

О.В. БРИГАДА

**Шляхи запобігання надзвичайним
ситуаціям на бетонних
спорудах водовідведення**

— Монографія —



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

О. В. Бригада

**ШЛЯХИ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ
НА БЕТОННИХ СПОРУДАХ ВОДОВІДВЕДЕННЯ**

Монографія

Рекомендовано до друку вченою радою
Національного університету цивільного захисту України
(протокол № 5 від 27.01.2022 р.)

Харків 2022

УДК 628.29
Б 87

Рецензенти:

М. П. Горох, начальник відділу науки та інновацій
комунального підприємства «Харківводоканал»
доктор технічних наук, професор **А. С. Карагяур**,
професор кафедри водопостачання, каналізації і гідравліки
Харківського національного університету будівництва та архітектури
доктор технічних наук, професор **В. М. Лобойченко**,
професор кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки НУЦЗ України

Рекомендовано до друку вченою радою
Національного університету цивільного захисту України
(протокол № 5 від 27.01.2022 р.)

Бригада О. В.
Б 87 Шляхи запобігання надзвичайним ситуаціям на бетонних спорудах водовідведення: монографія / О.В. Бригада. – Х: ФОП Бровін О.В., 2022. – 132 с.

ISBN 978-617-8009-82-3

Монографія присвячена вирішенню однієї з найактуальніших проблем – запобігання великомасштабним аваріям на бетонних та залізобетонних мережах водовідведення та забрудненню природних середовищ токсичними сполуками.

В роботі представлено аналіз надзвичайних ситуацій під час експлуатації мереж водовідведення, методи діагностики їх стану, контролю складу атмосфери підсклепінного простору каналізаційних трубопроводів. Охарактеризовано особливості приладу – корозиметра бетону – для оперативного неруйнуючого контролю стану бетонних трубопроводів водовідведення, експериментально визначено основні коефіцієнти для розрахунку глибини та швидкості корозії бетону. Проведено обстеження ділянок каналізаційних мереж м. Харкова, кількісно визначено концентрацію сірководню в атмосфері підсклепінного простору двома методами. Визначено ефективність захисних покриттів різного складу в захисті бетону від біогенної сірчано-кислотної агресії. Проаналізовано основні причини нещасних випадків на спорудах водовідведення під час ремонтно-відновлювальних робіт.

Для наукових, інженерно-технічних працівників, зайнятих у галузях екологічної безпеки, водопровідно-каналізаційного господарства, цивільної безпеки та охорони праці, науково-педагогічних працівників, здобувачів вищої освіти, аспірантів. Видання також може бути корисним в освітньому процесі підготовки фахівців за спеціальностями «Екологія», «Цивільна безпека» та «Технології захисту навколишнього середовища».

ISBN 978-617-8009-82-3

© О. В. Бригада, 2022
© НУЦЗУ, 2022

ЗМІСТ

Вступ	5
Розділ 1. Фактори експлуатаційної довговічності залізобетонних трубопроводів водовідведення та інструментальні методи їх контролю	7
1.1 Особливості надзвичайних ситуацій під час експлуатації каналізаційних мереж	7
1.2 Агресивні експлуатаційні середовища в системах водовідведення	13
1.3 Діагностика стану каналізаційних мереж	14
1.3.1 Найпоширеніші методи діагностики стану каналізаційних трубопроводів	14
1.3.2 Методи неруйнуючого контролю стану бетонних споруд, що знаходяться в умовах корозійної агресії	23
1.3.3 Методи контролю швидкості та глибини біогенної корозії бетону в мережах водовідведення	26
1.3.4 Методи оцінки ефективності протикорозійних заходів у мережах водовідведення	30
1.4 Експлуатаційні та екологічні наслідки утворення сірководню в мережах водовідведення	34
1.4.1 Вплив сірководню на експлуатаційну довговічність бетонних трубопроводів водовідведення	34
1.4.2 Небезпека газоповітряних викидів із каналізаційних шахт і колодязів для міського середовища	35
1.4.3 Методи контролю складу атмосфери підсклепінного простору каналізаційних трубопроводів	36
1.4.4 Методи розрахунку викидів сірководню у спорудах каналізації та математичного моделювання утворення сірководню у трубопроводах водовідведення	40
1.4.5 Картографування концентрації сірководню у спорудах каналізації	43
Розділ 2. Наукові основи дослідження агресивного середовища мереж водовідведення	45
2.1 Методологія дослідження корозійного ураження бетону у спорудах водовідведення, що знаходяться в експлуатації	45
2.1.1 Особливості конструкції електродів корозиметра бетону – пристрою для неруйнуючого контролю стану бетонних споруд водовідведення	45
2.1.2 Особливості вимірального приладу для корозиметра бетону	47
2.2 Експериментальне встановлення основних коефіцієнтів для розрахунку глибини та швидкості корозії бетону під час біогенної кислотної агресії в мережах водовідведення	52

2.2.1 Встановлення залежності коефіцієнта дифузії біогенних кислот у бетон від експлуатаційних факторів	52
2.2.2 Встановлення величини дифузії біогенних кислот за фронт корозії в динаміці корозійного процесу	56
2.2.3 Встановлення поправочного коефіцієнта, що враховує вплив повного заповнення трубопроводу на швидкість корозії склепінної частини	59
Розділ 3. Обстеження ділянок каналізаційних мереж м. Харкова	61
3.1 Обстеження споруд водовідведення в м. Харкові	61
3.2 Аналіз вмісту сірководню в мережах водовідведення.....	63
3.3 Електронне картографування накопичення сірководню в мережах водовідведення м. Харкова	67
Розділ 4. Кількісна оцінка накопичення сірководню в атмосфері підсклепінного простору залізобетонних каналізаційних трубопроводів.....	70
4.1 Математична модель виділення сірководню в атмосферу підсклепінного простору під час експлуатації самопливних каналізаційних трубопроводів.....	70
4.2 Розробка методу визначення концентрації сірководню на ділянках каналізаційної мережі, усередненої за тривалий період часу	94
4.3 Підвищення експлуатаційної довговічності ділянок залізобетонних каналізаційних трубопроводів із різною концентрацією сірководню в експлуатаційних середовищах	98
Розділ 5. Аналіз надзвичайних ситуацій під час експлуатації та ремонту споруд водовідведення	103
5.1 Основні причини нещасних випадків на спорудах водовідведення	103
5.2 Аналіз міжнародного досвіду в галузі цивільної безпеки на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства	109
Висновки	113
Перелік використаних джерел	116

ВСТУП

Безперебійна та безаварійна робота систем водовідведення є однією з найактуальніших задач життєзабезпечення міського населення України. Найважливішим чинником у забезпеченні надійності експлуатації водовідвідних систем і попередження надзвичайних ситуацій є діагностика стану трубопроводів і контроль складу атмосфери підсклепінного простору каналізаційних мереж. Особливу небезпеку для надійності водовідведення створює накопичення в експлуатаційних середовищах бетонних трубопроводів (стічній воді, підсклепінному просторі, конденсатній волозі на склепінні) сірководню, його похідних та продуктів окиснення, що ініціюють біогенну сірчаноокислотну корозію бетонного склепіння. Крім того, сірководень у газоподібних викидах із каналізаційних мереж створює проблеми для екологічної безпеки водовідведення. В таких умовах для забезпечення надійності експлуатації бетонних трубопроводів водовідведення необхідні методи оперативного контролю корозійного ураження цих об'єктів та активності накопичення в них сірководню. Наразі в Україні кількісне визначення концентрації сірководню в мережах водовідведення здійснюється лише в деяких великих містах і тільки періодично, що не дозволяє одержати об'єктивної оцінки небезпеки газоподібного середовища. Методи інспектування каналізаційних мереж (оптичні, телевізійні, лазерні та ін.), які наразі широко використовують за кордоном (а в Україні через високу вартість - дуже обмежено), не дозволяють визначити агресивність середовища на поверхні конструкцій та глибину корозійного руйнування бетону.

Сучасні розробки пристроїв для безпосереднього визначення глибини корозії склепінної частини бетонних трубопроводів, в яких використовується математична модель кислотної корозії бетону, потребують експериментального визначення спеціальних констант, що враховують особливості біогенної сірчаноокислотної агресії в каналізаційних мережах. Отже, існує нагальна проблема в суттєвому доповненні та удосконаленні методів контролю стану каналізаційних мереж, що знаходяться в експлуатації.

Окрім того, щорічно в Україні під час виконання робіт у замкнених (обмежених) просторах (люки, лази, колодязні камери, колектори, каналізаційні мережі тощо) виникають випадки травматизму на об'єктах водопровідно-каналізаційного господарства, в тому числі зі смертельними наслідками.

Необхідно акцентувати увагу щодо небезпеки самовільного виконання робіт з очищення каналізаційних колодязів приватних домоволодінь та необхідності залучення до виконання цих робіт спеціальних організацій, які мають відповідний дозвіл, на підвищенні відомчого контролю, забезпеченості підприємств засобами індивідуального та колективного захисту, безпеці проведення робіт у замкненому просторі, проведення своєчасного навчання та інструктажів з питань охорони праці, забезпечення постійного контролю повітряного середовища під час виконання робіт тощо. Під час проведення планових або аварійно-відновлювальних робіт щорічно відбуваються нещасні ви-

падки на спорудах каналізації, більшість яких закінчується летально. Люди гинуть через нестачу кисню, отруєння шкідливими речовинами, ураження електричним струмом тощо.

Більше 80 % нещасних випадків у колодязях зумовлено наявністю в них хоча б одного отруйного газу. Причини нещасних випадків, як правило, пов'язані з порушенням вимог щодо охорони праці під час проведення робіт, недооцінюванням робітниками небезпеки знаходження у подібних місцях, невикористанням засобів індивідуального захисту.

Розв'язання зазначених наукових та практичних питань сприятиме досягненню більш високого рівня надійності та екологічної безпеки бетонних каналізаційних колекторів, зменшенню рівня травматизму та інших надзвичайних ситуацій на цих спорудах.

