

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
ІМЕНІ О.М. БЕКЕТОВА**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВНИЦТВА, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА ЦИВІЛЬНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

**КАФЕДРА ВОДОПОСТАЧАННЯ, ВОДОВІДВЕДЕННЯ
І ОЧИЩЕННЯ ВОД**

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра

на тему

**«СТАНЦІЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ З ПІДЗЕМНОГО ДЖЕРЕЛА
ПРОДУКТИВНІСТЮ 26 ТИС. М³/ДОБУ»**

Виконав: здобувач освіти 4 курсу,
групи ГБтаВТ 2022-1
спеціальності 194 – Гідротехнічне
будівництво, водна інженерія та водні
технології
освітня програма «Гідротехнічне
будівництво, водна інженерія та водні
технології»
Мамчуренко С.П.
Керівник: доц. Сорокіна К.Б.
Рецензент: проф. Карагяур А.С.

Харків – 2026 року

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут навчально-науковий інститут будівництва, землеустрою та цивільної інженерії

Кафедра водопостачання, водовідведення і очищення вод

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології

Освітня програма Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ВВіОВ

 проф. Андрій КАРАГЯУР

" 25 " травня 20 26 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Мамчуренко Сергію Пилиповичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Станція очищення води з підземного джерела продуктивністю 26 тис. м³/добу

керівник роботи Сорокіна К.Б., канд. техн. наук, доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від 22.05.2026 року № 441-03

2. Строк подання здобувачем роботи 16.06.2026

3. Вихідні дані до роботи район будівництва – Житомирська область.

Експлуатаційні запаси підземних вод: статичні 372 124 308 м³, динамічні 310 000 м³.

Показники якості води: каламутність – 1 НОК, забарвленість – 18 град., залізо – 8,5 мг/дм³, марганець – 0,1 мг/дм³, загальна твердість – 4,0 ммоль/дм³, фтор – 0,5 мг/дм³, сухий залишок – 800 мг/дм³, рН – 7,1 од.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Загальні відомості

2. Технологічна частина

3. Захист від корозії











4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

- технологічна частина – 6 аркушів

- охорона праці – 1 аркуш

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--|--|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Загальні відомості | доц. К.Б. Сорокіна |  |  |
| Технологічна частина | доц. К.Б. Сорокіна |  |  |
| Захист від корозії | доц. К.Б. Сорокіна |  |  |
| Охорона праці | доц. В.В. Барбашин |  |  |
| Показник оригінальності кваліфікаційної роботи | проф. А.С. Карагяур | | |
| Допуск до захисту | проф. А.С. Карагяур |  |  |

7. Дата видачі завдання 25.05.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1. | Загальні відомості | 25.05-03.06.2026 | |
| 2. | Технологічна частина | 28.05-06.06.2026 | |
| 3. | Захист від корозії | 05.06-12.06.2026 | |
| 4. | Охорона праці | 30.05-12.06.2026 | |
| 5. | Оформлення пояснювальної записки | 30.05-15.06.2026 | |
| 6. | Оформлення графічного матеріалу | 30.05-15.06.2026 | |
| 7. | Передзахист та рецензування | 16.06-19.06.2026 | |
| 8. | Підготовка і захист КР | 17.06-29.06.2026 | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Здобувач вищої освіти



(підпис)

Сергій МАМЧУРЕНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Катерина СОРОКІНА

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

| | | |
|-----|---|----|
| | ВСТУП..... | 5 |
| 1 | ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ..... | 6 |
| 1.1 | Підходи до процесу знезалізнення природних вод..... | 6 |
| 1.2 | Природні умови району будівництва..... | 10 |
| 1.3 | Загальна характеристика технологічної схеми обробки води..... | 11 |
| 2 | ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА..... | 17 |
| 2.1 | Розрахунок водозабору..... | 17 |
| 2.2 | Розрахунок зон санітарної охорони водозабору..... | 33 |
| 2.3 | Розрахунок фільтрів..... | 37 |
| 2.4 | Розрахунок споруд для обробки промивних вод фільтрів..... | 45 |
| 2.5 | Фторування води..... | 48 |
| 2.6 | Знезараження води..... | 52 |
| 3 | ЗАХИСТ ОБЛАДНАННЯ ВІД КОРОЗІЇ..... | 58 |
| 3.1 | Види та класифікації корозійних процесів..... | 58 |
| 3.2 | Методи захисту від корозії..... | 60 |
| 3.3 | Організація комплексної системи антикорозійного захисту..... | 63 |
| 4 | ОХОРОНА ПРАЦІ..... | 68 |
| 4.1 | Завдання в області охорони труда..... | 68 |
| 4.2 | Аналіз умов праці та виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів..... | 70 |
| 4.3 | Розробка заходів щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці..... | 72 |
| 4.4 | Інструктаж та навчання з питань охорони праці..... | 78 |
| 4.5 | Вимоги щодо облаштування захисних споруд для обслуговуючого персоналу очисної станції..... | 79 |
| | Висновок..... | 84 |
| | ВИСНОВКИ..... | 86 |
| | СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 87 |

ВСТУП

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 90 аркушів, 5 рисунків, 5 таблиць, 7 аркушів графічної частини, 40 інформаційних джерела.

ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ, АЕРАЦІЯ, ФІЛЬТР, ОКИСНЕННЯ, СВЕРДЛОВИНА, УФ-ОПРОМІНЕННЯ, ГПХОХЛОРИТ НАТРІЮ, ФТОР

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є розрахунок основних елементів технологічної схеми комплексу споруд для забору, очищення та кондиціювання води з підземного джерела, що включає процеси знезалізнення та фторування.

У роботі проаналізовано особливості якісного складу підземних вод із надлишковими концентраціями заліза, розглянуто основні методи знезалізнення та умови їх застосування.

Виконаний вибір і розрахунок споруд та обладнання технологічної схеми обробки води.

Проведений аналіз видів корозійних процесів обладнання, визначені основні заходи для організації комплексної системи антикорозійного захисту.

Виконаний аналіз умов праці обслуговуючого персоналу очисної станції, розроблені заходи щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Підходи до процесу знезалізнення природних вод

У природних водних джерелах залізо може перебувати у кількох формах, зокрема у вигляді іонів двовалентного заліза, колоїдних органічних і неорганічних сполук, а також істинно розчинених органічних комплексів дво- та тривалентного заліза [1].

У глибоких водоносних горизонтах підземних вод, де переважає відновне середовище, залізо зазвичай знаходиться у вигляді іонів Fe^{2+} . Ця форма є термодинамічно стійкою у водних розчинах за наявності вільної вуглекислоти та відсутності активних окиснювачів [2]. Під час контакту підземної води з атмосферним повітрям відбувається її інтенсивне насичення киснем. У результаті розчинене двовалентне залізо окиснюється до тривалентного стану (Fe^{3+}), яке потім піддається гідролізу, коагулює та випадає в осад у вигляді нерозчинного гідроксиду заліза $Fe(OH)_3$.

Вода поверхневих джерел характеризується постійною присутністю розчиненого кисню, через що іони двовалентного заліза в ній зазвичай відсутні. У річкових та озерних водах, особливо гумінового (болотного) походження, залізо переважно міститься у вигляді високомолекулярних органічних сполук або у стабільній колоїдній формі [2].

Ступінь збагачення підземних вод тим чи іншим елементом визначається не лише його загальним вмістом у літосфері, породах і ґрунтах, а й міграційною здатністю, яка безпосередньо залежить від фізико-хімічних констант іона та параметрів геохімічного середовища міграції [2].

Основним матеріалом для надходження та накопичення заліза у водоносних горизонтах є мінерали залізовміщуючих порід, з якими вода контактує під час фільтрації. До таких матеріалів належать насамперед піщано-гравійні та глинисті відкладення, що мають у своєму складі значну кількість залізовмісних сполук.

Необхідність вилучення заліза з води, що спрямовується на господарсько-питні потреби, зумовлена суворими санітарно-гігієнічними

вимогами. Перевищення нормативних концентрацій призводить до суттєвого погіршення органолептичних властивостей води під час її зберігання та транспортування, а також викликає заростання комунікацій, запірно-регулюючої апаратури та технологічного обладнання солями заліза й продуктами життєдіяльності залізобактерій, таких як *Leptothrix* та *Gallionella*. Ці мікроорганізми здійснюють хемосинтетичне окиснення заліза (II) до заліза (III) з утворенням гідроксиду заліза, який відкладається в їхніх захисних чохлах. Після відмирання бактеріальних клітин на внутрішніх стінках трубопроводів і резервуарів формуються щільні біокорозійні нарости. Крім того, гідроксид заліза сорбує та закріплює інші завислі домішки, що стимулює звуження прохідного перерізу труб, аж до їх повного заростання [1–3].

Також осади заліза утворюють із металом труб гальванічні пари, що суттєво прискорює процеси корозії. Відповідно до чинних нормативних документів [4], вміст загального заліза в питній воді не повинен перевищувати 0,2 мг/дм³.

Обґрунтований вибір технологічної схеми знезалізнення вимагає попереднього проведення повного хімічного аналізу вихідної води з джерела водопостачання, а також виконання комплексних технологічних досліджень безпосередньо біля об'єкта. Це дозволяє визначити найбільш раціональний метод очищення залежно від форм існування заліза та загального сольового складу води.

При цьому слід враховувати зміни показників якості води, оскільки форми сполук заліза та їхні концентрації можуть істотно коливатися під впливом сезонних факторів і змін рівня ґрунтових вод.

На сьогодні розроблено та впроваджено значну кількість методів видалення заліза, які за своїм технологічним принципом поділяють на два основні типи: безреагентні (фізичні) та реагентні [2, 5].

З безреагентних методів знезалізнення підземних вод перспективними та науково обґрунтованими є такі методи: спрощена аерація з наступним фільтруванням [6]; глибока аерація, що поєднується з подальшим

відстоюванням та фільтруванням [3, 6]; «суха» фільтрація; фільтрування із використанням каркасних фільтрів; електрокоагуляційна обробка; подвійна аерація, що передбачає обробку в шарі завислого осаду та подальше фільтрування; фільтрування в підземних умовах із попереднім нагнітанням у пласт збагаченої киснем води; аерація у поєднанні з двоступеневим фільтруванням.

До технологічної групи реагентних методів належать такі схеми обробки [2]: спрощена аерація, введення хімічного окиснювача та фільтрування; напірна флотація із застосуванням вапнування та подальшим фільтруванням; вапнування, прояснення в тонкошаровому відстійнику та фінішне фільтрування; комплексна схема, що включає аерацію, окиснення, вапнування, коагуляцію, флокуляцію з наступним відстоюванням або обробкою в шарі завислого осаду та фільтруванням; фільтрування через модифіковані зернисті завантаження [7]; іонообмінне катіонування [8].

Для надання утвореному під час знезалізнення дрібнодисперсному гідроксиду заліза властивостей, необхідних для ефективного видалення, доцільно застосовувати коагулянти; при цьому використання поліоксихлориду алюмінію забезпечує вищу ефективність процесу порівняно із сульфатом алюмінію [9].

Існуюче різноманіття підходів виключає їхню техніко-економічну рівноцінність щодо експлуатаційної надійності, технологічної гнучкості, капітальних витрат та областей практичного застосування. Так, знезалізнення поверхневих водних джерел через складність форм заліза практично неможливо реалізувати без застосування хімічних реагентів, тоді як для обробки підземних вод найширшого розповсюдження набули саме безреагентні фізичні методи.

Метод спрощеної аерації [6] реалізують у гравітаційному або напірному варіантах, вибір яких залежить від проєктної продуктивності та компоновальних рішень очисної станції. Цей підхід є найбільш вивченим і широко застосовується для підземних вод за умови, що концентрація

загального заліза не перевищує 10 мг/дм^3 (причому частка розчиненого заліза (II) має становити не менше 70 %), вміст вільного сірководню обмежений $0,5 \text{ мг/дм}^3$, значення рН становить не менше 6,7, перманганатна окиснюваність не перевищує $6\text{--}7 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, а лужність є достатньою для підтримки стабільного рН середовища [2, 3, 6].

В основі методу спрощеної аерації лежить здатність води, яка містить розчинений кисень та іони Fe^{2+} , під час руху крізь зернистий шар фільтрувального матеріалу виділяти сполуки заліза безпосередньо на поверхні зерен завантаження. Це призводить до формування стабільної автокаталітичної плівки, що складається з адсорбованих іонів та гідроксидів дво- і тривалентного заліза. Утворена матриця інтенсифікує та прискорює подальші процеси гетерогенного окиснення. Оскільки знезалізнення у такому шарі є гетерогенним автокаталітичним процесом, забезпечується безперервне самовідновлення та нарощування каталітично активної плівки безпосередньо під час робочого циклу фільтра [6].

Важливою перевагою цього методу є те, що безпосередньо перед надходженням на фільтр не потрібно завершувати повний цикл об'ємного окиснення двовалентного заліза в тривалентне з його переведенням у дисперсний гідроксид. Це дозволяє повністю виключити з технологічної схеми великогабаритні й високовартісні аераційні споруди та тривалі контактні резервуари.

Спрощена аерація досягається за допомогою конструктивно простих пристроїв шляхом зливання води з невеликої висоти в приймальну кишеню чи центральний канал фільтра, або за допомогою дозованого інжектування (вдування) стисненого повітря у напірний підвідний трубопровід. Відсутність громіздкого аераційного обладнання мінімізує капітальні витрати, суттєво спрощує автоматизацію та експлуатацію станцій, а також знижує собівартість очищення води.

1.2 Природні умови району будівництва

Для проєктування станції очищення підземних вод у Житомирській області необхідно враховувати специфіку регіону, який розташований переважно в межах Українського Полісся та частково Лісостепу, а також лежить на кристалічному фундаменті [10, 11].

Клімат району будівництва помірно-континентальний, з м'якою зимою та теплим вологим літом. Середньорічна температура повітря становить близько $+7,5 - +8,5$ °С. При цьому середня температура січня дорівнює $-4,5 - -5,5$ °С, а липня $+18,5 - +19,5$ °С, тоді як абсолютні мінімуми та максимуми можуть сягати -36 °С та $+38$ °С [10, 11].

Опади випадають у достатній та надмірній кількості в обсязі 600–650 мм на рік, переважно в теплий період.

Переважають вітри західного та південно-західного напрямків, а глибина промерзання ґрунту становить 0,9–1,1 м, що обов'язково враховується при проєктуванні зовнішніх мереж та фундаментів очисних споруд.

Житомирська область характеризується різноманітним ґрунтовим покривом через перехід від Полісся до Лісостепу. На півночі переважають дерново-підзолисті, піщані та супіщані ґрунти, подекуди із заболоченими низинами, тоді як у південних районах поширені сірі лісові та чорноземні опідзолені ґрунти [10, 11].

Будівельні властивості ґрунтів у зонах поширення пісків забезпечують добру водопроникність, проте вимагають укріплення котлованів при зведенні заглиблених резервуарів чи насосних станцій. Близькість залягання кристалічних порід може зумовити необхідність проведення складних земляних та скельних розробок під час закладання фундаментів глибоких споруд.

Гідрогеологічні умови є унікальними через розташування території на кристалічному щиті. Основним водоносним комплексом для господарсько-питного водопостачання слугує тріщинувата зона кристалічних порід архей-

протерозою, що залягає на глибині від 10–15 до 80–100 м [10, 11]. Ці води прісні, але характеризуються природним підвищеним вмістом двовалентного заліза та марганцю, що обґрунтовує необхідність етапу знезалізнення.

Концентрація двовалентного заліза у підземних водах кристалічного щита на Житомирщині часто коливається від 1 до 5 мг/дм³, а в деяких ділянках може досягати 10 мг/дм³ [10, 11].

Окрім заліза, у воді майже завжди присутній марганець із концентраціями від 0,1 до 1,0 мг/дм³ [10, 11].

Загальна твердість води зазвичай помірна і становить 2–4 мг-екв/дм³, а водневий показник рН знаходиться в межах 6,5–7,5, що є сприятливим для процесу окиснення.

Четвертинний водоносний комплекс залягає у водно-льодовикових відкладах на глибині 2–20 метрів та використовується переважно для децентралізованого водопостачання, проте є вразливим до техногенного забруднення [10, 11].

Сеноман-туронський водоносний горизонт трапляється на південному сході та сході області, будучи захищеним від поверхневого забруднення потужною товщею мергелів та глин.

Окрім очищення від заліза, вода потребує коригування мінерального складу шляхом фторування, оскільки природний вміст фтору в підземних водах регіону часто є зниженим і становить менше 0,5 мг/дм³, що необхідно для профілактики карієсу та захворювань зубів у населення.

1.3 Загальна характеристика технологічної схеми обробки води

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є розрахунок основних елементів технологічної схеми комплексу споруд для забору, очищення та кондиціонування води з підземного джерела, що включає процеси знезалізнення та фторування.

Показники якості вихідної води приведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Показники якості вихідної води

| Показник | Допустимі норми | Фактичні показники |
|---|------------------------|--------------------|
| Каламутність, НОК | 1 | 1 |
| Забарвленість, град. | 20,0 | 18,0 |
| pH, од. | 6,5–8,5 | 7,1 |
| Сухий залишок, мг/дм ³ | 1000 | 800 |
| Загальна твердість, ммоль/дм ³ | 7,0 | 4,0 |
| Залізо, мг/дм ³ | 0,2 | 8,5 |
| Марганець, мг/дм ³ | 0,05 | 0,1 |
| Фтор, мг/дм ³ | 1,5–0,7 | 0,5 |
| Перманганатна окиснюваність, мг О ₂ /дм ³ | 2,0 | 1,5 |
| Запах, бали | 2,0 | 1 |
| Присмак при 20 °С, бали | 2,0 | 1 |
| Висновок | Вода потребує очищення | |

На основі аналізу результатів хімічного дослідження вихідної води з вододжерела визначено технологічну послідовність процесів обробки води та обрано комплекс очисних споруд [6, 12].

Вихідна вода з водозабірної споруди (свердловини) транспортується насосами станції першого підйому до приймальної камери, яка розташована перед блоком фільтрувальних споруд. Конструктивне рішення передбачає подачу води з висоти 0,6 м над дзеркалом води у камері. Такий підхід забезпечує ефективну спрощену аерацію: за рахунок кінетичної енергії вільного падіння струменя та розбризкування відбувається інтенсивний масообмін з атмосферним повітрям, внаслідок чого вода насичується необхідною кількістю розчиненого кисню для протікання подальших окисних процесів.

Основним етапом видалення сполук заліза є його затримання у товщі зернистого завантаження швидких фільтрів. Під час фільтрування попередньо аерованої води через шар зернистого завантаження на поверхні окремих зерен поступово формується специфічна каталітична плівка. Дана плівка складається переважно з гідроксиду заліза (III), який виконує роль

автокатализатора, що суттєво активує та інтенсифікує процеси окиснення двовалентного заліза до тривалентного стану.

Це контактне покриття, яке слугує безпосереднім катализатором, безперервно та природним шляхом оновлюється під час фільтрування води. Проте стійке функціонування та регенерація автокаталітичної плівки можливі лише за умови постійної присутності у воді розчиненого кисню у строго визначених концентраціях. Для забезпечення стабільної кінетики переходу заліза (II) у нерозчинну форму заліза (III) необхідно, щоб фактичний вміст розчиненого кисню у 4–6 разів перевищував теоретично розраховані витрати [6]. Практично це становить 0,6–0,9 мг кисню на мг заліза (II), при цьому більші значення питомої витрати кисню приймаються за умови вихідного вмісту заліза (II) до 5–6 мг/дм³, тоді як менші питомі показники допускаються при вищих концентраціях забруднювача.

Процес «заряджання» фільтрувального завантаження, що полягає у первинному формуванні стійкої плівки зі сполук заліза на поверхні зерен, відбувається на початку фільтроциклу. Залежно від комплексу показників вихідної якості води, гідродинамічних параметрів завантаження та заданої швидкості фільтрування, тривалість періоду «заряджання» може коливатися від 30–40 год до кількох діб. Лише після остаточного завершення формування цього каталітичного шару технологічна система досягає своєї проектної потужності, забезпечуючи повний, глибокий та стабільний ефект очищення води.

Після проходження крізь товщу фільтрувального матеріалу та повного звільнення від надлишкових сполук заліза, вода піддається додатковому кондиціонуванню. Для підтримання фізіологічно повноцінного вмісту іонів фтору відповідно до чинних нормативно-санітарних вимог [4], очищена вода проходить стадію фторування, обов'язковість якого регламентується та контролюється органами державної санітарно-епідеміологічної служби. Фторування реалізується шляхом додавання насиченого робочого розчину

реагенту – кремнефтористоводневої кислоти – з точним автоматизованим дозуванням у потік фільтрованої води.

Необхідність обов'язкового знезараження води після проходження ступеня знезалізнення встановлюється за суворим узгодженням з територіальними органами санітарно-епідеміологічного нагляду. В кваліфікаційній роботі як первинний бар'єр дезінфекції передбачено впровадження безреагентного методу, а саме обробки води ультрафіолетовим опроміненням, що дозволяє миттєво інактивувати патогенну мікрофлору без зміни хімічного складу води та утворення токсичних побічних продуктів.

