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: **«Проєктування регулювальних місткостей для мережі транспортування води»**

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

Керівник: доцент кафедри міського будівництва і архітектури, канд. техн. наук С.В. Ільїн

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» 02 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Пивоваровій Марині Вікторівні
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Тема роботи Проєктування регулювальних місткостей для мережі транспортування води

затверджено наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1832-с

2. Строк подання роботи: *20.05.2026*

3. Вихідні дані до роботи: продуктивність водопровідної мережі 45 000 м³/доб

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить розробити): РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДИ. ***1.1****Класифікація мереж транспортування води. 1.2. Гідравлічні режими роботи мереж. 1.3. Значенняь регулювальних місткостей у стабілізації тиску та витрат. 1.4. Види регулювальних місткостей. 1.5. Нормативна база. 1.6. Висновки за розділом. РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ МЕРЕЖІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРЕБИ В РЕГУЛЮВАЛЬНИХ МІСТКОСТЯХ. 2.1. Характеристика об'єкта проєктування. 2.2. Гідравлічний розрахунок мережі. 2.3. Аналіз нерівномірності споживання та роботи насосних станцій. 2.4. Виявлення ділянок з несприятливими режимами. 2.5. Обґрунтування місця розташування регулювальних місткостей. 2.6. Висновки за розділом. РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ МІСТКОСТЕЙ. 3.1. Визначення необхідного об'єму регулювальної місткості. 3.2. Гідравлічний розрахунок взаємодії місткості з мереж. 3.3. Вибір типу та конструкції місткості. 3.4. Конструктивні розрахунки. 3.5. Система автоматизованого керування. 3.6. Моделювання роботи мережі з регулювальними місткостями. 3.7. Висновки за розділом. РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ, БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА. 4.1. Капітальні та експлуатаційні витрати.4.2. Техніко-економічні показники. 4.3. Заходи з охорони праці та техніки безпеки. 4.4. Екологічна оцінка. 4.5. Заходи з енергозбереження та надійності. ВИСНОВКИ,*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
1. Гідравлічні режими роботи водопровідної мережі. 2. Схема системи автоматизованого керування мережею. 3. Розрахункова схема водопровідної мережі. 4,Визначення об'єму регулювальної місткості. 5. Водонапірна башта. 6.Резервуари чистої води.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Ільїн С.В., к.т.н., доцент		
2	Ільїн С.В., к.т.н., доцент		
3	Ільїн С.В., к.т.н., доцент		
4	Ільїн С.В., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 01.02.2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Виконання	Примітка
1	Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДИ	08.03.25	
2	Розділ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ МЕРЕЖІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРЕБИ В РЕГУЛЮВАЛЬНИХ МІСТКОСТЯХ.	30.03.25	
3	Листи 1-2.	10.04.25	
4	Розділ 3. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ МІСТКОСТЕЙ	15.04.25	
5	Листи 3,4.	25.04.25	
	Розділ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ, БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА..Лист №4.	01.05.25	
6	Листи 5-6.	10.05.25	
7	Презентація підготовка доповіді.	15.05.25	
8	Попередній захист	20.05.25	

Студент М.В. Пивоварова

Керівник роботи Ільїн С.В.

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер І.В. Гребенюк

ЗМІСТ

ВСТУП……6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДИ……8
1.1. Класифікація мереж транспортування води……...8
1.2 Гідравлічні режими роботи мереж……..9
1.3 Значення регулювальних місткостей у стабілізації тиску та витрат…....11
1.4 Види регулювальних місткостей……...12
1.5 Нормативна база……..13
1.6. Висновки за розділом……14
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ МЕРЕЖІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРЕБИ В РЕГУЛЮВАЛЬНИХ МІСТКОСТЯХ……..…...15
2.1. Характеристика об'єкта проєктування……...……..15
2.2. Гідравлічний розрахунок мережі……..16
2.3. Аналіз нерівномірності споживання та роботи насосних станцій…….17
2.4. Виявлення ділянок з несприятливими режимами……...18
2.5. Обґрунтування місця розташування регулювальних місткостей……..18
2.6. Висновки за розділом……19
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ МІСТКОСТЕЙ……...21
3.1. Визначення необхідного об'єму регулювальної місткості…….21
3.2. Гідравлічний розрахунок взаємодії місткості з мереж……...22
3.3. Вибір типу та конструкції місткості…….23
3.4. Конструктивні розрахунки……24
3.5. Система автоматизованого керування……..25
3.6. Моделювання роботи мережі з регулювальними місткостями……..27
3.7. Висновки за розділом……27

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ, БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА……...……29
4.1. Капітальні та експлуатаційні витрати……...29
4.2. Техніко-економічні показники……...……...30
4.3. Заходи з охорони праці та техніки безпеки……..…31
4.4. Екологічна оцінка……...35
4.5. Заходи з енергозбереження та надійності……39
4.6. Висновки за розділом……..…44
ВИСНОВКИ……...47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...……..52

ВСТУП

Забезпечення надійного та якісного водопостачання є одним із пріоритетних завдань комунальної інфраструктури будь-якого населеного пункту. Зі зростанням урбанізації, зміщенням пікових навантажень споживання та підвищенням вимог до якості питної води проблема регулювання режимів роботи водопровідних мереж набуває дедалі більшої актуальності. Нерівномірність водоспоживання упродовж доби, тижня та сезону року є об'єктивним явищем, яке зумовлене особливостями побутових, виробничих і санітарно-гігієнічних потреб населення.

Регулювальні місткості – резервуари чистої води (РЧВ), водонапірні башти, напірно-регулювальні вузли – є фундаментальними елементами будь-якої системи централізованого водопостачання. Вони виконують функцію буфера між відносно рівномірною подачею насосних станцій та нерівномірним споживанням, акумулюючи воду в години мінімального споживання та видаючи її в години пікового попиту. Крім того, регулювальні місткості забезпечують недоторканний протипожежний запас, аварійний резерв на час ремонту насосного обладнання та стабілізують тиск у мережі.

Незважаючи на тривалу практику застосування, проєктування регулювальних місткостей залишається складним інженерним завданням, що вимагає врахування гідравлічних, конструктивних, технологічних та економічних чинників. Перехід до систем автоматизованого диспетчерського управління (SCADA) відкриває нові можливості для оптимізації роботи резервуарів в режимі реального часу, проте потребує відповідних методичних підходів при проєктуванні.

Актуальність теми обумовлена також тим, що значна частина регулювальних місткостей в Україні введена в експлуатацію у 1960–1980 роках і потребує реконструкції або заміни. Відповідно до Стратегії розвитку комунальної інфраструктури до 2030 року, передбачено масштабне оновлення основних фондів водопостачання, у тому числі регулювальних споруд.

Метою роботи є розроблення комплексного проєктного рішення для регулювальної місткості у складі водопровідної мережі реального об'єкта – системи водопостачання м. Рівне – із виконанням усіх необхідних гідравлічних, конструктивних та техніко-економічних розрахунків.

Завдання роботи:

– виконати аналіз теоретичних основ регулювання режимів роботи водопровідних мереж та класифікацію регулювальних місткостей;

– провести гідравлічний розрахунок існуючої мережі та виявити ділянки з несприятливими режимами роботи;

– визначити необхідний регулювальний об'єм та обґрунтувати місце розташування місткості;

– виконати конструктивні розрахунки залізобетонного резервуара відповідно до чинних норм;

– розробити схему системи автоматизованого керування регулювальною місткістю;

– виконати техніко-економічне обґрунтування та оцінку екологічного впливу проєктного рішення.

Об'єкт дослідження – водопровідна мережа транспортування питної води міста. Предмет дослідження – параметри та конструктивні рішення регулювальних місткостей.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному застосуванні методу інтегрального графіка та чисельного моделювання в EPANET для уточнення параметрів регулювальної місткості з урахуванням реальних графіків водоспоживання та режимів роботи насосних станцій.

Практичне значення отриманих результатів визначається можливістю їх безпосереднього застосування у проєктній документації для будівництва регулювальної місткості об'ємом 3 400 м³ у місті.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДИ

1.1. Класифікація мереж транспортування води

Мережі транспортування води є сукупністю трубопроводів, споруд і обладнання, призначених для подачі питної, технічної або пожежної води від джерела водопостачання до споживачів. Залежно від призначення, схеми прокладання та умов роботи вони поділяються на кілька основних категорій.

Магістральні трубопроводи (водоводи) призначені для транспортування великих витрат води на значні відстані від водозабірних або водопідготовчих споруд до розподільної мережі. Характерними ознаками магістральних трубопроводів є великі діаметри (від 400 до 1200 мм і більше), значна протяжність (від кількох кілометрів до сотень кілометрів), відсутність відборів води безпосередньо по трасі та підвищені вимоги до надійності. За конструкцією вони виконуються зі сталевих, залізобетонних або поліетиленових труб і оснащуються засувками для секціонування, вантузами для видалення повітря та засобами захисту від гідравлічного удару[24].

Напірні водоводи та розподільні мережі функціонують за рахунок надлишкового тиску, що створюється насосними станціями або напором водонапірних башт. Тиск у напірних мережах становить зазвичай 0.3–0.6 МПа (3–6 атм), що забезпечує подачу води до споживачів на всіх поверхах будівель. За схемою прокладання напірні мережі поділяються на тупикові (деревовидні) та кільцеві. Тупикові схеми економічніші за витратами матеріалів, проте менш надійні – аварія на будь-якій ділянці призводить до припинення подачі всім споживачам, розташованим далі по трасі. Кільцеві схеми забезпечують двобічне живлення кожного вузла, що суттєво підвищує надійність водопостачання, але потребує більшої кількості труб та арматури.

Самопливні (гравітаційні) водоводи та мережі використовуються в умовах значного перевищення позначок джерела над позначками споживачів. Вони не потребують витрат електроенергії на перекачування, однак їх

застосування обмежене топографічними умовами місцевості. До самопливних систем відносять також відкриті канали, тунелі та дюкери для переходу через перепони.



Рисунок 1.1 – Класифікація мереж транспортування води (Схема 1)

Окремою категорією є комбіновані системи, у яких поєднуються напірні та самопливні ділянки. Такі системи характерні для гірських районів або при значній різниці відміток між окремими зонами водопостачання. У таких системах регулювальні місткості відіграють особливо важливу роль, оскільки дозволяють згладжувати перепади тиску між зонами та забезпечувати нормативний тиск у кожній зоні.

1.2. Гідравлічні режими роботи мереж

Гідравлічний режим водопровідної мережі характеризується розподілом тисків та витрат у всіх вузлах і на всіх ділянках у будь-який момент часу. Режими роботи мережі поділяються на усталені (квазістаціонарні) та перехідні (нестаціонарні). Усталений режим відповідає умовам, за яких витрати та тиски змінюються настільки повільно, що система в кожний момент знаходиться в стані рівноваги. Перехідні режими виникають при раптових змінах режиму

роботи – пусках і зупинках насосів, відкриванні та закриванні засувок, аваріях на трубопроводах[21].

Нерівномірність водоспоживання є основним чинником, що визначає необхідність регулювання режимів роботи мережі. Характер добового графіка водоспоживання залежить від структури населеного пункту, промислового потенціалу, кліматичних умов та інших факторів. Для оцінки нерівномірності використовуються коефіцієнти: добовий коефіцієнт нерівномірності Кдоб (відношення максимального добового водоспоживання до середнього), що коливається у межах 1.1–1.4 для великих міст та 1.3–1.5 для малих; годинний коефіцієнт нерівномірності Кгод (відношення максимальної годинної витрати до середньої за добу), що може досягати 1.5–2.5.

Гідравлічний удар є перехідним явищем у напірних трубопроводах, яке виникає при різкому скороченні або припиненні руху рідини. Фізична суть гідроудару полягає у стисненні рідини та пружній деформації стінок труби при поширенні хвилі надлишкового або зниженого тиску з швидкістю, що відповідає швидкості звуку в пружній рідині. За формулою Жуковського, максимальне підвищення тиску при прямому гідравлічному ударі становить:

$$\Delta H = a \cdot v_0 / g,$$

де a – швидкість поширення хвилі тиску, м/с (900–1200 м/с для сталевих труб); v_0 – швидкість течії до зупинки, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с².