РОЗДІЛ 1. ФАКТОРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБОПРОВОДІВ ВОДОВІДВЕДЕННЯ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ЇХ КОНТРОЛЮ

1.1 Особливості надзвичайних ситуацій під час експлуатації каналізаційних мереж

Каналізаційні мережі відносяться до найважливіших систем життєзабезпечення міст, отже їх безаварійна експлуатація – завдання державної ваги.

Проблема збереження та відновлення діючих мереж є особливо актуальною у зв'язку зі зростаючими вимогами до безпеки технічних об'єктів. В останні роки великомасштабні аварії на спорудах водовідведення сталися в Харкові, Черкасах, Чернігові, Херсоні, Мелітополі та ін. [1–5]. Наслідки цих аварій становлять серйозну техногенну небезпеку для навколишнього середовища та населення, внаслідок порушення нормальної роботи підприємств, наземних транспортних систем, забруднення ґрунту, водою стічними водами тощо. З урахуванням всіх негативних наслідків для експлуатації систем водовідведення, а також їх екологічної безпеки, аварії на каналізаційних мережах необхідно ліквідувати в найкоротший термін. Проте більш важливо передбачити подібні надзвичайні ситуації на цих технічних спорудах заздалегідь і вчасно їм запобігти. Гостра нестача сучасних технічних засобів контролю стану каналізаційних трубопроводів унеможливорює своєчасне виявлення дефектів і місць пошкоджень, внаслідок чого аварійний стан колекторів виявляється тільки після аварії [1–5].

Загальна протяжність каналізаційних мереж України становить 59745 км, з них 8640 км повністю вичерпали свій амортизаційний ресурс і 7555 км знаходяться в аварійному стані. У містах і селищах на каналізаційних мережах відбувається більше 43000 аварій в рік. В середньому на мережах водовідведення України відбувається більше 2 аварій на рік на 1 км, що значно перевищує аналогічний показник у країнах Європи. Систему каналізаційних мереж м. Києва фахівці характеризують як «дуже стару», 84,5 % споруд якої відпрацювали свій нормативний термін служби [4, 6].

Елементами, які зазнають найбільшого пошкодження на мережах каналізації, побудованих у 1950–1970 рр., які складають $\frac{1}{4}$ частину загальної протяжності мережі, є трубопроводи великих діаметрів, виконані з бетону та залізобетону. Більшість аварій відбувається на залізобетонних трубопроводах водовідведення. Трубопроводи діаметром 600–1200 мм і оглядові колодязі руйнуються, в основному, внаслідок корозійних процесів [1, 2, 4, 7]. Пошкоджуваність трубопроводів малих діаметрів (до 500 мм), що досягає 70 %, відбувається внаслідок фізико-механічних впливів. Це пояснюється невеликою глибиною їх залягання, різноманітністю видів конструктивних матеріалів, що відрізняються своїми властивостями, конструкцією стиків, здатністю сприймати зовнішні навантаження тощо.

Класифікацію залізобетонних каналізаційних колекторів, основні ушкодження цих об'єктів та їх причини наведено на рис. 1.1 [1].

Необхідно відзначити, що більшість каналізаційних трубопроводів та тунельних колекторів у промислових центрах України були побудовані в останні 40–50 років, коли активно розвивалося будівництво будівель і споруд з бетону та залізобетону [4]. Вибір матеріалів для будівництва був обґрунтований фахівцями Держбуду СРСР, та передбачуваний термін служби цих матеріалів для бетонних та залізобетонних конструкцій під землею було заплановано не менш ніж 100 років [4]. Насправді бетонні каналізаційні трубопроводи та тунельні колектори виходять з ладу набагато раніше запланованого нормативного терміну служби – не 20–30 років, а 5–10, а в деяких випадках і раніше [1, 3, 4]. Наразі трубопроводи, виконані з бетону та залізобетону, складають близько 30 % всіх матеріалів, які використовуються для будівництва споруд водовідведення (табл. 1.1) [1, 2, 4, 8].

Таблиця 1.1 – Розподіл труб у каналізаційних мережах України за матеріалом [1]

Матеріал	Питома вага труб із даного матеріалу в мережі, %
Стальні	4,8
Чавунні	20,0
Азбестоцементні	8,6
Керамічні	38,3
Бетонні	10,5
Залізобетонні	17,7
Інше	0,1

Труби для будівництва каналізаційних мереж виготовляються з різних матеріалів, з урахуванням призначення трубопроводів, складу стічних і ґрунтових вод. Самопливні каналізаційні мережі укладають із керамічних, азбестоцементних і безнапірних залізобетонних труб, а колектори великих діаметрів – із залізобетонних труб або збірних залізобетонних елементів [7].

У системах каналізації найбільш пошкодженими елементами є трубопроводи великих діаметрів (рис. 1.2), які виконані переважно з бетону та залізобетону [1].



Рисунок 1.2 – Розподіл дефектів споруд у системі каналізації

Відмова в роботі каналізаційних трубопроводів виникає внаслідок цілого комплексу несприятливих факторів. Найчастішими причинами аварій на трубопроводах водовідведення є [1, 2, 4, 9–11]:

1. осідання труб і колодязів, що зумовлено дефектами проектування та будівництва (неякісне закладання стиків, неправильне визначення типу основи тощо);
2. стирання лотків трубопроводів твердими речовинами, що містяться у стічній воді, за умов підвищеної швидкості руху рідини;
3. руйнування труб під впливом зовнішніх навантажень.
4. руйнування трубопроводів внаслідок корозії різних видів.

Частота відмов у роботі каналізаційних мереж – порушення їх герметичності або пропускної здатності є різною для кожного матеріалу та зменшується в міру збільшення діаметра труб (табл. 1.2). Пошкоджуваність трубопроводів малих діаметрів (до 500 мм) внаслідок фізико-механічних впливів досягає 70 % (рис. 1.3).

Таблиця 1.2 – Інтенсивність відмов каналізаційних трубопроводів із різних матеріалів

Матеріал труб	Діаметр, мм	Загальна довжина обстеженої ділянки, км	Загальна кількість зареєстрованих пошкоджень	Інтенсивність відмов, λ, 1/км·рік
Сталеві	200	324	990	3,05
	500	131	183	1,4
	1000	90	3	0,03
Чавунні	200	80	122	1,52
	500	34	38	1,11
	800	17	1	0,06
Азбестоцементні	150	29	54	1,87
	300	7	9	1,10
	500	13	14	1,08
Керамічні	200	30	30	1,00
	500	36	2	0,06
	600	18	7	0,05
Бетонні	400	160	24	0,15
	600	320	3	0,09
	1000	75	2	0,02
Залізобетонні	600	315	32	0,10
	1000	90	6	0,08
	2000	33	1	0,03
	3600	8	1	0,005

Це пояснюється порівняно невеликою глибиною їх залягання, різноманітністю видів конструктивних матеріалів труб, які відрізняються своїми властивостями, конструкцією стиків і здатністю сприймати зовнішні навантаження. Трубопроводи великих діаметрів (більше 500 мм), які мають більшу

масивність та розташовуються порівняно глибше та далі від мережі, зазнають переважно корозійних пошкоджень (67 %) [1].

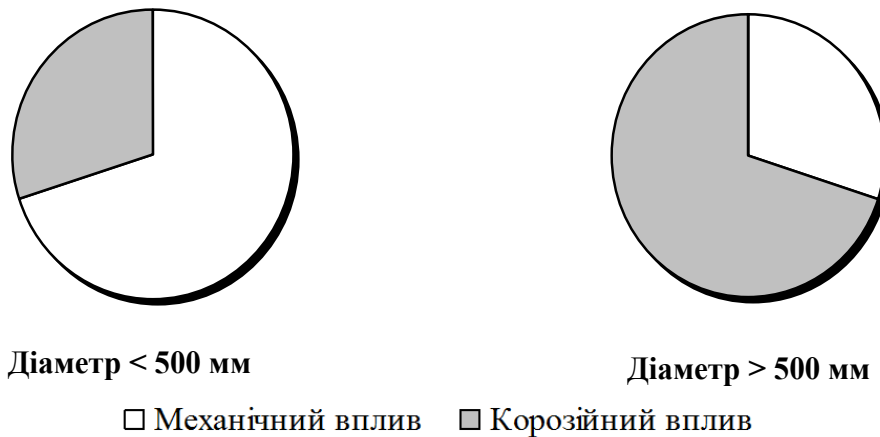


Рисунок 1.3 – Залежність причин пошкоджень каналізаційних трубопроводів від їх діаметрів

Тільки в м. Харкові знос каналізаційних мереж становить 57–73 %, (рис. 1.4), що вимагає їх заміни та санації. Колектори діаметром 400–2000 мм (приблизно 350 км) – найбільш зношена частина й являє собою ¼ всієї протяжності мережі (загальна протяжність каналізаційних мереж у м Харкові становить близько 1500 км). Особливу проблему становлять труби з залізобетону (23 %) та оглядові колодязі, які руйнуються в першу чергу через газову корозію. Каналізаційна мережа включає в себе приблизно 60000 оглядових колодязів. Більшість оглядових колодязів (80 %) виконані з залізобетонних кілець з діаметрами 800–2000 мм. Інші типи оглядових колодязів являють собою прямокутні конструкції, зроблені з цегли, бетонних елементів або залізобетону. Тунельні колектори також схильні до корозії, та близько 10–15 % мають руйнування залізобетонних конструкцій склепіння [8].



Рисунок 1.4 – Протяжність інженерних мереж та їх знос у м. Харкові

Питомі витрати на ремонт трубопроводів малих діаметрів відносно невеликі, хоча частота відмов є високою. Це пов'язано з тим, що пошкодження, викликані фізико-механічними діями, носять, як правило, локальний характер. Колектори великого діаметра мають частоту відмов набагато меншу, але вимагають значних економічних витрат на відновлення, оскільки корозійні пошкодження є масштабнішими.