З метою забезпечення тривалого пролонгованого ефекту дезінфекції безпосередньо у транспортувальних водоводах та розподільних мережах міського водопроводу, відповідно до вимог Державних санітарних правил і норм [4], додатково передбачено вторинну обробку води розчином електролітичного гіпохлориту натрію. Введення робочого дезінфікувального розчину здійснюється безпосередньо у магістральний трубопровід фільтрованої води на ділянці перед її надходженням у резервуари чистої води.

Оброблена вода спрямовується до резервуарів чистої води (далі – РЧВ), звідки забирається насосами станції другого підйому і подається у зовнішню розподільну мережу безпосередньо до споживачів населеного пункту.

Загальний об'єм РЧВ має забезпечувати регулюючий, протипожежний та аварійний об'єми. Для станції корисною продуктивністю 25 000 м³/добу зазвичай проєктують не менше двох резервуарів для можливості їх почергового очищення, ремонту та забезпечення безперебійної роботи станції.

Повний регулюючий та запасний об'єм РЧВ зазвичай становить близько 20–30 % від добової подачі (залежно від графіку роботи НС-II та рівномірності споживання), тобто

$$W_{\text{заг}} = 25\,000 \cdot 0,25 = 6\,250 \text{ м}^3.$$

Приймаємо 2 резервуари об'ємом по 4 000 м³ кожен (сумарно 8 000 м³), що забезпечує надійний аварійний та протипожежний запас. Розміри РЧВ у

плані – 24 м × 36 м. Робоча глибина води $H_{\text{роб}} = 4,8$ м, повна висота стіни – 5,4 м. Площа дзеркала води становить 864 м².

Насосна станція другого підйому має подавати 25 000 м³/добу до населеного пункту (решта враховує власні потреби очисної станції: промивка фільтрів, технологічні витрати). Середня годинна витрата дорівнює:

$$Q_{\text{год}} = \frac{25\,000}{24} \approx 1\,042 \text{ м}^3/\text{год} \approx 290 \text{ л/с.}$$

Для врахування годинної нерівномірності споживання в місті зазвичай передбачають частотне регулювання або підбір насосів з різною продуктивністю.

Для забезпечення високої надійності та регулювання витрат приймаємо таку схему НС 2 підйому: 3 робочих насоси + 1 резервний (разом 4 агрегати).

Подача одного робочого насоса дорівнює:

$$Q_1 = \frac{1\,042}{3} = 347,3 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Базовий робочий напір приймаємо $H = 50$ м.

Приймаємо насоси Grundfos NB 125-250/262. Робоча точка одного насоса: $Q = 350$ м³/год, $H = 50$ м. Потужність електродвигуна 55–75 кВт, частота обертання 1 450 об/хв.

Усі робочі насоси обов'язково комплектуються перетворювачами частоти або замовляються із вбудованими частотними регуляторами. Це дозволить насосній станції автоматично підлаштовуватися під графік водоспоживання міста, знижуючи подачу в нічні години та оптимізуючи енергоспоживання.

У міру тривалого пропускання очищеної води через швидкий фільтр зернистий шар поступово колюматується та забруднюється затриманими дисперсними частинками гідроксиду заліза. Наслідком цього є зростання втрати тиску в завантаженні та падіння швидкості фільтрування за умови підтримання постійного початкового тиску. Зменшення робочої швидкості призводить до падіння загальної годинної продуктивності споруди, що порушує загальний режим роботи станції.

Для відновлення фільтрувальної здатності завантаження виконують його водоповітряну промивку. З цією метою подачу вихідної води на фільтр повністю припиняють, а через нижню дренажно-розподільну систему у напрямку знизу вгору подають воду та стиснене повітря з високою інтенсивністю, що забезпечує переведення завантаження у псевдозріджений стан та ефективне видалення накопиченого осаду. Вода для проведення промивання транспортується під дією гравітаційних сил зі спеціального високорозташованого напірного бака або подається промивними насосами.

Для забезпечення раціонального використання водних ресурсів, зменшення витрат води на власні технологічні потреби станції знезалізнення, а також з метою запобігання забрудненню навколишнього середовища стоками з високим вмістом сполук заліза, передбачено влаштування комплексу споруд для обороту промивних вод та зневоднення утвореного осаду.

Передбачена технологічна схема утилізації промивних вод, яка включає транспортування відпрацьованих промивних вод у відстійники, гравітаційне прояснення забрудненої води в об'ємі відстійника, подальше перекачування проясненої води насосами у загальний потік сирієї води, що подається на фільтри для повторного циклу очищення, ущільнення та концентрування осаду безпосередньо у нижній частині відстійника, перекачування ущільненого шламу на майданчики для підсушування, а також зневоднення осаду на цих піскових майданчиках протягом 14 діб.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок водозабору

Джерело водопостачання розташоване на відстані 3 км від меж населеного пункту.

Проектом передбачається буріння вісімнадцяти свердловин (шістнадцяти робочих і двох резервних). Добова витрата кожної свердловини становить 1 625 м³/добу, годинна – 67,7 м³/год.

Спосіб буріння свердловин – роторний.

Проектна глибина свердловин – 200 м.

Категорія споруд за ступенем забезпеченості подачі води – I, клас відповідальності будівлі – 2, ступінь вогнестійкості – II, категорія будівлі за вибухопожежною та пожежною небезпекою – Д (за ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [13]).

Поверхня території майданчика водозабірних свердловин рівна, вирівняна насипними ґрунтами. Абсолютні відмітки поверхні становлять 17,20–17,70 м.

У геологічній будові майданчика беруть участь відкладення, представлені суглинками різної консистенції, перекриті з поверхні шаром техногенних ґрунтів.

Насипні ґрунти представлені суглинками (рідше пісками та супісками) з будівельним сміттям. Насипні ґрунти не можуть бути використані як основа та зворотне засипання проєктованих споруд через неоднорідну будову та недостатню щільність, і підлягають видаленню.

Основою фундаментів слугуватимуть суглинки стрічкові напівтверді, рідше тугопластичні, жовтувато-коричневі, з прошарками пилоподібного піску та супіску.

Прийняті такі нормативні фізико-механічні властивості ґрунтів:

- густина ґрунту – об'ємна маса ґрунту в природному стані разом із порами та вологою $\rho = 1,88 \text{ г/см}^3$;

- кут внутрішнього тертя ґрунту – характеризує опір ґрунту зсуву за рахунок тертя між частинками $\varphi = 28^\circ$;

- питома зчеплення (когезія) ґрунту – відображає силу зв'язку між частинками ґрунту, що забезпечує його міцність навіть за відсутності нормального тиску $C = 0,016$ МПа;

- модуль деформації ґрунту – характеризує стисливість ґрунту під навантаженням $E = 10,8$ МПа.

За ступенем морозної пучистості суглинки належать до середньопучистих ґрунтів. Нормативна глибина сезонного промерзання цих ґрунтів становить 115 см.

Коефіцієнт фільтрації пісковиків у середньому становить 20 – 30 м/добу, а питомі дебіти свердловин досягають 0,5–2,3 л/с·м.

Експлуатаційні дебіти більшості свердловин становлять 40,0–60,0 м³/год при зниженні рівня води на 20,0–30,0 м.

П'єзометричний рівень горизонту встановлюється на глибині 30,0–40,0 м.

Тривалість використання джерела визначається експлуатаційними запасами самого джерела та розрахунковою продуктивністю водозабору.

Виконуємо розрахунок водозабірних свердловин [12, 14–16].

Розрахункова продуктивність водозабору за умови його рівномірної роботи дорівнює

$$Q_{\text{доб.р.}} = \alpha \cdot Q_{\text{доб}} = 1,04 \cdot 25\,000 = 26\,000 \text{ м}^3/\text{добу}, \quad (2.1)$$

де α – коефіцієнт, що враховує витрату води на власні потреби очисних споруд;

$Q_{\text{доб}}$ – корисна продуктивність водозабору, м³/добу;

Тоді годинна корисна продуктивність водозабору дорівнює

$$Q_{\text{год.р.}} = \frac{Q_{\text{доб.р.}}}{24} = \frac{26\,000}{24} = 1\,083,3 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Обсяг експлуатаційних запасів підземних вод, м³, у загальному вигляді визначається за формулою:

$$Q_e = Q_{ст} + Q_{дин}, \quad (2.2)$$

де $Q_{ст}$ – статичні запаси підземних вод;

$Q_{дин}$ – динамічні запаси підземних вод.

Статичні запаси включають об'єм води у порах та тріщинах водоносного пласта:

$$Q_{ст} = \mu \cdot V, \quad (2.3)$$

де V – об'єм водоносної породи, м³;

μ – коефіцієнт водовіддачі (коефіцієнт запасу).

Статичні запаси прийняті за завданням: $Q_{ст} = 372\,124\,308$ м³.

Динамічні запаси являють собою обсяг підземних вод, що характеризує природну продуктивність водоносних горизонтів у тому обсязі, в якому забір води з них компенсується надходженням у них води з областей живлення:

$$Q_{дин} = b \cdot m \cdot K \cdot i, \quad (2.4)$$

де b – ширина потоку підземних вод, м;

m – товщина водоносного пласта;

K – коефіцієнт фільтрації, що залежить від породи водоносного пласта, м/добу;

i – гідравлічний ухил.

У розрахунку динамічні запаси прийнято за завданням: $Q_{дин} = 310\,000$ м³.

$$Q_e = Q_{ст} + Q_{дин} = 372\,124\,308 + 310\,000 = 372\,434\,308 \text{ м}^3.$$

Тривалість використання джерела водопостачання:

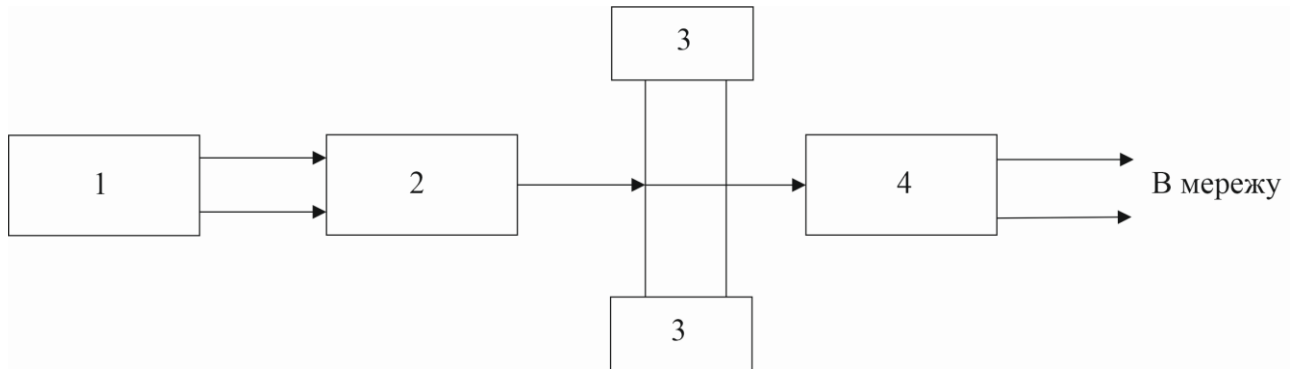
$$t = \frac{Q_e}{365 \cdot Q_{доб.р.}} = \frac{202\,234\,308}{365 \cdot 26\,000} = 39,2 \text{ роки.}$$

У результаті гідрогеологічних та геологічних досліджень було отримано такі вихідні дані для проєктування та розрахунку водозабору:

- потужність водоносного пласта $m = 48$ м;
- водоносний пласт складається з кварцових пісковиків різної зернистості;
- подошва водоносного пласта залягає нижче поверхні землі на 262 м;
- статичний рівень знаходиться на глибині 30–40 м від поверхні землі.

В якості водозабірної споруди в даному проєкті прийнята водозабірна свердловина як найпоширеніший тип водозабірної пристрою, що відповідає даним умовам залягання водоносного пласта та його потужності.

Принципова схема розташування споруд водопостачання, передбачених у проєкті, наведені на рис. 2.1.



1 – водозабірна споруда (свердловини); 2 – споруди для очищення та підготовки води; 3 – резервуари з чистою водою;
4 – насосна станція II підйому

Рисунок 2.1 – Схема розташування споруд водопостачання

Перш ніж затвердити остаточну експлуатаційну конструкцію свердловини, складають її схему (робочу конструкцію), а потім проводять розрахунок основних параметрів (припливу води до свердловини та пропускної здатності фільтра).

Конструкція свердловини включає в себе такі основні елементи:

- кондуктор;
- технічні колони труб;
- експлуатаційну колону;
- цементний захист;
- фільтр свердловини (водоприймальна частина з відстійником і надфільтровою трубою).

Початковий і кінцевий діаметри свердловини приймають залежно від сортаменту труб, способу буріння, розмірів і конструкції фільтра та насоса. Свердловини кріплять декількома колонами обсадних труб, кількість яких

залежить від глибини свердловини та виходу колон труб. Колона обсадних труб найбільшого діаметра називається кондуктором. Ці труби не входять до числа безпосередніх технічних колон. Глибина опускання кондуктора призначається до першого водонепроникного пласта (сіра глина) із заходом у цей пласт на 1 м.

Приплив води до свердловини більшою мірою залежить від діаметра робочої частини фільтра, ніж від його довжини. Тому для збільшення потоку $Q_{св}$, а отже, для зменшення кількості свердловин, спочатку визначаємо максимальне значення діаметра труб, щоб отримати максимально допустимий для цього способу буріння діаметр фільтра.

Максимально можливий діаметр кондуктора відповідно до сортаменту сталевих труб, а також обмеження діаметрів занурювальних труб, обумовлених обраними вище типами бурового верстата та вібромашини, дорівнює 530 мм. Різниця в діаметрах між кондуктором і першою колоною, а також між попередньою і наступною колонами обсадних труб повинна становити не менше 100 мм. При встановленні фільтра із заглибленням у нижньорозташований водонепроникний шар верх його надфільтрової труби влаштовується на 5 м вище башмака експлуатаційної колони труб і закріплюється сальником. Башмак (кінець) колони труби кондуктора входить у водонепроникну породу на 1 м, а башмак останньої колони – покрівлі використовуваного водоносного пласта – на 1 м.

Після аналізу гідрогеологічних умов у проєкті обрано варіант буріння свердловин на основний водоносний горизонт верхньопротерозойських пісковиків.

Проєктні параметри свердловин:

- спосіб буріння – роторний;
- глибина свердловин – 200 м;
- статичний рівень – 30,0–40,0 м;
- питома продуктивність – 0,5–0,8 л/с;
- експлуатаційна продуктивність – 65,0–70,0 м³/год;

- потрібний дебіт – 1 625 м³/добу;
- розрахунковий динамічний рівень води у свердловині – 65–75 м.

Глибина, конструкція свердловини та тип фільтра коригуються у процесі буріння.

Буріння свердловин рекомендується проводити обертово-роторним способом. Початковий діаметр буріння $D = 490$ мм, кінцевий – $D = 243$ мм.

Буріння проводиться від 0,0 до 45,0 м тришарошечним долотом $D = 490$ мм (19І), від 45,0 до 150,0 м тришарошечним долотом $D = 394$ мм (15І), від 150,0 до 200,0 м тришарошечним долотом $D = 243$ мм (9І).

Буріння супроводжується гідрогеологічними спостереженнями за літологічним складом порід, їхньою товщиною, поглинанням промивної рідини, параметрами глинистого розчину та іншими явищами, що виникають у процесі буріння свердловини.

Відбір зразків (шламу) проводиться через кожні 2-3 м та при зміні порід.

1-ша колона обсадних труб $D = 426$ мм встановлюється на глибину 45,0 м з подальшим затрубним цементуванням колони та підйомом цементного розчину до устя свердловини.

2-га колона обсадних труб $D = 273$ мм встановлюється на глибину 150,0 м з подальшим затрубним цементуванням колони та підйомом цементного розчину до устя свердловини.

Для запобігання потраплянню у свердловину поверхневих вод експлуатаційна колона $D = 273$ мм виводиться на 0,5 м над денною поверхнею.

3-я колона, фільтрова $D = 219 \times 168$ мм, встановлюється в інтервалі 145,0–200,0 м.

Під час відбору води з пухких порід у свердловинах встановлюють фільтри. Фільтр складається з водоприймальної (робочої) частини, надфільтрової труби та відстійника. Довжина надфільтрової труби залежить від конструкції свердловини.

Геофізичні дослідження (стандартний каротаж і гаммакаротаж) проводяться при глибині свердловини 200,0 м для отримання більшої інформації про геологічну будову.

Довжина робочої частини фільтрової колони, м, визначається за формулою:

$$L = \frac{Q \cdot \lambda}{d}, \quad (2.5)$$

де Q – проєктний дебіт свердловини – 67,7 м³/год;

λ – емпіричний коефіцієнт – 90;

d – зовнішній діаметр фільтра – 168 мм.

$$L = \frac{67,7 \cdot 90}{168} = 36,3 \text{ м.}$$

В якості водоносного пласта розглядається пісок середньозернистий. Згідно з довідковими даними, можуть бути використані такі фільтри: стрижневий фільтр, спірально-дротовий, з водоприймальною поверхнею з дротяної обмотки, сіток квадратного плетіння, штампованого листа з нержавіючої сталі з піщано-гравійним обсипанням.

Для експлуатаційної свердловини приймається щілинний фільтр зі стрижневим каркасом із нержавіючої сталі та клиноподібною дротяною обмоткою з нержавіючої сталі. Дріт приварюється до поздовжніх стрижнів контактним зварюванням, що забезпечує високу механічну міцність конструкції та стабільність розмірів фільтрувальних щілин.

Основним завданням гідрогеологічного розрахунку є визначення дебіту свердловин та зниження рівня підземних вод у процесі експлуатації водозабірної споруди. Одночасно з вирішенням цих завдань на основі розрахунків уточнюють схему розташування водозабірних свердловин, їхню кількість та розміри.

У зв'язку з тим, що необхідна кількість свердловин ще не встановлена, оцінка продуктивності водозабору, м³/добу, проводиться стосовно однієї свердловини:

$$Q_{\text{св}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot m \cdot S_{\text{доп}}}{R}, \quad (2.6)$$

де $S_{дон}$ – допустиме зниження рівня підземних вод, м.

$$S_{дон} = H - (0,3 \cdot m + \Delta H_{нас} + \Delta H_{\phi}), \quad (2.7)$$

де H – напір над дном водоносного горизонту, м;

$\Delta H_{нас}$ – максимальна глибина занурення насоса під динамічний рівень води у свердловині, м, приймаємо $\Delta H_{нас} = 25$ м;

m – потужність водоносного пласта, $m = 48$ м

ΔH_{ϕ} – втрати напору на вході у свердловину (приблизно 1,5 м.)

$$S_{дон} = 77 - (0,3 \cdot 48 + 25 + 1,5) = 36 \text{ м};$$

де k – коефіцієнт фільтрації, $k = 20$ м/добу;

R – гідравлічний опір, що залежить від гідрогеологічних умов та типу водозабірної споруди;

$$R = R_0 + \beta \cdot \xi = 11 + 1 \cdot 13 = 24 \quad (2.8)$$

де R_0 – гідравлічний опір R у точці розташування свердловини;

$$R_0 = \ln \frac{R_{св}}{r} = \ln \frac{4963,6}{0,084} = 11, \quad (2.9)$$

де r – радіус фільтра, м;

$$r = \frac{d_{\phi}}{2} = \frac{0,168}{2} = 0,084 \text{ м.}$$

$R_{св}$ – радіус впливу свердловини, що визначається за формулою:

$$R_{св} = 1,5 \cdot \sqrt{c \cdot t} = 1,5 \cdot \sqrt{1200 \cdot 9125} = 4963,6 \text{ м} \quad (2.10)$$

де c – коефіцієнт п'єзопровідності водоносних порід, м³/добу;

$$c = \frac{k \cdot m}{\mu} = \frac{2,5 \cdot 48}{0,1} = 1200; \quad (2.11)$$

t – термін експлуатації свердловини (25 років), $t = 9125$ діб;

β – відношення витрати свердловини, яка розглядається $Q_{св}$ до сумарної витрати водозабору $Q_{доб.р.}$, тобто $\beta = \frac{Q_{св}}{Q_{доб.р.}}$; у разі розгляду окремої свердловини $\beta = 1$;

ξ – додатковий опір, що враховує недосконалість фільтрації свердловини, величина якого визначається залежно від співвідношення

$$\frac{l_{\phi}}{m} = \frac{45}{48} = 0,9$$

та

$$\frac{m}{r} = \frac{48}{0,084} = 571,4;$$

$$\xi = 13.$$

$$Q_{\text{св}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 48 \cdot 36}{24} = 9\,043,2 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Занурювальний насос можна встановити за однією з чотирьох схем:

- 1) установка вище рівня водоносного пласта в одній із колон обсадних труб;
- 2) розташування насоса в межах водоносного пласта та кінцевої колони обсадних труб;
- 3) встановлення насоса в межах надфільтрової труби вище робочої частини фільтра;
- 4) встановлення насоса нижче робочої частини фільтра над відстійником.

Найкращим варіантом є перша схема, оскільки можна отримати максимальну довжину фільтра, що забезпечує більшу його пропускну здатність.