При v_0 = 1.5 м/с та a = 1000 м/с підвищення тиску складає 150 м водяного стовпа (1.5 МПа), що може перевищувати розрахунковий тиск у 3–4 рази та призводити до руйнування трубопроводу. Для захисту від гідравлічного удару застосовуються: повільно закриваючі засувки та клапани, демпфери пульсацій, повітряні котли, а також регулювальні місткості, які поглинають хвилю надлишкового тиску.

Кавітація – явище утворення та подальшого захлопування парових бульбашок у потоці рідини при місцевому зниженні тиску нижче тиску насичених парів. Кавітація виникає на всмоктуючих патрубках насосів, у

звужених перерізах трубопроводів, за напіввідкритими засувками. Наслідками кавітації є зниження ККД насосів, вібрація та ерозійне руйнування металевих поверхонь. Нормативне число кавітаційного запасу для відцентрових насосів регламентується ДСТУ 6134.

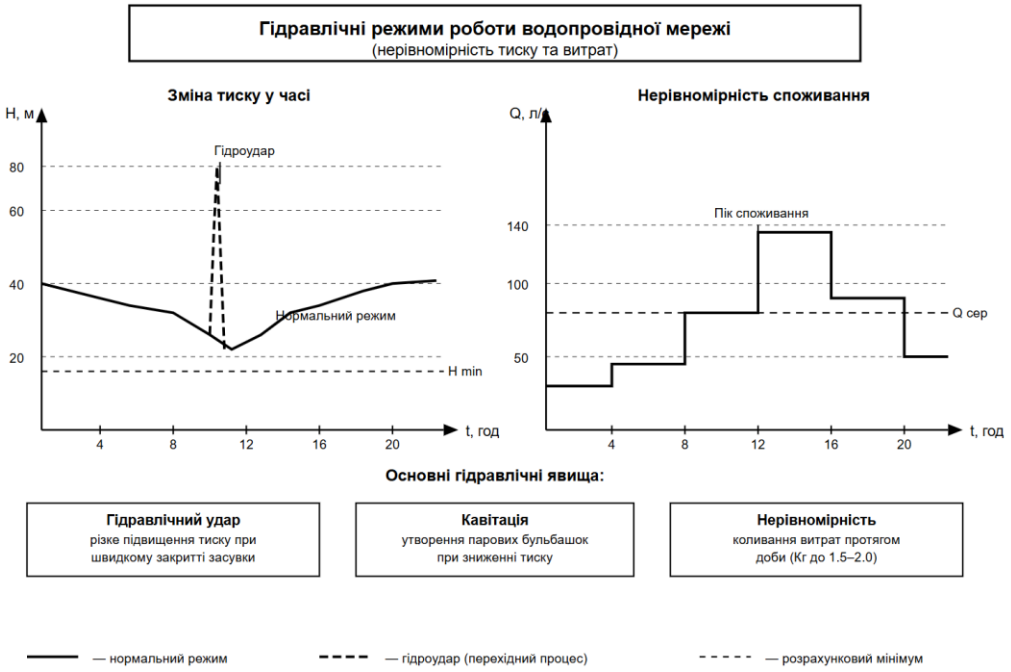


Рисунок 1.2 – Гідравлічні режими роботи мережі: нерівномірність тиску і витрат (Схема 2)

1.3. Значення регулювальних місткостей у стабілізації тиску та витрат

Регулювальна місткість виконує в системі водопостачання роль акумулятора, що компенсує різницю між подачею насосної станції та споживанням у кожний момент часу. Принцип роботи резервуара базується на збереженні матеріального балансу: у години, коли подача перевищує споживання, місткість наповнюється; у години пікового споживання – спорожняється, забезпечуючи необхідну витрату в мережі[1].

Наявність регулювальної місткості дозволяє насосній станції працювати у більш рівномірному режимі (зменшення кількості пусків-зупинок, зменшення діапазону регулювання частотних перетворювачів), що збільшує

ресурс насосного обладнання та знижує питомі витрати електроенергії. За розрахунками, рівномірний режим роботи насосів забезпечує економію електроенергії до 15–20% порівняно з неоптимальним режимом.

Регулювальна місткість також виконує функцію протипожежного резерву. Відповідно до ДБН В.2.5-74:2013, у резервуарах чистої води повинен зберігатися запас води для гасіння пожеж протягом розрахункового часу (3 години для міст з витратою 35 л/с або більше). Аварійний запас призначений для забезпечення водопостачання на час ліквідації аварій на насосних станціях або магістральних трубопроводах.

Ще одна важлива функція – стабілізація тиску в мережі. При значних коливаннях витрат тиск у вузлах мережі змінюється в широких межах, що призводить до незадовільного водопостачання у години пік або надмірного тиску у нічний час. Резервуар, підключений до мережі через напірний водопровід, є джерелом стабільного тиску, визначеного позначкою рівня води в ньому.

1.4. Види регулювальних місткостей

Резервуари чистої води (РЧВ) – наземні або підземні ємності, розташовані, як правило, поруч з насосними станціями II підйому. Вони виконують функції акумулювання регулювального, аварійного та протипожежного об'ємів води. Конструктивно РЧВ виконуються зі збірного або монолітного залізобетону, рідше – з полімерних матеріалів або нержавіючої сталі. Місткість РЧВ може становити від кількох сотень до десятків тисяч кубометрів[2].

Водонапірні башти являють собою металевий або залізобетонний бак, встановлений на вежі висотою 10–40 м. Башти виконують подвійну функцію: регулювання та підтримки постійного тиску в мережі за рахунок гравітаційного напору. Об'єм баків водонапірних башт, як правило, значно менший за об'єм РЧВ і становить 25–250 м³. Недоліком водонапірних башт є

їх висока вартість при значних об'ємах, потреба в утепленні в умовах морозів та обмежені можливості для герметизації.

Гідропневматичні баки (котли) використовуються у невеликих локальних системах водопостачання. Принцип роботи базується на стисненні повітря при наповненні бака, яке підтримує тиск у мережі при зменшенні витрати. Перевагами є компактність та відсутність потреби у будівництві вежі, недоліком – відносно малий регулювальний об'єм та необхідність підтримки тиску повітря.

Напірно-регулювальні вузли (НРВ) – сучасні системи, що поєднують функції регулювання тиску, витрати та об'єму. НРВ включають збірні місткості, регулюючі клапани, витратоміри та систему автоматичного управління. Їх перевагою є гнучкість у регулюванні режимів роботи мережі в реальному часі.

Підземні залізобетонні резервуари є найпоширенішим типом регулювальних місткостей у системах водопостачання України. Вони характеризуються великою місткістю (від 500 до 50 000 м³), довговічністю (нормативний строк служби 50–100 років), низькими теплоптратами завдяки заглибленню в ґрунт та стабільними умовами зберігання води.

1.5. Нормативна база

Проєктування регулювальних місткостей регламентується комплексом нормативних документів, основним з яких в Україні є ДБН В.2.5-74:2013 «Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення». Цей норматив встановлює вимоги до визначення розрахункових витрат, об'ємів регулювальних місткостей, розміщення резервуарів, їх конструктивного виконання та санітарного захисту[7].

ДСТУ та відповідні технічні умови регламентують властивості матеріалів для будівництва резервуарів: ДСТУ EN 1916 (залізобетонні труби та фасонні вироби), ДСТУ 4272 (вимоги до питної води), ДСТУ ISO 9001

(система управління якістю). У частині розрахунків залізобетонних конструкцій застосовується ДБН В.2.6-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції».

СНиП 2.04.02-84 «Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди» зберігає чинність у частині, що не суперечить вітчизняним ДБН. Він містить детальні методики гідравлічного розрахунку мереж та визначення параметрів регулювальних місткостей, яких немає в сучасних вітчизняних нормах.

Міжнародний стандарт ISO 24510 «Діяльність, пов'язана з послугами питного водопостачання та водовідведення» визначає принципи оцінки ефективності систем водопостачання, у тому числі показники надійності та безперебійності подачі, якими повинні відповідати проєктовані об'єкти. Стандарти серії EN 805 (Водопостачання. Вимоги до систем і компонентів за межею будівлі) регламентують технічні вимоги до мереж водопостачання в країнах ЄС та поступово впроваджуються в Україні.

1.6. Висновки за розділом

Проведений аналіз теоретичних основ регулювання режимів роботи мереж транспортування води дозволяє зробити такі висновки:

1. Нерівномірність водоспоживання є фундаментальним явищем, що визначає необхідність регулювальних місткостей у будь-якій системі централізованого водопостачання.
2. Регулювальні місткості виконують комплекс функцій: регулювання нерівномірності, забезпечення протипожежного та аварійного запасів, стабілізація тиску, захист від гідравлічного удару.
3. Найбільш поширеним типом регулювальних місткостей для міських систем водопостачання є підземні залізобетонні резервуари чистої води.
4. Проєктування регулювальних місткостей здійснюється відповідно до ДБН В.2.5-74:2013 та суміжних нормативних документів.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ МЕРЕЖІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРЕБИ В РЕГУЛЮВАЛЬНИХ МІСТКОСТЯХ

2.1. Характеристика об'єкта проєктування

Об'єктом проєктування є система водопостачання міста з населенням близько 248 тис. осіб. Система включає: водозабір з р. Устя продуктивністю 45 000 м³/доб, станцію водопідготовки, насосну станцію II підйому (НС-II) та розподільну мережу протяжністю 312 км. Розрахунковий район проєктування охоплює північно-східну частину міста площею 12.4 км², з населенням 72 тис. осіб та кількома промисловими підприємствами.

Добова потреба у воді для розрахункового району складає 22 500 м³/доб, у тому числі: господарсько-питне споживання – 16 200 м³/доб (72%), виробниче водоспоживання – 4 500 м³/доб (20%), поливання та миття вулиць – 1 800 м³/доб (8%). Коефіцієнт добової нерівномірності Кдоб = 1.35 встановлений на підставі багаторічних спостережень за водоспоживанням.

Існуюча мережа підживлення розрахункового району включає чотири основні вузли (В-1…В-4) та чотири характерні ділянки трубопроводів. Характеристики ділянок наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристика трубопроводів розрахункової ділянки мережі

Ділянка	Матеріал труб	Діаметр, мм	Довжина, м	Рік укладення	Стан
НС-II — В-1	Сталь (з/а)	315	850	1984	задовільний
В-1 — В-2	Чавун	250	1200	1976	незадовільний
В-2 — В-3	Сталь (з/а)	200	900	1991	задовільний
В-3 — В-4	ВЧШГ	160	700	2008	добрий

2.2. Гідравлічний розрахунок мережі

Гідравлічний розрахунок виконаний методом Лобачова–Харді–Кросса для квазістаціонарного режиму максимального водоспоживання. Розрахункові витрати в кожному вузлі визначені відповідно до питомих витрат на одиницю площі водопостачання та зосереджених витрат промислових споживачів. Сума вузлових витрат (55 л/с) відповідає максимальній годинній витраті з урахуванням коефіцієнта годинної нерівномірності Кгод = 1.78.

Питомий гідравлічний опір трубопроводів розраховано за формулою Дарсі–Вейсбаха з використанням коефіцієнта гідравлічного тертя λ, визначеного за формулою Альтшуля:

$$\lambda = 0.11 \cdot (\Delta/d + 68/Re)^{0.25},$$

де Δ – еквівалентна шорсткість стінки труби, мм; d – внутрішній діаметр, мм; Re – число Рейнольдса. Для чавунних труб Δ = 1.0 мм, для сталевих з антикорозійним захистом Δ = 0.5 мм, для ВЧШГ Δ = 0.25 мм.

Результати розрахунку мережі для режиму максимального водоспоживання наведено в таблицях 2.2 та 2.3.