Під час аналізу аварій на каналізаційних мережах встановлено, що однією з причин руйнування труб є деформації основ під трубами, які викликані нерівномірними осіданнями ґрунтів. Ґрунт у природному стані може служити надійною основою для труб, заповнених водою, тому що їх маса не перевищує маси витісненої ними землі. Однак за своєю будовою ґрунти є неоднорідними – вони можуть бути сухими або насиченими водою. У разі порушення природної рівноваги ґрунтів глибокими виїмками, відкачуванням води або періодичними коливаннями напірного горизонту вони втрачають стійкість, набувають рухливості і можуть змінити щільність середовища, що оточує трубу. Рішення про тип основи під труби приймають враховуючи несучу здатність ґрунтів і фактичні навантаження [2, 4].

Як видно з даних табл. 1.3, понад 60 % руйнувань бетонних і залізобетонних каналізаційних колекторів відбувається внаслідок корозійних процесів на склепінній частини трубопроводів, у колодязях, оглядових камерах, вентиляційних шахтах тощо.

Таблиця 1.3 – Пошкодження каналізаційних мереж, виконаних із бетону та залізобетону [2]

Пошкодження	% від загальної кількості пошкоджень
Розкриття стиків, наявність наскрізних тріщин	18
Стирання лоткової частини трубопроводів	15
Корозійне руйнування з оголенням арматури стін, колодязів, камер та вентиляційних шахт	23
Корозія, руйнування склепінної частини колектора	44

На підставі даних обстежень каналізаційних трубопроводів виділяють 4 групи випадків аварійного пошкодження колекторів [12]:

1. колектори, що відводять промислові стоки одночасно з господарсько-побутовими, що пошкоджені за 4–6 років після початку експлуатації до аварійного стану, внаслідок високої швидкості корозії бетону > 8 мм/рік;

2. колектори, аварійне пошкодження яких настало за 7–20 років внаслідок корозії бетону їх стінок зі швидкістю 5–8 мм/рік. Термін служби цих колекторів (господарсько-побутових і промислових стоків) залежить від товщини трубопроводу та режиму експлуатації;

3. колектори для господарсько-побутових стоків, на яких аварійні ситуації відбувалися за умов експлуатації 8–22 років внаслідок середньої швидко-

сті корозії 3–5 мм/рік. Таку різницю безаварійної експлуатації колекторів можна пояснити відмінностями якості бетону труб, а також ступенем заповнення колектора в процесі експлуатації;

4. колектори великого діаметра з великою товщиною стінок і вентиляваним простором над потоком рідини (зі зменшеною концентрацією сірководню в підсклепінному просторі), які пропрацювали безаварійно понад 30 років.

Незалежно від причин аварійного руйнування колекторів, можна зробити висновок, що терміни безаварійної служби залізобетонних каналізаційних трубопроводів дуже малі. З огляду на зростаючу довжину каналізаційних мереж, труднощі їх ремонту, відновлення та небезпеку забруднення навколишнього середовища стічними водами, необхідно забезпечити населені пункти надійними каналізаційними спорудами, розрахованими на безаварійну службу протягом десятків років (50 і більше). Для вирішення цього завдання необхідні зміни у проєктуванні, виготовленні, будівництві та експлуатації каналізаційних колекторів. Необхідно уточнити нормативи, від яких залежить термін служби залізобетону в даних умовах, їх надійність із точки зору захисту навколишнього середовища від забруднення стічними водами.

1.2 Агресивні експлуатаційні середовища в системах водовідведення

У каналізаційних мережах великого діаметра, як зазначалося вище, переважають руйнування трубопроводів (безнапірних або самопливних ділянок) внаслідок корозії [1, 2, 4]. Основна причина такого виду корозії – мікробіологічна сірчано-кислотна агресія, тобто вплив на бетонну поверхню трубопроводу сірчаної кислоти, що продукується тіоновими бактеріями [1, 2, 4, 10, 13–33]. Утворення агресивного середовища в каналізаційних колекторах водовідведення можна представити у вигляді наступних етапів [1, 2, 4, 13–16, 27, 31–33]:

- утворення сірководню (H_2S) у стічній воді в анаеробних умовах внаслідок мікробіологічних процесів;
- виділення H_2S зі стічної рідини в підсклепінний простір;
- розчинення сірководню в конденсатній волозі на поверхні труб і його окислення тіоновими бактеріями до сірчаної кислоти.

Стічна вода, що транспортується колектором, згідно СНіП 2.03.11-85, не є агресивною по відношенню до бетону і залізобетону.

Атмосфера підсклепінного простору, що містить сірководень, є корозійно-небезпечною для бетону: від слабоагресивної до агресивної [13, 27, 34].

На формування агресивності газоподібного середовища впливає ряд параметрів: склад стічних вод (концентрація сульфатів, хімічне споживання кисню – ХСК), наявність ділянок з анаеробними умовами, зон підвищеної турбулентності водного потоку (перепадні колодязі та камери, повороти тощо), температура стічних вод, що подаються у каналізацію тощо.

Під час розчинення газоподібних сполук (головним чином сірководню) та їх мікробіологічного окислення у плівковій конденсатній волозі на поверх-

ні склепінної частини каналізаційних колекторів утворюється надзвичайно корозійно-агресивна суміш із низьким значенням рН і високим солевмістом, яка активно взаємодіє з компонентами бетону (головним чином, із цементними гідратами). На ряді ділянок каналізаційних мереж склад плівкової конденсатної вологи на поверхні бетонних конструкцій згідно СНіП 2.03.11-85 є сільноагресивним по відношенню до бетону [4].

В цілому корозійне руйнування бетону склепінної частини каналізаційних мереж і споруд на них зумовлене впливом двох агресивних експлуатаційних середовищ: газоподібного, але, головним чином, рідкого – плівкової конденсатної вологи, які сформовані, в основному, продуктами мікробного метаболізму.

1.3 Діагностика стану каналізаційних мереж

1.3.1 Найпоширеніші методи діагностики стану каналізаційних трубопроводів

Ефективна та безаварійна експлуатація водопровідних і каналізаційних мереж неможлива без інформації про їх технічний стан, на підставі якого можна запобігати надзвичайним ситуаціям на цих об'єктах, планувати ремонтні роботи, здійснювати приймання новозбудованих та відремонтованих мереж. Своєчасна діагностика стану каналізаційних трубопроводів дає можливість виявити порожнечі та зони розуцільнення у прилеглих ґрунтах, визначити технічний стан трубопроводів для виявлення дефектів і руйнувань, місць інфільтрації та ексфільтрації стічних вод, рівня осаду у трубах і тунельних колекторах тощо.

Експлуатація та ремонт підземних трубопроводів різного призначення набувають все більш вираженої тенденції до ускладнення та підвищення відповідальності за якість виконуваних робіт. Особливо наочно ця тенденція проявилася в останні 10–20 років. Раніше основна складність і відповідальність за експлуатацію та ремонт трубопроводних систем була пов'язана з нафто-, газо- та продуктопроводами (через техногенне та екологічне навантаження на навколишнє середовище у випадку аварій на цих спорудах). Однак останнім часом трубопроводи комунального водного господарства все частіше стають джерелом підвищеної небезпеки і, як наслідок, – надзвичайних ситуацій різного характеру. Наслідки від аварій та незадовільного стану цих мереж завдають значних екологічних і економічних збитків. Внаслідок аварій на каналізаційних колекторах відбувається підтоплення підземного простору міст стічною водою, забруднення ґрунту, водойм і ґрунтових вод каналізаційними стоками. У зв'язку з тим, що більше 75 % каналізаційних мереж України відпрацювали свій нормативний термін, екологічну ситуацію на спорудах водовідведення можна оцінити як напружену, а на окремих ділянках – небезпечну або навіть кризову [1, 2, 12–14, 18, 22–24, 27].

Велика частина підземних трубопроводів комунального водного господарства країни перебуває за межами розрахункових термінів амортизації, а технічний стан значної їх частини можна визначити як перед-арійний чи ава-

рійний. При цьому кількість трубопроводів у такому технічному стані продовжує стрімко зростати з року в рік.

Протяжність основних каналізаційних мереж на підприємстві ДОКП «Донецькоблводоканал» становить 1733 км, з них 471 км (27,2 %) зношені та 231,1 км (13,8 %) знаходяться в аварійному стані [1].

Амортизація основних фондів каналізаційних мереж в м. Харкові становить 70 %, причому близько 40 % всієї каналізаційної мережі повністю відпрацювало свій ресурс. Дослідження, проведені науковцями Харківського національного університету будівництва та архітектури та працівниками КП «Харківводоканал», підтверджують, що каналізаційні тунелі з бетону та залізобетону перебувають у стадії інтенсивного руйнування внаслідок корозійних процесів [35]. В табл. 1.4 наведено результати обстеження оглядових шахт на діючих каналізаційних колекторах м. Харкова, що свідчить про їх аварійний стан.

Успішно експлуатувати споруди, що знаходяться у подібному стані, планувати реконструкцію мереж або капітальний ремонт трубопроводів без об'єктивної інформації про їх стан вкрай складно і небезпечно [1, 2, 4].

В Україні експлуатація зовнішньої каналізаційної мережі в містах і селищах здійснюється спеціальними службами районів або ділянок, які входять до складу управлінь водопровідно-каналізаційного господарства або відповідних відділів при міських і селищних комунальних органах. На промислових підприємствах експлуатацію каналізаційної мережі здійснюють спеціальні служби. Експлуатаційні служби кожного району можуть обслуговувати мережу протяжністю до 1000 км. До складу служб району можуть входити служби виробничих ділянок, які обслуговують мережу довжиною 100–150 км [2, 4].