При розгляді високонапірного водоносного пласта застосування першої схеми виправдовується, якщо виконується умова:

$$H > h_{\text{необх}} + 0,5 \cdot m \quad (2.12)$$

де $h_{\text{необх}}$ – необхідна висота стовпа води над поверхнею пласта, м;

$$h_{\text{необх}} = h_1 + h_2 + L_{\text{нас}} + \Delta H_{\text{нас}}, \quad (2.13)$$

де h_1 – висота надфільтрової труби відносно башмака останньої колони, $h_1 = 5$ м;

h_2 – відстань від верху надфільтрової труби до низу насоса, $h_2 = 2$ м;

$L_{\text{нас}}$ – загальна довжина занурювального насоса, що дорівнює 2 м.

$$h_{\text{необх}} = 5 + 2 + 2 + 3 = 12 \text{ м.}$$

$$44 > 12 + 0,5 \cdot 48 = 36.$$

У цьому випадку береться максимальна довжина фільтра, м,

$$l_{\phi} = m - h_3 - h_4, \quad (2.14)$$

де h_3, h_4 – відстань до фільтра відповідної підшови та від покрівлі водоносного пласта, $h_3 = h_4 = 1,5$ м.

$$l_\phi = 48 - 1,5 - 1,5 = 45 \text{ м.}$$

Застосування першої схеми можливе для досконалих і недосконалих систем.

Для експлуатації свердловин обрано багатоступінчасті занурювальні насоси Grundfos SP 60-7 [17]. Робочі параметри насосів становлять подачу близько $67,7 \text{ м}^3/\text{год}$ при напорі 110–120 м. Конструкція насосів виконана з корозійностійкої нержавіючої сталі, що забезпечує тривалий термін експлуатації та відповідність вимогам систем господарсько-питного водопостачання. Насосні агрегати передбачено оснащувати частотними перетворювачами для регулювання продуктивності та зменшення енергоспоживання.

Діаметр водопідйомних труб становить 159 мм.

Марку насоса та глибину його встановлення уточнюють після проведення дослідного відкачування відповідно до фактичного статичного рівня та питомого дебіту свердловини.

Свердловину обладнують рівнеміром і витратоміром для періодичних вимірювань динамічного рівня і дебіту.

Встановлення занурювального насоса у свердловину проводять після спорудження над нею павільйону насосної станції.

Будівельне відкачування води зі свердловини проводять протягом трьох діб із дебітом не менше проєктного.

Після встановлення насоса проводять герметизацію гирла свердловини.

Пропускна здатність фільтра, $\text{м}^3/\text{добу}$, визначається за формулою:

$$Q_\phi = \pi \cdot d_\phi \cdot l_\phi \cdot V_\phi \cdot \eta, \quad (2.15)$$

де V_ϕ – максимально допустима швидкість надходження води до фільтра, визначена за емпіричною залежністю:

$$V_\phi = 65 \sqrt[3]{k}; \quad (2.16)$$

$$V_\phi = 65 \sqrt[3]{20} = 176,4;$$

η – проникність фільтра, тобто відношення площі фільтра до площі його бічної поверхні; $\eta = 0,35$.

$$Q_{\phi} = 3,14 \cdot 0,168 \cdot 48,5 \cdot 176,4 \cdot 0,35 = 1\,579,6 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Якщо виникає необхідність отримати задану кількість води Q_{ϕ} за умови обмеженої потужності водоносного шару, а отже, і обмеженої довжини фільтра l_{ϕ} , то наведена формула вирішується відносно діаметра d_{ϕ} . В умовах практично необмеженої потужності водоносного шару аналогічно може бути визначена необхідна довжина фільтра l_{ϕ} .

Питання щодо можливості використання однієї свердловини вирішується шляхом порівняння розрахункової продуктивності водозабору $Q_{\text{доб.р.}}$, максимального припливу води до свердловини $Q_{\text{св.}}$ та пропускної здатності фільтра Q_{ϕ} .

$$Q_{\text{доб.р.}} = 26\,000 \text{ м}^3/\text{добу};$$

$$Q_{\text{год.р.}} = 1\,083,3 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$Q_{\text{св.}} = 9\,043,2 \text{ м}^3/\text{добу};$$

$$Q_{\phi} = 1\,579,6 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Якщо одночасно при цілодобовій роботі свердловини $Q_{\text{год.р.}} < \frac{Q_{\phi}}{24}$ та $Q_{\text{год.р.}} < \frac{Q_{\text{св.}}}{24}$, то приймають водозабір у вигляді однієї свердловини.

У даному випадку:

$$Q_{\text{год.р.}} > \frac{Q_{\phi}}{24}; \quad 1\,083,3 \text{ м}^3/\text{год} > \frac{1\,579,6}{24} = 65,8 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$Q_{\text{год.р.}} > \frac{Q_{\text{св.}}}{24}; \quad 1\,083,3 \text{ м}^3/\text{год} > \frac{9\,043,2}{24} = 376,8 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Орієнтовна кількість свердловин у груповому водозаборі визначається за формулою:

$$n = \frac{Q_{\text{доб.р.}}}{Q_{\phi}}; \tag{2.17}$$

$$n = \frac{26\,000}{1\,579,6} = 16,4 \text{ св.}$$

Округливши величину n до найближчого цілого числа, отримуємо 16 свердловин. Кількість резервних свердловин приймаємо рівною 2.

Годинна продуктивність однієї свердловини, м³/год, визначається за формулою:

$$Q = \frac{Q_{\text{доб.р.}}}{n}, \quad (2.18)$$

$$Q = \frac{1\,083,3}{16} = 67,7 \text{ м}^3/\text{год} = 1\,625 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Фактичне зниження рівня S , м, визначається за формулою:

$$S = \frac{R \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot m}. \quad (2.19)$$

При цьому зміниться значення гідравлічного опору R_0 , що входить до складу загального гідравлічного опору R і визначається залежно від типу водозабору.

При лінійному розташуванні свердловин гідравлічний опір визначається за формулою:

$$R_0 = \ln \frac{2,7 \cdot R_{\text{св}}}{l} + \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{1}{\pi \cdot r \cdot n}, \quad (2.20)$$

де l – відстань між свердловинами, м; $l = 100$ м.

$$R_0 = \ln \frac{2,7 \cdot 4963,6}{100} + \frac{1}{9} \cdot \ln \frac{1}{3,14 \cdot 0,084 \cdot 9} = 5,3.$$

Загальний гідравлічний опір визначаємо за формулою $R = R_0 + \beta$. При цьому коефіцієнт:

$$\beta = \frac{Q_{\text{св}}}{Q_{\text{доб.р}}} = \frac{1341,3}{12075} = 0,12;$$

$$R = R_0 + \beta = 5,3 + 0,12 = 5,42 \text{ м}.$$

Тоді фактичне зниження рівня:

$$S = \frac{15 \cdot 1341,7}{2 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 48} = 3,3 \text{ м}.$$

Визначаємо довжину водопровідної труби від насоса до верху свердловини:

$$l_{\text{водопр.тр.}} = C + S + 3 = 113 + 3,3 + 3 = 119,3 \text{ м}.$$

$$C = \sum_5 - H = 157 - 44 = 113 \text{ м}.$$

Розрахункова продуктивність насосів на водозаборах підземних вод залежить від потреби у воді та схеми водопостачання об'єкта. У проєкті

передбачено рівномірну роботу насосів, розраховану на продуктивність свердловини $Q = 67,7 \text{ м}^3/\text{год} = 18,8 \text{ л/с}$.

При відборі води зі свердловини напір насоса $H_{нас}$, м, визначається з урахуванням геометричної висоти підйому води H_2 , зниження рівня S і втрат напору у водопідйомній трубі $h_{в.т.}$, у насосній станції $h_{н.с.}$ і на напірному водогоні h_n , тобто

$$H_{нас} = H_2 + S + h_{в.т.} + h_{н.с.} + h_n \quad (2.21)$$

де

$$H_2 = Z_{p.o.c.} - Z_{c.p.}, \quad (2.22)$$

$Z_{c.p.}$ – позначка статичного рівня підземних вод, м; $Z_{c.p.} = 40$ м;

$Z_{p.o.c.}$ – позначка рівня води у збірному резервуарі на очисній станції.

$$H_2 = 113 + 17 - 40 = 90 \text{ м};$$

$h_{в.т.}$ – втрати напору у водопідйомних трубах довжиною $l_{водопр.тр.}$

$$h_{в.т.} = \frac{A \cdot Q^2 \cdot l_{водопр.тр.}}{86400^2}. \quad (2.23)$$

де Q – витрата, що подається свердловиною, $\text{м}^3/\text{добу}$;

A – коефіцієнт опору водопідйомних труб, який визначається залежно від діаметра D за формулою:

$$A = \frac{k}{D^p}. \quad (2.24)$$

Значення коефіцієнтів k та p , що визначають коефіцієнт опору водопідйомних труб залежно від матеріалу, для сталевих труб такі: $k = 0,001736$ та $p = 15,3$.

Визначаємо діаметр водопідйомної труби:

$$d = 150 \text{ мм}; v = 0,81 \text{ м/с}.$$

Поправний коефіцієнт для $v = 0,81 \text{ м/с}$ $k = 0,958$.

$$h_{в.т.} = \frac{22,04 \cdot 1\,625,0^2 \cdot 119,3}{86400^2} = 0,6 \text{ м};$$

$h_{н.с.}$ – втрати у насосній станції, $h_{н.с.} = 2$ м;

h_n – втрати напору у збірному напірному водогоні від свердловини до місця подачі води, м, що визначаються за формулою:

$$h_n = 1,05 \cdot i_n \cdot l_n \quad (2.25)$$

де l_n – довжина збірною водогону, м;

i_n – втрати напору на 1 пог. м довжини водогону.

Довжина збірною водогону визначається прийнятою лінійною схемою водогону. При визначенні довжини збірною водогону, окрім відстані між водозабірними свердловинами $l = 100$ м, додатково враховуємо відстань від свердловини до збірною водогону (5 м).

Для влаштування напірних водопроводів застосовують сталеві труби з внутрішньою ізоляцією. Діаметри напірних водопроводів обираємо виходячи зі швидкості руху води в них: 0,4–0,7 м/с – для діаметрів 100–400 мм; 0,7–1 м/с – для діаметрів 500–1000 мм.

Лінійні збірні водоводи проєктуємо за телескопічною схемою з поступовим збільшенням діаметрів у міру підключення свердловин (рис. 2.2). Дані по ділянках наведено в табл. 2.1.

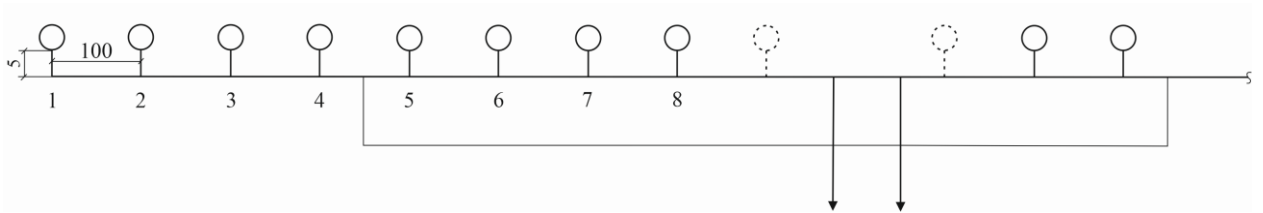


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема лінійних збірних водогонів

Таблиця 2.1 – Розрахункові дані щодо ділянок напірного водогону

| № ділянки | Довжина ділянки | Витрата, л/с | $d_{тр}$, мм | v , м/с | $1000i$ | $h = 1,05 il$ |
|-----------|-----------------|--------------|---------------|-----------|---------|---------------|
| 1–2 | 100 | 18,8 | 150 | 1,06 | 12 | 1,26 |
| 2–3 | 100 | 37,6 | 200 | 1,2 | 8 | 0,84 |
| 3–4 | 100 | 56,4 | 250 | 1,15 | 6 | 0,63 |
| 4–5 | 100 | 75,2 | 300 | 1,06 | 5 | 0,53 |
| 5–6 | 100 | 94,0 | 350 | 0,98 | 4,5 | 0,47 |
| 6–7 | 100 | 112,8 | 400 | 0,9 | 4 | 0,42 |
| 7–8 | 100 | 131,6 | 400 | 1,05 | 5 | 0,53 |
| 8–ОС | 230 | 150,4 | 450 | 0,95 | 4 | 0,97 |
| Разом | – | – | – | – | – | 5,65 |

$$H_{нас} = 90,0 + 3,3 + 0,6 + 2,0 + 5,65 = 101,55 \text{ м.}$$

Підбір насосного обладнання здійснюємо за такими параметрами:

$$Q = 67,7 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$H = 101,55 \text{ м.}$$

Для експлуатації свердловин обрано багатоступінчасті занурювальні насоси Grundfos SP 60-7 [17].

Марку насоса та глибину його встановлення уточнюють після проведення дослідного відкачування відповідно до фактичного статичного рівня та питомого дебіту свердловини.

Свердловину обладнують рівнеміром та витратоміром для періодичних вимірювань динамічного рівня та дебіту.

Встановлення занурювального насоса у свердловину здійснюють після спорудження над нею павільйону насосної станції.

Будівельне відкачування води зі свердловини проводиться протягом трьох діб з дебітом не менше проєктного.

Після встановлення насоса проводиться герметизація гирла свердловини. Свердловинний водозабір включає водозабірну свердловину та будівлю насосної станції на свердловині.

Будівля насосної станції спроектована у наземному варіанті. У будівлі розміщено пульт керування насосом, водомірний вузол, регулювальну та запірну арматуру, а також обладнано вузли для подачі води в пересувну тару.

Герметизація гирла свердловини здійснена за допомогою оголовка і досягається створенням ущільнень з гумових прокладок. Ущільнення кромки гирла свердловини відбувається під дією ваги насоса і водопідйомних труб на гумову прокладку через фланець опорного коліна. Ущільнення в місцях проходження електрокабелю та п'єзометричної трубки через фланці здійснюється стисканням гумової прокладки болтами, що скріплюють фланці, та за допомогою сальникових ніпелів.

Устьовий патрубок бетонується у фундамент устя свердловини. Облік обсягу відкачуваної води здійснюється лічильниками холодної води.

Трубопроводи та трубопровідна арматура, встановлені в будівлі станції, забезпечують подачу води до резервуарів чистої води.

Будівлі павільйонів над свердловинами спроектовані з цегли з поздовжніми несучими стінами. Габаритні розміри в плані в осях 3,0 м × 6,0 м, висота будівлі до нижнього краю плит покриття – 3,0 м.

Вогнестійкість будівлі – II ступеня, категорія будівлі за вибухопожежною та пожежною небезпекою – Д (згідно з ДБН В.1.1-7:2016).

Стіни будівлі товщиною 510 мм – з цегли М125 (ДСТУ EN 771-1) на розчині М50, облицьовані лицьовою цеглою М150 (ДСТУ EN 771-1). Покриття – із збірних залізобетонних багатопорожнистих плит. У покритті будівлі передбачено люк для обслуговування заглибних насосів.

Покрівля – похила, чотиришарова рулонна на утеплювачі та пароізоляції з поверхневим шаром із гравію, втопленого в бітумну мастику.

Підлоги – з керамічної плитки на підстиляючому шарі з бетону В7,5.

Заповнення дверних прорізів – металевий глухий однопольний блок, утеплений.

Відмостка навколо будівлі – асфальтова на щебеневій основі.

Внутрішнє оздоблення:

- стель – затирка швів, побілка на клейовій основі;
- стін – штукатурка та фарбування на клейовій основі, нижня частина стін – глазурована плитка.

Фундаменти будівлі павільйону – стрічкові зі збірних бетонних блоків.

Оголовок свердловини розташовуємо в наземному павільйоні з цегли. Габарити павільйону у плані приймаємо з урахуванням розміщення в ньому головки свердловини, контрольно-вимірювальних приладів, витратоміра та арматури.

Верхня частина експлуатаційної колони виступає над підлогою на 0,5 м. Конструкція оголовка свердловини забезпечує повну герметизацію, що

унеможливиює проникнення поверхневої води та забруднень у міжтрубний і затрубний простір свердловини.

Діаметр обвідної лінії $d = 150$ мм.

Вантуз, встановлений над оголовком свердловини, має такі технічні характеристики:

- умовний прохід приєднувального патрубку $D_y = 100$ мм;
- діаметр випускного отвору $d = 25$ мм;
- тиск P_{max} , при якому вантуз є працездатним, дорівнює 2,3 атм;
- марка ВМТ-100;
- маса $m = 71$ кг.

Розміри наземної частини свердловини у плані становитимуть $3,0$ м \times $6,0$ м.

2.2 Розрахунок зон санітарної охорони водозабору

Відповідно до ДБН В.2.5-74:2013 [12] зона санітарної охорони (далі – ЗСО) джерела водопостачання (свердловин) має складатися з трьох поясів: першого – суворого режиму, другого та третього — режимів обмеження.

Санітарно-оздоровчі та захисні водоохоронні заходи встановлюють для кожного поясу ЗСО відповідно до його призначення і виконують як одноразові заходи, що здійснюються до початку експлуатації водозабору (наприклад, знесення будівель, влаштування огорожі тощо), або як постійні заходи режимного характеру (заборона будь-якого будівництва, використання отрутохімікатів тощо).

На околицях водозабору встановлюється зона санітарної охорони (ЗСО), в якій вживаються спеціальні заходи, що виключають можливість потрапляння забруднень у водозабір та водоносний пласт у районі водозабору.

При організації ЗСО враховується вид забруднень (мікробне, хімічне), що визначає їх стійкість (стабільність) та можливу довжину шляху просування у водоносному пласті.

Якщо час низхідного руху забруднень у напрямку до місця водозабору становить менше 400 днів, водоносний горизонт не захищений від мікробних забруднень, що проникають крізь покривну товщу порід. Якщо час руху становить менше 25–50 років, то водоносний горизонт не захищений від нейтральних хімічних забруднень.

У випадках, коли товща порід, що залягає над водоносним горизонтом, не забезпечує природного захисту підземних вод від поверхневого забруднення, захист водозабору в межах ЗСО здійснюється за допомогою спеціальних заходів таким чином, щоб можливі джерела забруднення були віддалені від меж ЗСО на відстань, за якої тривалість руху забруднення по пласту буде не меншою, ніж задана.

Водоносний горизонт надійно захищений від поверхневого забруднення потужною товщею надлягаючих водонепроникних порід (суглинки та щільні глини) у межах усіх трьох поясів зони санітарної охорони свердловин і за гідрогеологічними характеристиками належить до типу захищених.

Крім того, проєктована конструкція свердловин передбачає низку технічних заходів, що забезпечують надійність санітарного стану свердловин:

- діапазон 0,0–45,0 м (четвертинні відкладення, ґрунтові води) перекриваються колоною обсадних труб $D = 426$ мм із цементуванням затрубного простору та підйомом цементного розчину до устя свердловини; колона виводиться на 0,5 м вище поверхні землі;

- діапазон 0,0–150,0 м перекривається колоною обсадних труб $D = 273$ мм із цементуванням затрубного простору та підйомом цементного розчину до гирла свердловини; колона виводиться на 0,5 м вище поверхні землі.

До складу ЗСО входять три зони: перша – суворого режиму; друга та третя – обмеженого режиму.

Межа першого поясу ЗСО встановлюється на відстані не менше 30 м від водозабору при використанні захищених підземних вод (захищеними є напірні води). Оскільки розглядається груповий водозабір, межа першого поясу віддалена від крайніх свердловин на 30 м.

Зона суворого режиму забороняє будівництво промислових підприємств, ведення сільськогосподарської діяльності тощо.

Розміри зон обмежень визначаються гідрогеологічними умовами розташування свердловин та часом руху частинок забрудненої рідини від меж зони до водозабору, протягом якого відбувається природне очищення бактеріально або хімічно забруднених вод.

Межі другого та третього поясів ЗСО встановлюються на таких відстанях, щоб забруднення, що проникли у водоносний горизонт за межами зон обмежень, не могли під час експлуатації свердловин досягти водозабору.

Межа другого поясу ЗСО визначається за допомогою гідродинамічних розрахунків. Основним параметром, що визначає відстань від межі другого поясу ЗСО до водозабору, є розрахунковий час T_m просування мікробного забруднення з потоком підземних вод до водозабору, яке має бути достатнім для ефективного самоочищення води. Оскільки свердловини знаходяться у І кліматичному районі і не мають безпосереднього гідравлічного зв'язку з відкритим водоймищем, то приймаємо $T_m = 200$ діб [12, табл. 40].

Визначення меж ЗСО вище за течією потоку здійснюється за формулою:

$$T = \frac{\mu}{K \cdot i} \cdot \left[R_B - \frac{0,366 \cdot Q_\phi}{0,8 \cdot m \cdot K \cdot i} \cdot \lg \left(\frac{6,28 \cdot 0,8 \cdot m \cdot K \cdot i \cdot R_B}{Q_\phi} + 1 \right) \right] =$$

$$= \frac{0,3}{20 \cdot 0,02} \cdot \left[R_B - \frac{0,366 \cdot 1\,625,0}{0,8 \cdot 48 \cdot 20 \cdot 0,02} \cdot \lg \left(\frac{6,28 \cdot 0,8 \cdot 48 \cdot 20 \cdot 0,02 \cdot R_B}{1\,625,0} + 1 \right) \right], \quad (2.26)$$

де μ – ефективна пористість водоносного ґрунту (коефіцієнт водовіддачі);

K – коефіцієнт фільтрації (гідравлічна провідність);

i – гідравлічний ухил (градієнт напору);

R_B – радіус впливу водозабірної свердловини, м;

Q_ϕ – фактичний дебіт водозабору, м³/добу;

m – потужність (товщина) водоносного шару, м.