Таблиця 2.2 – Результати гідравлічного розрахунку (режим максимального водоспоживання)

Вузол	Позначка осі, м	Вузлова витрата, л/с	Тиск розр., м вод.ст.	Тиск факт., м вод.ст.
В-1	175.8	0	45.0	46.2
В-2	174.2	18	38.5	37.8
В-3	172.6	22	32.0	30.4
В-4	170.1	15	25.0	22.1

Таблиця 2.3 – Гідравлічні характеристики ділянок мережі

Ділянка	Витрата Q, л/с	Швидкість v, м/с	Втрати тиску hf, м	Питомі втрати i, м/км
НС-II — В-1	60.0	0.77	4.2	4.94
В-1 — В-2	42.0	0.85	8.4	7.00
В-2 — В-3	24.0	0.76	7.4	8.22
В-3 — В-4	15.0	0.74	8.3	11.86

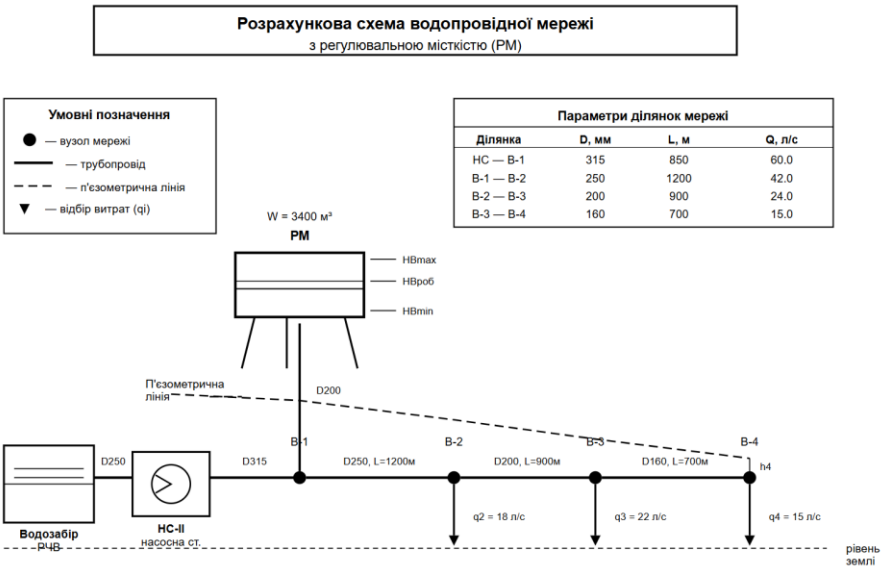


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема мережі з регулювальною місткістю (Схема 3)

2.3. Аналіз нерівномірності споживання та роботи насосних станцій

На підставі обробки добових відомостей обліку води за 365 діб побудовано інтегральний графік водоспоживання. Встановлено, що максимальне споживання спостерігається у проміжку 7:00–9:00 та 17:00–20:00, а мінімальне – з 1:00 до 5:00. Максимальна годинна витрата становить 1 560 м³/год, мінімальна – 285 м³/год, середня – 937.5 м³/год. Відповідно:

$$\text{Кгод.}max = 1\,560 / 937.5 = 1.664;$$

$$\text{Кгод.}min = 285 / 937.5 = 0.304.$$

Насосна станція II підйому обладнана трьома насосними агрегатами Д 2000-100 з подачею 2 000 м³/год кожний. Існуюча схема роботи передбачає

увімкнення одного насоса в нічні години, двох – в денні та трьох – у години пік. Кожне вмикання/вимикання насоса є джерелом гідравлічного удару. За рік фіксується понад 1 450 пусків насосів, тоді як нормативний ресурс складає не більше 500 пусків на рік. Це є причиною прискореного зносу насосного обладнання та підвищеного ризику аварій.

Введення регулювальної місткості дозволить перевести НС-ІІ на більш рівномірний режим роботи: в нічний час – закачування у резервуар, вдень – рівномірна подача з одночасною роботою резервуара. Кількість пусків скоротиться до 180–220 на рік.

2.4. Виявлення ділянок з несприятливими режимами

Аналіз результатів гідравлічного розрахунку свідчить про такі проблемні зони. По-перше, тиск у вузлі В-4 (22.1 м) є нижчим за нормативний мінімум 25 м (ДБН В.2.5-74:2013) для цієї ділянки мережі. Це викликано значними питомими втратами тиску на ділянці В-3–В-4 (11.86 м/км), що перевищує допустиме значення 6–8 м/км. Причиною є недостатній діаметр трубопроводу на цій ділянці.

По-друге, ділянка трубопроводу В-1–В-2 із чавунних труб 1976 р. укладення знаходиться в незадовільному стані та потребує заміни. При аварії на цій ділянці водопостачання вузлів В-2, В-3 і В-4 буде повністю припинено. Відсутність регулювальної місткості унеможливлює навіть тимчасове водопостачання у разі аварійного відключення мережі.

По-третє, нічний мінімум споживання (285 м³/год) при роботі одного насоса (2 000 м³/год) призводить до підвищення тиску у вузлі В-1 до 58–62 м, що наближається до максимально допустимого значення 60 м. Регулювальна місткість дозволить спрямувати надлишкові об'єми у резервуар замість «підживлення» мережі надлишковим тиском.

2.5. Обґрунтування місця розташування регулювальних місткостей

Місце розташування регулювальної місткості визначається декількома чинниками: топографічними умовами (необхідна позначка дна резервуара для забезпечення нормативного тиску в усіх вузлах), відстанню від насосної станції (мінімальна довжина підвідного трубопроводу), наявністю земельної ділянки відповідної площі та умовами підключення до існуючої мережі.

Проведений аналіз рельєфу та інфраструктури показав, що оптимальним є розташування РЧВ поблизу вузла В-1, на земельній ділянці площею 0.3 га, розташованій на позначці 176.0 м.

При рівні води в резервуарі $176.0 + 5.0 = 181.0$ м тиск у мережі визначається:

$$\Delta H = 181.0 - 175.8 - 4.2 = 1.0 \text{ м (мінімальний вільний напір)}$$

що недостатньо. Тому передбачається підключення резервуара через насосну підкачку з регулюванням тиску за допомогою частотного перетворювача.

2.6. Висновки за розділом

За результатами аналізу існуючої водопровідної мережі встановлено комплекс проблем, що негативно впливають на надійність та ефективність системи водопостачання розрахункового району.

Перш за все, загальний рівень надійності мережі є недостатнім. Це зумовлено відсутністю регулювальної ємності (резервуарів чистої води), яка могла б компенсувати добові та пікові коливання водоспоживання, а також стабілізувати роботу системи при аварійних ситуаціях або нерівномірних режимах подачі води. Додатково ситуацію ускладнює наявність окремих ділянок трубопроводів із несприятливими гідравлічними режимами, де спостерігаються втрати напору, підвищені швидкості або недостатня

пропускна здатність, що призводить до нестабільного водопостачання споживачів.

Особливо критичною є ситуація у вузлі В-4, де фактичний тиск не відповідає нормативним вимогам. Це означає, що споживачі в даній точці мережі отримують воду з недостатнім напором, що може впливати на комфорт користування та навіть унеможливлювати нормальну роботу внутрішньобудинкових систем водопостачання. Для усунення цієї проблеми необхідно реалізувати комплекс технічних заходів, який включає будівництво резервуара чистої води (РЧВ), а також заміну існуючого трубопроводу на ділянці В-3–В-4 із збільшенням діаметра до 200 мм. Така модернізація дозволить зменшити гідравлічні втрати та забезпечити необхідний рівень тиску у вузлі. Окремо слід відзначити нераціональний режим роботи насосної станції ІІ підйому. Вона функціонує у ступінчастому режимі з надмірною кількістю запусків та зупинок насосного обладнання. Такий характер роботи є технічно небажаним, оскільки призводить до підвищеного зносу електродвигунів і насосів, збільшення витрат електроенергії та скорочення ресурсу обладнання. Це також свідчить про відсутність плавного регулювання продуктивності або недостатню узгодженість між режимами роботи насосної станції та добовим графіком водоспоживання. Найбільш доцільним рішенням для підвищення загальної ефективності системи є розміщення резервуара чистої води в районі вузла В-1 на відмітці 176,0 м. Таке розташування є гідравлічно обґрунтованим, оскільки дозволяє оптимізувати подачу води в мережу з урахуванням рельєфу місцевості та забезпечити більш рівномірний розподіл напорів. Підключення РЧВ через насосну підкачку дає можливість стабілізувати роботу системи, зменшити кількість пусків насосів та забезпечити більш рівномірне навантаження на обладнання насосної станції.

У підсумку, запропоновані заходи спрямовані на підвищення надійності водопостачання, вирівнювання гідравлічних режимів у мережі, забезпечення нормативного тиску у проблемних вузлах та оптимізацію роботи насосного обладнання.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ МІСТКОСТЕЙ

3.1. Визначення необхідного об'єму регулювальної місткості

Загальний необхідний об'єм регулювальної місткості складається з трьох компонентів: регулювального об'єму Wрег, протипожежного запасу Wпож і аварійного запасу Wав:

$$W = W\,\text{рег} + W\,\text{пож} + W\,\text{ав}$$

Регулювальний об'єм визначено методом інтегрального графіка добового водоспоживання. Для цього за добовим графіком водоспоживання побудовані накопичувальні криві подачі та споживання.

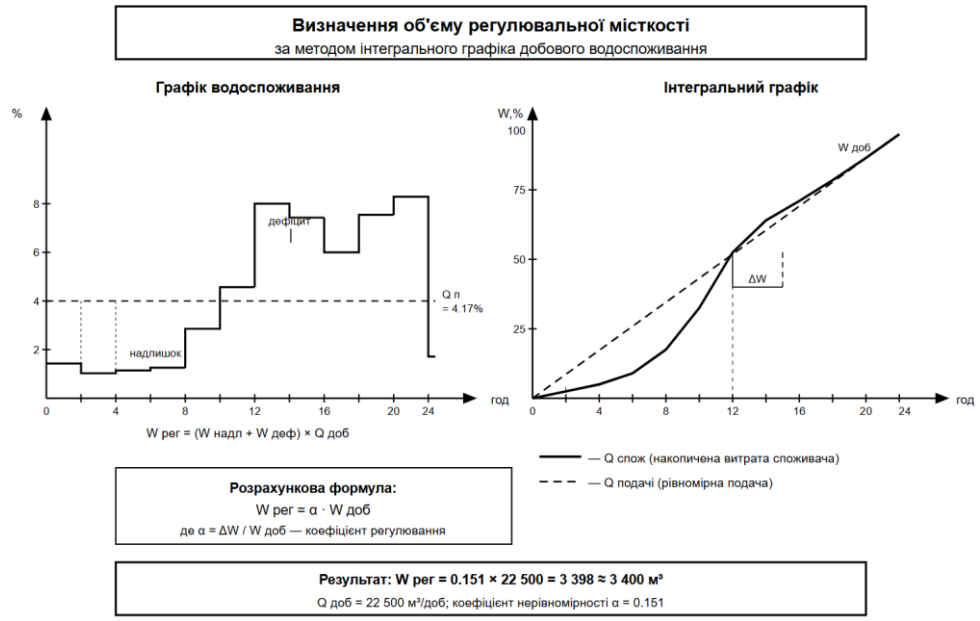


Рисунок 3.1 – Визначення об'єму регулювальної місткості за інтегральним графіком (Схема 4)

Максимальне відхилення між кривими подачі та споживання:

$$\Delta W = 15.1\%\ \text{від}\ Q\ \text{доб}$$

Регулювальний об'єм:

$$W\,\text{рег} = 0.151 \times 22\,500 = 3\,398\ \text{м}^3$$

Протипожежний запас для міста з населенням понад 50 000 осіб, витрата на пожежогасіння q = 35 л/с, час гасіння t = 3 год, кількість одночасних пожеж n = 2:

$$W\,\text{пож} = q \cdot t \cdot n \cdot 3.6 = 35 \times 3 \times 2 \times 3.6 = 756\,\text{м}^3$$

Аварійний запас у розмірі 6-годинного середнього споживання:

$$W\,\text{ав} = Q\,\text{доб} / 24 \times 6 = 22\,500 / 24 \times 6 = 5\,625\,\text{м}^3$$

Однак аварійний запас частково перекривається регулювальним (з урахуванням режиму роботи), тому з урахуванням поправки:

$$W\,\text{ав розр} = 5\,625 \times 0.40 = 2\,250\,\text{м}^3$$

Загальний об'єм:

$$W = 3\,398 + 756 + 2\,250 = 6\,404\,\text{м}^3$$

Прийнято два резервуари по 3 400 м³ кожний, що задовольняє вимогу нормативу щодо будівництва не менше двох секцій. Загальний об'єм: W = 6 800 м³ > 6 404 м³ – умова виконана.