Таблиця 1.4 – Стан конструкцій оглядових шахт на каналізаційних тунелях м. Харкова [35]

№ шахти	Глибина, м	Розмір шахти у плані	Діаметр тунелів у шахті	Стан металокопструкцій	Технічний стан внутрішніх стін шахти
1	2	3	4	5	6
9	19,16	4,55x4,25 (3,8x3,5)	Вихідного –1,84	Металокопструкції сильно кородовані, частково відсутні (обвалені)	Бетонні стіни, перекриття зазнали незначної газової корозії
10	11,82	Кругла у плані Ø4,6	1,84	Металокопструкції відсутні у зв'язку з їх обривом	Бетонні стіни, перекриття зазнали незначної газової корозії
12	4,91	Кругла у плані Ø5,0	Вхідного – 0,8 (після санації), вихідного –1,5	Металокопструкції відсутні у зв'язку з їх обривом	Бетонні стіни, перекриття зазнали незначної газової корозії
6	6,75	Кругла у плані Ø5,0	1,84	Металокопструкції відсутні у зв'язку з їх обваленням	Бетонні стіни, перекриття зазнали незначної газової корозії

Продовження табл. 1.4

1	2	3	4	5	6
7	8,64	5,0x4,5	1,84	Металеві сходові марші та огороження зазнали сильної корозії, як наслідок – їх повне обвалення	Бетонні стіни, перекриття зазнали незначної газової корозії
8 ХТЗ	12,22	Кругла у плані Ø5,96	Вхідного – 1,5 (від ш. 10), вихідного – 1,84 (на ш. 7)	Металоконструкції у зв'язку із сильною корозією перебувають в аварійному стані. Спуск є неможливим.	Покриті поліетиленовою плівкою, стан задовільний. Капітальний ремонт був у 2002 р.
8-ма Північна група заводів	10,76	3,7x3,7	1,84	Металеві сходові марші та огороження зазнали сильної корозії, як наслідок – їх повне обвалення	Бетонні стіни, перекриття зазнали незначної газової корозії
5-й Роганський тунель	12,65	Кругла у плані Ø5,0	1,84	Металеві конструкції відсутні у зв'язку з їх обваленням	Бетонні стіни, перекриття зазнали незначної газової корозії
3 «Автозапчастина»	15,66	3,8x3,3	1,84	Металеві конструкції зазнали сильної газової корозії, частково відсутні (обвалені)	Бетонні стіни, перекриття зазнали незначної газової корозії
5-й Промпобутовий тунель	13,18	2,0x4,3	1,84	Металеві сходові марші та огороження сильно кородовані	Захисний шар бетону на перекриттях і стінах скородований (видно арматуру)

Основні заходи, спрямовані на експлуатацію та контроль стану каналізаційних мереж, наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Заходи щодо експлуатації та контролю стану каналізаційних мереж

Проведена робота	Періодичність виконання
Контроль мереж і місць стиків очисних і трубних замків. Оцінка щільності, стану, прогнозування	Раз на рік
Перевірка каналізаційних стоків	За необхідності
Контроль за станом стічних вод, запиранням замків	Щоквартально
Перевірка стану забруднення	Кожні 6 місяців
Оптичний контроль за підземними та змішаними стоками	За необхідності
Випробування мереж на щільність водою для визначення руйнувань і просочування вод	За необхідності

Спостереження за технічним станом каналізаційної мережі включає [2, 4]:
 – зовнішній огляд мережі – виявлення дефектних люків, горловин колодязів (виконується один раз у два місяці);

- технічний огляд – визначення пошкодження мережі, наявності інфільтрації, ступеня наповнення труб, необхідності очищення та ремонту мережі (1–2 рази на рік);

- технічний огляд основних магістралей, зливоспусків і приєднань до колекторів. На підставі результатів огляду складають дефектну відомість і кошторис на поточний та капітальний ремонт або графіки на очищення мереж;

- огляд внутрішніх порожнин каналізаційних труб діаметром 200–1200 мм - виконується телевізійними установками.

У процесі експлуатації тунельних колекторів здійснюється технічний контроль за: підключенням відкритої мережі до споруд, проведенням підземних робіт над тунелем і в безпосередній близькості від нього, скиданням снігу із самоскидів у шахти під час снігосплаву, будівництвом і ремонтом тунелів і споруд, а також за ліквідацією закупоювань у перепадних пристроях, шахтах і свердловинах.

Для технічного огляду тунельних колекторів та їх ремонту повинні передбачатися певні можливості [2, 4]:

- припинення транспортування ними стічних вод (колектори закільцовані або наявність колекторів-дублерів);

- відключення приєднання каналізаційних мереж до шахт і бурових свердловин;

- проведення скидань через аварійні випуски та зливоспуски у водойми (для чого необхідний дозвіл організації з охорони вод).

- Заходи щодо визначення та оцінки стану каналізаційних мереж включають [2, 4]:

- розробку відповідного плану з урахуванням специфіки роботи кожного підприємства та його виробничих цехів;

- підготовку до проведення оглядів;

- інспекційні огляди;

- аналіз результатів обстежень стану каналізаційних мереж;

- використання результатів обстежень для оцінки стану конструкцій;

- висновок – про проведення додаткового інспектування, в тому числі й з очищення стічних вод, встановлення тимчасових інтервалів експлуатації, інспекції та очищення, або вживання заходів з усунення пошкоджень.

Найкращим способом інспекції трубопроводів водовідведення є внутрішня пряма та непряма інспекція будівельних конструкцій [2, 4]. Пряма інспекція включає в себе візуальне спостереження та обхід. Для проведення прямої інспекції використовують: систему нахилених дзеркал; фотографування каналів; лазер і шайбу з отвором; спостереження за допомогою телекамер, встановлених у трубопроводах. Класифікація методів інспекції каналізаційних колекторів приведена на рис. 1.5.

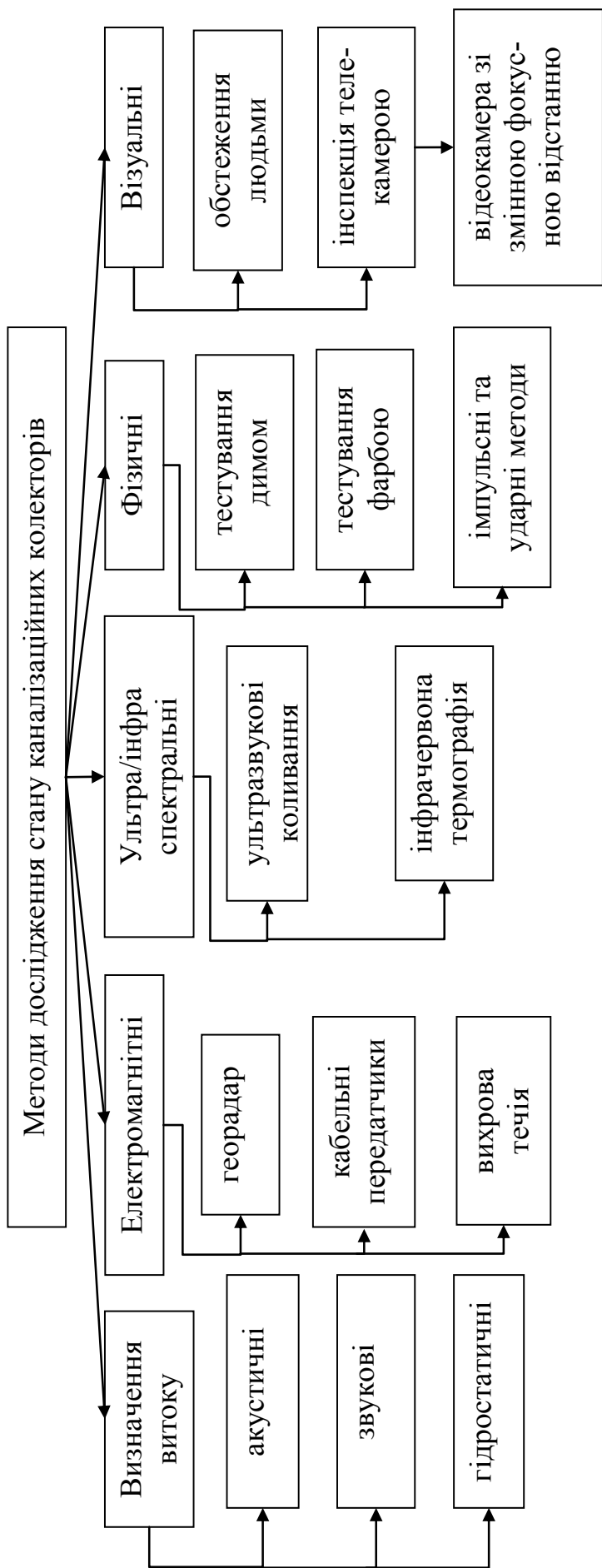


Рисунок 1.5 – Класифікація методів інспекції каналізаційних колекторів [32]

Для визначення герметичності каналізаційних трубопроводів на практиці застосовують методи випробування на щільність із використанням повітря, води або диму [2, 4, 11, 36–38].

Випробування каналізаційних трубопроводів на щільність за допомогою диму набуло великого поширення в США і Канаді під час діагностики непрохідних трубопроводів. Метод є оперативним, недорогим і ефективним, оскільки не вимагає складного обладнання та висококваліфікованої робочої сили. Для інспектування використовують нетоксичні димові бомби 3–5-хвилинної дії або рідкий холодний білий дим без запаху. Димову бомбу поміщають у шахту колектора з вентилятором, що подає дим через систему. У випадку проходження диму назовні крізь трубу визначають положення тріщин [36, 37].

Метод фарбування води дозволяє простежити потік стічної води, що проходить через систему колекторів, а також виявити несанкціоновані підключення. Нетоксична фарба у вигляді порошку додається у воду, що транспортується трубопроводом. У шахті, яка розташована нижче за течією від точки додавання барвника, спостерігають за інтенсивністю фарбування потоку рідини в колекторі [36, 37].

У Німеччині для визначення локалізації витоків у каналізаційних колекторах використовують електричну систему AMS-4, яка дозволяє вимірювати опір матеріалу труби і визначати положення тріщин, витоків і т.п. Метод добре зарекомендував себе під час обстеження бетонних і керамічних труб [39].

Використання лазерних технологій для діагностики стану каналізаційних трубопроводів ґрунтується на тому, що рівна стіна труби відіб'є найбільшу кількість світла, а пошкоджена поверхня – меншу кількість світла назад на спеціальний датчик.