За розрахункового часу, який прийняли $T_m = 200$ діб радіус впливу R_ϕ становитиме 350 м.

Приймаємо $R_\phi = 350$ м, тобто межа другого поясу встановлюється на відстані 350 м.

Третій пояс призначений для захисту підземних вод від хімічного забруднення. Розрахунковий час T_x просування забруднення має бути більшим за проєктний термін експлуатації водозабору, але не менше 25 років. $T_x = 39,2$ роки. Розташування межі третього поясу ЗСО визначається гідродинамічними розрахунками.

Відстань від меж ЗСО вгору за течією потоку розраховується за формулою:

$$T = \frac{\mu}{K \cdot i} \cdot \left[R_B - \frac{0,366 \cdot Q_\phi}{0,8 \cdot m \cdot K \cdot i} \cdot \lg \left(\frac{6,28 \cdot 0,8 \cdot m \cdot K \cdot i \cdot R_B}{Q_\phi} + 1 \right) \right] =$$

$$= \frac{0,3}{20 \cdot 0,02} \cdot \left[R_B - \frac{0,366 \cdot 1\,625,0}{0,8 \cdot 48 \cdot 20 \cdot 0,02} \cdot \lg \left(\frac{6,28 \cdot 0,8 \cdot 48 \cdot 20 \cdot 0,02 \cdot R_B}{1\,625,0} + 1 \right) \right]. \quad (2.27)$$

$$T = T_m = 16\,790 \text{ днів (46 років).}$$

$$R_e = 23\,000 \text{ м, фактично } T = 17\,167 \text{ днів (47 років).}$$

Приймаємо $R_e = 23\,000$ м, тобто межа третього поясу встановлюється на відстані 23 000 м.

Віддалення меж ЗСО вниз за течією підземних вод визначається за формулою:

$$r_B = \frac{Q_\phi}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot 0,8 \cdot m \cdot i} = \frac{1\,625,0}{2 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 0,8 \cdot 48 \cdot 0,02} = 16,8 \text{ м.} \quad (2.28)$$

Межа ЗСО у поперечному перерізі, що проходить через свердловину перпендикулярно до напрямку руху потоку:

$$2d = \frac{Q_\phi}{2 \cdot 0,8 \cdot m \cdot K \cdot i} = \frac{1\,625,0}{2 \cdot 0,8 \cdot 48 \cdot 20 \cdot 0,02} = 52,9 \text{ м.} \quad (2.29)$$

З урахуванням можливості розширення меж ЗСО до нейтральної лінії струму в процесі тривалої експлуатації водозабору величину $2d_{max}$, м, у перерізі, що віддалений від свердловини на відстань R_e , обчислюємо за формулою:

$$2d = \frac{Q_\phi}{0,8 \cdot m \cdot K \cdot i} = \frac{1\,625,0}{0,8 \cdot 48 \cdot 20 \cdot 0,02} = 105,8 \text{ м.} \quad (2.30)$$

2.3 Розрахунок фільтрів знезалізнення води

Для видалення заліза з підземної води прийнято метод спрощеної аерації з фільтруванням на швидких безнапірних фільтрах із водоповітряним промиванням. Застосування даного методу є ефективним для підземних вод, у яких залізо переважно знаходиться у розчиненій двовалентній формі та відсутні значні концентрації органічних речовин і сірководню.

Перед подачею на фільтри вода виливається з висоти 0,5 м у приймальну камеру, де відбувається її контакт з атмосферним повітрям. У процесі вільного падіння та перемішування вода насичується киснем до концентрації 5–7 мг/дм³, а також частково дегазується, внаслідок чого з неї видаляється частина вільної вуглекислоти. Зменшення концентрації діоксиду вуглецю призводить до підвищення значення рН води та створює сприятливі умови для подальшого окиснення двовалентного заліза.

Безпосереднє окиснення і гідроліз сполук заліза відбуваються переважно в товщі фільтрувального завантаження. Розчинене двовалентне залізо під дією розчиненого кисню переходить у тривалентну форму з утворенням малорозчинного гідроксиду заліза Fe(OH)₃, який осаджується на поверхні зерен завантаження з кварцового піску. У процесі експлуатації на зернах фільтрувального матеріалу формується каталітична плівка сполук заліза, яка інтенсифікує подальше окиснення та вилучення заліза з води.

Утворені пластівці та частинки гідроксиду заліза затримуються фільтрувальним завантаженням, а очищена вода відводиться до резервуарів чистої води для подальшого знезараження та подачі споживачам.

Для відновлення фільтрувальної здатності завантаження передбачається його періодичне водоповітряне промивання, яке забезпечує ефективне видалення накопичених відкладень сполук заліза та відновлення початкових гідравлічних характеристик фільтрів.

Приймаємо швидкі фільтри з водоповітряним промиванням, з піщаним наповненням із кварцового піску діаметром зерен 1–2 мм, коефіцієнтом неоднорідності 1,5, висотою шару 1 200 мм, швидкістю фільтрування 8 м/год

[12, табл. 31]. Інтенсивність потоку води під час промивання прийнята 7 л/(с·м²), а повітря – 20 л/(с·м²) при загальній тривалості подачі відповідно 7 і 2 хв.

Сумарну площа фільтрів розраховуємо за формулою:

$$F_{\phi} = \frac{Q}{T_{\text{ст}} \cdot V_{\text{н}} - n_{\text{пр}} \cdot q_{\text{пр}} - n_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{пр}} \cdot V_{\text{н}}}, \text{ м}^2, \quad (2.31)$$

де Q – продуктивність очисних споруд, м³/добу;

$T_{\text{ст}}$ – тривалість роботи станції протягом доби, год.;

$V_{\text{н}}$ – розрахункова швидкість фільтрування в нормальному режимі, м/с;

$n_{\text{пр}}$ – кількість промивань одного фільтра за добу за умови нормальної експлуатації;

$q_{\text{пр}}$ – питома витрата води на одну промивання фільтра на одиницю площі за годину:

$$q_{\text{пр}} = 3,6 \cdot \omega \cdot \tau_{\text{пр}}, \text{ м}^3/\text{м}^2, \quad (2.32)$$

де ω – інтенсивність промивання, л/с · м²;

$$q_{\text{пр}} = 3,6 \cdot 7 \cdot 0,12 = 3,02 \text{ м}^3/\text{м}^2;$$

$\tau_{\text{пр}}$ – тривалість промивання, год.

Сумарна площа фільтрів буде дорівнювати:

$$F_{\phi} = \frac{26\,000}{24 \cdot 8 - 2 \cdot 3,02 - 2 \cdot 0,5 \cdot 8} = 146,1 \text{ м}^2.$$

Кількість фільтрів становитиме:

$$N_{\phi} = 0,5 \sqrt{F_{\phi}} = 0,5 \sqrt{146,1} = 6 \text{ од.}$$

Розрахункова площа одного фільтра дорівнює:

$$f_{\phi} = \frac{F_{\phi}}{N_{\phi}} = \frac{146,1}{6} = 24,4 \text{ м}^2.$$

Приймаємо фільтри розмірами 5,0 м x 5,7 м у плані.

Повна висота фільтра визначається за формулою:

$$H_{\text{ф.повн.}} = H_3 + H_{\text{ни}} + H_6 + H_{\text{дод}} + 0,5, \text{ м}, \quad (2.33)$$

де H_3 – висота фільтруючого шару, м;

$H_{\text{ни}}$ – товщина підтримуючих шарів, м;

H_e – висота шару води над поверхнею завантаження, приймається не менше 2 м;

$H_{дод}$ – додаткова висота шару води, що накопичується під час промивання та відключення фільтра, що промивається, на інших фільтрах, м.

Додаткова висота фільтра становитиме:

$$H_{дод} = \frac{W_0}{f_{\phi} \cdot (N-1)}, \text{ м}, \quad (2.34)$$

де W_0 – об'єм води, м³, що накопичується під час простою фільтра, який промивають, може бути обчислений за формулою:

$$W_0 = \frac{Q}{T_{ст} \cdot N_{\phi}} \cdot \tau_{пр} = \frac{26\,000}{24 \cdot 6} \cdot 0,5 = 90,3 \text{ м}^3. \quad (2.35)$$

$$H_{дод} = \frac{W_0}{f_{\phi} \cdot (N-1)} = \frac{90,3}{24 \cdot (6-1)} = 0,75 \text{ м}.$$

$$H_{\phi, повн.} = 1,2 + 0,5 + 2,0 + 0,75 + 0,5 \approx 5,0 \text{ м}.$$

Дренажна система фільтрів складається з двох перфорованих трубопроводів – знизу повітряного, над ним – водяного. Колектор промивної води прокладається в центрі фільтра, а для повітря передбачено дві гілки колектора, які розташовані паралельно водяному біля стінок фільтра.

Розрахунок водорозподільної системи

Витрата промивної води дорівнює:

$$q_{пр} = f_{\phi} \cdot \omega = 28,5 \times 7 \approx 200 \text{ л/с}. \quad (2.36)$$

Приймаємо діаметр колектора 500 мм, швидкість надходження води в колектор становить $V_k = 1,02$ м/с. Приймаємо по 17 відгалужень від колектора з кожного боку з відстанню між їх осями 294 мм.

Витрата води, що надходить у кожне відгалуження дорівнює:

$$q_{відг} = 200 : 34 = 5,9 \text{ л/с}.$$

Діаметри відгалужень приймаємо такими, що дорівнюють 70 мм при швидкості надходження води $V_{\phi} = 1,68$ м/с. У нижній утворювальній трубі відгалужень передбачаються отвори діаметром 10 мм. Загальну площу отворів прийняли 0,3 % від площі фільтра. Їх загальна кількість дорівнює:

$$n_{отв} = \frac{(0,0025 \dots 0,003) \cdot 4 \cdot f_{\phi}}{3,14 \cdot d_0^2} = \frac{0,0025 \cdot 4 \cdot 28,5}{3,14 \cdot 0,01^2} = 918 \text{ од}. \quad (2.37)$$

На кожне з 34 відгалужень припадає: $918 / 34 = 27$ отворів.

При довжині кожного відгалуження:

$$L_{\text{відг}} = \frac{6\,000 - 500}{2} = 2750 \text{ мм},$$

відстань між отворами становить:

$$l_{\text{відг}} = \frac{2750}{27} = 102 \text{ мм}.$$

Для видалення повітря з колектора на його кінці встановлюється стояк-повітряник діаметром 75 мм.

Для відведення промивних вод передбачається водозлив. Висоту між нижньою та верхньою кромками водозливу при витраті промивної води на 1 м ширини фільтра $q_{\text{пром}} = 7 \cdot 5 = 35 \text{ л/(м}\cdot\text{с)}$ приймаємо 420 мм. Відстань між верхніми краями водозливу та відбійної стінки приймаємо 25 мм, а шар води до низу водозливу – 30 мм. Інші розміри водозливу прийняті: $a = 20 \text{ мм}$, $b = 40 \text{ мм}$.

Глибина збірного каналу для відведення промивних вод, при прийнятій ширині 0,8 м, розташовується нижче кромки водоспаду на величину, яка дорівнює:

$$H_{\text{кан}} = 1,73 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{q_{\text{кан}}^2}{9,81 \cdot V_{\text{кан}}^2}\right)} + 0,2 = 1,73 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{0,2^2}{9,81 \cdot 0,8^2}\right)} + 0,2 = 0,52 \text{ м}. \quad (2.38)$$

Розрахунок розподільчої системи для повітря

Розподільча система розраховується на витрату $q = 28,5 \cdot 20 = 570 \text{ л/с}$.

Спочатку в орієнтовному розрахунку колектор прийнятий з двох гілок діаметром 200 мм кожна, при швидкості руху повітря в них 9,1 м/с. Відгалуження для повітря розташовуються між відгалуженнями для води, тому в нашому прикладі їх по 18 од. від кожної гілки колектора з відстанню між осями 294 мм. Відгалуження спрямовані від кожної гілки до центру фільтра і мають довжину 260 мм.

На кожне відгалуження припадає витрата повітря, яка дорівнює

$$q_{\text{нов}} = 570 : 2 : 18 = 15,8 \text{ л/с}.$$

Приймаємо діаметр відгалужень 35 мм, при швидкості руху повітря в них 16,6 м/с. Отвори приймаємо круглими діаметром 3 мм, які

розташовуються у два ряди у напрямку вниз під кутом 45° у шаховому порядку.

Загальна кількість отворів визначається за швидкістю виходу повітря з них 50 м/с за формулою:

$$n_{\text{пов.отв.}} = \frac{4 \cdot 0,570}{50 \cdot 3,14 \cdot 0,003^2} = 1620 \text{ од.}$$

На кожному відгалуженні розташовано 45 отворів, відстань між якими в кожному ряді дорівнює:

$$L_{\text{отв.}} = \frac{2 \cdot 750 \cdot 2}{45} = 115 \text{ мм,}$$

що відповідає рекомендованому діапазону 100–180 мм.

Виконуємо уточнений розрахунок з урахуванням гідравлічних характеристик системи. Приймаємо нерівномірність розподілу води в отворах і відгалуженнях однаковою $\Delta + \Delta_{\text{кол}} = 0,01$, тоді величина $a_o = a_{\text{кол}} = 0,14$; $\mu_o = 0,54$.

Коефіцієнт гідравлічного опору дорівнює:

$$\zeta_o = \frac{0,0044 \cdot L}{d} = \frac{0,0044 \cdot 2,75}{0,035} = 0,35 < 1,0 \quad (2.39)$$

При площі перерізу відгалуження $0,00096 \text{ м}^2$ сумарна площа отворів дорівнюватиме:

$$f_{\text{отв.}} = \frac{a \cdot F}{\mu \cdot \sqrt{(1 - \zeta_o)}}, \text{ м}^2, \quad (2.40)$$

де a – характеристика трубопроводу, яка визначається залежно від допустимого ступеня нерівномірності розподілу повітря площею споруди, з урахуванням того, що загальна нерівномірність $\Delta_{\text{заг}}$ є сумою нерівномірностей розподілу у відгалуженнях Δ_0 та у колекторі $\Delta_{\text{кол}}$, причому має бути $\Delta_{\text{заг}} = \Delta_0 + \Delta_{\text{кол}} \cdot 0,02$;

F – площа поперечного перерізу даного трубопроводу, м^2 ;

μ – коефіцієнт витрати; для відгалужень, що знаходяться в зернистому шарі, визначається залежно від діаметра зерен, а при їхньому розташуванні в гравійному шарі приймається $m = 0,54$.

$$f_{\text{отв.}} = \frac{0,14 \cdot 0,00096}{0,54 \cdot \sqrt{(1 - 0,35)}} = 0,000305 \text{ м}^2,$$

звідси швидкість витoku повітря з отворів дорівнюватиме:

$$V_{\text{нов.отв.}} = \frac{0,0159}{0,000305} = 52 \text{ м/с,}$$

що лише дещо відрізняється від рекомендованої швидкості 50 м/с.

При прийнятому діаметрі отворів 3 мм, їх кількість на одному відгалуженні становитиме:

$$n_{\text{отв.пов.}} = \frac{0,000305 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,003^2} = 44 \text{ од.}$$

Крок отворів у кожному з двох рядів 125 мм, що знаходиться в рекомендованих межах.

Коефіцієнт опору колектора дорівнює:

$$\zeta_{\text{кол.}} = \frac{0,0044 \cdot 6}{0,2} = 0,132.$$

Загальний коефіцієнт опору відгалужень дорівнюватиме:

$$\Psi_{\text{заг}} = \frac{1 - \zeta_0}{\sin^2\left(\frac{a_0 \cdot 180}{3,14}\right)} + 0,35, \quad (2.41)$$

де ζ_0 та a_0 – параметри для відгалужень;

$$\Psi_{\text{заг}} = \frac{1 - 0,35}{\sin^2\left(\frac{0,14 \cdot 180}{3,14}\right)} + 0,35 = \frac{0,65}{0,1396^2} + 0,35 = 33,68. \quad (2.42)$$

Визначаємо коефіцієнт витрати для колектора:

$$\mu_{\text{кол}} = \sqrt{\frac{1}{5,5 + \Psi_{\text{заг}}}} = \sqrt{\frac{1}{5,5 + 33,68}} = 0,16. \quad (2.43)$$

Визначаємо площу перерізу колектора за формулою:

$$F_{\text{кол}} = \frac{\mu_{\text{кол}} \cdot \sum f \cdot \sqrt{(1 - \zeta_{\text{кол.}})}}{a_{\text{кол}}}, \text{ м}^2, \quad (2.44)$$

де $\sum f$ – сумарна площа перерізів відгалуджень:

$$\sum f = \frac{3,14 \cdot 0,035^2}{4} \cdot 36 = 0,0346 \text{ м}^2.$$

$$F_{\text{кол}} = \frac{0,16 \cdot 0,0346 \cdot \sqrt{(1 - 0,132)}}{0,14} = 0,0368 \text{ м}^2.$$

Цій площі відповідає діаметр труби 0,22 м. Приймаємо діаметр колектора 200 мм, зі швидкістю руху повітря в ньому 9,1 м/с, тобто в межах рекомендованої.

У підсумку повітряний колектор являє собою трубопровід діаметром 200 мм, з відгалуженнями діаметром 35 мм з кроком 294 мм, з отворами у відгалуженнях діаметром 3 мм з кроком між ними в кожному з двох рядів 145 мм.

Магістральний повітропровід приймаємо діаметром 200 мм, при швидкості руху повітря в ньому 18,2 м/с. Магістраль прокладається на висоті на 3 м вище водозливу і опускається стояком до позначки прокладки колектора.

Підбір промивних пристроїв для водоповітряного промивання.

Прийнята схема промивання фільтрів від промивної вежі. Об'єм вежі розраховуємо на два промивання за формулою:

$$W_B = \frac{2 \cdot f_{\phi} \cdot \omega_{\text{пр}} \cdot 60 \cdot \tau_{\text{пр}}}{1000} = \frac{2 \cdot 28,5 \cdot 7 \cdot 60 \cdot 6}{1000} = 143,6 \text{ м}^3. \quad (2.45)$$

Приймаємо типову вежу місткістю 150 м³ з висотою бака 6,5 м.

Визначаємо втрати напору у фільтрі під час водяного промивання:

Визначаємо втрати напору в дренажній системі. Відношення площі отворів до площі колектора:

$$\omega = \frac{0,0025 \cdot 28,5}{\frac{3,14 \cdot 0,45^2}{4}} = 0,453.$$

Коефіцієнт гідравлічного опору дорівнює:

$$\zeta = \frac{2,2}{0,453^2} + 1 = 11,72.$$

Втрати напору обчислюємо за формулою:

$$h_{\text{др.}} = \frac{\zeta \cdot V_{\text{к}}^2}{2g} + \frac{V_{\text{б.в.}}^2}{2g}, \text{ м}, \quad (2.46)$$

де ζ – коефіцієнт гідравлічного опору;

$V_{\text{к}}$ – фактична швидкість промивної води на початку колектора;

$V_{\text{б.в.}}$ – фактична швидкість у бічних відгалуженнях.

$$h_{\text{др.}} = \frac{11,72 \cdot 1,02^2}{2g} + \frac{1,68^2}{2g} = \frac{11,72 \cdot 1,02^2}{2 \cdot 9,81} + \frac{1,68^2}{2 \cdot 9,81} = 0,8 \text{ м};$$

Втрати напору в підтримуючих шарах визначаємо за формулою:

$$h_{\text{шш}} = 0,22 \cdot N_{\text{шш}} \cdot \omega_{\text{пр}} = 0,22 \cdot 0,5 \cdot 7 = 0,77 \text{ м}. \quad (2.47)$$

Втрати напору в зернистому наповнювачі визначаємо за формулою:

$$h_{\text{фи}} = (a + b \cdot \omega_{\text{пр}}) \cdot 1,2, \text{ м}, \quad (2.48)$$

де a та b – параметри, які дорівнюють 0,85 та 0,04 для завантаження із крупністю зерен 1,0–2,0 мм.

$$h_{\text{фи}} = (0,85 + 0,04 \times 7) \cdot 1,2 = 1,36 \text{ м}.$$

Відмітка жолоба (водозливу) $Z_{\text{ж}}$ від дна фільтра дорівнює сумі висот підтримуючого шару, завантаження та води, тобто:

$$Z_{\text{ж}} = 0,500 + 1,200 + 0,450 = 2,150 \text{ м}.$$

Відмітку дна бака вежі розраховуємо з урахуванням суми втрат напору в трубопроводі, які орієнтовно дорівнюють $\sum h = 1,500$ м:

$$Z_{\text{дб}} = Z_{\text{ж}} + h_{\text{д}} + h_{\text{пш}} + h_{\text{фс}} + \sum h + 1,5, \text{ м}, \quad (2.49)$$

де $Z_{\text{ж}}$ та $Z_{\text{нр}}$ – відмітки відповідно верхнього краю жолоба та нижнього рівня води в резервуарі з чистою водою;

1,500 – резерв напору.

$$Z_{\text{дб}} = 2,150 + 1,540 + 0,770 + 1,040 + 1,500 + 1,500 = 8,500 \text{ м}.$$

Відмітка верхнього рівня води у вежі:

$$Z_{\text{вб}} = 8,500 + 6,500 = 15,000 \text{ м}.$$

Відмітку насоса для наповнення башти розраховуємо за формулою:

$$Q_{\text{н}} = \frac{W_{\text{в}} \cdot N_{\text{ф}}}{(T_{\text{ст}} - n_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{пр}})} = \frac{144 \cdot 6}{(24 - 2 \cdot 0,1)} = 36,3 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (2.50)$$

Вежа заповнюється насосом з РЧВ з приблизною відміткою нижньої межі рівня води $Z_{\text{нр}} = -4,000$. Напір насоса повинен бути не меншим, ніж визначений за формулою:

$$H_{\text{н}} = Z_{\text{вб}} - Z_{\text{нр}} + \sum h_{\text{пр}} + 1,5 = 15,0 + 4,0 + 1,0 + 1,5 = 21,5 \text{ м}, \quad (2.51)$$

де $Z_{\text{вб}}$ – позначка верхнього рівня води в баку вежі, м;

$\sum h_{\text{пр}}$ – втрати напору в трубопроводі під час поповнення промивного запасу вежі, м;

1,0 – приблизні втрати напору в подаючому трубопроводі, м.