Таким чином, для розрахункового району приймаємо до будівництва два залізобетонних резервуари об'ємом 3 400 м³ кожний, з'єднаних між собою трубопроводами з можливістю роздільної та спільної роботи.

3.2. Гідравлічний розрахунок взаємодії місткості з мережею

Гідравлічна взаємодія РЧВ з мережею розглядається для трьох характерних режимів: наповнення резервуара (нічні години, споживання < подачі), спорожнення резервуара (години пік, споживання > подачі) та транзитного режиму (рівновага). Розрахунок виконаний методом характеристик у програмному середовищі EPANET 2.2.

Підвідний трубопровід до РЧВ від вузла В-1: D = 200 мм, L = 120 м, матеріал – ВЧШГ. Витрата заповнення (нічний режим):

$$Q\,\text{зап} = Q\,\text{НС} - Q\,\text{спож.ніч} = 2\,000/3.6 - 285/3.6 = 476\,\text{л/с}$$

Втрати тиску в підвідному трубопроводі при Q = 476 л/с:

$$v = Q / (\pi \cdot d^2 / 4) = 0.476 / (\pi \times 0.2^2 / 4) = 15.2\,\text{м/с}$$

Примітка: розрахункова витрата заповнення обмежується пропускною здатністю трубопроводу та регулюючим клапаном. Прийнята витрата заповнення Q зап = 250 л/с (v = 7.96 м/с), час заповнення:

$$t\,\text{зап} = W / Q\,\text{зап} = 3\,400 / (0.250 \times 3\,600) = 3.78\,\text{год}$$

Напір, необхідний для заповнення резервуара:

$$H\,\text{зап} = H\,\text{рез} + h\,\text{ф} + h\,\text{м} = (176 + 5.8) - 181.0 + 3.5 + 1.2 = 5.5\,\text{м}$$

де Н рез – рівень води в резервуарі (max), м; h ф – лінійні втрати; h м – місцеві втрати. Цей напір забезпечується роботою насосів НС-II з запасом.

Режим спорожнення (підкачка): насос підкачки Q п = 150 л/с, Н п = 35 м, N уст = 75 кВт. Час спорожнення регулювального об'єму:

$$t\,\text{спор} = W\,\text{рег} / Q\,\text{п} = 3\,398 / (0.150 \times 3\,600) = 6.29\,\text{год}$$

Результати моделювання у EPANET показали, що при роботі РЧВ у розрахунковому режимі тиск у вузлі В-4 підвищується з 22.1 до 28.4 м, що відповідає нормативним вимогам.

3.3. Вибір типу та конструкції місткості

Порівняно три типи конструктивного виконання резервуарів: монолітний залізобетон, збірний залізобетон із попередньо напруженими панелями та склопластиковий (GRP). Результати порівняння наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння типів конструкцій резервуарів

Показник	Монолітний ЗБ	Збірний ЗБ	Склопластик (GRP)
Вартість будівництва, грн/м³	6 800	5 200	9 400
Строк служби, років	80–100	50–70	30–50
Ремонтопридатність	висока	середня	низька
Теплоізоляція	добра	задовільна	незадовільна
Санітарна надійність	висока	середня	висока
Сейсмостійкість	висока	середня	висока

За результатами техніко-економічного порівняння прийнятий тип – монолітний залізобетонний підземний резервуар прямокутної форми в плані. Прийнятий тип відзначається найбільшим строком служби, найкращою ремонтопридатністю і надійною герметичністю при правильному виконанні гідроізоляційних робіт. Незважаючи на вищу початкову вартість порівняно зі збірним варіантом, наведені витрати за 50 років строку служби є мінімальними.

3.4. Конструктивні розрахунки

Визначення конструктивних розмірів резервуара виконано з урахуванням нормативних вимог ДБН В.2.5-74:2013 (корисна глибина 3.0–6.0 м, відношення ширини до довжини 1:2–1:4) та умов несучої здатності конструкцій.

Прийнята глибина корисного шару води: H = 5.3 м. Площа в плані:

$$F = W / H = 3\,400 / 5.3 = 641.5\ \text{м}^2$$

Прийнятий розмір у плані: L × B = 47.5 × 15.8 = 750.5 м². Включаючи мертвий залишок 0.5 м та запас на конструкцію: загальна висота H заг = 5.3 + 0.5 + 0.4 = 6.2 м, округлюємо до H заг = 7.2 м.

Розрахунок бокових стін виконано як пластини, закріплені по трьом граням та вільних по верхній. Максимальний тиск гідростатичний:

$$p = \gamma \times H = 10.0 \times 5.3 = 53\ \text{кН/м}^2$$

Розрахунковий момент у нижньому перерізі стіни (за МКЕ):

$$M = \alpha \times p \times l^2 = 0.082 \times 53 \times 15.8^2 = 1\,083\ \text{кН} \cdot \text{м/м}$$

де α – коефіцієнт, що залежить від схеми защемлення і відношення сторін, l – менша сторона пластини.

Підбір арматури: при бетоні C25/30 (Rb = 14.5 МПа) та арматурі A400 (Rs = 350 МПа), товщина стіни δ = 0.30 м, захисний шар a = 35 мм, робоча висота перерізу d = 300 – 35 = 265 мм:

$$As = M / (Rs \times z) = 1\,083 \times 10^3 / (350 \times 0.9 \times 265 \times 10^{-3}) = 12\,990 \text{ мм}^2/\text{м}$$

Прийнято: армування ø20 А400 з кроком 240 мм (As факт = 13 090 мм²/м).

Перекриття резервуара – плоска залізобетонна плита з ребрами жорсткості. Товщина плити перекриття: δ = 200 мм, товщина підлоги – 200 мм.

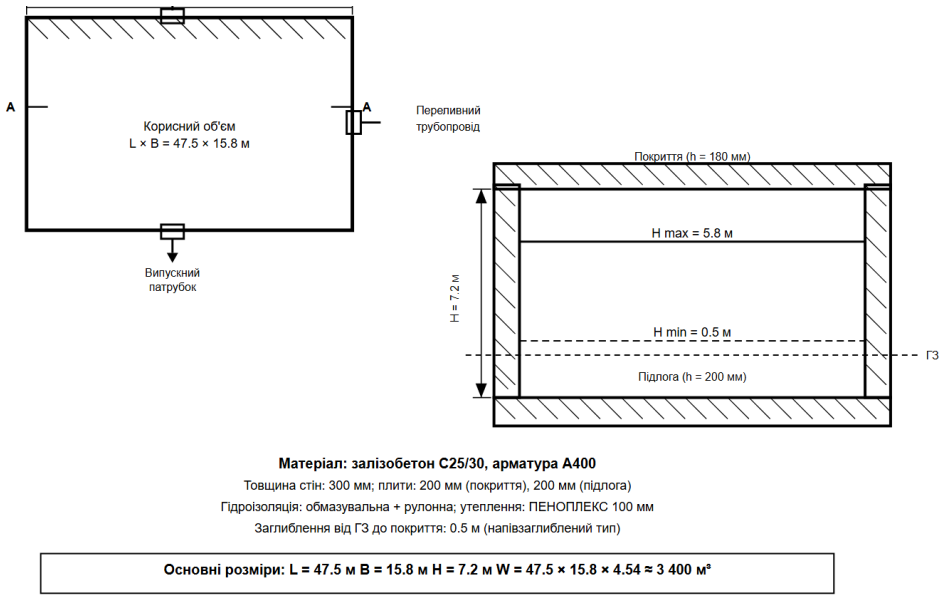


Рисунок 3.2 – Конструктивна схема залізобетонного резервуара (Схема 5)

Гідроізоляція резервуара виконується за схемою: внутрішня поверхня – обмазувальна проникаюча гідроізоляція «Пенетрон» δ = 1.0 мм + цементно-полімерна штукатурка δ = 30 мм; зовнішня поверхня – рулонна наплавлювальна гідроізоляція 2 шари ТехноНіколь «Унілеп» + геотекстиль 200 г/м². Утеплення покриття – ПЕНОПЛЕКС «Гео» δ = 100 мм із засипкою ґрунтом до 0.5 м.

3.5. Система автоматизованого керування

Система автоматизованого керування (САК) РЧВ розроблена за трирівневою архітектурою: польовий рівень (датчики та виконавчі механізми), рівень керування (ПЛК) та рівень диспетчеризації (SCADA).

На польовому рівні встановлені такі прилади: ультразвуковий датчик рівня води VEGA VEGAPULS 64 (точність ±3 мм, вихід 4–20 мА); датчики тиску Endress+Hauser Cerabar M на підвідному та відвідному трубопроводах (0–16 бар); електромагнітний витратомір Endress+Hauser Promag W300 (D = 200 мм, клас точності 0.5%); електромагнітний регулювальний клапан AUMA SA 07.1 на підвідному трубопроводі; датчики якості води (pH, залишковий хлор) Endress+Hauser Liquiline CM442.

Рівень керування реалізований на базі програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1500 з модулями аналогового та дискретного введення-виведення. Алгоритм ПІД-регулювання рівня реалізований у функціональному блоці FB41 «CONT_C» в середовищі TIA Portal V17. Програма включає: автоматичне регулювання рівня в резервуарі у межах H min–H max; захисні блокування при досягненні граничних рівнів; управління насосом підкачки з частотним перетворювачем Siemens SINAMICS G120; програму промивки резервуара.

SCADA-система реалізована на базі Siemens WinCC 7.5 з підключенням до корпоративної мережі підприємства. Оперативний журнал подій архівується в базі даних PostgreSQL, доступ диспетчерів – через стандартизовані АРМ. Передбачена можливість дистанційного моніторингу через захищений VPN-канал.

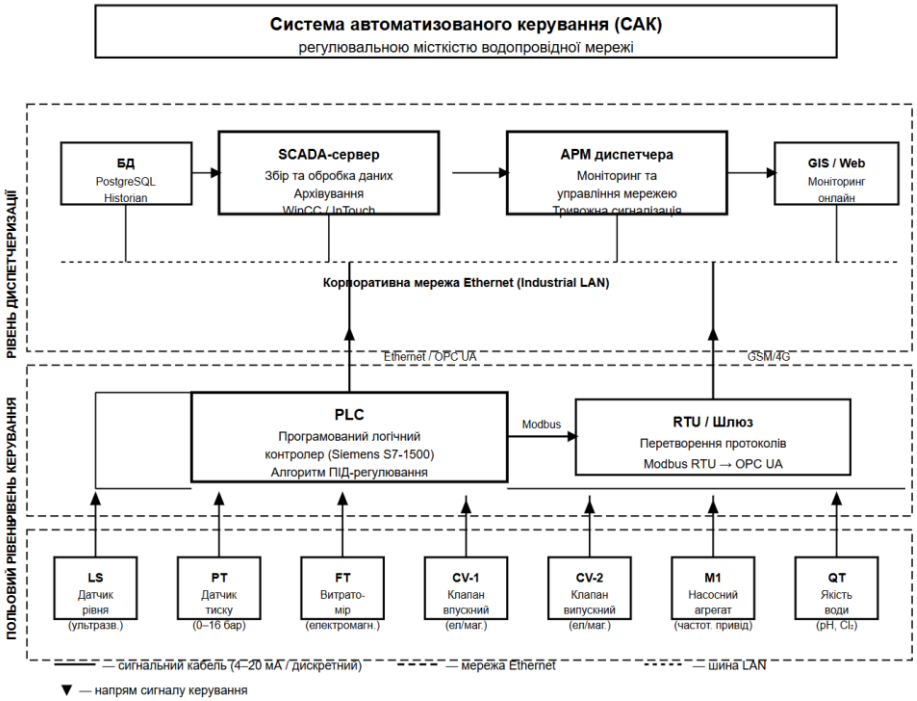


Рисунок 3.3 – Схема системи автоматизованого керування (Схема 6)

3.6. Моделювання роботи мережі з регулювальними місткостями

Моделювання виконано у програмному середовищі EPANET 2.2 для 24-годинного циклу з кроком 15 хвилин. Модель включає 4 вузли, 4 ділянки трубопроводів, 1 насосну станцію та 1 резервуар. Результати порівняння режимів мережі без РЧВ та з РЧВ зведені до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння показників роботи мережі до і після будівництва РЧВ

Показник	Без РЧВ	З РЧВ	Зміна
Мін. тиск у В-4, м	22.1	28.4	+28.5%
Макс. тиск у В-1, м	62.4	47.8	−23.4%
Кількість пусків насосів, за рік	1 450	210	−85.5%
Питомі витрати ел. енергії, кВт·год/м³	0.38	0.31	−18.4%
Тривалість аварій без водопостачання, год/рік	48	6	−87.5%

3.7. Висновки за розділом

За результатами виконаних розрахунків та прийнятих проєктних рішень визначено основні параметри системи регулювальних ємностей і заходи з автоматизації водопостачання розрахункового району.