Лазерні технології застосовуються у трубопроводах із гладкими стінами: керамічними, залізобетонними, оскільки нерівності внутрішньої поверхні трубопроводу (виступаючі частини цементного розчину під час укладки цегли) сприймаються приладами як пошкодження, зміщення стиків тощо [11, 36].

Метод інфрачервоної теплографії базується на визначенні температурних змін у певних областях трубопроводів та порівнянні її з температурою навколишнього ґрунту. Технологія є ефективною для виявлення витоків, пустот навколо труби та слабого засипання виїмки. Ефективність цього методу залежить від місцевих метеорологічних умов: дощу, снігу, хмарності, погоди, а також від кваліфікації персоналу, оскільки точність визначення місця розташування та ступеня дефектів під час інтерпретації результатів обстеження залежить від рівня професійної підготовки оператора [11, 36].

Для виявлення невидимих пошкоджень можуть використовуватися акустичні методи, ґрунтовані на поширенні звукових коливань. Під час використання цих методів, окрім інформації про наявність корозії на трубі та пошкодження в основі, може бути виміряна товщина стінки труби, стан і глибина тріщин; виявлення помилок у режимі експлуатації (обстеження можна прово-

дити в колекторі без зупинки його експлуатації та попереднього очищення) [2, 4, 11].

Для оцінки стану товщини стін, глибини тріщин, умов у прилеглому ґрунті використовують ультразвукові методи, які полягають у реєстрації швидкості проходження ультразвукових хвиль у середовищі, що досліджується. Цей метод інспекції дуже добре себе зарекомендував під час обстеження бетонних, пластмасових, керамічних трубопроводів. В якості недоліку цього методу необхідно відзначити, що для ультразвукового обстеження спеціалістам необхідно мати повний доступ до труби, що залягає у ґрунті [4, 10, 34].

До візуальних методів обстеження каналізаційних трубопроводів відносять діагностику стану колекторів співробітниками служби експлуатації мереж водовідведення та телевізійну інспекцію [2, 11, 24, 31–33].

Телевізійний огляд дає найбільш точну й об'єктивну інформацію про стан внутрішньої поверхні трубопроводів. Однією з телевізійних систем для обстеження колекторів є PANORAMO® система, яка вперше була застосована в 2007 р. (рис. 1.6) [37, 38]. На пристрої розташовані 2 камери. Кожна система лінз має спеціальну оптику з кутом огляду 185 градусів, що дозволяє отримати максимальну кількість інформації про стан трубопроводу.

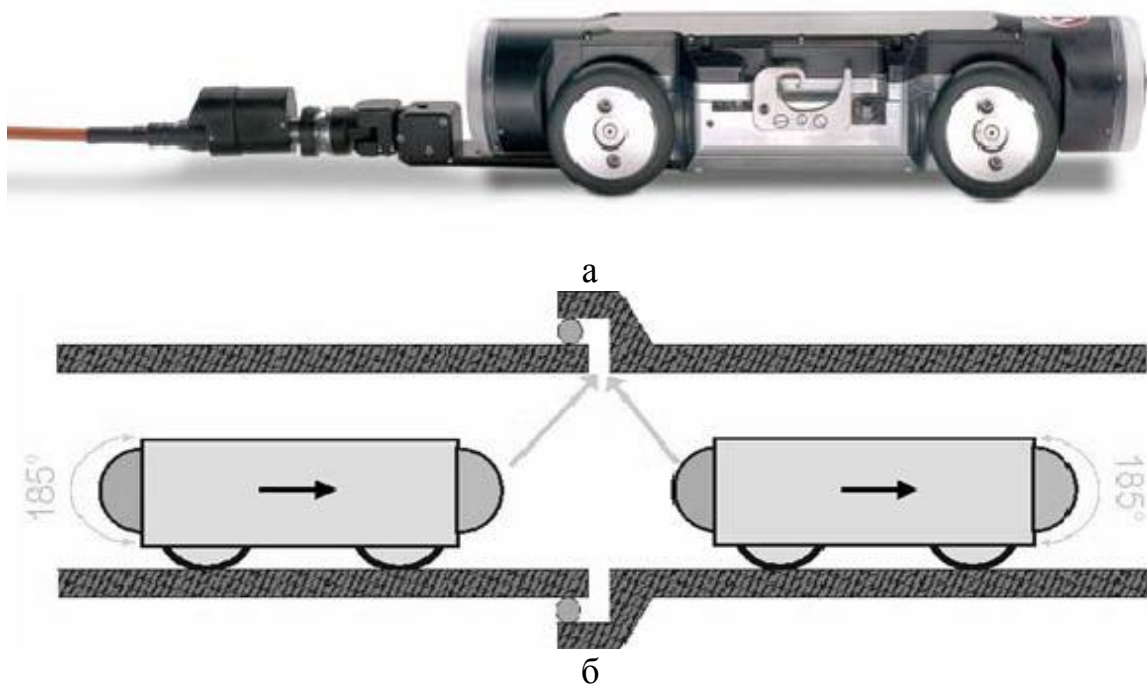


Рисунок 1.6 – Система PANORAMO®:

а – зовнішній вигляд; б – схема обстеження трубопроводів

Застосування телеустановок, під час застосування певних технологій ремонту, полегшує його проведення, забезпечує ефективний контроль якості очистки, а також дозволяє відновити втрачені або застарілі схеми трубопроводів. За допомогою телеустановок визначають наступні види дефектів труб:

наявність тріщин у стінках труб, зміщення та розстикування проломів, деформації труб, негерметичність стиків труб, стан внутрішньої поверхні труби, визначення місця розташування засмічень, заторів, несанкціонованих підключень тощо [1, 2, 4, 11, 36–42].

До телекамер, які використовують для телевізійної діагностики стану каналізаційних мереж, висуваються ряд вимог: стійкість техніки до тиску води, нечутливість до поштовхів, ударів і температури, захищеність від вибуху тощо. Для успішного проведення зйомок також необхідно дотримуватися таких умов: достатньо постійне освітлення в колекторі, освітлення для радіальної або асиметричної зйомки, достатня ширина зйомки траси [4].

Поява самохідних роботів для телеінспекції водопровідних і каналізаційних трубопроводів відноситься до середини 50-х рр. Одним з основоположників даного напрямку є фірма «ІВАК» (м. Кіль, Німеччина). У 80-ті рр. муніципальні служби великих російських міст для інспекції трубопроводів могли використовувати тільки імпортовані телесистеми «ІВАК», «Rausch» (Німеччина), «Vretmaskin» (Швеція). В СРСР інспекційні ТВ-роботи для дослідження водопровідних і каналізаційних мереж до 1991 р. не застосовувались. Наразі, лідируюче місце з виробництва роботів для телевізійної діагностики займає НВО «Тарис» (Росія, м. Москва) [1]. На підприємстві випускають різні системи телеінспекції трубопроводів не тільки для діагностики стану трубопроводів, а й локального ремонту із застосуванням фрезерного робота та системи з установки внутрішніх бандажів для ліквідації витоків стічних вод [40].

В наш час спостерігається тенденція до використання декількох методів обстеження каналізаційних колекторів на базі телевізійної діагностики. У Німеччині розроблено ряд комплексних вимірювальних приладів (Sonomolch, «LASMO», «pulse Echo Radar» тощо), які, крім ТВ-діагностики каналізаційних колекторів, можуть одночасно визначати міцність бетону на стиск, глибину тріщин у бетонних колекторах і навіть їх основах. Наприклад, система PIRAT (Pipe Inspection Rapid Assessment Technique) об'єднує в собі лазерне та ультразвукове обладнання [11, 34, 40]. Система SSET (Sewer Scanners and Evaluation Technology), що розроблена в Японії, поєднує в собі відеоінспекцію та сканування поверхні колекторів. Пошкодження трубопроводів ідентифікуються й описуються у вигляді поздовжніх горизонтальних і вертикальних відхилень [11, 36, 37, 41, 42].

Система KARO являє собою робота, призначеного для огляду керамічних і бетонних колекторів діаметром 200–500 мм і довжиною до 400 м. Прилад складається з різних датчиків – оптичних, ультразвукових і мікрохвильових, які можуть визначати тип, стан і ступінь пошкодження у трубі, несправність у стіні труби і в її основі. Додатковий картографічний модуль дозволяє виявити несанкціоновані підключення на спорудах водовідведення [11].

В Україні одним із перших розробників і виробників інспекційних телероботів стало ВАТ «ДОНВУГЛЕВОДОКАНАЛ». На цьому підприємстві були розроблені вітчизняні системи «Донбас-1», «Донбас-2», діагностичний

плаваючий зонд, які пройшли апробацію у виробничих умовах і отримали високу оцінку фахівців [1, 4].

В інституті «УкркомунНДІпрогрес» (м. Харків) з 1990 р. ведуться роботи зі створення установки для огляду внутрішньої поверхні діючих колекторів. З 1996 р. було розроблено і змонтовано на базі мікроавтобуса РАФ пересувну установку для огляду колекторів діаметром 500–1200 мм. З 1997 р. на замовлення комунального підприємства «Харківводоканал» інститут виготовив лабораторію телевізійного огляду, яка забезпечує огляд колекторів діаметром 600–800 мм (у разі заповнення до 37 %), 1000–1200 мм (при заповненні до 50 %) і 1200–3000 мм (за умов заповнення до 70 %). Максимальна довжина ділянки, що інспектується, сягає 700 м; допустима швидкість потоку рідини у процесі огляду – 3 м/с. З 1997 р. цим лабораторним комплексом було проведено огляд 9000 м тунельних колекторів, 3000 м трубопроводів діаметром 600–1500 мм, 32 шахтних колекторів м. Харкова. Обстежено також 3000 м трубопроводів в Івано-Франківську, Сумах, Херсоні та ін. містах України [4, 11].