Для подачі води приймаємо горизонтальний консольний відцентровий насос типу Grundfos NK 50-200/219 із робочими параметрами $Q = 35 \text{ м}^3/\text{год}$ та

$H = 22,5$ м. Насос обладнується асинхронним електродвигуном потужністю 5,5 кВт, 2900 об/хв, та призначений для перекачування чистої води в системах господарсько-питного водопостачання. Передбачаємо один резервний насос.

Повітродувний пристрій (повітродувка, компресор) повинен забезпечувати пусковий та промивний режими роботи. У пусковому режимі тиск приблизно дорівнює подвоєній висоті стовпа води у фільтрі, відраховуючи від дна, а витрата повітря – 5–10 % від розрахункової, визначеної за формулою:

$$Q_{\text{повітродув.}} = 0,06 \cdot \omega_{\text{п}} \cdot f_{\text{ф}} = 0,06 \cdot 20 \cdot 28,5 = 34,3 \text{ м}^3/\text{хв}. \quad (2.52)$$

Розрахунковий напір повітродувки приймаємо таким, що дорівнює сумі висоти стовпа води у фільтрі та втрат напору в комунікації, що дорівнює 1,0 м, із запасом 0,5 м:

$$H_{\text{п}} = 2,15 + 1,0 + 0,5 = 3,65 \text{ м}.$$

Для подачі повітря на систему аерації приймаємо повітродувку турбінного типу Grundfos HST 60–80 з продуктивністю 3000–4200 м³/год та робочим тиском до 0,15 МПа. Установка оснащена системою частотного регулювання продуктивності, автоматичним контролем тиску та інтеграцією в систему SCADA. Повітродувка забезпечує стабільну подачу повітря в аераційні системи при мінімальних енергетичних витратах. Передбачаємо одну резервну повітродувку.

2.4 Розрахунок споруд для обробки промивних вод фільтрів

Для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, а також скорочення витрат очищеної води на власні технологічні потреби, на водоочисній станції передбачається впровадження замкненого (оборотного) циклу використання промивних вод.

В роботі передбачена технологічна схема обробки промивних вод фільтрів, яка включає збір забруднених промивних вод з подальшим їх спрямуванням до відстійників для прояснення. У відстійниках відбувається

процес гравітаційного осадження завислих речовин, результатом чого є природне розділення потоку на прояснену воду та осад.

Прояснена вода після відстоювання повертається в технологічний цикл шляхом перекачування насосами до потоку вихідної води перед фільтрами, що забезпечує її повторне очищення та дозволяє знизити водоспоживання станції на власні потреби.

У нижній частині відстійників відбувається ущільнення осаду.

Ущільнений шлам періодично видаляється та перекачується на спеціально облаштовані майданчики для природного підсушування.

На піскових майданчиках здійснюється подальше зневоднення осаду протягом орієнтовно 14 діб за рахунок випаровування вологи та фільтрації через дренажний шар.

Після завершення процесу підсушування зневоднений осад може бути вивезений на утилізацію або захоронення відповідно до вимог природоохоронного законодавства.

Кількість резервуарів-відстійників має становити не менше двох і визначається за формулою:

$$n = \frac{N_{\phi} \cdot t \cdot n_{\text{пр}}}{T_{\text{ст}}}, \text{ од.}, \quad (2.53)$$

де N_{ϕ} – кількість фільтрів на станції;

t – період перебування промивних вод у відстійнику, год;

$n_{\text{пр}}$ – кількість промивок кожного фільтра протягом доби;

$T_{\text{ст}}$ – тривалість роботи станції протягом доби, год.

$$n = \frac{6 \cdot 4,5 \cdot 2}{24} = 2,2 \text{ шт.}$$

Приймаємо 2 резервуари.

Об'єм води, необхідний для одного промивання одного фільтра, становить 84 м^3 . Отже, об'єм зони прояснення резервуара-відстійника повинен бути не менше $W_{\text{пр}} = 84 \text{ м}^3$. Приймаємо розміри зони прояснення в плані $5,0 \text{ м} \times 7,0 \text{ м}$ і висотою $2,5 \text{ м}$. Висота захисної зони приймається рівною $0,3 \text{ м}$.

Будівельна висота, тобто відстань від рівня води до верху резервуара, становить 0,5 м.

Зона накопичення осаду виконується з похилими під кутом 45° стінками, з двома конусами в резервуарі для зменшення його висоти.

Об'єм зони накопичення осаду $W_{oc} = 29,7 \text{ м}^3$, визначений за об'ємом конусної частини відстійника.

Кількість заліза, у розрахунку на $\text{Fe}(\text{OH})_3$, що випадає в осад за добу, визначаємо за формулою:

$$q = \frac{107 \cdot Q \cdot C_{Fe}}{56 \cdot 1000}, \text{ кг/добу}, \quad (2.54)$$

де Q – повна продуктивність станції, $\text{м}^3/\text{добу}$;

C_{Fe} – вміст заліза у воді, мг/л ;

56 – атомна маса заліза;

107 – молекулярна маса гідроксиду заліза.

$$q = \frac{107 \cdot 26000 \cdot 8,5}{56 \cdot 1000} = 422,3 \text{ кг/добу}.$$

Об'єм осаду вологістю 96,5 % дорівнює:

$$W_{oc, \text{добу}} = \frac{100 \cdot q}{(1000 \cdot (100 - 96,5))} = \frac{100 \cdot 422,3}{(1000 \cdot (100 - 96,5))} = 12,1 \text{ м}^3/\text{добу}. \quad (2.55)$$

Тривалість перебування осаду у відстійнику зазвичай становить 0,3–14 діб.

У нашому випадку:

$$T_{oc} = \frac{W_{oc}}{W_{oc, \text{добу}}} = \frac{29,7}{12,1} = 2,5 \text{ доби}, \quad (2.56)$$

тобто об'єм зони осаду у відстійнику є достатнім.

Визначення діаметрів трубопроводів наведено в таблиці 2.2.

Осад, ущільнений у резервуарах-відстійниках, являє собою гідроксид заліза – малонебезпечну речовину 4 класу небезпеки, і його можна складувати на полігонах промислових або побутових відходів або в накопичувачах. Для зменшення об'єму осад піддається зневодненню.

Найпростішими спорудами для зневоднення осаду є майданчики зневоднення осаду.

Таблиця 2.2 – Розрахунок трубопроводів споруд для обробки промивних вод

| Призначення трубопроводу | Формула визначення витрати | Витрата q , л/с | Діаметр d , мм | Швидкість V , м/с | Гідрравлічний ухил i |
|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------|---------------------|------------------------|
| Скидання промивних вод у відстійник | Промивна витрата фільтра $q_{пр}$ | 200 | 400 | 1,5 | 0,0076 |
| Відкачування проясненої води | $\frac{W_{проясн}}{3,6 \cdot t_3}$ | $\frac{84}{3,6 \cdot 1} = 23,3$ | 125 | 1,4 | 0,031 |
| Відкачування осаду | $\frac{W_{ос}}{3,6 \cdot t_4}$ | $\frac{12,1}{3,6 \cdot 2,5} = 1,3$ | 80 | 1,2 | 0,031 |
| Переливний трубопровід | $q_{пр}$ | 200 | 350 | 1,9 | 0,015 |
| Стічна вода з дренажного приямка | — | — | 100 | — | |

При тривалому зберіганні осаду на майданчиках гідроксид заліза піддається старінню і переходить з аморфного стану в кристалічний. Це призводить до зменшення фільтраційного опору осаду і збільшення його водовіддаючої здатності. Основну масу води з осаду вдається відводити через фільтруюче підґрунтя з крупнозернистого піску. При підсушуванні вологість осаду знижується до 50–60 %. Навантаження осаду на майданчики з фільтруючою основою може бути прийнято від 6 до 10 м³/м².

2.5 Фторування води

Фторування питної води в Житомирській області є необхідним заходом для профілактики стоматологічних захворювань (карієсу) у населення, оскільки природний вміст фтору в підземних джерелах регіону часто є недостатнім (менше 0,5 мг/дм³ при нормі 0,7–1,5 мг/м³).

Як реагент для фторування в кваліфікаційній роботі приймаємо використання кремнефтористоводневої кислоти (H₂SiF₆). Перевагами цього

реагенту є його висока розчинність, відносно низька вартість та простота автоматизації процесу дозування у рідкому вигляді.

Процес фторування реалізується на фінальній стадії очищення води – безпосередньо перед подачею у резервуари чистої води (РЧВ), що забезпечує рівномірне змішування.

Кремнефтористоводнева кислота постачається в автоцистернах і перекачується у ємності для зберігання через закриту систему з використанням насосів для агресивних середовищ.

Кислота постачається у вигляді 20–30 %-ого розчину. Приймаємо концентрацію технічного продукту 25 % (масова частка). Оскільки H_2SiF_6 постачається у стабільній концентрації, приготування додаткового робочого розчину не потребується, що виключає необхідність у баках для розведення та додаткових мішалок. Це значно підвищує безпеку експлуатації та зменшує ризики витоку реагенту. Система підключена безпосередньо до витратних ємностей через гнучкі хімістійкі шланги.

Робочий розчин подається мембранними насосами-дозаторами, які синхронізовані з витратомірами (лічильниками води) на виході станції. Це дозволяє підтримувати постійну концентрацію фтору незалежно від коливань добового споживання води.

Всі трубопроводи від ємності до точки введення мають бути виконані з PE (поліетилену) або PVDF (полівініліденфториду). Використання металевих деталей категорично заборонено через високу корозійну активність реагенту.

У місці введення реагенту передбачено статичний змішувач, який гарантує повне розподілення розчину у потоці очищеної води протягом декількох секунд.

Дозу реагенту для фторування води D_ϕ визначаємо за формулою:

$$D_\phi = \frac{(m_\phi \cdot C_\phi - \Phi) \cdot K_\phi}{C_p}, \text{ мг/дм}^3, \quad (2.57)$$

де m_ϕ – коефіцієнт, який залежить від місця введення фтору в оброблювану воду; за умови введення фтору в очищену воду дорівнює 1;

C_{ϕ} – вміст фтору в обробленій воді, мг/дм³;

Φ – вміст фтору у вихідній воді, мг/дм³;

K_{ϕ} – вміст фтору в реагенті. Молекулярна маса H₂SiF₆ дорівнює 144 г/моль, а фтору в ній – $6 \times 19 = 114$ г/моль. Тоді коефіцієнт перерахунку дорівнює $144 / 114 = 1,26$;

C_p – вміст чистого реагенту в технічному продукті, %.

Оскільки споживання води влітку вище, а взимку нижче, до того ж змінюється реакційна здатність реагентів, приймаємо фторування літньою та зимньою дозами для досягнення цільової концентрації відповідно C_{ϕ} в літній період 0,9 мг/дм³, в зимній – 1,1 мг/дм³.

Тоді

$$D_{\phi}^{\text{л}} = \frac{(1 \cdot 0,9 - 0,5) \cdot 1,26}{0,25} = 2,02 \text{ мг/дм}^3,$$

$$D_{\phi}^{\text{з}} = \frac{(1 \cdot 1,1 - 0,5) \cdot 1,26}{0,25} = 3,02 \text{ мг/дм}^3.$$

Для приготування та зберігання реагенту передбачається 2 ємності (1 робоча + 1 резервна) з хімічно стійкого поліетилену (HDPE). Розрахунковий запас реагенту передбачаємо на 30 діб.

Добова витрата 25 %-ої кислоти густиною 1,3 кг/л дорівнює:

- для літнього періоду – $26\,000 \times 2,02 \times 10^{-6} = 0,053$ т/добу = 40,8 л/добу;

- для зимового періоду – $26\,000 \times 3,02 \times 10^{-6} = 0,078$ т/добу = 60 л/добу.

Місткість ємності для зберігання дорівнює 2 м³.

Ємність витратного баку приймаємо 500 л, що забезпечує запас на 8 діб автономної роботи (в зимовий період). Бак виконується з HDPE (поліетилену високої щільності).

Для забезпечення високої точності дозування та стійкості до агресивної кислоти обрано промислові насоси-дозатори серії Grundfos DDA (Digital Dosing). Приймаємо насос-дозатор Grundfos DDA 7.5-16 FCM [19] (2 робочих + 1 резервний). Це цифровий мембранний насос з кроковим двигуном. Його максимальна продуктивність становить 7,5 л/год (необхідна – 2,5–2,8 л/год із

запасом для регулювання в межах 10–100%). Максимальний тиск 16 бар (достатньо для подолання опору напірного трубопроводу).

Головка насоса виконана з PVDF (полівініліденфторид) – матеріалу з максимальною хімічною стійкістю до кислот.

Робота з кремнефтористоводневою кислотою вимагає суворого дотримання правил техніки безпеки: використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) органів дихання, очей та шкіри, оскільки продукт є токсичним та корозійним. У приміщенні реагентного господарства необхідно встановити систему контролю парів фтористих сполук. Обов'язкова наявність припливно-витяжної вентиляції з кратністю обміну не менше 10 об'ємів на годину. Підлога має бути покрита кислотостійкою плиткою, передбачений прਿਆмок для збору можливих проливів реагенту. Також передбачена наявність фонтанчика для промивання очей та аварійного душу.

Для забезпечення ефективного фторування води принципове значення має не лише точність дозування, а й швидкість та якість змішування реагенту з основним потоком води. Оскільки кремнефтористоводнева кислота має густину, вищу за воду, без якісного змішування можливе виникнення розшарування або утворення зон із передозуванням та недодозуванням.

Для забезпечення гарантованого перемішування кремнефтористоводневої кислоти з потоком очищеної води проєктом передбачено встановлення статичного змішувача трубного типу Koflo 300 Series (серія 300) [20] з корпусом з PVC (полівінілхлориду) або PVDF (для повної хімічної стійкості). Спіральні лопаті змішувача забезпечують турбулентність при низьких втратах тиску.

Статичний змішувач слід встановлювати на прямій ділянці трубопроводу (довжиною не менше 3-5 діаметрів труби до і після змішувача) для забезпечення стабільного гідравлічного режиму.

Для контролю якості змішування передбачено встановлення датчику залишкового фтору на відстані 15-20 м після змішувача. Це дозволить в

режимі реального часу визначати концентрацію фтору для по всьому перерізу потоку.

2.6 Знезараження води

На очисній станції для знезараження води застосовується ультрафіолетове опромінення. Для додаткової дезінфекції та забезпечення пролонгованої знезаражувальної дії передбачено використання гіпохлориту натрію, який отримують шляхом електролітичного розчину кухонної солі.

Знезараження ультрафіолетовим випромінюванням за допомогою бактерицидних ламп проводиться для вод підземних джерел, які мають коли-індекс не більше 1000 од/л при вмісті заліза не більше 0,2 мг/л [18].

Бактерицидні установки встановлюють на всмоктувальних і напірних лініях насосів другого підйому в окремих будівлях або приміщеннях. Робочих установок (секцій) повинно бути не більше п'яти, резервних – одна.

Потужність потоку бактерицидної енергії, Вт, визначають за формулою:

$$F_{\text{бак}} = \frac{q_p \cdot \alpha_{\text{пог}} \cdot k \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right)}{1563,4 \cdot \eta_{\text{л}} \cdot \eta_0}, \quad (2.58)$$

де q_p – розрахункові витрати води, м³/год,

$\alpha_{\text{пог}}$ – коефіцієнт поглинання опромінюваної води, см⁻¹ (для глибоких підземних вод – 0,1 см⁻¹, для інших – 0,15 см⁻¹);

$k = 2500$ мкВт·с/см² – коефіцієнт опору бактерій;

$\eta_{\text{л}}$ – коефіцієнт використання бактерицидного потоку ламп (для занурених ламп – 0,9, незанурених – 0,75);

$\eta_0 = 0,9$ – коефіцієнт використання бактерицидного випромінювання;

$\left(\frac{P}{P_0}\right)$ – ступінь знезараження.

Витрати електроенергії, Вт-год/м³, визначають за формулою:

$$E = N \cdot \frac{n_{\text{л}}}{q_p}, \quad (2.59)$$

де N – номінальна потужність однієї лампи, Вт;

$n_{\text{л}}$ – кількість ламп, шт.

Для знезараження очищеної підземної води витратою 26 000 м³/добу передбачено дві ультрафіолетові установки типу TrojanUVSwift 24 [21] – 1 робоча + 1 резервна. Установки забезпечують знезараження води при витраті 1083 м³/год та гарантованій дозі ультрафіолетового опромінення не менше 40 мДж/см². Реактори оснащені автоматичною системою очищення кварцових чохлах, датчиками інтенсивності УФ-випромінювання, системою автоматичного регулювання потужності ламп та інтегровані в загальну систему диспетчерського контролю станції.

Установка TrojanUVSwift 24 (див. рис. 2.3) призначена для знезараження питної води УФ випромінюванням та застосовується на станціях водопідготовки комунального і промислового водопостачання. Установка забезпечує інактивацію патогенних мікроорганізмів без зміни фізико-хімічного складу води та без утворення побічних продуктів дезінфекції.



Рис. 2.3 – Установка УФ-опромінювання води TrojanUVSwift 24

Основним елементом установки є горизонтальний реактор із нержавіючої сталі марки AISI 316L, усередині якого розміщені високоефективні амальгамні УФ лампи низького тиску (див. рис. 2.4). Лампи встановлені у кварцових захисних чохлах, що запобігають їх контакту з водою та забезпечують максимальне проходження УФ випромінювання.

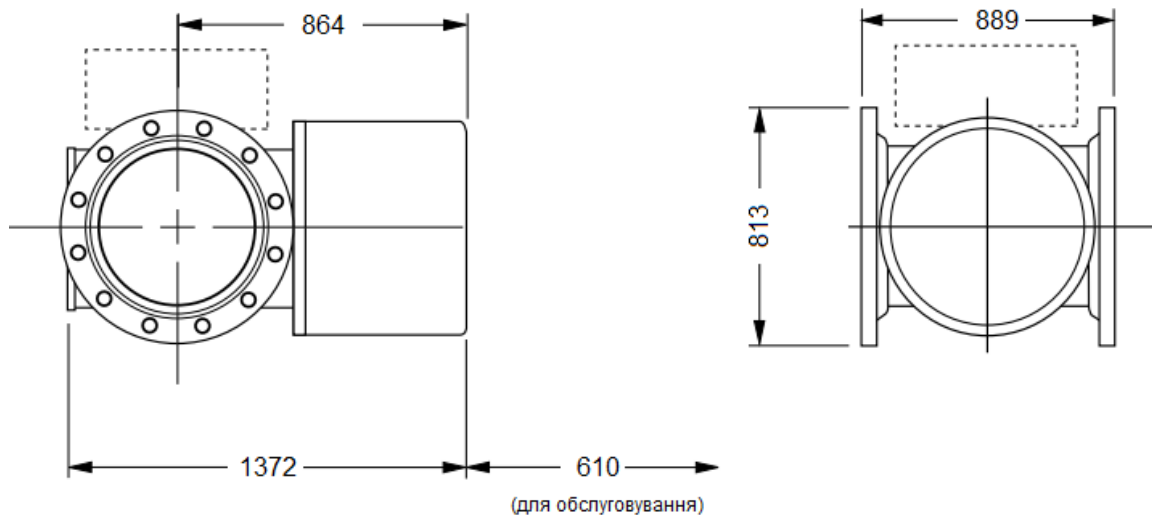


Рис. 2.4 – Конструктивні параметри установки TrojanUVSwift 24

Установка обладнана системою автоматичного очищення кварцових чохлів ActiClean, датчиками інтенсивності УФ-випромінювання, витратоміром та системою автоматичного регулювання потужності ламп залежно від витрати води та її оптичних характеристик. Робота установки контролюється програмованим логічним контролером із можливістю передачі даних до системи диспетчерського управління (SCADA).

Очищена вода надходить у корпус реактора та рівномірно розподіляється по його перерізу. Під час проходження через реактор вода опромінюється УФ випромінюванням із довжиною хвилі близько 254 нм, яке генерується амальгамними лампами низького тиску.