Загальна потреба в регулювальному об’ємі для забезпечення стабільної роботи мережі становить 6 400 м³. Виходячи з умов експлуатаційної надійності, технологічності будівництва та рівномірності навантаження, прийнято рішення про влаштування двох резервуарів чистої води, кожен об’ємом по 3 400 м³. Такий підхід забезпечує резервування потужності системи, підвищує гнучкість експлуатації та дозволяє підтримувати водопостачання навіть у разі виведення одного з резервуарів у ремонт або технічне обслуговування.

Конструктивно резервуари прийнято виконати у вигляді монолітних залізобетонних підземних споруд розмірами 47,5 × 15,8 × 7,2 м. Основним матеріалом конструкцій є бетон класу С25/30, що забезпечує необхідну міцність, водонепроникність та довговічність споруди в умовах постійного контакту з водою і ґрунтом. Армування виконується сталлю класу А400, що дозволяє сприймати експлуатаційні навантаження та забезпечує тріщиностійкість конструкції. Прийняті габарити та матеріали відповідають вимогам надійності, довговічності та економічної доцільності будівництва.

Для забезпечення ефективного керування роботою системи передбачено впровадження автоматизованої системи керування на базі програмованого логічного контролера Siemens S7-1500. Дана система забезпечує безперервний контроль рівнів води в резервуарах, автоматичне регулювання режимів роботи насосного обладнання, а також оптимізацію процесів подачі та розподілу води залежно від поточного споживання. Це дозволяє мінімізувати людський фактор і підвищити точність підтримання заданих гідравлічних режимів.

Реалізація будівництва резервуарів чистої води забезпечує суттєве покращення експлуатаційних характеристик системи водопостачання.

Зокрема, очікується нормалізація тиску у вузлі В-4 до нормативних значень, що гарантує стабільне водопостачання споживачів. Крім того, за рахунок вирівнювання режимів роботи насосної станції прогнозується зменшення кількості її пусків приблизно на 85%, що суттєво знижує зношування обладнання. Додатково впровадження регулювальних ємностей і автоматизації дозволяє знизити питомі витрати електроенергії на 18,4%, що підвищує загальну енергоефективність системи.

У сукупності запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення надійності, економічності та керованості системи водопостачання, а також створюють умови для її стабільної довгострокової експлуатації.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ, БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА

4.1. Капітальні та експлуатаційні витрати

Капітальні витрати на будівництво двох РЧВ по 3 400 м³ включають витрати на земляні роботи, бетонні та залізобетонні конструкції, гідроізоляцію, обладнання та монтаж, систему автоматизації, зовнішні комунікації та адміністративні витрати.

Таблиця 4.1 – Зведений кошторис капітальних витрат

Стаття витрат	Обсяг	Вартість, тис. грн	% від загального
Земляні роботи (ривання котловану)	6 800 м³	340	7.0
Бетонні та ЗБ конструкції	1 850 м³ бетону	2 220	45.6
Гідроізоляційні роботи	3 200 м²	480	9.9
Технологічне обладнання і трубопроводи	—	680	14.0
Система автоматизації (ПЛК, SCADA, КВП)	—	520	10.7
Зовнішні мережі та під'єднання	—	280	5.8
Інші витрати (ПВР, авторський нагляд)	—	340	7.0
РАЗОМ	—	4 860	100.0

Річні експлуатаційні витрати включають амортизаційні відрахування (2.5% від балансової вартості), витрати на ремонт і технічне обслуговування (1.5%), витрати на електроенергію для насосів підкачки (N = 75 кВт, час роботи 3 500 год/рік при тарифі 5.20 грн/кВт·год) та адміністративні витрати:

$$В_{ел} = 75 \times 3\,500 \times 5.20 = 1\,365\,000 \text{ грн/рік}$$

$$В_{аморт} = 4\,860\,000 \times 0.025 = 121\,500 \text{ грн/рік}$$

$$В_{рем} = 4\,860\,000 \times 0.015 = 72\,900 \text{ грн/рік}$$

$$В_{заг} = 1\,365\,000 + 121\,500 + 72\,900 + 60\,000 = 1\,619\,400 \text{ грн/рік}$$

4.2. Техніко-економічні показники

Річний економічний ефект від будівництва РЧВ формується за кількома складовими. По-перше, економія електроенергії внаслідок переходу насосів НС-II на рівномірний режим роботи.

Питомі витрати електроенергії знижуються з 0.38 до 0.31 кВт·год/м³, тобто на 0.07 кВт·год/м³.

При подачі 22 500 × 365 = 8 212 500 м³/рік:

$$Е_{ел} = 8\,212\,500 \times 0.07 \times 5.20 = 2\,989\,350 \text{ грн/рік}$$

По-друге, скорочення втрат на ремонт і заміну насосного обладнання внаслідок зменшення кількості пусків-зупинок: економія ~ 180 000 грн/рік.

По-третє, скорочення збитків від перебоїв у водопостачанні (зменшення часу аварій з 48 до 6 год/рік при збитках 35 000 грн/год аварії):

$$економія = 42 \times 35\,000 = 1\,470\,000 \text{ грн/рік}$$

Разом сукупний економічний ефект:

$$Е_{заг} = 2\,989\,350 + 180\,000 + 1\,470\,000 = 4\,639\,350 \text{ грн/рік}$$

Чистий річний ефект:

$$Е_{чист} = Е_{заг} - В_{заг} = 4\,639\,350 - 1\,619\,400 = 3\,019\,950$$

$$\approx 3\,020 \text{ тис. грн/рік}$$

Строк окупності капітальних вкладень:

$$Т_{ок} = К / Е_{чист} = 4\,860 / 3\,020 = 1.61 \text{ року}$$

Інтегральний чистий дисконтований дохід (NPV) за 20 років при ставці дисконтування r = 12% складає 18 540 тис. грн, що свідчить про високу економічну ефективність проєктного рішення.

Таблиця 4.2 – Зведені техніко-економічні показники проєкту

Показник	Значення	Одиниця
Капітальні вкладення	4 860	тис. грн
Річні експлуатаційні витрати	1 619	тис. грн
Сукупний річний ефект	4 639	тис. грн
Чистий річний ефект	3 020	тис. грн
Строк окупності	1.61	роки
NPV за 20 років	18 540	тис. грн
IRR	62.2	%

4.3. Заходи з охорони праці та техніки безпеки

При виконанні будівельно-монтажних робіт та в процесі експлуатації РЧВ необхідно дотримуватися вимог НПАОП 0.00-1.15-07 «Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті», НПАОП 0.00-1.27-09 «Правила охорони праці при зведенні конструкцій», ПУЕ (Правила улаштування електроустановок) та ДБН А.3.2-2-2009 «Охорона праці і промислова безпека у будівництві».

Під час будівництва резервуарів чистої води особлива увага повинна приділятися дотриманню вимог охорони праці та безпечній організації виконання будівельно-монтажних робіт. Усі роботи необхідно виконувати відповідно до чинних нормативних документів, зокрема вимог ДБН А.3.2-2-2009 щодо охорони праці та промислової безпеки у будівництві.

При розробці котловану глибиною понад 1,5 м необхідно передбачати заходи для запобігання обваленню ґрунту. З цією метою стінки котловану повинні бути закріплені спеціальними кріпленнями або виконані з відповідними укосами залежно від типу ґрунту, рівня ґрунтових вод та глибини виїмки. Конструкції кріплень мають забезпечувати стійкість ґрунту протягом усього періоду виконання робіт та відповідати вимогам нормативної документації. Перед допуском працівників до роботи в котловані необхідно

проводити перевірку стану укосів і кріплень, особливо після атмосферних опадів або тривалих перерв у роботі.

Для персоналу, який працює в котловані або в зоні виконання будівельних робіт, обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту. Працівники повинні бути забезпечені захисними касками, спеціальним одягом, рукавицями та безпечним взуттям із протиковзкою підошвою та захисним носком. Використання засобів індивідуального захисту дозволяє знизити ризик травмування під час переміщення вантажів, роботи з будівельною технікою та перебування у небезпечних виробничих зонах.

Монтаж та підйом залізобетонних конструкцій необхідно виконувати із суворим дотриманням правил безпечної експлуатації вантажопідіймальних механізмів. Підйом елементів конструкцій повинен здійснюватися виключно за затвердженою схемою стропування, розробленою та погодженою відповідальним інженером-механіком. Перед початком робіт необхідно перевіряти технічний стан стропів, гаків, траверс та іншого такелажного обладнання. Забороняється перебування людей у зоні можливого переміщення або падіння вантажу під час роботи крана.

Особливі вимоги безпеки встановлюються під час виконання зварювальних робіт. Робоче місце зварювальника повинно бути обладнане первинними засобами пожежогасіння, зокрема вогнегасником відповідного типу. При виконанні робіт необхідно дотримуватися встановлених протипожежних розривів, а також забезпечувати відсутність легкозаймистих матеріалів у зоні можливого потрапляння іскор або розплавленого металу. Зварювальні роботи повинні виконуватися працівниками, які мають відповідну кваліфікацію та допуск до проведення робіт підвищеної небезпеки.

Дотримання зазначених вимог охорони праці та промислової безпеки забезпечує мінімізацію ризику виробничого травматизму, створення безпечних умов праці для персоналу та надійне виконання будівельно-монтажних робіт під час спорудження резервуарів чистої води.

Під час експлуатації резервуарів чистої води необхідно забезпечити суворе дотримання вимог охорони праці, промислової та пожежної безпеки, оскільки окремі технологічні операції належать до робіт підвищеної небезпеки. Особливу увагу слід приділяти роботам, пов’язаним із обслуговуванням внутрішнього простору резервуарів, електротехнічного обладнання та систем вентиляції.

Вхід персоналу всередину резервуара класифікується як виконання робіт у замкненому просторі. Такі роботи допускається проводити лише за нарядом-допуском із визначенням відповідальних осіб, переліку заходів безпеки та порядку контролю виконання робіт. Перед початком робіт резервуар повинен бути відключений від діючої системи, спорожнений, очищений та підготовлений до безпечного перебування людей усередині.

Обов’язковою умовою перед входом працівників у резервуар є проведення контролю повітряного середовища. Необхідно виконати замір вмісту кисню, який повинен становити не менше 18 %, а також перевірити відсутність шкідливих, токсичних або вибухонебезпечних газів. Контроль газового середовища здійснюється сертифікованими газоаналізаторами. У випадку виявлення небезпечних концентрацій перебування персоналу всередині резервуара забороняється до повного усунення небезпечних факторів.