Сучасні ТВ-роботи переміщуються у трубопроводах шляхом проштовхування або протягування. Існують і плаваючі ТВ-роботи для самопливних колекторів. Довжина інспектованих ділянок не перевищує 50–80 м. Протяжність ділянки для обстеження лімітується довжиною кабеля та здатністю ТВ-робота протягнути за собою кабель трубопроводом, тобто силою тяги, яка залежить від потужності приводів ТВ-робота, його маси, матеріалу, форми коліс (гусениць), а також від матеріалу та стану каналізаційної мережі. Діапазон діаметрів трубопроводів, що обслуговуються ТВ-роботом, з одного боку, обмежений габаритами робота, а з іншого, можливістю переміщення телекамери в центрі трубопроводу великого діаметра та наявністю на ТВ-роботах освітлення, достатнього для огляду великих труб. Самохідні ТВ-роботи застосовуються зазвичай для трубопроводів діаметром від 90 до 1200–1400 мм (рідко – до 4000 мм). Мінімальний діаметр визначається технічними можливостями для створення мініатюрної самохідної телесистеми, а максимальний – доцільністю застосування ТВ-роботів у великих прохідних трубопроводах [1, 41].

У табл. 1.6 наведено загальні пошкодження та дефекти каналізаційних трубопроводів, які можуть бути виявлені у процесі інспектування різними методами.

Як видно з даних табл. 1.6, наявність корозійних процесів у трубопроводах водовідведення може бути виявлена за допомогою візуальних методів діагностики – обстеження співробітниками мереж водовідведення та за допомогою телевізійної діагностики, а також за допомогою ультразвукових методів. Але жоден із вищезазначених методів не дозволяє кількісно оцінити ступінь корозійного ураження трубопроводів водовідведення, яке є основною причиною руйнування цих об'єктів каналізації та головним фактором зниження їх експлуатаційної довговічності.

Таблиця 1.6 – Види пошкоджень, які можна визначити під час технологічної інспекції [36]

Метод інспекції	Тип пошкоджень/дефектів						
	Винос з'єднання	Погіршення якості цементного каменю	Наявність тріщин	Корозія	Товщина труби	Поперечний вигин	Місцеві пошкодження склепіння
CCTV	+	+	+	+	-	+	+
SSET	+	+	+	+	-	+	+
Ультразвук	+	-	+	+	+	+	+
Лазерна інтерферометрія	+	-	+	-	-	+	+
Інфрачервона термографія	+	-	+	-	-	-	-
Тест фарбою	-	-	-	-	-	-	-
Обстеження людьми	+	+	+	+	-	+	-
Інспекція димом	+	-	+	-	-	-	-

1.3.2 Методи неруйнуючого контролю стану бетонних споруд, що знаходяться в умовах корозійної агресії

Надійність і довговічність бетонних споруд у значній мірі залежать від якості їх конструкцій. Механічні властивості ряду матеріалів у процесі експлуатації зазнають серйозних змін (аж до руйнування), тому необхідні методи контролю показників надійності цих матеріалів і конструкцій з них. Руйнівні методи контролю мають ряд переваг: оперативне отримання інформації, низька трудомісткість проведення випробувань, можливість автоматизації контрольно-вимірювального процесу та ін. [43]. Наразі контроль якості залізобетонних конструкцій та споруд стандартизований і для нього застосовується більше 20 методів неруйнуючого контролю, поставлено на виробництво 10 моделей стандартних приладів неруйнуючого контролю [44].

Під час проведення неруйнуючого контролю бетонних конструкцій та споруд основними контрольованими параметрами є: міцність, величина захисного шару, вологість, морозостійкість, вологостійкість і ін. Основним показником є міцність на стиск – властивість матеріалу чинити опір руйнуванню під дією внутрішніх напружень, що викликані зовнішніми силами або іншими факторами. Існує кілька методів випробування бетонів на міцність [2, 4, 43–60]:

- метод стандартних зразків. Зразки кубічної або циліндричної форми виготовляють із проб бетонної суміші, яка застосовується у процесі виготовлення контрольованого виробу. На підставі лабораторних випробувань можна судити про довговічність дослідженого бетону, який піддавали певним впливам для руйнування;

- використання кернів, що були вибурені з конструкції, які потім випробовують подібно до стандартних зразків під пресом. Бетон кернів повністю відповідає реальному матеріалу конструкції. Однак складність

відбору зразків-кернів, висока трудомісткість і вартість вибурювання кернів, небезпека порушення цілісності конструкції, можливе порушення структури керна під час вибурювання й обробки торців – обмежує використання цього методу.

Метод випробування стандартних бетонних зразків має ряд недоліків: обсяг виготовлення стандартних зразків не можна порівняти з обсягами виробництва конструкцій та споруд, умови формування і твердіння не завжди відповідають умовам виготовлення конструкцій. У лабораторії оцінити стан бетонних зразків легше та простіше, ніж у натурних експлуатаційних умовах, але міцність бетонних зразків може суттєво відрізнятись від фактичної міцності бетону в конструкціях [46].

Основні методи неруйнуючого контролю, основані на побудові індивідуальних градуювальних залежностей, наведено нижче.

Метод пластичної деформації оснований на вимірюванні розмірів відбитка, який залишився на поверхні бетону після зіткнення з нею сталеві кульки або іншого штампу. Метод є застарілим, але до сих пір його використовують через простоту та малу вартість обладнання. Найбільшого поширення набули молоток Кашкарова [46, 54, 59], прилад МИС-500 (молоток випробувальний стабілізований), ручний кульковий молоток (молоток І.А. Фідзеля), дисковий прилад ДПГ-4 (прилад А.М. Губбера), універсальний маятниковий прилад УМП та ін. [2, 4, 44, 46, 47]. Під час вимірювання міцності бетону цими методами слід враховувати: ретельну підготовку поверхні бетону до випробування: для забезпечення надійних та достовірних результатів важливо правильно наносити удар, тобто чітко перпендикулярно до поверхні бетону. Дуже складно наносити правильні ручні удари на вертикальних і похилих поверхнях. Вологість бетону під час випробування повинна бути близькою до вологості, за якої були проведені експерименти для побудови градуювальних кривих, таблиць або формул. У випадку значного розходження у вологості (понад 20 %) в отримані результати вводяться поправки [47, 54].

Метод пружного відскоку полягає у вимірі величини зворотного відскоку ударника після зіткнення з поверхнею бетону. Для випробувань цим методом використовують склерометр Шмідта та його аналоги (пружинні або маятникові молотки). Метод пружного відскоку оснований на вимірюванні поверхневої твердості бетону [2, 4, 46–49, 53].

Метод відриву зі сколюванням і сколювання ребра конструкції (метод місцевих руйнувань) полягає в реєстрації зусилля, необхідного для сколювання ділянки бетону на ребрі конструкції, або руйнування бетону під час витягання з нього анкерного пристрою. Метод буває двох типів: відрив під час висмикання анкера, закріпленого в бетон, і відрив плаского диска, приклеєного до бетону. Метод сколювання ребра конструкції застосовують за наявності в конструкції ребер, на які встановлюють сталеву скобу з виступами [46, 47, 53].

Це найбільш точні з методів неруйнівного контролю міцності бетону, оскільки для них допускається використовувати універсальну градуювальну залежність, в якій змінюються лише два параметри:

1) крупність заповнювача, яку приймають рівною 1 за умов крупності менше 50 мм і 1,1 у випадку крупності більше 50 мм;

2) тип бетону – важкий або легкий [46].

До недоліків цих методів слід віднести їх високу трудомісткість і неможливість їх використання в густоармованих ділянках, у випадку специфічних умов експлуатації бетонних конструкцій (споруди водовідведення, опори мостів), а також те, що вони частково пошкоджують поверхню конструкції [46, 47].

Метод відриву сталевих дисків полягає в реєстрації напруги, необхідної для місцевого руйнування бетону під час відриву від нього металевого диска [46, 47]. В наш час метод використовується рідко.

Ультразвуковий (УЗ) імпульсний метод полягає в реєстрації швидкості проходження ультразвукових хвиль [55, 59]. Метод є універсальним під час випробування зразків, виробів і конструкцій порівняно невеликих розмірів. В наш час його застосування у країнах СНД стандартизовано для контролю твердіння бетону, вихідного й експертного контролю міцності бетону, морозостійкості та тріщиностійкості бетону. Ультразвуковий метод дозволяє визначати властивості бетону не в поверхневому шарі, а у всій товщині виробу, що підвищує надійність контролю міцності. За технікою проведення випробувань можна виділити наскрізне УЗ прозвучування, коли датчики розташовують з різних сторін тестованого зразка, і поверхнєве прозвучування, коли датчики розташовані з одного боку. Необхідно відзначити складність застосування зазначеного методу на спорудах водовідведення [46–48, 56]. Найбільш широко поширені прилади, що реалізують цей метод – КК 14П, УФ-50 МЦ, сімейство приладів Пульсар, Бетон-32, УК-14ПМ, КК-10ПМС та ін.

Недолік застосування УЗ методу – сильний вплив деяких технологічних факторів на залежність між міцністю та швидкістю УЗ хвиль, що знецінює точність методу, особливо під час випробування конструкцій з бетону з невідомими властивостями. УЗ методом не рекомендують контролювати міцність масивних виробів і конструкцій (товщиною понад 5 м і довжиною понад 10 м) [55–57]. Для УЗ методів використовують складну радіотехнічну апаратуру, експлуатація якої в польових умовах ускладнена, і вимагає висококваліфікованих фахівців.

Резонансний (вібраційний) метод доцільно застосовувати у практиці лабораторних випробувань під час дослідження морозостійкості, корозійної стійкості, за необхідності контролювати зміни фізико-механічних характеристик бетону в часі в одних і тих же зразках [46]. Цим методом вимірюють частоту власних коливань зразків із розрахунком за цією характеристикою динамічних модулів пружності. Саме цей метод був успішно застосований в Південній Африці, для обстеження бетонних каналізаційних труб, які зазнають впливу корозії внаслідок дії біогенної сірчаної кислоти. За допомогою резонансних методів визначали різноманітні склади бетону з різним типом заповнювача, в результаті чого стало можливим обрати корозійно-стійкий бетон, що значно продовжило час експлуатації каналізаційних труб [51].