УФ випромінювання проникає крізь клітинні оболонки мікроорганізмів і пошкоджує їхню ДНК та РНК. У результаті бактерії, віруси та найпростіші втрачають здатність до розмноження та стають біологічно неактивними. Процес знезараження відбувається практично миттєво під час проходження води через реактор.

Система автоматичного керування безперервно контролює інтенсивність УФ-випромінювання, витрату води, температуру ламп та інші робочі параметри. За зміни витрати або якості води потужність ламп автоматично регулюється для забезпечення гарантованої дози опромінювання не

менше 40 мДж/см². У разі зниження інтенсивності випромінювання нижче допустимого рівня система подає сигнал тривоги та може автоматично перевести установку в безпечний режим роботи.

Для підтримання ефективності знезараження кварцові чохла ламп періодично очищаються автоматичною механічною системою без зупинки роботи установки. Це дозволяє запобігти утворенню відкладень і забезпечити стабільне проходження УФ випромінювання протягом усього терміну експлуатації.

Для очищеної підземної води питомі витрати електроенергії становлять приблизно 0,004 – 0,008 кВт·год/м³. Приймаємо 0,005 кВт·год/м³. Тоді добове споживання дорівнює:

$$26000 \cdot 0,005 = 130 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}$$

Середня потужність установки:

$$P = \frac{130}{24} = 5,4 \text{ кВт.}$$

З урахуванням пікових режимів та резерву приймаємо встановлену потужність вузла УФ-знезараження 15 кВт.

Установка УФ опромінення встановлюється в приміщенні з розмірами: довжина – 12 м, ширина – 8 м, висота – 3,6 м.

В приміщення передбачено встановлення:

- підйомно-транспортного обладнання вантажопідйомністю 1 т;
- трапу для аварійного спорожнення;
- припливно-витяжної вентиляції;
- опалення (температура має бути не нижче +5 °С).

Після УФ-знезараження передбачено введення розчину гіпохлориту натрію дозою 0,3–0,5 мг/дм³ для забезпечення залишкового дезінфекційного ефекту у розподільчій мережі.

В склад установки для приготування розчину гіпохлориту натрію входять електролізери та різномісні баки. Розчин солі 10 %-ої концентрації подають у бак постійного рівня, звідки він витікає з постійними витратами. Після наповнення бачка дозатора спрацьовує сифон й зливає певний об'єм

розчину в електролізер. Під дією електричного струму в електролізері утворюється гіпохлорит натрію. Нові порції розчину солі виштовхують гіпохлорит натрію у витратний бак, із якого він дозується насосом дозатором.

Електролізери розміщують у сухому опалюваному приміщенні, їх повинно бути не більше трьох, один з яких резервний. На приготування 1 кг активного хлору використовується 15–8 кг кухонної солі.

Слід передбачати вологе зберігання солі. Місткість баків для зберігання солі – 1,5 м³ на 1 т солі. Кількість баків не менше двох. На складі зберігається 30-ти добовий запас.

Бак-накопичувач повинен вміщувати об'єм гіпохлориту натрію, якого вистачить для роботи не менше ніж на 12 год. Тривалість контакту хлору і гіпохлориту з водою повинна бути не менше 60 хв.

З огляду на те, що хлорування води здійснюється лише для забезпечення вмісту в ній залишкового вільного хлору, приймаємо дозу хлору $D_{Cl} = 0,5$ мг/дм³ (максимальне значення). Тоді добові витрати хлору становитимуть:

$$Q_{д. Cl} = \frac{Q_{доб.р} \cdot D_{Cl}}{1000} = \frac{26\,000 \cdot 0,5}{1\,000} = 13 \text{ кг/добу.} \quad (2.60)$$

Застосовуємо установку для приготування гіпохлориту натрію Grundfos Selcorperm SES-500-M/K-ES [22] (продуктивність 13 кг/добу) (див. рис. 2.5). Передбачаються 1 робоча і 1 резервна установки.

Необхідна кількість кухонної солі:

$$Q_c = 12 \cdot 13 = 156 \text{ кг/добу.}$$

Передбачається мокре зберігання солі.

Місткість баків дорівнює:

$$W_c = \frac{1,5 \cdot Q_c \cdot 30}{1000} = \frac{1,5 \cdot 156 \cdot 30}{1000} = 7,02 \text{ м}^3. \quad (2.61)$$

Приймаємо кількість баків – 2 од., кожний розмірами 2 м × 2 м × 1 м, місткість кожного 4 м³.

Місткість баків-накопичувачів гіпохлориту натрію дорівнює:

$$W_{ГН} = \frac{Q_{доб.р} \cdot t \cdot D_{Cl}}{24 \cdot 10\,000 \cdot 1 \cdot 1} = \frac{26\,000 \cdot 12 \cdot 0,5}{24 \cdot 10\,000 \cdot 1 \cdot 1} = 0,65 \text{ м}^3. \quad (2.62)$$

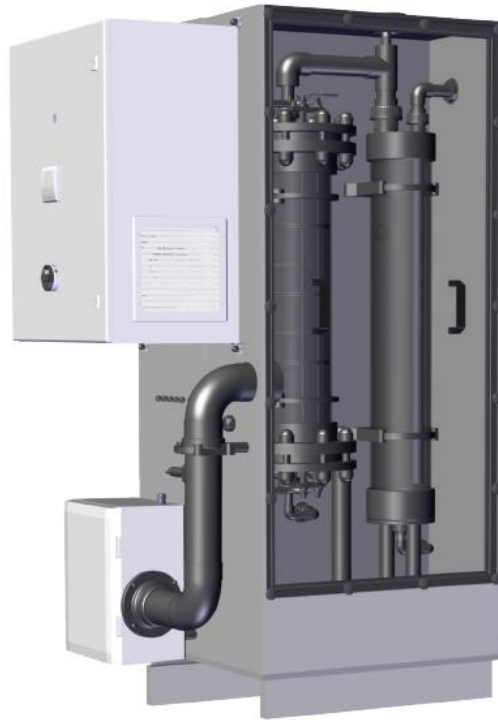


Рис. 2.5 – Установка для приготування гіпохлориту натрію
Grundfos Selcoperm SES-500-M/K-ES

Для електролітичного гіпохлориту натрію зазвичай вміст активного хлору становить 0,8–1,0 %. Приймаємо $C = 0,8 \% = 8 \text{ г/л}$.

Об'єм розчину гіпохлориту натрію дорівнює:

$$V = \frac{Q_{\text{д.сl}}}{C} = \frac{13 \cdot 1000}{8} = 1625 \text{ л/добу} = 67,7 \text{ л/год.} \quad (2.63)$$

Для дозування розчину гіпохлориту натрію приймаємо мембранний дозувальний насос з PTFE-покриттям Grundfos DDA 12-10 [23] (1 робочий + 1 резервний).

3 ЗАХИСТ ОБЛАДНАННЯ ВІД КОРОЗІЇ

3.1 Види та класифікація корозійних процесів

Корозія – руйнування металу внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії його з навколишнім середовищем [24].

За механізмом реакцій взаємодії металу з середовищем розрізняють такі основні причини корозії [24, 25]:

1) Хімічні реакції – виникають у результаті прямої взаємодії металу з агресивними компонентами навколишнього середовища, такими як кислоти, луги, солі або кисень. Наприклад, утворення іржі на залізі відбувається при контакті з киснем і водою, що призводить до утворення оксиду заліза. Також хімічна корозія проявляється при взаємодії металів із сірководнем (H_2S), що призводить до утворення сульфідних плівок на поверхні труб. Це явище особливо небезпечне для сталевих трубопроводів, оскільки призводить до їхнього поступового руйнування.

2) Мікробіологічна корозія – викликана діяльністю мікроорганізмів, які сприяють руйнуванню металів. Бактерії, такі як сульфатвідновлюючі (SRB), утворюють агресивні продукти життєдіяльності, сірководень, який прискорює корозійні процеси. Усередині трубопроводів мікробіологічна корозія може проявлятися у вигляді локалізованих осередків, що ускладнює своєчасне виявлення та вимагає регулярного моніторингу. Особливо важливо враховувати мікробіологічну корозію в умовах підземних свердловин і трубопроводів, де відсутній вільний доступ для візуального контролю.

3) Електрохімічна корозія – найпоширеніший тип корозії, що виникає внаслідок взаємодії металів з електролітами, які утворюють гальванічні пари. У трубопроводах цей процес може посилюватися через наявність води, солей та інших іонних сполук, що прискорює руйнування металу. Різниця потенціалів між різними ділянками металевої поверхні призводить до утворення корозійних осередків, де одна ділянка металу окиснюється, а інша відновлюється.

За видом корозійного середовища розрізняють [24]:

- газову – корозія в газовому середовищі при високих температурах;
- атмосферну – корозія металу в природній атмосфері;
- рідинну – корозія в розчинах електrolітів;
- підземну – корозія металу в ґрунті;
- блукаючими струмами – корозія трубопроводів у результаті дії струмів витоку під час роботи рейкового електрифікованого транспорту;
- контактну – корозія в результаті сполучення різнорідних металів у електропровідному середовищі.

За видом корозійних руйнувань поверхні металу корозію поділяють на загальну (рівномірну та нерівномірну) і місцеву.

При рівномірній корозії проблема характеризується однорідним руйнуванням поверхні металу по всій його площі. Це один із найбільш передбачуваних видів корозії, який легко контролювати та уповільнювати при використанні захисних покриттів та/або інгібіторів. Така корозія частіше виникає при контакті обладнання з агресивними рідинами або газами (кислоти, солі тощо), під впливом атмосферних факторів (волога, кисень), а також у разі відсутності або порушення властивостей захисних покриттів.

Місцева корозія (пітінг) зазвичай проявляється у вигляді дрібних, але глибоких отворів або точкових пошкоджень на поверхні металу. Цей вид корозії вкрай небезпечний, оскільки може призвести до руйнування матеріалу навіть при незначних загальних втратах маси.

Причини виникнення місцевої корозії [25]:

- наявність агресивних іонів, таких як хлориди або сульфідиди;
- пошкодження або дефекти в захисних покриттях;
- наявність сторонніх включень або забруднень на поверхні металу.

Гальванічна корозія виникає при контакті двох різних металів у присутності електrolіту, що призводить до прискореного руйнування більш активного металу. Гальванічна корозія зустрічається в трубопровідних системах, оскільки тут використовуються різнорідні матеріали та присутні хімічно активні речовини.

Ерозійна корозія відбувається внаслідок спільного впливу механічного зносу та корозії на металеву поверхню, особливо в умовах руху рідин або газів. Це часто спостерігається в трубопроводах, насосах та іншому обладнанні, що працює у високошвидкісних потоках.

Корозійне розтріскування поверхні металу під дією напруги виникає при одночасному впливі корозійного середовища та механічних напружень, що призводить до утворення тріщин у металі. Цей вид пошкоджень є поширеним і досить небезпечним, оскільки може призвести до раптових відмов обладнання та виникнення аварійних ситуацій.

На швидкість корозії трубопроводу впливають внутрішні та зовнішні фактори, властиві як металу, так і корозійному середовищу. Внутрішні фактори визначаються природою металу, його складом, структурою, станом поверхні, наявністю напружень. Зовнішні фактори впливають на швидкість корозії металів і визначаються природою та властивостями корозійного середовища. До них належать: концентрація іонів водню (рН), швидкість руху електроліту, температура, тиск, контакт з іншими металами, зовнішні струми.

3.2 Методи захисту від корозії

Сучасні технології дозволяють ефективно запобігати виникненню корозійних процесів, зберігаючи цілісність і працездатність металоконструкцій на тривалій термін.

Серед методів захисту обладнання від корозії можна виділити такі [24–29]:

- 1) Вибір матеріалів для обсадних труб свердловин – важливо враховувати агресивність середовища, в якому вони будуть експлуатуватися, особливо в умовах свердловинного буріння. Сталеві труби з підвищеним вмістом хрому або молібдену мають високу стійкість до іржі, спричиненої сірководнем та хлоридними іонами. Важливо також враховувати товщину стінок і здатність труб протистояти внутрішньому та зовнішньому тиску. Вибір відповідного сплаву або композиту відіграє ключову роль у подовженні

терміну експлуатації трубопроводу та зниженні витрат на його обслуговування.

2) Застосування спеціальних покриттів – один із найефективніших способів захисту трубопроводів та обладнання від корозії. Поліуретанові, епоксидні та фторополімерні покриття створюють надійний бар'єр, запобігаючи контакту металу з агресивним середовищем. Дуже важливим моментом є вибір покриття, що відповідає конкретним умовам експлуатації, будь то внутрішні або зовнішні поверхні труб, насосного обладнання або компресорних станцій. Правильне нанесення та контроль за станом покриття дозволяють значно зменшити ймовірність корозійного руйнування. Ще одна перевага покриттів: вони не тільки подовжують термін служби металевих конструкцій, але й істотно знижують витрати на ремонт та обслуговування.

3) Використання інгібіторів корозії – інгібітори додаються в робоче середовище для уповільнення хімічних реакцій, що викликають руйнування металів. Вони утворюють захисну плівку на поверхні виробу, запобігаючи його контакту з агресивними речовинами. Застосування інгібіторів особливо ефективно в трубопроводах і резервуарах, де неможливо використовувати фізичні бар'єри.

4) Застосування антикорозійних покриттів – такі склади утворюють фізичний бар'єр, що ізолює метал від агресивного середовища. Важливо правильно підібрати тип покриття – від епоксидних до поліуретанових – залежно від умов експлуатації та характеру корозійних впливів.

5) Катодний захист – метод, заснований на подачі негативного потенціалу на метал, що захищається, що запобігає його окисненню та корозії. У трубопроводах катодний захист може бути реалізований шляхом підключення зовнішнього джерела струму або використання жертвеного анода, який кородує замість основного металу. Важливо правильно розрахувати струмове навантаження та забезпечити рівномірний розподіл потенціалу по всій поверхні, щоб уникнути локальних ділянок корозії. Катодний захист

ефективний для підземних трубопроводів і резервуарів, де доступ до конструкції обмежений.

6) Анодний захист – застосовується для захисту металів, які можуть пасивуватися, таких як нержавіюча сталь, шляхом підключення їх до позитивного полюса джерела струму. В результаті цього на поверхні труб або іншого виробу формується пасивна оксидна плівка, що запобігає корозії. Анодний захист вимагає точного контролю потенціалу, щоб уникнути виходу з пасивного стану, що може призвести до прискореної корозії. Метод особливо ефективний в умовах, де метал піддається впливу агресивних середовищ, таких як кислоти.

7) Моніторинг корозії – є критично важливим елементом управління безпекою та надійністю інфраструктурних об'єктів. Процедури та технології моніторингу дозволяють своєчасно виявляти та запобігати корозійним пошкодженням, мінімізуючи ризики та витрати на ремонт.

8) Неруйнівний контроль (NDT) – включає в себе кілька методів, що дозволяють виявити внутрішні дефекти та ознаки корозії без руйнування матеріалу навіть у важкодоступних місцях. Серед найбільш ефективних методів NDT: ультразвукове сканування, рентгенографія, магнітопорошкова дефектоскопія [30].

9) Системи віддаленого моніторингу – системи дистанційного моніторингу на основі IoT (Інтернет речей), використання дронів для візуального огляду важкодоступних об'єктів, роботизовані інспекційні пристрої (роботи-контролери), бездротові сенсори для вимірювання параметрів у реальному часі, супутниковий моніторинг інфраструктури, технології машинного навчання для аналізу даних моніторингу, використання цифрових двійників для прогнозування та аналізу корозії.

Необхідно зазначити, що захист від корозії не тільки подовжує термін служби обладнання, але й істотно знижує економічні витрати на його ремонт.

Витрати на захист трубопроводів та обладнання становлять значну частину бюджету проєкту, але вони повністю виправдані в довгостроковій

перспективі. Інвестиції в якісні покриття, інгібітори та системи катодного захисту дозволяють істотно скоротити частоту аварій і продовжити термін служби сталевих труб та насосного обладнання. Грамотне планування та облік витрат на етапі проєктування можуть знизити загальні витрати на експлуатацію на 30–40 % [26].

Своєчасний захист дозволить уникнути дорогих ремонтів та заміни трубопроводів. Експлуатаційні витрати на підтримку працездатності свердловин і компресорних станцій знижуються в середньому на 50 % (за умови застосування раціональних методів захисту). Це не тільки економить кошти, але й запобігає простоям [29].

Необхідно враховувати й екологічний аспект. Захист труб від корозії істотно зменшує ризики витоків. А це означає, що рідини, що транспортуються, не потрапляють у ґрунт та водойми. У зв'язку з цим методи захисту особливо важливі для збереження екосистем.

Крім цього, до екологічних переваг застосування методів захисту від корозії можна віднести подовження терміну служби обладнання та зменшення потреби у виробництві нових матеріалів, а також зменшення обсягу відходів, пов'язаних з ремонтом та заміною обладнання.

3.3 Організація комплексної системи антикорозійного захисту

Для забезпечення надійної експлуатації обладнання очисної станції, з огляду на специфіку роботи з водою з підземного джерела (яка характеризується підвищеним вмістом заліза), для захисту обладнання від корозії необхідно використовувати комплексний підхід.

На очисній станції обладнання піддається впливу агресивних факторів, що прискорюють руйнування металів. Основним процесом тут є електрохімічна корозія, зумовлена постійним контактом металевих елементів (трубопроводи, насосне обладнання) з водою, яка виступає в ролі електроліту. Наявність розчиненого кисню (особливо після процесу спрощеної аерації під

час знезалізнення) та зміна іонного складу води створюють ідеальні умови для формування гальванічних пар.

Особливу небезпеку становить локальна корозія, яка може виникнути на внутрішніх поверхнях насосів та у зонах зварних швів обладнання.

Оскільки на станції застосовується електрохімічне отримання гіпохлориту натрію, необхідно враховувати ризик впливу активних хлорид-іонів, які сприяють виникненню точкових пошкоджень захисних пасивних плівок на металі.

Крім того, під час роботи насосного обладнання неминуче виникає ерозійна корозія, спричинена високою швидкістю потоку води, яка механічно впливає на поверхню, руйнуючи захисний шар продуктів корозії.

Для запобігання корозії на станції необхідно взяти комплексу заходів, що поєднує вибір матеріалів, фізичну ізоляцію та електрохімічні методи захисту.

Першочерговим методом є застосування антикорозійних покриттів, що ізолюють метал від агресивного середовища. Для трубопроводів і внутрішньої поверхні металевих ємностей рекомендується використання сучасних епоксидних і поліуретанових сумішей. Ці матеріали створюють надійний фізичний бар'єр, що запобігає прямому контакту води з металом, що значно знижує експлуатаційні витрати на обслуговування обладнання.

Під час вибору типу покриття необхідно враховувати, що епоксидні системи забезпечують високу адгезію та стійкість до вологи, тоді як поліуретанові склади, що найчастіше наносяться як фінішні шари, надають захисту додаткову еластичність та стійкість до ультрафіолетового випромінювання.

При проектуванні систем захисту на очисній станції дотримуватимемося таких підходів:

- 1) Відповідність нормативній базі – усі матеріали мають відповідати вимогам ДСТУ-Н Б А.3.1-29:2015 [31]. Важливо обирати склади, які мають

офіційні сертифікати відповідності та дозволені Міністерством охорони здоров'я України для використання в системах підготовки питної води.

2) Багатошарові системи – для підвищення надійності та запобігання пористості покриттів рекомендується застосовувати багатошарові схеми. Стандартною практикою для об'єктів з підвищеною корозійною агресивністю є нанесення епоксидного ґрунту (товщиною близько 80 мкм), проміжного епоксидного шару (120 мкм) та фінішного поліуретанового шару (60 мкм).

3) Якість підготовки поверхні – довговічність покриття на 80 % залежить від підготовки металу. Необхідно суворо дотримуватися вимог стандарту ДСТУ ISO 8501-1 [32], зокрема досягати ступеня очищення не нижче Sa 2½ (суцільна поверхня без видимих слідів іржі) перед нанесенням ґрунту.

4) Вибір спеціалізованих складів – для внутрішніх поверхонь резервуарів та систем очисних споруд, що контактують з водою, рекомендується використовувати матеріали типу EpoSet або спеціалізовані епоксидні покриття, які можна наносити навіть на вологий бетон або сталь без втрати адгезії.

5) Температурні режими – під час вибору матеріалів слід враховувати кліматичні умови регіону експлуатації. Сучасні промислові покриття, що використовуються в Україні, мають забезпечувати стабільність у широкому діапазоні температур, зазвичай від -40 °С до +180 °С, що гарантує цілісність бар'єру в умовах сезонних коливань.

Для захисту насосної станції, де ризик корозії підвищений через механічні навантаження та вплив розчинених газів, доцільно застосовувати електрохімічні методи. Катодний захист є ефективним засобом, що запобігає окисненню металів. В умовах роботи насосів і допоміжних резервуарів реалізація катодного захисту за допомогою жертвених анодів дозволяє перенести процес корозії з конструкційного матеріалу на більш активний метал анода.

У специфічних умовах взаємодії з хлоридами та в процесах, що вимагають високої чистоти матеріалів, може бути застосований анодний

захист, що сприяє формуванню пасивної оксидної плівки, однак цей метод вимагає суворого автоматизованого контролю потенціалу.