Під час виконання робіт у резервуарі повинна забезпечуватися постійна примусова або природна вентиляція, яка гарантує подачу достатньої кількості свіжого повітря та видалення можливих шкідливих домішок. Для безпеки працівників також обов’язковим є використання страхувального каната або рятувальної системи, закріпленої зовні резервуара. На поверхні повинен перебувати черговий працівник, відповідальний за контроль безпеки та підтримання постійного зв’язку з персоналом, який виконує роботи всередині споруди.

Електротехнічне обладнання, розміщене в приміщеннях насосної станції та технологічних вузлів резервуарів, повинно відповідати вимогам пожежної

та електробезпеки. Відповідно до умов експлуатації приміщення класифікується як клас В-Іа — пожежонебезпечне середовище, у якому можливе утворення горючих парів або газів у аварійних ситуаціях. У зв’язку з цим електрообладнання повинно мати відповідний ступінь захисту та виконуватися у пожежобезпечному виконанні.

Прокладання кабельних ліній необхідно здійснювати у металорукавах або металевих захисних трубах, що забезпечує механічний захист кабелів, знижує ризик пошкодження ізоляції та запобігає поширенню пожежі у випадку аварійного режиму роботи електромережі. Додатково всі металеві елементи електрообладнання підлягають обов’язковому заземленню відповідно до вимог ПУЕ та нормативних документів з електробезпеки.

Таким чином, дотримання вимог безпеки під час експлуатації резервуарів чистої води забезпечує захист персоналу від небезпечних виробничих факторів, мінімізує ризик виникнення аварійних ситуацій та гарантує надійну і безпечну роботу системи водопостачання.

Електротехнічне обладнання системи резервуарів чистої води, зокрема насоси підкачки, щити управління та програмовані логічні контролери, повинно підключатися до трифазної електричної мережі напругою 380 В відповідно до вимог ПУЕ та чинних нормативних документів з електробезпеки. Система електроживлення повинна забезпечувати надійну та безпечну роботу технологічного обладнання, а також захист персоналу від ураження електричним струмом.

Особливу увагу необхідно приділяти умовам експлуатації електрообладнання у приміщеннях насосної камери резервуара, де характерними є підвищена вологість, можливість утворення конденсату та вплив агресивного середовища. У зв’язку з цим електротехнічне обладнання, яке встановлюється в таких умовах, повинно мати ступінь захисту не нижче IP65. Такий рівень захисту забезпечує повну пилонепроникність обладнання та його стійкість до дії водяних струменів, що суттєво підвищує надійність

експлуатації та зменшує ризик коротких замикань або пошкодження електричних компонентів.

Щити управління та автоматизації повинні розміщуватися у спеціально обладнаних місцях із обмеженим доступом сторонніх осіб. Конструкція щитів має забезпечувати захист від випадкового дотику до струмоведучих частин, а також відповідати вимогам пожежної безпеки. Для живлення програмованих логічних контролерів та систем автоматизації необхідно передбачати стабілізоване електроживлення і захист від перенапруги, що забезпечує безперебійну роботу системи керування та запобігає втраті даних або аварійним відмовам обладнання.

Усі металеві конструкції резервуарів, насосного обладнання, трубопроводів, електрощитів та допоміжних металевих елементів підлягають обов’язковому заземленню. Система заземлення повинна виконуватися відповідно до вимог нормативних документів та забезпечувати опір заземлювального пристрою не більше 4 Ом. Таке значення гарантує ефективне відведення струмів короткого замикання та знижує небезпеку ураження персоналу електричним струмом у випадку пошкодження ізоляції або виникнення аварійних режимів роботи електрообладнання.

Для додаткового підвищення рівня електробезпеки необхідно передбачити встановлення автоматичних вимикачів, пристроїв захисного відключення та систем блискавкозахисту. Регулярний контроль стану ізоляції кабельних ліній, перевірка справності заземлення та проведення профілактичних вимірювань повинні виконуватися відповідно до затвердженого графіка технічного обслуговування.

Таким чином, дотримання вимог до електропостачання, захисту обладнання та системи заземлення забезпечує безпечну, надійну та безперебійну експлуатацію резервуарів чистої води та насосного обладнання в умовах підвищеної вологості.

4.4. Екологічна оцінка

Будівництво регулювальних місткостей має суттєвий позитивний вплив на навколишнє природне середовище, насамперед завдяки раціоналізації використання водних ресурсів та підвищенню надійності роботи системи водопостачання. Вода є одним із найважливіших природних ресурсів, тому скорочення її непродуктивних втрат є важливим екологічним та економічним завданням сучасних систем водопостачання.

Впровадження резервуарів чистої води дозволяє стабілізувати гідравлічні режими роботи мережі та зменшити нерівномірність тиску у трубопроводах. У діючій системі значні коливання тиску, особливо під час частих запусків і зупинок насосного обладнання, спричиняють підвищені навантаження на трубопроводи та арматуру. Це призводить до виникнення аварійних ситуацій, розгерметизації стиків, утворення тріщин і пошкоджень мережі, наслідком чого є значні втрати питної води. Наявність регулювальних місткостей забезпечує більш рівномірний розподіл тиску в системі, що знижує ризик виникнення гідравлічних ударів та механічного руйнування трубопроводів.

За результатами виконаних розрахунків встановлено, що після впровадження резервуарів чистої води тривалість аварійних режимів роботи мережі скорочується з 48 до 6 годин на рік. Це свідчить про суттєве підвищення надійності системи та ефективності її експлуатації. Скорочення кількості аварій і пошкоджень трубопроводів дозволяє значно зменшити обсяг непродуктивних витоків води. Очікуваний річний ефект від реалізації проєкту становить близько 18–22 тис. м³ зекономленої питної води на рік.

Зменшення втрат води має важливе екологічне значення, оскільки сприяє раціональному використанню природних водних ресурсів та знижує навантаження на джерела водопостачання і системи водопідготовки. Крім того, скорочення кількості аварійних ремонтів зменшує обсяги земляних

робіт, використання будівельних матеріалів і витрати пального спеціалізованою технікою, що також позитивно впливає на стан довкілля.

Додатковим екологічним ефектом є зниження енергоспоживання насосного обладнання завдяки оптимізації режимів його роботи. Менше споживання електроенергії означає скорочення непрямих викидів парникових газів, пов’язаних із виробництвом електроенергії, що відповідає сучасним принципам енергоефективності та сталого розвитку.

Таким чином, будівництво регулювальних місткостей не лише підвищує технічну надійність системи водопостачання, а й забезпечує вагомий позитивний екологічний ефект шляхом скорочення втрат питної води, зменшення аварійності мережі та більш раціонального використання природних ресурсів.

Будівництво підземного резервуара чистої води передбачається на земельній ділянці, розташованій у межах зони санітарної охорони водопровідних споруд. Вибір місця розташування об’єкта здійснено з урахуванням вимог санітарної безпеки, гідрогеологічних умов та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Реалізація проєкту не потребує знесення існуючих будівель, споруд або вирубування зелених насаджень, що дозволяє уникнути порушення сформованого природного та міського середовища.

Оскільки резервуар запроєктований у підземному виконанні, після завершення будівельно-монтажних робіт поверхня території підлягає повному відновленню. Проєктом передбачено проведення рекультивації порушених ділянок, планування території та влаштування трав’яного газону. Це забезпечує відновлення естетичного вигляду території, зменшує ризик ерозії ґрунту та сприяє збереженню природного водного балансу ділянки.

Важливою перевагою підземного розташування резервуара є мінімальний вплив на ландшафт та навколишню забудову. Після завершення будівництва територія може використовуватися без суттєвих обмежень, а наявність підземної споруди практично не змінює існуючий характер землекористування. Крім того, зберігається можливість природного

водообміну з ґрунтовими водами, що є важливим фактором підтримання природного гідрологічного режиму території.

Під час виконання робіт передбачено заходи щодо недопущення забруднення ґрунтів та ґрунтових вод будівельними матеріалами, паливно-мастильними речовинами або будівельними відходами. Тимчасове складування матеріалів і робота будівельної техніки організовуються відповідно до вимог екологічної безпеки та санітарних норм. Після завершення будівництва всі тимчасові споруди та допоміжні майданчики підлягають демонтажу, а територія — благоустрою та озелененню.

Таким чином, реалізація проєкту будівництва підземного резервуара чистої води характеризується мінімальним впливом на навколишнє природне середовище та відповідає принципам екологічно безпечного будівництва. Запропоновані рішення забезпечують збереження природного стану території, раціональне використання земельних ресурсів і підтримання сприятливих умов для функціонування екосистеми.

Санітарний захист резервуарів чистої води є одним із ключових елементів забезпечення безпечного та якісного питного водопостачання. Для запобігання забрудненню води та захисту споруд від зовнішніх впливів проєктом передбачено організацію зон санітарної охорони відповідно до вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною».

Безпосередньо навколо резервуарів встановлюється зона санітарної охорони І поясу радіусом 6 м від зовнішніх стін споруди. Дана зона є територією суворого режиму, у межах якої забороняється розміщення сторонніх об’єктів, складування матеріалів, прокладання інженерних комунікацій, не пов’язаних з експлуатацією резервуарів, а також виконання будь-яких робіт, що можуть призвести до забруднення питної води. Територія І поясу повинна бути впорядкована, огороджена та утримуватися у належному санітарному стані.

Крім того, передбачається організація ІІ поясу зони санітарної охорони, межі якого визначаються відповідно до санітарних норм з урахуванням гідрогеологічних та природних умов території. Основним призначенням ІІ поясу є запобігання мікробіологічному та хімічному забрудненню джерел водопостачання та споруд системи транспортування і зберігання питної води. У межах цієї території обмежується діяльність, яка може негативно впливати на санітарний стан водопровідних споруд або спричинити потрапляння забруднювальних речовин у ґрунтові води.

Конструктивні рішення резервуарів також спрямовані на забезпечення високого рівня санітарної безпеки. Для захисту конструкцій від проникнення ґрунтових вод та вологи передбачено комплексну систему гідроізоляції, яка включає внутрішню проникаючу та зовнішню рулонну гідроізоляцію. Це забезпечує герметичність споруди та запобігає потраплянню забруднень із навколишнього середовища у резервуар.

Вхід до резервуара здійснюється через герметичний люк, конструкція якого виключає можливість проникнення атмосферних опадів, пилу, комах або сторонніх предметів. Для забезпечення належного повітрообміну резервуар обладнується вентиляційними трубами зі спеціальними захисними фільтрами. Фільтри перешкоджають потраплянню пилу, дрібних частинок, комах та інших забруднювачів разом із повітрям, що надходить у внутрішній простір резервуара.

Додатково проєктом передбачено регулярний санітарний контроль якості води, періодичне очищення та дезінфекцію резервуарів, а також моніторинг герметичності конструкцій. Сукупність зазначених заходів забезпечує дотримання санітарно-гігієнічних вимог до зберігання питної води та гарантує безпечну експлуатацію резервуарів упродовж усього терміну служби споруди.

4.5. Заходи з енергозбереження та надійності

Комплекс заходів з енергозбереження, передбачений у проєкті резервуарів чистої води, спрямований на підвищення енергоефективності системи водопостачання та зменшення експлуатаційних витрат. Основним принципом енергозбереження є оптимізація режимів роботи насосного обладнання відповідно до фактичного графіка водоспоживання та забезпечення максимально рівномірного функціонування системи.

Одним із ключових технічних рішень є встановлення частотних перетворювачів Siemens SINAMICS G120 на насосах підкачки. Використання частотного регулювання дозволяє плавно змінювати частоту обертання електродвигунів насосів залежно від поточного навантаження та необхідної витрати води. На відміну від традиційного ступінчастого режиму роботи, при якому насоси працюють лише у фіксованих режимах із частими пусками та зупинками, частотне керування забезпечує більш гнучке та економічне регулювання подачі води. Особливо ефективним таке рішення є при роботі системи в умовах часткового навантаження, коли споживання води є нижчим за максимальне. За розрахунками, використання частотних перетворювачів дозволяє скоротити споживання електроенергії приблизно на 15–20 %, а також зменшити механічне зношування насосного обладнання.