Крім перерахованих методів і апаратних засобів контролю, існує й ряд інших, таких як інфрачервоний, радіаційний, вібраційно-акустичний, акустико-емісійний, застосування яких є дуже складним або знаходиться на стадії розробки [46, 47, 53, 57, 58].

Основними вимогами, що висуваються до приладів неруйнуючого контролю, є: простота використання, універсальність і достатня точність, тобто із приладом повинен вміти працювати середньокваліфікований фахівець після прочитання паспорту та інструкції.

Вибір методу неруйнівного контролю залежить від ряду факторів: характеристики бетону, виду виробу чи конструкції, трудомісткості методу, умов експлуатації споруди, місцевих умов тощо. У ряді випадків може виникнути необхідність спільного застосування декількох методів, тобто комплексних випробувань. Оптимальний метод для випробувань можна визначити тільки з урахуванням всіх конкретних умов [46, 47, 53].

Під час проведення випробувань зі зміни міцності або визначення модуля пружності необхідно враховувати і вид корозії (за класифікацією Москвіна) [61]. Метод пластичних деформацій, за умов корозії III виду дозволяє отримати найбільш точні результати, в той час як в дослідженнях корозії I і II виду (а саме цей тип корозії бетону відбувається в каналізаційних мережах) він не може бути використаний. Метод вимірювання міцності під час стиснення з успіхом може бути застосований під час оцінки корозії I і II виду, але він не повинен застосовуватися як основний метод у дослідженнях корозії III виду, оскільки на перших етапах розвитку корозії даного виду відбувається кристалізація солей в порах бетону, бетон ущільнюється зі збільшенням міцності. Підвищення міцності носить тимчасовий характер, оскільки чим більш агресивним є середовище, тим швидше знижується міцність [61, 62].

Найбільш складними для контролю бетону конструкцій є випадки впливу на нього хімічних, мікробіологічних, термічних, атмосферних агресивних чинників. Ці чинники впливають у першу чергу на поверхневі шари бетону, тому під час обстеження необхідно візуально, простукуванням або змочуванням розчином фенолфталеїну виявити поверхневий шар із порушеною структурою. Підготовка бетону для випробувань неруйнівними методами полягає у видаленні поверхневого шару на ділянці контролю та зачистці поверхні наждаковим каменем [47].

1.3.3 Методи контролю швидкості та глибини біогенної корозії бетону в мережах водовідведення

Різноманіття властивостей агресивних середовищ і корозії бетону сильно ускладнює вивчення цих процесів і, відповідно, вибір ефективних методів боротьби з корозією. Вибір методу дослідження має велике значення для отримання надійних результатів, що характеризують справжній напрямок і швидкість процесів корозії, які відбуваються в бетоні [61–65].

Основні фактори, що впливають на інтенсивне корозійне руйнування бетонних трубопроводів водовідведення, а отже і на небезпечну екологічну обстановку в прилеглих регіонах, наведено в табл. 1.7 [1, 2, 4, 13, 24, 66–74].

Одним з головних факторів, що впливають на експлуатаційну довговічність бетонних трубопроводів водовідведення, є швидкість корозії склепінної частини внаслідок біогенної сірчаної кислотної агресії. Ця агресія зумовлена особливими умовами, що створюються в самопливних каналізаційних колекторах через життєдіяльність мікроорганізмів, що окислюють неорганічні сполуки (H_2S , SO_2 , NH_3 , NO_x , CO та ін.) до надзвичайно агресивних неорганічних кислот. Головним продуктом цього процесу є сірчана кислота, яка активно взаємодіє з цементними складовими бетону, що призводить до розвитку корозійних процесів на склепінній частині колектора, утворення розчинних сполук та зниження міцності, скорочення терміну експлуатації та довговічності бетонних споруд [1, 4, 13, 66–74].

Таблиця 1.7 – Фактори, що впливають на інтенсивність розвитку корозії бетону в каналізаційних трубопроводах [73]

Фактор (збільшення)	Опис ефекту (передбачається збільшення)
Температура стічних вод та підсклепінного простору	Емісія сірководню з рідкої фази та мікробіологічна корозія бетону (МКБ)
Вологість підсклепінного простору	Утворення конденсату на склепінній частині трубопроводів та МКБ
Зменшення рН стічних вод	Емісія сірководню з рідкої фази та МКБ
Час перебування	Анаеробна активність сульфатредуючих бактерій та МКБ
Місце розташування в каналізаційній трубі	Склепіння та межа розділу фаз
Водне/цементне співвідношення	Дифузія агресивних компонентів у бетон
Пористість/проникність	Дифузія агресивних компонентів у бетон
Зменшення вмісту цементу	Інтенсивна дифузія агресивних компонентів у бетон
Наявність вапнякових агрегатів	Зменшення реакції агресивних компонентів
Підтоплення склепінної частини	Тимчасове зниження мікробної активності та МКБ протягом декількох тижнів

Для дослідження швидкості корозії необхідно застосовувати такі методи, які дозволили б визначити вплив найважливіших перетворень у бетоні на швидкість корозії [64]. Дослідження швидкості корозії бетону виконують за концентрацією певної речовини у зразку, наприклад, іонів кальцію або за зміною фізичних властивостей зразків (глибини руйнування, втрати у вазі тощо) [61–65, 73–79].

Комплексний вплив біологічних і гігromетричних чинників призводить до інтенсивного руйнування бетону каналізаційних колекторів. Сітка тріщин в певних умовах зростає безперервно, досягаючи іноді 10–20 см/добу. Характерно, що розвиток тріщиноутворення відбувається не тільки на поверхні споруди, але і на всю глибину бетону. Характер пошкоджень, що виникають у

бетоні та залізобетоні, визначається експлуатаційними умовами, в яких опиняються споруди водовідведення [80].

Будь-яка гетерогенна реакція протікає в кілька стадій: підведення реагуючих частинок до поверхні, гетерогенна реакція на поверхні й відведення молекул, які утворилися, від місця реакції. Кожній стадії притаманна певна швидкість. Корозія цементного каменю лімітується найменшою з цих швидкостей [63].

Під час розробки методу дослідження швидкості корозії слід виходити з того, що він повинен моделювати корозію бетону в конструкціях і надавати об'єктивні, легковідтворювані кількісні характеристики за умов тривалих випробувань, які можуть слугувати основою розрахунку довговічності бетонних конструкцій. Умови проведення досліджень повинні бути оптимальними для розвитку процесів корозії [65].

Фахівцями було проведено ряд лабораторних експериментів із визначення швидкості корозії цементного каменю в розчинах різних кислот. Всі дослідження швидкості корозії виконували за умов постійної величини поверхні зразка, що вступала в реакцію, й постійної концентрації агресивного розчину (зниження початкової концентрації агресивних розчинів не більше ніж на 5-8 %). У випадку дотримання прийнятих умов, швидкість корозії бетону змінювалася в часі (рис. 1.7) [63].

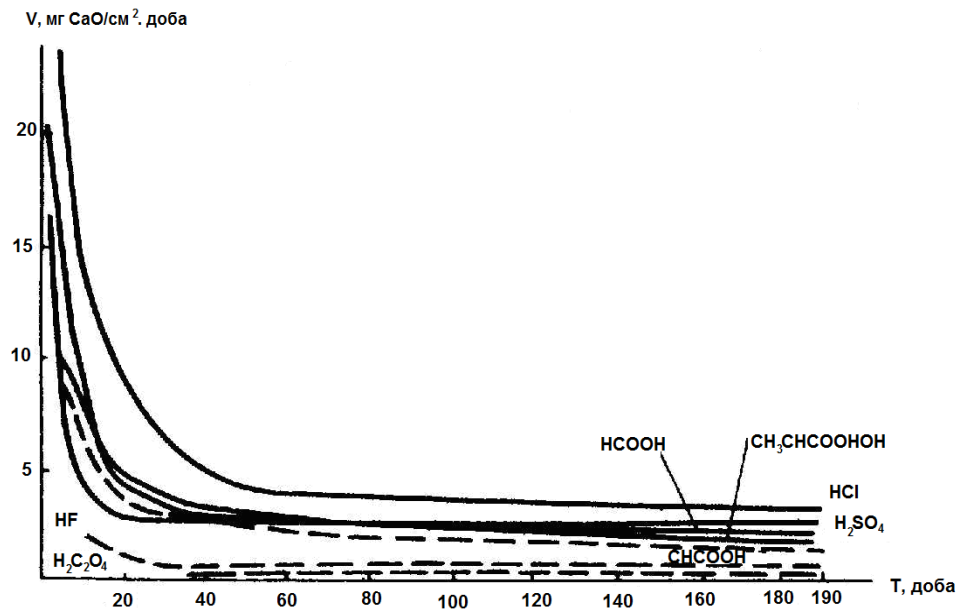


Рисунок 1.7 – Швидкість корозії цементного каменю в 0,1N концентрації розчинів різних кислот:

HCl (pH=1); H₂SO₄ (pH=1); H₂C₂O₄ (pH=2,59); HCOOH (pH=2,37); CH₃COOH (pH=2,87); CH₃CH(OH)COOH (pH=2,43); HF (pH=2,08)

Як видно з даних рис. 1.7, зміна швидкості корозії бетону в часі й невелика її кількість навіть у перші хвилини випробування свідчить про те, що

цей процес відбувається в дифузійно-кінетичній, а потім у дифузійній області. Під час взаємодії цементного каменю з соляною кислотою максимальна швидкість його корозії в перші хвилини не перевищує $100,5 \text{ мг CaO/см}^2 \cdot \text{добу}$, а потім швидко падає, внаслідок утворення нерозчинних продуктів, які перешкоджають проникненню агресивних розчинів углиб цементного каменю та визначають перехід процесу корозії в дифузійну область. На рис. 1.7 можна виділити три періоди зміни швидкості корозії. Перший, кінетичний період, дуже короткий, є однаковим для кислот рівної активності, характеризується максимальною величиною швидкості корозії. Коли на поверхні розділу фаз утворюється шар із продуктів взаємодії, процес сповільнюється, і швидкість корозії визначається дифузією іонів кислоти крізь утворену плівку. У цей період відбувається формування суцільної плівки. Другий, дифузійно-кінетичний період, характеризується також уповільненням швидкості корозії, але у значно меншій мірі. У третій період швидкість корозії стабілізується, поступово знижуючись із часом. Уповільнення процесу є функцією двох протилежних за знаком процесів: збільшення товщини плівки та утворення дефектів в її структурі [62, 63].

