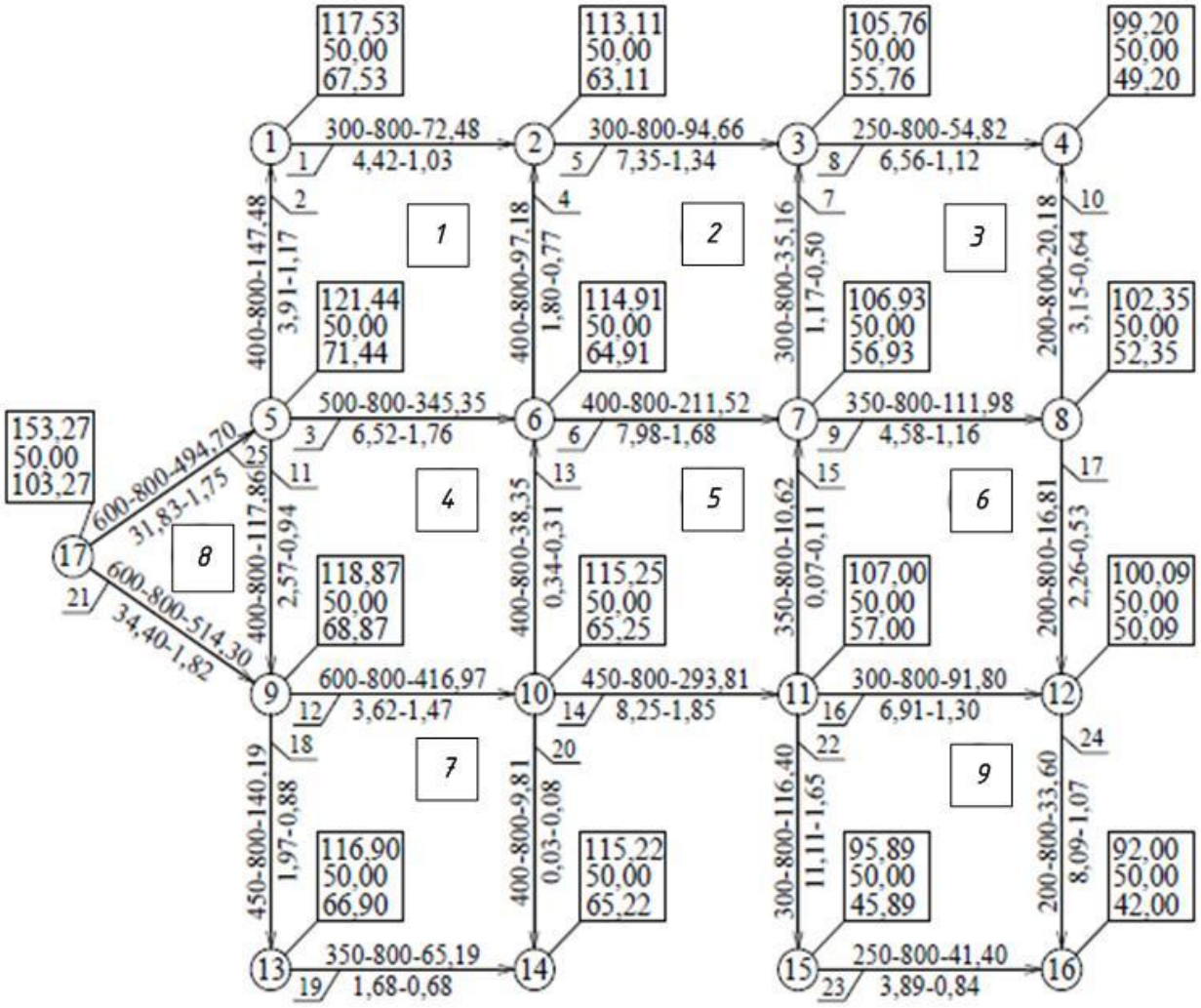


Рисунок В.8 – П'єзометрична карта при аварії на ділянці №20 10-14



УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

П,м
Z,м
H,м

H-вільний напір у вузлі , м

Z-геодезична позначка, м

№ вузла $\frac{d \cdot l \cdot q}{h \cdot V}$

6 Номер вузла

5 Номер контуру

2 Номер ділянки

Рисунок В.9 – П'єзометрична карта при аварії на ділянці №21 14–15