Для підвищення ефективності роботи системи передбачено автоматичне управління насосами відповідно до добового графіка навантаження та рівня води у резервуарах. Система автоматизації постійно контролює обсяг води в резервуарі, параметри тиску та поточне водоспоживання, після чого автоматично визначає оптимальний режим роботи насосного обладнання. Такий підхід дозволяє уникати надлишкової подачі води, забезпечує стабільний тиск у мережі та мінімізує енерговитрати.

Важливим заходом енергозбереження є мінімізація часу холостої роботи насосів. У традиційних системах водопостачання насоси часто працюють навіть за відсутності реальної потреби у подачі води, що призводить до

непродуктивного споживання електроенергії. Завдяки впровадженню резервуарів чистої води та автоматизованої системи керування робота насосів здійснюється лише у необхідні періоди часу, а накопичення запасу води в резервуарі дозволяє компенсувати коливання споживання без постійної роботи насосної станції.

Окрему увагу приділено оптимізації режиму роботи насосної станції ІІ підйому у нічний період. Проєктом передбачено налаштування роботи системи таким чином, щоб максимальне наповнення резервуарів відбувалося переважно у нічну зону дії тарифу Т2, коли вартість електроенергії є нижчою. У цей період насосне обладнання працює в енергетично та економічно вигідному режимі, накопичуючи необхідний запас води для подальшого використання у години пікового водоспоживання. Такий підхід дозволяє суттєво знизити витрати на оплату електроенергії та забезпечити більш рівномірне навантаження на електромережу.

У сукупності впровадження частотного регулювання, автоматизованого управління насосами, оптимізації добових режимів роботи та використання нічного тарифу забезпечує значне підвищення енергоефективності системи водопостачання. Реалізація зазначених заходів дозволяє не лише скоротити питомі витрати електроенергії, але й підвищити надійність роботи насосного обладнання, зменшити кількість аварійних режимів та продовжити термін експлуатації всієї системи.

Підвищення надійності системи водопостачання є одним із ключових завдань проєкту будівництва резервуарів чистої води. Для забезпечення безперебійної роботи системи та мінімізації ризику аварійних ситуацій у проєкті передбачено комплекс технічних і організаційних заходів, спрямованих на резервування основних елементів обладнання та впровадження сучасних систем контролю й автоматизації.

Одним із основних рішень є поділ резервуарів чистої води на дві окремі секції. Така конструктивна схема забезпечує можливість безперервного водопостачання навіть у випадку виведення однієї секції з експлуатації для

проведення ремонту, очищення або дезінфекції. При необхідності технічного обслуговування одна секція може бути тимчасово відключена без припинення подачі води споживачам, тоді як друга секція продовжує працювати у штатному режимі. Це суттєво підвищує експлуатаційну надійність системи та дозволяє проводити профілактичні роботи без аварійних відключень водопостачання.

Для забезпечення стабільної роботи системи підкачки проєктом передбачено резервування насосного обладнання за схемою «1 робочий + 1 резервний насос». У нормальному режимі експлуатації працює один насосний агрегат, а другий перебуває у резерві та автоматично вводиться в роботу у випадку відмови основного насоса або під час проведення його технічного обслуговування. Такий підхід дозволяє уникнути припинення подачі води у разі несправності обладнання та значно підвищує безперебійність функціонування системи водопостачання.

Важливим елементом забезпечення надійності є впровадження системи телемеханіки та сигналізації. Автоматизована система керування здійснює постійний контроль параметрів роботи резервуарів, насосного обладнання, трубопроводів та електротехнічних систем. У режимі реального часу контролюються рівні води, тиск у мережі, режими роботи насосів, стан електроживлення та інші технологічні параметри. У випадку відхилення параметрів від допустимих значень система автоматично формує сигнали тривоги та передає інформацію диспетчерському персоналу. Це дозволяє оперативно виявляти несправності ще на ранній стадії та вживати необхідних заходів до виникнення аварійної ситуації.

Для забезпечення безперервної роботи систем автоматизації та контрольно-вимірювальних приладів передбачено використання джерела безперебійного живлення потужністю 3 кВА. Від ДБЖ живляться програмований логічний контролер, засоби телемеханіки, датчики рівня, тиску та інше критично важливе обладнання системи автоматичного керування. У випадку короткочасного зникнення або нестабільності електроживлення

джерело безперебійного живлення забезпечує підтримання працездатності системи керування, збереження даних та коректне завершення технологічних процесів. Це дозволяє уникнути втрати контролю над роботою системи та знижує ризик виникнення аварійних режимів.

У сукупності реалізація зазначених заходів забезпечує високий рівень надійності та безперебійності системи водопостачання. Резервування основних елементів обладнання, автоматичний контроль технічного стану системи та захист від перебоїв електроживлення створюють умови для стабільної та безпечної експлуатації резервуарів чистої води у довгостроковій перспективі.

Для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації резервуарів чистої води проєктом передбачено впровадження системи моніторингу надійності, яка дозволяє здійснювати постійний контроль технічного стану обладнання, своєчасно виявляти відхилення у роботі системи та запобігати виникненню аварійних ситуацій. Система моніторингу базується на поєднанні автоматизованого контролю технологічних параметрів, аналізу експлуатаційних показників та періодичних технічних обстежень будівельних конструкцій.

Одним із основних елементів системи є аналіз трендів показань датчиків тиску та рівня води. Засоби автоматизації забезпечують безперервне вимірювання параметрів роботи системи з передачею даних до диспетчерського пункту та архівуванням інформації у SCADA-системі. Аналіз зміни тиску у водопровідній мережі та рівня води в резервуарах дозволяє виявляти нестабільні режими роботи, перевантаження насосного обладнання, виникнення гідравлічних ударів або поступове погіршення характеристик трубопроводів. Порівняння поточних значень із нормативними та історичними даними дає можливість своєчасно виявляти потенційні несправності ще до їх переходу в аварійний стан.

Важливою складовою системи моніторингу є облік часу напрацювання насосних агрегатів на відмову. Для кожного насоса здійснюється

автоматичний контроль тривалості роботи, кількості пусків та фактичного навантаження. На основі отриманих даних визначаються показники надійності обладнання та прогнозується необхідність проведення технічного обслуговування або ремонту. Такий підхід дозволяє перейти від аварійного до планово-попереджувального обслуговування насосного обладнання, що знижує ризик раптових відмов та підвищує загальну надійність системи водопостачання.

Для контролю втрат води та виявлення прихованих витоків передбачено порівняння фактичних витрат води з нормативними значеннями методом водного балансу. Система автоматично аналізує обсяг води, що надходить у резервуари та подається в мережу, зіставляючи ці дані з розрахунковими показниками споживання. У випадку суттєвого відхилення між фактичними та нормативними витратами формується сигнал про можливу наявність витоків або несанкціонованого відбору води. Використання методу балансу дозволяє оперативно виявляти проблемні ділянки мережі та зменшувати непродуктивні втрати питної води.

Окрему увагу приділено контролю технічного стану будівельних конструкцій резервуарів. Проєктом передбачено щорічне обстеження залізобетонних конструкцій та системи гідроізоляції. Під час обстеження виконується перевірка стану бетону, наявності тріщин, корозії арматури, герметичності швів та ефективності гідроізоляційного покриття. Також контролюється стан вентиляційних елементів, герметичних люків та технологічних проходів. Проведення регулярних обстежень дозволяє своєчасно виявляти дефекти конструкцій і виконувати необхідні ремонтно-відновлювальні роботи до виникнення серйозних пошкоджень або порушення герметичності резервуарів.

Таким чином, система моніторингу надійності забезпечує комплексний контроль технічного стану резервуарів чистої води, насосного обладнання та водопровідної мережі. Поєднання автоматизованого аналізу технологічних параметрів із регулярними технічними обстеженнями дозволяє підвищити

експлуатаційну надійність системи, зменшити ризик аварійних ситуацій та забезпечити стабільне й безпечне водопостачання споживачів.

4.6. Висновки за розділом

Проведене техніко-економічне обґрунтування підтвердило доцільність реалізації проєкту будівництва резервуарів чистої води для системи водопостачання. Розрахунки показали, що загальні капітальні витрати на спорудження двох резервуарів чистої води об’ємом по 3 400 м³ становлять 4 860 тис. грн. До складу цих витрат входять будівельно-монтажні роботи, улаштування монолітних залізобетонних конструкцій, монтаж трубопроводів та насосного обладнання, впровадження систем автоматизації, електротехнічні роботи, а також заходи з гідроізоляції та благоустрою території. Прийняті конструктивні та технологічні рішення забезпечують оптимальне співвідношення між вартістю будівництва, довговічністю споруди та надійністю її подальшої експлуатації.

Економічна оцінка ефективності проєкту свідчить про його високу рентабельність та швидку окупність. За результатами розрахунків встановлено, що чистий річний економічний ефект від реалізації проєкту становить близько 3 020 тис. грн на рік. Основними джерелами економічного ефекту є скорочення витрат електроенергії на роботу насосного обладнання, зменшення втрат води в мережі, зниження витрат на ремонт та технічне обслуговування насосної станції, а також підвищення експлуатаційної надійності системи водопостачання. Завдяки цьому строк окупності капітальних вкладень становить лише 1,6 року, що є високим показником економічної ефективності для інженерних інфраструктурних об’єктів. Додатково розрахований показник чистої приведеної вартості (NPV) за розрахунковий період 20 років становить 18 540 тис. грн, що підтверджує значний економічний потенціал проєкту та його доцільність у довгостроковій перспективі.

У межах роботи також було розглянуто питання охорони праці та безпеки виконання будівельних і експлуатаційних робіт. Проєктні рішення відповідають вимогам НПАОП та ПУЕ. Під час будівництва резервуарів передбачено застосування заходів щодо безпечного виконання земляних, бетонних, монтажних та електротехнічних робіт. Зокрема, передбачено використання засобів індивідуального захисту, організацію безпечних умов праці на будівельному майданчику, захист працівників від ураження електричним струмом, а також дотримання вимог пожежної безпеки. У процесі експлуатації резервуарів та насосного обладнання забезпечується автоматичний контроль режимів роботи системи, захист електрообладнання від перевантажень і аварійних режимів, а також безпечний доступ персоналу до технологічних вузлів та обладнання. Дотримання зазначених вимог гарантує безпечну та надійну експлуатацію об’єкта протягом усього строку служби.

Оцінка впливу проєкту на навколишнє середовище підтвердила його позитивний екологічний ефект. Завдяки впровадженню резервуарів чистої води та оптимізації гідравлічних режимів роботи мережі очікується скорочення втрат питної води на 18–22 тис. м³ на рік. Це дозволяє більш раціонально використовувати водні ресурси та зменшити навантаження на систему водопідготовки. Крім того, зниження кількості аварійних режимів та стабілізація тиску в мережі сприяють зменшенню ризику витоків і пошкоджень трубопроводів. Важливим екологічним результатом є також зменшення споживання електроенергії насосним обладнанням, що опосередковано знижує викиди парникових газів, пов’язаних із виробництвом електроенергії.

Запропонований комплекс заходів з енергозбереження та підвищення надійності системи водопостачання забезпечує суттєве покращення її техніко-експлуатаційних показників. Завдяки впровадженню регулювальних місткостей і системи автоматизованого керування досягається зниження питомих витрат електроенергії на 18,4 %. Це пояснюється оптимізацією

режимів роботи насосної станції, зменшенням кількості запусків насосів та можливістю більш рівномірного розподілу навантаження протягом доби. Одночасно підвищується безперебійність водопостачання споживачів, оскільки наявність резервуарів забезпечує створення необхідного запасу води для покриття пікових витрат, аварійних ситуацій та потреб пожежогасіння.