Ефективність антикорозійних систем повинна підтверджуватися системою моніторингу, що включає технології неруйнівного контролю. Для оцінки стану магістральних трубопроводів планується застосування ультразвукового сканування, що дозволяє виявляти приховані осередки корозії та витончення стінок без зупинки процесу очищення води. Інтеграція датчиків, що працюють у режимі реального часу, дозволить створити цифрову модель стану корозійного зносу обладнання.

Такий підхід є ключовим етапом переходу від стратегії планово-попереджувальних ремонтів до стратегії обслуговування за технічним станом. Впровадження цієї системи дозволяє сформувати «цифровий двійник» (digital twin) – динамічну віртуальну модель, яка постійно оновлюється на основі фактичних даних про стан металоконструкцій очисної станції. Збір та аналіз інформації в режимі реального часу дає змогу виявляти розвиток локальної або мікробіологічної корозії на ранніх стадіях, коли вони ще не загрожують цілісності обладнання, що дозволяє значно знизити ризики аварійних зупинок та мінімізувати експлуатаційні витрати.

Для реалізації концепції цифрового двійника корозійного стану на об'єкті водопідготовки рекомендується наступний комплекс технічних рішень:

- система бездротового моніторингу – встановлення на критичних ділянках трубопроводів та корпусах фільтрів мережі бездротових сенсорів, що вимірюють параметри середовища (рН, електропровідність, швидкість потоку, вміст розчиненого кисню). Ці дані, передані за протоколами IoT, стають вхідними параметрами для цифрової моделі, яка прогнозує швидкість корозійних процесів відповідно до зміни складу води;

- ультразвукові датчики товщинометрії – інтеграція стаціонарних ультразвукових датчиків у найбільш вразливих зонах (коліна трубопроводів, ділянки після вузлів дозування реагентів), де ризик ерозійної та піттингової

корозії є найвищим. Постійне відстеження товщини стінок металу дозволяє автоматично коригувати роботу системи захисту (наприклад, змінювати дозування інгібіторів) при виявленні ознак прискореного зносу;

- аналітичне програмне забезпечення та прогнозування – використання технологій машинного навчання для обробки потоку даних від датчиків. Програмне забезпечення цифрового двійника буде порівнювати отримані показники з теоретичними моделями корозії, що дає можливість завчасно будувати прогнози щодо залишкового ресурсу конкретного вузла та ефективно планувати сервісні роботи;

- цифровізація інспекцій – доповнення даних від стаціонарних датчиків періодичними даними неруйнівного контролю (рентгенографія, магнітопорошкова дефектоскопія), результати яких мають вноситися до цифрового двійника для верифікації моделі та підвищення точності прогнозів.

Поєднання даних онлайн-сенсорів із математичним моделюванням забезпечить високу надійність інфраструктури, дозволить персоналу бачити реальну картину корозійного зносу в режимі реального часу без необхідності проведення демонтажу чи візуального огляду важкодоступних вузлів.

Загалом, такий комплексний підхід до захисту не тільки подовжує термін експлуатації обладнання, мінімізуючи частоту дорогих аварійних ремонтів, а й безпосередньо впливає на екологічну безпеку станції. Запобігання корозійним витокам виключає ризик потрапляння реагентів та неочищеної води в ґрунт, забезпечуючи стабільну роботу станції відповідно до санітарних норм та зберігаючи природні екосистеми в районі розташування підземного джерела.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Завдання в області охорони праці

Техногенні небезпеки, що створюються технічними засобами, можуть завдавати шкоди здоров'ю працівників та спричиняти їхні травми. Шкідливі фактори переважно чинять негативний вплив на працівників, що призводить до погіршення самопочуття або захворювання.

Охорона праці визначається як система забезпечення безпеки життя та здоров'я працівників у процесі трудової діяльності, що включає правові, соціально-економічні, організаційні, технічні, психофізіологічні, санітарно-гігієнічні, лікувально-профілактичні, реабілітаційні та інші заходи, методи та засоби [33].

Метою охорони праці є скорочення соціально-економічних втрат, зумовлених умовами праці, а її предметом – дослідження стану умов праці, ідентифікація небезпечних і шкідливих факторів, їх джерел, оцінка ризиків виробничого травматизму та професійної захворюваності, розробка та широке використання комплексу заходів щодо забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці, підвищення культури виробництва.

Управління охороною праці – це діяльність держави, спрямована на забезпечення конституційних прав громадян на здорові та безпечні умови праці [34].

У загальному вигляді механізм управління охороною праці включає методи управління, функції (види діяльності) та органи управління.

Методи управління – це способи впливу на поведінку та діяльність об'єктів управління з метою зниження виробничого травматизму, загальної та професійної захворюваності шляхом створення безпечного та нешкідливого виробничого середовища [34].

Основними методами управління є: адміністративні, економічні та соціально-психологічні [34].

Адміністративні методи забезпечують державний примус до вжиття заходів з охорони праці всіма господарськими суб'єктами.

Основними інструментами адміністративного управління є законодавство з охорони праці, система стандартів та інших нормативних правових актів, а також постанови та настанови, що приймаються державними органами з охорони праці. Адміністративні методи управління передбачають також здійснення керівництва організаційно-господарськими заходами щодо реалізації державної політики з охорони праці. До таких заходів належать моніторинг стану виробничого середовища на підприємствах і в галузях, дотримання законодавства з охорони праці, організація науково-дослідних робіт, навчання, міжнародне співробітництво тощо.

Завдання адміністративних органів полягає у впливі на прийняття рішень роботодавцями, спонукаючи їх як до виконання запланованих програм у сфері охорони праці, так і до самостійного пошуку найбільш ефективних засобів для поліпшення умов праці.

Економічні методи управління в широкому сенсі об'єднують механізми, що створюють матеріальну зацікавленість роботодавців у поліпшенні умов праці. Економічні методи передбачають використання вартісних важелів, до яких можна віднести: компенсаційні виплати за нещасні випадки, травматизм і захворюваність, пов'язані з умовами праці; штрафи за порушення трудового законодавства та ризики травмування; пільгове оподаткування, пільгове кредитування, субсидування тощо [33, 34].

Соціально–психологічні методи управління – це методи морального стимулювання, які реалізуються за допомогою заходів як заохочувального характеру, так і примусового впливу на порушників трудового законодавства.

Управління охороною праці передбачає виконання цілого ряду специфічних функцій, тобто видів діяльності, що впливають на ставлення роботодавців до умов праці.

4.2 Аналіз умов праці та виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Небезпеки та шкідливі фактори, що призводять до травмування та захворюваності працівників, можуть бути реальними (очевидними) та прихованими (потенційними). Умови, за яких потенційна небезпека може реалізуватися, визначаються як причина нещасного випадку, травмування тощо.

За складом і властивостями виробничі небезпечні та шкідливі фактори поділяють на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [35].

Фізичні небезпечні та шкідливі фактори – це рухомі машини та механізми; незахищені рухомі елементи виробничого обладнання; вироби, що переміщуються; підвищена напруга в електричних мережах; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного, рентгенівського, лазерного та ультрафіолетового випромінювання; підвищений рівень вібрації та шуму; недостатнє освітлення; несприятливі метеорологічні умови тощо.

Хімічні небезпечні та шкідливі фактори – це різні хімічні елементи та їхні сполуки, що мають загальнотоксичні, подразнювальні, мутагенні, сенсibiliзуючі та канцерогенні властивості. Найбільшу канцерогенність мають миш'як, нікель, кадмій, хлорфенол, три- та тетрахлоретилен, вінілхлорид, бензапірен та інші смолисті леткі речовини [36].

До біологічних небезпечних і шкідливих факторів належать мікро- та макроорганізми (бактерії, віруси, гриби, рослини, тварини). Їхній вплив на людину може призводити до травм та інфекційних захворювань [37].

Психофізіологічні фактори включають фізичні перевантаження (статичні, динамічні, гіподинамічні), а також нервово-психічні перевантаження, до яких належать розумове перенапруження, монотонність праці, емоційні перевантаження, перенапруження органів чуття тощо.

Виникнення нервово-психічних перевантажень зумовлене зміною характеру сучасного виробництва, підвищенням складності трудової

діяльності та істотною зміною функції й ролі людини (людського фактору) у процесі праці, особливістю якого стає інтенсифікація психічної діяльності людини.

На об'єкті дипломного проектування, що включає насосну станцію, вузли аерації, швидкі фільтри, реагентне господарство, установки ультрафіолетового (УФ) знезараження та електрохімічного отримання гіпохлориту натрію, можна виділити такі групи небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

1) фізичні фактори:

- рухомі елементи – експлуатація насосного обладнання та запірної арматури створює ризик впливу незахищених рухомих частин механізмів;

- електрична безпека – наявність насосів, повітродувок, систем управління, освітлення та установок електрохімічного синтезу пов'язана з підвищеною напругою в електричних мережах;

- випромінювання – використання УФ-знезараження створює джерело підвищеного рівня ультрафіолетового випромінювання;

- шум і вібрація – робота насосного обладнання є джерелом підвищеного рівня шуму та вібрації;

- мікроклімат – у приміщеннях насосної станції та фільтрувального залу можуть спостерігатися несприятливі умови (підвищена вологість, перепади температур).

2) хімічні фактори – токсичні речовини:

- у процесі електрохімічного отримання гіпохлориту натрію та його дозування можливий контакт персоналу з хімічними сполуками, що мають подразнювальні та загальнотоксичні властивості.

- у процесі фторування води використовується фторосилікатна кислота (H_2SiF_6), яка є агресивною речовиною, що має виражені подразнювальні та припікаючі властивості при контакті зі шкірою та слизовими оболонками. При негерметичності обладнання або помилках під час дозування можливий ризик інгаляційного отруєння парами або отримання хімічних опіків персоналу.

Речовина класифікується як небезпечна, що вимагає суворого контролю концентрацій у робочій зоні.

3) біологічні фактори – наявність контакту з необробленою підземною водою (джерелом забруднень) створює ризик впливу бактерій, грибів та інших мікроорганізмів, здатних викликати інфекційні захворювання.

4) психофізіологічні фактори:

- перевантаження – обслуговування обладнання (особливо у змінному режимі) може призводити до фізичних перевантажень;

- нервово-психічне напруження – інтенсифікація праці, пов'язана з моніторингом складних автоматизованих систем очищення та відповідальністю за безперебійне водопостачання, може викликати розумове перенапруження та емоційні перевантаження;

- підвищене нервово-психічне напруження, зумовлене впливом воєнного стану – персонал станції працює в умовах хронічного стресу, викликаного військовою агресією, що проявляється у підвищеній тривожності, дефіциті сну та постійному нервовому напруженні. Цей фактор призводить до зниження концентрації уваги, уповільнення реакції на небезпеки, що виникають, та порушення процесу прийняття рішень у критичних ситуаціях. В результаті підвищується ймовірність помилок при керуванні обладнанням, що може призвести до аварійних ситуацій на станції (наприклад, неправильного дозування реагентів, ігнорування показань приладів або несвоєчасного реагування на витоки).

4.3 Розробка заходів щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці

Безпека виробничих процесів здебільшого визначається безпекою технологічного обладнання, яке має убезпечувати працівників під час монтажу, введення в експлуатацію та експлуатації як у разі автономного використання, так і у складі технологічних комплексів за умови дотримання вимог, передбачених експлуатаційною документацією.

Усе обладнання (машини, технічні системи) має бути травмо-, пожежо- та вибухобезпечним, не бути джерелом виділення парів, газів, пилу в кількостях, що перевищують встановлені норми, а генеровані ним вібрації, шуми, ультра- та інфразвук, електромагнітне неіонізуюче та іонізуюче випромінювання не повинні перевищувати допустимі рівні [35–37].

Усі технічні пристрої та системи повинні мати органи керування та відображення інформації, що відповідають ергономічним вимогам, і бути розташовані таким чином, щоб користування ними не спричиняло підвищеної стомлюваності; органи керування повинні бути в зоні досяжності оператора, зусилля, які необхідно докладати до них, повинні відповідати фізичним можливостям людини; рукоятки, штурвали, педалі, кнопки та тумблери повинні бути спрофільовані таким чином, щоб були максимально зручними у використанні. Кількість та розрізняваність засобів відображення інформації повинні враховувати можливості оператора щодо її сприйняття та не призводити до необхідності надмірної концентрації уваги [36].

Система управління обладнанням повинна забезпечувати надійне та безпечне його функціонування за всіх передбачених режимів роботи обладнання та за будь-яких зовнішніх впливів в умовах експлуатації. Вона повинна виключати виникнення небезпечних ситуацій через порушення працівниками послідовності керуючих дій.

Для мінімізації виявлених ризиків на об'єкті дипломного проєктування пропонується реалізація комплексу організаційно-технічних заходів:

1) захист від фізичних небезпек:

- усі обертові та рухомі частини насосного обладнання повинні бути оснащені надійними захисними кожухами;

- проведення регулярного моніторингу заземлення обладнання для захисту від підвищеної напруги та статичної електрики;

- забезпечення захисту персоналу від УФ-випромінювання шляхом застосування закритих корпусів реакторів, встановлення захисних екранів та використання засобів індивідуального захисту (далі – ЗІЗ) очей і шкіри;

- встановлення звукоізолюючих кожухів на насоси та віброгасильних опор для зниження рівнів шуму та вібрації.

2) хімічна безпека:

- встановлення датчиків-газоаналізаторів у зоні зберігання реагентів для раннього виявлення витоків;

- забезпечення персоналу спеціальним хімічно стійким одягом, спецвзуттям, рукавичками та повнолицевими масками з фільтрами. У приміщеннях зберігання реагентів мають бути передбачені стаціонарні аварійні душі та фонтанчики для промивання очей;

- автоматизація процесу дозування гіпохлориту натрію для виключення прямого контакту персоналу з хімічними речовинами;

- автоматизація систем оповіщення та контролю, щоб у разі збоїв система могла автоматично перевести станцію в безпечний режим (наприклад, блокування подачі фторосилікатної кислоти);

- забезпечення приміщень системою припливно-витяжної вентиляції та використання ЗІЗ органів дихання та шкірних покривів під час проведення ремонтних робіт у зоні дозування.

3) біологічний захист:

- суворе дотримання правил особистої гігієни, використання спецодягу та рукавичок під час взяття проб води або обслуговування фільтрів;

- проведення регулярних профілактичних оглядів персоналу.

4) оптимізація психофізіологічного навантаження:

- впровадження сучасних систем автоматизації (АСУ ТП), що знижує роль людини в рутинних операціях, але вимагає проведення якісного навчання для запобігання стресові при виникненні нестандартних ситуацій;

- дотримання режимів праці та відпочинку, створення ергономічних робочих місць в операторній для запобігання монотонності праці та нервово-психічних перевантажень;

- інформаційна підтримка – проведення регулярних інструктажів щодо дій персоналу у разі надзвичайних ситуацій (сигнали тривоги, правила поведінки при загрозі обстрілів), що знижує фактор невизначеності та паніки;

- психологічна підтримка – впровадження в графік коротких відновлювальних пауз і надання доступу до консультацій психолога для профілактики емоційного вигоряння та перенапруги.

Для систематизації вимог щодо охорони праці на проєктованій станції очищення води складено таблицю 4.1 вибору засобів індивідуального захисту залежно від виконуваних робіт та факторів, що впливають.

Таблиця 4.1 – Забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту (ЗІЗ)

| Вид виконуваних робіт | Основні небезпечні та шкідливі фактори | Необхідні ЗІЗ |
|--|--|---|
| Робота з фторосилікатною кислотою (завантаження, контроль дозування) | Хімічні: ризик опіків, інгаляційного отруєння | Костюм із кислотостійкого матеріалу, гумові чоботи, рукавички з бутилкаучуку, повнолицева маска з фільтром (від кислих газів) |
| Експлуатація та ремонт насосної станції | Фізичні: елементи, що рухаються, шум, вібрація | Спецодяг із щільної тканини (комбінезон), захисна каска, антивібраційні рукавички, протишумні навушники або вкладиші |
| Обслуговування установок УФ-знезараження | Фізичні: ультрафіолетове випромінювання | Спецодяг із закритими рукавами, захисні окуляри або щиток зі світлофільтром, що захищає від жорсткого УФ-випромінювання |
| Лабораторний контроль за якістю води (відбір проб) | Біологічні: контакт з мікроорганізмами; | Лабораторний халат, рукавички з нітрилу, захисні окуляри, при |

| Вид виконуваних робіт | Основні небезпечні та шкідливі фактори | Необхідні ЗІЗ |
|--|--|---|
| | Хімічні: контакт із реагентами | необхідності – захисна маска |
| Обслуговування фільтрів (очищення, завантаження) | Фізичні: пилоутворення, шум; Біологічні: контакт із забрудненнями | Пилозахисний респіратор, рукавички, спецвзуття з нековзною підошвою |

Розрахунок фактичної інтенсивності звуку для насосного та повітродувного обладнання

У зв'язку з тим, що значення інтенсивності звуку та звукового тиску змінюється в дуже широких межах, а вухо людини здатне реагувати на абсолютне, введені логарифмічні величини звукового рівня тиску та інтенсивності. Відчуття людини, що виникають при різних роздратуваннях, зокрема при шумі, пропорційні логарифму кількості енергії подразника (закон Вебера-Фехнера) [37].

Рівень інтенсивності (сили) звуку L_j (дБ) визначається за формулою:

$$L_j = 10 \cdot \lg \left(\frac{J}{J_0} \right), \quad (4.1)$$

де J – фактичне значення сили звуку, Вт/м²;

J_0 – порогове значення сили звуку, Вт/м² ($J_0 = 10 - 12$ Вт/м²);

\lg – логарифм десятковий.

Сумарний шум від кількох джерел з різними рівнями сили звуку чи звукового тиску ($L \neq L_2 \neq \dots L_n$) розраховують за формулою:

$$L = L_{\delta} + \Delta, \quad (4.2)$$

де L_{δ} – найбільший з джерел шуму, що складаються, дБ;

$\Delta(\delta)$ – «добавка» при складанні рівнів від двох джерел, дБ, яка залежить від різниці між ними.

Визначимо фактичну інтенсивність звуку для насосного та повітродувного обладнання з рівнями інтенсивності $L_1 = 40$ дБ, $L_2 = 65$ дБ, $L_3 = 80$ дБ, $L_4 = 100$ дБ. Знайдемо сумарний рівень шуму всіх джерел.

Визначаємо фактичну силу звуку J для кожного з джерел з використанням формули (4.1) та приймаючи поріг чутності $J_0 = 10^{-12}$ Вт/м²

$$L_j = 10 \cdot \lg \left(\frac{J}{J_0} \right) = 10 \cdot \lg J - 10 \cdot \lg J_0;$$

$$10 \cdot \lg J = L_j + 10 \cdot \lg J_0.$$

Для першого джерела:

$$\lg J = \frac{40}{10} + 10 \cdot \lg 10^{-12} = 4 - 12 = -8;$$

$$J = 10^{-8} \text{ Вт/м}^2.$$

Для другого джерела: $J = 10^{-5,5}$ Вт/м².

Для третього джерела: $J = 10^{-4}$ Вт/м².

Для четвертого джерела: $J = 10^{-2}$ Вт/м².

Визначимо сумарний шум за формулою (4.2) для джерел $L_1 = 40$ дБ, $L_2 = 65$ дБ. $L_2 - L_1 = 15$ дБ, тоді добавка $\Delta = 0$ дБ.

$$L_{1-2} = L_2 + \Delta = 65 + 0 = 65 \text{ дБ.}$$

Визначимо сумарний шум для джерел $L_{1-2} = 65$ дБ та $L_3 = 80$ дБ. Оскільки різниця між джерелами 15 дБ, добавка $\Delta = 0$ дБ. Сумарний шум дорівнюватиме рівню сили звуку більшого джерела $L_{1-2-3} = 80$ дБ.

Визначимо сумарний шум для джерел $L_{1-2-3} = 80$ дБ та $L_4 = 100$ дБ. Різниця між ними 20 дБ, тому добавка $\Delta = 0$ дБ. Сумарний шум дорівнює 100 дБ.

Таким чином, сумарний шум від усіх джерел дорівнює 100 дБ.

Розрахунок звукоізолюючої здатності перегородки

Одним із способів обмеження поширення шуму в приміщенні або у відкритому просторі є влаштування звукоізолюючих перешкод, які розміщують між джерелом шуму та працюючим [34, 37].

Звукоізолююча здатність одношарової перегородки на частоті 500 Гц, дБ, може бути визначена з формул:

- при поверхневій щільності огорожі до 200 кг/м:

$$R_{\text{огор}} = 13,5 \cdot \lg 80 + 13; \quad (4.3)$$

- при поверхневій щільності огороження понад 200 кг/м:

$$R_{\text{огор}} = 23 \cdot \lg Q - 9 \quad (4.4)$$

де Q – маса 1 м огороження, кг.

Розрахуємо звукоізолюючу здатність перегородки товщиною 14 см, виконаної з керамзитобетону марки М 150, об'ємною щільністю $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$.

Визначаємо поверхневу щільність ізолюючої конструкції:

$$q = \rho \cdot h = 1600 \cdot 0,14 = 224 \text{ кг/м}^2.$$

Визначимо за формулою (4.4) звукоізолюючу здатність одношарової перегородки для випадку, коли поверхнева щільність понад 200 кг/м^2 :

$$R_{\text{огор}} = 23 \cdot \lg Q - 9 = 23 \cdot \lg 224 - 9 = 45 \text{ дБ.}$$

Тобто, перегородка товщиною 14 см забезпечує зниження рівня шуму на 45 дБ.