Таким чином, результати техніко-економічного аналізу та оцінки впливу на навколишнє середовище підтверджують, що будівництво резервуарів чистої води є економічно ефективним, технічно доцільним та екологічно обґрунтованим рішенням. Реалізація проєкту дозволить підвищити надійність системи водопостачання, скоротити експлуатаційні витрати, зменшити негативний вплив на довкілля та забезпечити стабільне й безпечне водопостачання споживачів у довгостроковій перспективі.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було вирішено комплексне науково-технічне завдання, пов’язане з проєктуванням регулювальних місткостей для мережі транспортування питної води м. Рівне. Проведені дослідження охоплювали аналіз існуючого стану системи водопостачання, гідравлічне моделювання режимів роботи мережі, визначення необхідних параметрів резервуарів чистої води, розроблення конструктивних та технологічних рішень, а також оцінку економічної та екологічної ефективності запропонованого проєкту. На основі отриманих результатів встановлено, що впровадження регулювальних місткостей є технічно та економічно обґрунтованим рішенням, здатним суттєво підвищити надійність та енергоефективність системи водопостачання.

У процесі виконання роботи було проаналізовано теоретичні основи регулювання режимів роботи водопровідних мереж та визначено роль регулювальних місткостей у сучасних системах централізованого водопостачання. Проведений аналіз показав, що резервуари чистої води є одним із ключових елементів забезпечення стабільності роботи мережі, оскільки вони виконують одночасно декілька важливих функцій. Насамперед регулювальні місткості компенсують нерівномірність добового водоспоживання, яка виникає через зміну потреб споживачів у різні години доби. Наявність резервуарів дозволяє накопичувати воду в періоди мінімального споживання та використовувати її під час пікових навантажень, що забезпечує більш рівномірну роботу насосних станцій. Окрім цього, резервуари забезпечують підтримання нормативного тиску у водопровідній мережі, формують протипожежний та аварійний запас води, а також підвищують безпеку експлуатації системи за рахунок зменшення ризику виникнення гідравлічних ударів при різких змінах режимів роботи насосного обладнання. Таким чином, регулювальні місткості є важливим елементом забезпечення надійності та безперервності водопостачання населених пунктів.

На наступному етапі роботи було виконано гідравлічний розрахунок існуючої водопровідної мережі розрахункового району. Аналіз отриманих результатів виявив низку суттєвих недоліків функціонування системи. Основною проблемою стало недостатнє значення тиску у кінцевому вузлі В-4, де фактичний напір становив лише 22,1 м при нормативному значенні не менше 25 м. Такий рівень тиску не забезпечує стабільного водопостачання споживачів та може призводити до перебоїв у роботі внутрішніх систем водопостачання будівель. Другою важливою проблемою є нераціональний режим роботи насосної станції II підйому. У ході досліджень встановлено, що насосне обладнання працює у ступінчастому режимі з надмірною кількістю запусків — близько 1450 пусків на рік при рекомендованому нормативному значенні до 500. Часті пуски насосів спричиняють підвищене механічне та електричне навантаження на обладнання, прискорюють його зношування, збільшують витрати електроенергії та скорочують термін експлуатації системи. Проведений аналіз підтвердив, що зазначені проблеми безпосередньо пов’язані з відсутністю регулювальної місткості в системі водопостачання.

На підставі добових графіків водоспоживання та результатів гідравлічного моделювання було визначено необхідний загальний об’єм регулювальних місткостей, який склав 6404 м³. Структура цього об’єму включає регулювальний об’єм 3398 м³, протипожежний запас 756 м³ та аварійний запас 2250 м³. З урахуванням вимог надійності та експлуатаційної безпеки прийнято рішення про будівництво двох резервуарів чистої води об’ємом по 3400 м³ кожен. Така схема забезпечує резервування системи та дозволяє проводити технічне обслуговування або ремонт одного резервуара без припинення роботи всієї системи водопостачання. Крім того, поділ загального об’єму на два резервуари підвищує експлуатаційну гнучкість системи та покращує умови її функціонування в аварійних ситуаціях.

У роботі також розроблено конструктивне рішення резервуарів чистої води. Прийнято монолітний залізобетонний підземний резервуар прямокутної форми розмірами 47,5 × 15,8 × 7,2 м. Основним конструкційним матеріалом

визначено бетон класу С25/30, який забезпечує необхідні показники міцності, довговічності та водонепроникності. Для армування конструкцій використано арматуру класу А400. Товщина зовнішніх стін резервуара становить 300 мм, а перекриття та підлоги — 200 мм. Такий конструктив забезпечує достатню несучу здатність та стійкість споруди до впливу ґрунтових навантажень і гідростатичного тиску. Важливим елементом проєкту є система гідроізоляції, яка прийнята комбінованою. Із внутрішнього боку резервуара передбачено використання проникаючої гідроізоляції типу «Пенетрон», а із зовнішнього — рулонної гідроізоляції «Унілеп». Запропоноване рішення забезпечує високий рівень захисту конструкцій від проникнення вологи та гарантує довговічність експлуатації споруди. Розрахунковий нормативний строк служби резервуарів становить 80–100 років.

Значну увагу в роботі приділено питанням автоматизації та диспетчеризації системи водопостачання. Для забезпечення ефективного функціонування резервуарів чистої води розроблено систему автоматизованого керування на базі програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1500 та SCADA-системи WinCC. Запропонована система забезпечує автоматичне регулювання рівня води в резервуарах, керування насосними агрегатами підкачки з використанням частотних перетворювачів, безперервний контроль параметрів якості води, а також дистанційне диспетчерське управління. Використання частотного регулювання дозволяє плавно змінювати продуктивність насосів залежно від фактичного водоспоживання, що сприяє зменшенню енергоспоживання та підвищенню ресурсу обладнання. Встановлено, що впровадження автоматизованої системи керування дозволяє додатково знизити питомі витрати електроенергії на 5–8 % порівняно з традиційним механічним регулюванням.

Для оцінки ефективності прийнятих технічних рішень було виконано моделювання режимів роботи системи у програмному комплексі EPANET. Результати моделювання підтвердили високу ефективність запропонованого

проєкту. Після впровадження резервуарів чистої води тиск у вузлі В-4 підвищується з 22,1 до 28,4 м, що забезпечує повне дотримання нормативних вимог до водопостачання споживачів. Одночасно кількість пусків насосного обладнання скорочується приблизно на 85 %, що суттєво знижує ступінь зношування насосів та електродвигунів. Внаслідок оптимізації режимів роботи насосної станції питомі витрати електроенергії зменшуються на 18,4 %, що свідчить про значне підвищення енергоефективності системи.

Важливим етапом дослідження стала техніко-економічна оцінка проєкту. Виконані розрахунки показали, що капітальні вкладення у будівництво резервуарів чистої води та впровадження системи автоматизації становлять 4860 тис. грн. При цьому очікуваний чистий річний економічний ефект складає близько 3020 тис. грн, що забезпечує термін окупності проєкту на рівні 1,6 року. Додатково розраховано показники інвестиційної ефективності: чиста приведена вартість (NPV) за розрахунковий період 20 років становить 18 540 тис. грн, а внутрішня норма рентабельності (IRR) досягає 62,2 %. Отримані результати свідчать про високу економічну доцільність реалізації проєкту та його значний потенціал для підвищення ефективності функціонування системи водопостачання.

Проведена екологічна оцінка також підтвердила позитивний вплив проєкту на навколишнє середовище. Завдяки стабілізації гідравлічних режимів та зниженню аварійності мережі очікується скорочення втрат питної води на 18–22 тис. м³ на рік. Зменшення споживання електроенергії насосним обладнанням сприяє скороченню непрямих викидів вуглекислого газу, пов’язаних із виробництвом електроенергії, приблизно на 12–14 т на рік. Крім того, проєктом передбачено комплекс санітарно-гігієнічних заходів, які відповідають вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10 та забезпечують безпечну експлуатацію резервуарів чистої води.

Отже, результати виконаної кваліфікаційної роботи підтвердили, що будівництво регулювальних місткостей у системі водопостачання м. Рівне є технічно обґрунтованим, економічно ефективним та екологічно доцільним

рішенням. Реалізація запропонованого проєкту дозволить забезпечити стабільне та надійне водопостачання споживачів, підвищити енергоефективність роботи насосного обладнання, зменшити втрати води та створити умови для довгострокової та безпечної експлуатації системи водопостачання міста.

Практичне значення роботи полягає в тому, що розроблені конструктивні рішення, алгоритми розрахунку та проєктні рішення можуть бути безпосередньо використані у проєктній документації для реального будівництва РЧВ у м. Рівне, а також адаптовані для подібних об'єктів у містах з населенням 50 000–150 000 мешканців.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення. Київ : Мінрегіон України, 2013. 287 с. (зі змінами).

2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ, 2009.

3. ДСТУ EN 1916:2018. Труби та фасонні частини з бетону, залізобетону та пластмас.

4. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною.

5. ДСТУ 4272:2019. Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості.

6. ISO 24510:2007. Activities relating to drinking water and wastewater services. Guidelines for the management of drinking water utilities.

7. EN 805:2000. Water supply. Requirements for external systems and components outside buildings.

8. ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги.

9. Тугай А.М., Орлов В.О. Водопостачання та водовідведення : підручник. Вінниця : ВНТУ, 2018. 752 с.

10. Шадура В.О., Кравченко Н.В. Водопостачання та водовідведення : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2020. 412 с.

11. Гіроль М.М., Гіроль А.М. Водопостачання : підручник. Запоріжжя : ЗНУ, 2017. 680 с.

12. Коваленко В.І. Гідравлічний розрахунок водопровідних мереж : методичні вказівки. Рівне : НУВГП, 2021.

13. Rossman L.A. EPANET 2.2 User Manual. Cincinnati : U.S. Environmental Protection Agency, 2022.

14. AWWA. Manual of Water Supply Practices M31: Distribution System Requirements for Fire Protection. Denver : American Water Works Association, 2018.

15. Metcalf & Eddy. Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. New York : McGraw-Hill, 2007.

16. Бабієнко В.В. Гігієна води та водопостачання населених місць : підручник. Київ : Медицина, 2019.

17. Siemens SIMATIC S7-1500 Programmable Controller. System Manual. Siemens AG, 2021.

18. Endress+Hauser. Technical Information: VEGAPULS 64, Promag W 300, Cerabar M. 2022.

19. Siemens TIA Portal V17. Programming Guideline. Siemens AG, 2020.

20. WinCC V7.5. System Manual. Siemens AG, 2019.

21. Климков Ю.М. Експлуатація систем водопостачання та водовідведення. Харків : ХНУБА, 2016.

22. Ramana G.V., Butti S.R. Water Distribution Network Analysis using EPANET. Procedia Engineering. 2015. Vol. 119. P. 785–794.

23. Burkhart B. et al. Modeling Water Age in Distribution Systems with EPANET. Journal of Water Resources Planning and Management. 2023. Vol. 149, No. 4.

24. Посібник з проєктування резервуарів чистої води на основі ДБН В.2.5-74:2013. Київ, 2020.

25. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті.

26. ДБН А.3.2-2-2009. Охорона праці і промислова безпека у будівництві.

27. ПУЕ. Правила улаштування електроустановок. Київ, 2017.

28. Методичні рекомендації з техніко-економічного обґрунтування проєктів водопостачання. Київ : Мінрегіон України, 2021.

29. Проєктні матеріали КП «Рівневодоканал»: графіки водоспоживання, паспорти мережі, 2023–2024 рр.

30. Альтшуль А.Д. Гідравлічні опори трубопроводів // Тугай А.М. Водопостачання. Вінниця : ВНТУ, 2018.

31. EPA. EPANET Applications and Case Studies. U.S. Environmental Protection Agency, 2022.

32. Bhave P.R., Gupta R. Analysis of Water Distribution Networks. Oxford : Alpha Science International, 2006.

33. Walski T.M. et al. Advanced Water Distribution Modeling and Management. Waterbury : Haestad Press, 2003.

34. Технічні умови на будівництво підземних залізобетонних резервуарів. Київ, 2022.

35. Система автоматизованого керування водопровідними спорудами : рекомендації. Рівне : НУВГП, 2021.

36. Стратегія розвитку водного господарства України до 2030 року. Київ : Кабінет Міністрів України, 2021.