4.4 Інструктаж та навчання з питань охорони праці

З питань безпеки мають проводитися такі види інструктажів: вступний, первинний на робочому місці, повторний, позаплановий та цільовий [33, 34].

Вступний інструктаж проводиться для всіх новоприйнятих на підприємство: робітників, інженерно-технічних працівників, службовців, відряджених учнів для проходження практики.

Первинний інструктаж проводиться безпосередньо на робочому місці для всіх прийнятих робітників та інженерно-технічних працівників, а також переведених з іншої ділянки, з однієї роботи на іншу, з одного виду обладнання на інший (і за тимчасового переведення). Про проведення інструктажу робиться відмітка в контрольному аркуші з підписом.

Повторний інструктаж проводиться один раз на 6 місяців за програмою інструктажу на робочому місці. Про проведення повторного інструктажу інструктуючим здійснюється запис у журналі обліку проведення інструктажів з підписами того, хто проводив і отримав інструктаж.

Позаплановий інструктаж проводиться у таких випадках [36]:

- зміна правил з охорони праці;
- зміна технологічного процесу;

- заміна та модернізація обладнання, засобів захисту тощо;
- порушення працівниками правил, а також після тривалої перерви у роботі.

Про проведення позапланового інструктажу здійснюється запис у журналі обліку інструктажів з відміткою про причину його проведення та підписами осіб, яка проводила і яка отримала інструктаж.

Цільовий інструктаж проводиться із працівниками перед виконанням робіт, на які оформляється наряд-допуск. Його проведення фіксують у наряді-допуску. Цільовий інструктаж проводиться при виконанні разових робіт (вантажно-розвантажувальні роботи, роботи з ліквідації аварій тощо).

До проведення робіт на обладнанні та технологіях підвищеної небезпеки допускається персонал, який пройшов спеціальне навчання та перевірку знань у галузі безпеки з видачею посвідчення на право допуску до таких робіт та обладнання.

Керівники та фахівці проходять перевірку знань з охорони праці не пізніше ніж через місяць після вступу на роботу чи посаду. Переатестацію в галузі безпеки адміністративно-технічний персонал проходить не рідше одного разу на три роки.

4.5 Вимоги щодо облаштування захисних споруд для обслуговуючого персоналу очисної станції

В умовах воєнного часу при зведенні та експлуатації об'єктів громадянської інфраструктури особливу увагу необхідно приділяти влаштуванню захисних споруд, які можуть знаходитися всередині будівель чи неподалік них. Облаштування таких споруд здійснюється за затвердженими стандартами безпеки [38].

Захисна споруда – це інженерна споруда, призначена для укриття людей, обладнання та майна від небезпек, що виникають у випадках наслідків аварій або катастроф на потенційно небезпечних об'єктах або в місцях розташування цих об'єктів, а також від ударів сучасних засобів ураження [39].

Споруди подвійного призначення – це інженерні споруди або приміщення, які у мирний час використовують за основним функціональним призначенням, а в особливий період чи під час надзвичайних ситуацій можуть використовувати для захисту населення.

До таких споруд належать, зокрема:

- підземні паркінги;
- станції метро;
- підвальні та цокольні приміщення;
- торговельні та спортивні комплекси;
- інші будівлі й споруди, які можуть бути пристосовані для укриття людей.

Основна особливість споруд подвійного призначення – поєднання звичайної експлуатації з можливістю швидкого переведення у режим захисної споруди цивільного захисту. Такі споруди повинні відповідати вимогам безпеки, мати необхідні системи вентиляції, евакуації, водопостачання, електроживлення та забезпечувати перебування людей протягом визначеного часу.

Відповідно до ДБН В.2.2-5:2023 Захисні споруди цивільного захисту [38] «захисні споруди та споруди подвійного призначення проєктують та будують таким чином, щоб протягом певного часу (до 48 год) створити належні умови для перебування людей, що підлягають укриттю, та забезпечити їх захист шляхом виключення або зменшення прогнозованих впливів небезпечних чинників, які можуть виникнути як складова частина небезпечних явищ надзвичайної ситуації, воєнних (бойових) дій та терористичних актів».

Укриття – це споруда цивільної оборони, що забезпечує захист осіб, що приховуються, від фугасної та осколкової дії звичайних засобів ураження, ураження уламками будівельних конструкцій, а також від обвалення конструкцій вищерозташованих поверхів будівель.

Укриття класифікують за наступними ознаками [39, 40]:

- захищеності від засобів ураження;
- тривалості функціонування;
- місткості;
- місця розташування;
- часу зведення.

Приміщення будинків, що пристосовують під укриття, мають відповідати наступним вимогам [38–40]:

- основні конструкції (стіни, перекриття, колони) мають бути вогнетривкими і досить міцними;
- зовнішні огорожувальні конструкції будівель повинні забезпечувати необхідний захист від фугасної дії звичайних засобів ураження;
- приміщення повинні бути, як правило, повністю заглибленими в ґрунт і перебувати на ділянках місцевості, не схильних до затоплення зливовими та ґрунтовими водами;
- площа, вільна від обладнання, та висота приміщень повинні відповідати вимогам [38];
- поблизу приміщень не повинно бути великих резервуарів з аварійно хімічно небезпечними речовинами, водопровідних та каналізаційних магістралей;
- поблизу укриттів не повинні проходити транзитні комунікації (трубопроводи опалення, водопостачання, стиснутого повітря, вентиляції, газо- і паропроводи, електрокабелі) або розміщуватись горизонтальні ділянки каналізаційних систем;
- шляхи підходу в підвальне приміщення повинні бути вільними від підвісних декоративних предметів, предметів що загоряються або матеріалів, які сильно димлять;
- укриття розташовують в будівлях, які є місцями постійного перебування осіб, що підлягають евакуації в укриття;
- конструкція та внутрішнє обладнання укриття не повинні ускладнювати його використання за прямим призначенням;

- прорізи та отвори повинні бути підготовлені для їх закладення при переведенні приміщення в режим укриття.

Укриття допускається розміщувати у підвальних приміщеннях раніше зведених будівель та споруд, підлога яких розташована нижче рівня ґрунтових вод, за наявності надійної гідроізоляції. Підлоги заглиблених приміщень мають бути бетонними.

Прокладання транзитних трубопроводів опалення, водопроводу та каналізації через приміщення укриттів допускається за умови розміщення їх у підлозі або в коридорах, відокремлених від приміщення протирадіаційного укриття стінами з межею вогнестійкості, що відповідає встановленим вимогам.

Прокладання транзитних та пов'язаних із системою будівлі газових мереж, паропроводів, трубопроводів з перегрітою водою та стисненим повітрям через приміщення укриття не допускається.

У складі укриттів у загальному випадку передбачаються основні приміщення (приміщення для розміщення осіб, які укриваються) та допоміжні (санітарні пости, санітарні вузли). У неканалізованих укриттях допускається передбачати приміщення для виносної тари.

Висота приміщень укриттів у будівлях, що заново проектується приймається залежно від функціонального призначення приміщень у мирний час, але не менше 1,9 м від позначки підлоги до низу виступаючих конструкцій перекриття [39].

Місткість укриттів не нормується і приймається залежно від площі використовуваних приміщень.

Внутрішній об'єм всіх приміщень укриття приймається не менше ніж 1,2 м³ на одну людину [40].

Кількість входів у укриття слід приймати не менше двох.

Укриття мають бути захищені від можливого затоплення дощовими водами, а також іншими рідинами при руйнуванні ємностей, розташованих на поверхні землі або на розташованих вище поверхах будівель і споруд.

Отвори в зовнішніх огорожувальних конструкціях, які не використовують для входу, виходу з укриття або вентиляції, мають бути закриті під час переведення приміщень в режим укриття з урахуванням дотримання вимог рівного захисту.

На входах в укриття необхідно встановлювати звичайні двері або оббиті металом.

У приміщеннях, що пристосовують під укриття, слід передбачати природну вентиляцію, опалення, необхідний запас питної води з розрахунку 2 л на добу на одну особу, каналізацію або виносну герметичну тару, що забезпечують необхідні умови перебування в них осіб, які укриваються, протягом 12 год.

Укриття, розташовані в зоні можливого радіоактивного зараження, повинні забезпечити послаблення радіації зовнішнього опромінення в заданих межах.

Розрахунок протирадіаційного захисту

Визначимо ступінь ослаблення радіації зовнішнього опромінення укриттів (A_3) залежно від їх призначення та місця розташування [39]. Показник A_3 для повністю заглиблених підвалів та приміщень, розташованих у внутрішньої частині не повністю заглиблених підвалів, а також для цокольних поверхів при сумарній масі виступаючих частин зовнішніх стін з обсіпанням 10 кН/м^2 і більше визначають за формулою (4.5).

$$A_3 = \frac{4,5 \cdot K_{\Pi}}{V_1 + X \cdot K_{\Pi}}, \quad (4.5)$$

де K_{Π} – кратність ослаблення перекриттям підвалу (цокольного поверху) вторинного випромінювання, розсіяного у приміщенні першого поверху, що визначається залежно від маси 1 м^2 перекриття;

V_1 – коефіцієнт, що залежить від висоти та ширини приміщення;

X – частина сумарної дози радіації, що проникає в приміщення через вхідні отвори визначають за формулою (4.6):

$$X = K_{\text{ВХ}} \cdot \Pi_{90}, \quad (4.6)$$

де K_{BX} – коефіцієнт, що характеризує конструктивні особливості входу та його захисні властивості;

P_{90} – коефіцієнт, який враховує тип і характеристику входу.

Приймаємо, що радіоактивні опади, які випали, рівномірно розподілені на горизонтальних поверхнях і горизонтальних проекціях похилих та криволінійних поверхонь. Зараження вертикальних поверхонь (стін) не враховуємо.

Визначаємо ступінь ослаблення радіації зовнішнього опромінення укриття на очисній станції за вихідних даних, наведених у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані визначення ступеня ослаблення радіації зовнішнього опромінення укриття

| | |
|---|------------------|
| Маса 1 м ² огорожувальних конструкцій: 3000 Н (300 кгс) | $K_{\pi} = 30$ |
| Висота приміщення: 2 м Ширина приміщення: 24 м | $V_I = 0,38$ |
| Відстань від входу до центра приміщення: 12 м Висота вхідного прорізу: 2 м Ширина вхідного прорізу: 2 м | $K_{BX} = 0,015$ |
| Вхід: тупиковий з поворотом на 90° | $P_{90} = 0,5$ |

Таким чином:

$$X = 0,015 \cdot 0,5 = 0,0075;$$

$$A_3 = \frac{4,5 \cdot 30}{0,38 + 0,0075 \cdot 30} = 223,14.$$

Висновок

1. Для об'єкта дипломного проектування виявлені фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні небезпечні і шкідливі виробничі фактори.

2. Для забезпечення безпечних та нешкідливих умов праці на очисній станції передбачено такі основні заходи:

- хімічний захист – при роботі з гіпохлоритом натрію та фторосилікатною кислотою ключовим фактором є захист органів дихання та шкірних покривів від їдких речовин, що мають загальнотоксичні та подразнювальні властивості;

- захист від випромінювання – оскільки УФ-знезараження є джерелом підвищеного рівня ультрафіолетового випромінювання, використання відкритих ділянок шкіри або незахищених очей суворо заборонено під час проведення технічного обслуговування ламп;

- біологічна безпека – враховуючи, що у вихідній воді можуть бути присутні мікро- та макроорганізми (бактерії, віруси, гриби), використання рукавичок та захисного одягу є обов'язковим при будь-якому контакті з необробленою водою або фільтрувальними матеріалами;

- фізичний захист – використання антивібраційних та захисних засобів знижує ризики травматизму, зумовленого впливом незахищених рухомих елементів обладнання та підвищеного рівня шуму.

3. Розглянуті основні вимоги щодо облаштування захисних споруд для обслуговуючого персоналу очисної станції.

ВИСНОВКИ

1. В кваліфікаційній роботі проведений аналіз особливостей якісного складу підземних вод із надлишковими концентраціями заліза та розглянуто основні методи знезалізнення та умови їх застосування.

2. На основі аналізу вихідних даних та результатів хімічного дослідження вихідної води з вододжерела визначено технологічну послідовність процесів обробки води, яка включає знезалізнення спрощеною аерацією, фторування, знезараження УФ опроміненням та додаванням гіпохлориту натрію.

3. Виконаний розрахунок водозабірних свердловин та основних елементів технологічної схеми обробки води, визначені межі зон санітарної охорони водозабору.

4. Для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, а також скорочення витрат очищеної води на власні технологічні потреби, передбачено впровадження оборотного циклу використання промивних вод фільтрів.

5. На очисній станції для знезараження води застосовується ультрафіолетове опромінення. Для додаткової дезінфекції та забезпечення пролонгованої знезаражувальної дії передбачено використання гіпохлориту натрію, який отримують шляхом електролітичного розчину кухонної солі.

6. Визначені підходи для організації комплексної системи антикорозійного захисту обладнання очисної та насосних станцій.

7. На очисній та насосних станціях виявлені фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні небезпечні і шкідливі виробничі фактори.

8. Для мінімізації виявлених ризиків на об'єкті дипломного проєктування запропоновано реалізацію комплексу організаційно-технічних заходів для забезпечення безпечних та нешкідливих умов праці.

9. Розглянуті основні вимоги щодо облаштування захисних споруд для обслуговуючого персоналу очисної станції в умовах воєнного стану.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Орлов В. В., Орлова А. М., Зошук В. О. Технологія підготовки питної води. Навчальний посібник / В. В. Орлов, А. М. Орлова, В. О. Зошук. – Рівне: НУВГП, 2010. – 176 с.
2. Шкоп А. О. Дослідження способів знезалізнення води. Перспективи та практичний аспект / А. О. Шкоп, С. С. Кулініч, А. С. Босюк, О. В. Шестопалов, Д. І. Нечипоренко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2025. – № 1(13). – С. 43–53.
3. Орлов В. О., Мартинов С. Ю. Аераційні методи знезалізнення води / В. О. Орлов, С. Ю. Мартинов // Вода і водоочисні технології. – 2011. – № 2(4). – С. 42–52.
4. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною : Державні санітарні норми та правила. – Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2010. – № 400 від 12.05.2010. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10>.
5. Курбанова Т., Хомутецька Т. Дослідження процесів знезалізнення води на експериментальній установці / Т. Курбанова, Т. Хомутецька // Build Master Class 2025 : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, м. Київ, 26–28 листопада 2025 р. / Київський національний університет будівництва і архітектури; гол. ред. В. І. Скошко. – Київ : КНУБА, 2025. – С. 275–276.
6. Орлов В. В. Знезалізнення підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням. Монографія / В. В. Орлов. – Рівне: НУВГП, 2008. – 158 с.
7. Гомеля М. Д., Твердохліб М. М. Дослідження ефективності очищення води від сполук заліза за допомогою модифікованих фільтрувальних завантажень / М. Д. Гомеля, М. М. Твердохліб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 2, № 10(80). – С. 47–52.
8. Твердохліб М. М., Гомеля М. Д. Знезалізнення води за допомогою суміші іонообмінних матеріалів / М. М. Твердохліб, М. Д. Гомеля // Екологічні науки. – 2019. – Т. 1, № 1(24). – С. 165–169.
9. Сорокіна К. Б., Мамчуренко С. П. Оптимізація коагуляційної обробки води для ресурсозбереження та зниження екологічних ризиків / К. Б. Сорокіна, С. П. Мамчуренко // VI міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження», Одеська державна академія будівництва та архітектури та екології, 18-19 грудня 2025 року. – С. 99-102.

10. Гнатів П. С. Природні ресурси України : навчальний посібник / П. С. Гнатів, П. Р. Хірівський, О. Д. Зинюк, Ю. Я. Корінець, Н. Є. Панас. – Львів: Камула, 2012. – 216 с.

11. Електронна версія Національного атласу України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/duivgu>.

12. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування [Електронний ресурс]. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – Чинний від 01.01.2014. – Режим доступу: [Єдина державна електронна система у сфері будівництва](#).

13. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Електронний ресурс]. – Київ : Мінрегіон України, 2016. – Чинний від 01.01.2017. – Режим доступу: <https://surl.li/vafflj>.

14. Хомутецька Т. П. Водозабірні споруди з поверхневих та підземних джерел: навч. посіб. / Т. П. Хомутецька, В. П. Хоружий. – Київ: КНУБА, 2023. – 288 с.

15. Орлов В. О., Назаров С. М., Орлова А. М. Водозабірні споруди. Навчальний посібник / В. О. Орлов, С. М. Назаров, А. М. Орлова. – Рівне: НУВГП, 2010. – 167 с.

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

17. Grundfos SP 60-7, занурювальний свердловинний насос. Технічні характеристики та робочі криві [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.cc/cgregk>.

18. Толстопалова Н. М. Технологія та обладнання одержання питної та технічної води : Фізико-хімічні основи і алгоритми розрахунків процесів водопідготовки : навч. посіб. / Н. М. Толстопалова, А. Л. Концевой, І. В. Косогіна, С. А. Концевой. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 130 с.

19. Grundfos DDA 7.5-16 FCM-PP/E/C-F-31U2U2FG, цифровий мембранний дозувальний насос [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/wmhunl>.

20. Koflo Corporation. Clear PVC Static Mixers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/stblho>.

21. Trojan Technologies. TrojanUVSwift® Drinking Water UV Treatment System [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/vwgrio>.
22. Grundfos. Selcoperm SES-500 (99788722) Drinking Water Disinfection System [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/tyxrdq>.
23. Grundfos DDA 12-10 AR-PP/V/C-F-31U2U2FG (97722044) цифровий дозувальний насос [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/aecmxj>.
24. Корозія та захист від корозії [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Н. А. Білоусова, І. С. Погребова, О. Г. Лінючев. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,09 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 180 с.
25. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / П. І. Стоєв, С. В. Литовченко, І. О. Гірка, В. Т. Грицина. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. – 216 с.
26. Борисенко Ю. В. Матеріали сучасної техніки та захист від руйнування : навчальний посібник / Ю. В. Борисенко. – К. : КНУТД, 2016. – 111 с.
27. ДСТУ 2733-94. Корозія та тимчасовий протикорозійний захист металевих виробів. Терміни та визначення [Електронний ресурс]. – Київ : Держстандарт України, 1994. – Чинний від 01.07.1995. – Режим доступу: BudStandart.
28. ДСТУ-Н Б В.2.6-186:2013. Настанова щодо захисту будівельних конструкцій будівель та споруд від корозії. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – Чинний від 01.01.2014. – Режим доступу: BudStandart.
29. Улаштування захисних покриттів у будівництві : навчальний посібник / В. П. Кизима, А. Г. Куковський, В. В. Яковчук та ін. – Рівне : НУВГП, 2018. – 241 с.
30. Гуменюк О., Трус І. Аналіз сучасних методів вимірювання швидкості корозії / О. Гуменюк, І. Трус// Biota. Human. Technology. – 2025. – № 1. – С. 197–210.
31. ДСТУ-Н Б А.3.1-29:2015. Магістральні трубопроводи. Нанесення захисних покриттів та улаштування теплової ізоляції. Настанова : Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 03.07.2015 № 153. – Київ, 2015. – Чинний від 01.04.2016. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0153858-15>.

32. ДСТУ EN ISO 8501-1:2014. Підготовка сталевих основ перед нанесенням фарб і подібних матеріалів. Візуальна оцінка чистоти поверхні. Частина 1. Ступені іржавіння та ступені підготовки непокритих сталевих основ і сталевих основ після повного видалення попередніх покриттів. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. – Режим доступу: [BudStandart](#).

33. Пожарова О. В. Охорона праці : навчальний посібник / О. В. Пожарова. – Одеса: Національний університет «Одеська юридична академія» 2022. – 86 с.

34. Грибан В. Г., Фоменко А. Є., Казначеев Д. Г. Безпека життєдіяльності та охорона праці : підруч. / В. Г. Грибан, А. Є. Фоменко, Д. Г. Казначеев. – Дніпро : Дніпроп. держ. ун-т внутр. справ, 2022. – 388 с.

35. Курепін В. М. Основи охорони праці: навчальний посібник для студентів закладів вищої освіти аграрної галузі / В. М. Курепін. – Миколаїв : МНАУ, 2022. – 347 с.

36. Крюковська О. А., Левчук К. О. Охорона праці в галузі (для хімічних спеціальностей) / Під редакцією к.т.н., доцента Толока А. О.: Навч. посібник. – 2011. – 230 с.

37. Гіроль М. М., Бернацький М. В., Хомко В. Є. Охорона праці у водопровідно-каналізаційному господарстві. Навчальний посібник / За ред. М. М. Гіроля. – Рівне: НУВГП, 2010. – 351 с.

38. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту [Електронний ресурс]. – Київ: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. – Режим доступу: [Портал Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва](#).

39. Основи проектування захисних споруд цивільного захисту / Олександр СЕМКО, Олена ФІЛОНЕНКО, Аліна ЗИГУН. – Полтава: ПП «Астроя», 2024. – 121 с.

40. Особливості конструктивних рішень захисних споруд цивільного захисту : Навч. посіб. / М. Ільченко, В. Гвоздь, І. Рудушко, О. Бас – Черкаси, 2022. – 130 с.