Для процесів кислотної корозії бетону є справедливим рівняння, отримане на основі опису кінетики гетерогенної реакції (рівняння Тамана), яке може бути записане в наступному вигляді [28]:

$$\delta = A_{\delta} \sqrt{D^* C_0 E t}, \quad (1.1)$$

де δ – глибина корозійного пошкодження, м;
 A_{δ} – коефіцієнт, постійний для даного складу бетону, $\text{м}^3/\text{кг}^{1/2}$;
 D^* – ефективний коефіцієнт дифузії агресивної речовини крізь шар продуктів корозії, $\text{см}^2/\text{год}$;
 C_0 – концентрація агресивної речовини, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 E – хімічний еквівалент, який являє собою співвідношення мас оксиду кальцію та кислоти, що вступають у взаємодію;
 t – час впливу агресивного середовища на бетон, год.

Для урахування впливу на бетон споруд водовідведення комплексу кислот була розроблена наступна формула [13]:

$$V_{\text{кор.}} = \frac{1,1 \cdot h_k}{t} \frac{1,1 \sqrt{p \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-pH} t + \delta^2} - \delta}{t} \cdot k_4 \cdot k_5, \quad (1.2)$$

де $V_{\text{кор.}}$ – швидкість корозії, $\text{мм}/\text{рік}$;
 h_k – глибина корозії, см ;
 p – коефіцієнт, що враховує властивості бетону: для бетонів марок W4, W6, W8 складає відповідно 33,60; 31,61; 27,82 $\text{см}^2/\text{год}$;
 t – час впливу агресивного середовища на бетон, год;
 pH – рН плівкової конденсатної вологи;

δ – величина дифузії біогенних кислот за фронт корозії, см;
 k_4 и k_5 – перерахункові коефіцієнти – год/рік і мм/см, 8760 та 10 відповідно.

Хоча стандартних методів випробувань до сих пір не існує, вітчизняні та зарубіжні фахівці виконували ряд експериментів з контролю глибини та швидкості біогенної корозії бетону в каналізаційних колекторах [12, 28, 65–86]. В ході досліджень стандартні бетонні зразки підвішували в підсклепінному просторі колектора з різним вмістом сірководню в газовому середовищі, в якому регулярно контролювали концентрацію сірководню. В ряді досліджень контролювали також температуру та вологість у спорудах водовідведення [76]. Після закінчення експериментів розраховували швидкість корозії бетону та зіставляли її з концентрацією сірководню в атмосфері підсклепінного простору колектора. В процесі натурних досліджень було доведено, що швидкість біогенної кислотної корозії бетону у спорудах водовідведення залежить від концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору. Тому для зниження швидкості корозійного процесу в каналізаційних колекторах, необхідно зменшити вміст сірководню в атмосфері підсклепінного простору до концентрацій $< 0,5$ ppm, а також знизити кількість вологи на склепінні колекторів водовідведення [28, 75, 85].

1.3.4 Методи оцінки ефективності протикорозійних заходів у мережах водовідведення

Оцінка реального корозійного стану конструкції є важливою для вибору складу бетону та виду протикорозійного захисту, для визначення можливості подальшої експлуатації конструкції або її заміни. Дані економічної статистики показують, що вже в перші 10 років служби в агресивному середовищі експлуатаційні витрати перевищують початкову вартість конструкції. Дослідження причин пошкодження різних будівельних конструкцій показують, що 55-75 % з них відбувається через неправильне урахування агресивних властивостей середовища й антикорозійних властивостей матеріалу [77].

Ступінь агресивності природних і техногенних середовищ по відношенню до бетонів і будівельних розчинів оцінюється за кількістю індивідуальних найбільш агресивних іонів і сполук. Прогнозувати корозійну ситуацію в експлуатаційному середовищі, що містить суміш речовин, особливо інфіковану різними групами мікроорганізмів, досить важко. Це пов'язано з тим, що під час такого підходу не враховуються складні хімічні взаємодії між компонентами середовища та дія мікробіологічного фактора [84]. Відомо, що найважливішою особливістю останнього є здатність живих організмів трансформувати у процесі життєдіяльності вихідне корозійне середовище [65]. Концентрація одних речовин, у тому числі й корозійно небезпечних, у міру споживання їх різними групами бактерій знижується, але при цьому можлива поява та накопичення не менш агресивних сполук, що не виявляються в початкових рідких і газоподібних середовищах.

Антикорозійні покриття для бетонних конструкцій водовідведення та очисних споруд почали застосовувати в основному з 1990-х років в Японії. Наразі проведено ряд досліджень щодо ефективності корозійних покриттів у захисті бетону від біогенної сірчаної кислотної агресії на бетонних спорудах водовідведення та очисних спорудах каналізації [87–89].

Як свідчать статистичні дані, найчастіше корозійний вплив оцінюють у натурних або лабораторних умовах (після експозиції у розчинах сірчаної кислоти різної концентрації) за втратою ваги зразків бетону, які досліджувалися, зміною кольору покриття, наявністю пухирів, спучень, тріщин, а також за допомогою гідростатичних випробувань тощо (рис. 1.8).



а



б

Рисунок 1.8 – Візуальні пошкодження захисних покриттів після їх нанесення на ділянки бетонних споруд водовідведення:

а – спучування захисного покриття, б – відшарування покриття [88]

Для підтвердження стійкості та відповідності вимогам захисних покриттів, що планується застосовувати у разі сильного хімічного впливу біогенної кислотної агресії, поки не існує ніякої програми випробувань, нормативно врегульованої або представленої будь-яким об'єднанням фахівців [87].

Науково-дослідним інститутом полімерних будівельних матеріалів (Німеччина) були проведені випробування системи покриття бетону StoPox 452 EP і StoPox KU 180 для застосування в якості поверхневого захисного шару у випадку сильної хімічної корозії внаслідок впливу біогенної сірчаної кислоти.

Для випробувань були встановлені наступні параметри:

— випробування проводиться на бетоні – DIN EN 1766 C (0,70) [90], який має високу пористість капілярів, незначну межу міцності під час розтягування;

— основні елементи бетону під час нанесення покриття були поверхнево - сухими, в зерні – насиченими водою;

— твердіння здійснюється під час подачі води зі зворотного боку за температури 12 ± 2 °C та вологості 85 ± 5 %;

- подальша витримка здійснюється під час подачі води зі зворотного боку системи нанесення шару за температури 23 ± 2 °C і вологості 50 ± 5 %, а також із подачею води з передньої сторони, показник рН ~ 0 протягом 14 днів і подальша витримка за показника рН = 1 протягом 70 днів. Ненавантажений зразок після затвердіння зберігається сухим.
- В результаті випробувань визначали наступні характеристики:
- щільність системи накладення шару;
- утворення пухирів і відшаровувань після сірчаноокислотного вилежування вважається неприпустимим;
- утворення пухирів і відшаровувань після подачі води зі зворотного боку вважається неприпустимим;
- клейкість після різного вилежування, а також стійкість по відношенню до сірчаної кислоти;
- адгезійна міцність під час розтягування $\geq 1,5$ (1,0 – мінімальний одиничний показник) N/мм² готового шару;
- адгезійна міцність під час розтягування після сірчаноокислотного вилежування $\geq 1,5$ N/мм² (1,0 – мінімальний одиничний показник).

Для випробувань застосовувалися основні бетонні елементи згідно DIN EN 1766, референтний бетон С (0,70) класу міцності С 20/25 з розмірами 300x300x60 мм. Глибина поверхні становила 0,5 мм, середня адгезійна міцність під час розтягування поверхні склала 2,5 N/мм². На момент попередньої витримки вік основних бетонних елементів перевищував 90 днів.

Для випробувань попередній витримці було піддано 3 основних бетонних елементи. Спочатку основні бетонні елементи були витримані протягом 14 днів під водою за температури 12 ± 2 °C. Після цього водне дзеркало в басейні для витримки було знижено приблизно на 15 мм, тобто стало нижче по відношенню до нанесеного на поверхню шару. Водопоглинання основних бетонних елементів до терміну нанесення шару було встановлено гравіметрично – 6,1 % відносно початкової ваги. Основні бетонні елементи піддавалися вилежуванню протягом 6 днів у басейні зі зниженим дзеркалом води за температури 12 ± 2 °C і вологості 85 ± 5 %. Після цього басейни для вилежування з досліджуваними зразками були переміщені в температуру 23 ± 2 °C і вологістю 50 ± 5 %. Через 34 доби перебування в басейні за температури 23 ± 2 °C та вологості 50 ± 5 % досліджувані зразки були піддані навантаженню (табл. 1.8).

Досліджувані зразки протягом усього часу навантаження та безпосередньо після завершення випробувань досліджувалися на можливі зміни властивостей захисного шару – зміну кольору, відшарування, лущення, утворення тріщин і пухирів.

Контроль щільності системи захисного шару проводився опосередковано за допомогою регулярного визначення показника рН рідини, в яку занурювали зразки. Показник рН сірчаної кислоти піддавався регулярному контролю за допомогою рН-електрода з підключеним мікропроцесором фірми «Метром».

Визначення адгезійної міцності системи захисного шару проводилося під час випробування на розрив відповідно до DIN EN 1542 за два дні після

вилучення з відповідного вилежування. Адгезійна міцність під час розтягування системи захисного шару визначалася на референтних зразках через рівномірні проміжки часу калірованним приладом для випробувань фірми «Фройндль» типу «Easy-M». У процесі випробувань були визначені межі адгезійної міцності під час розтягування з постійним зростанням в 100 N/s.

Таблиця 1.8 - Вид навантаження та тривалість вилежування

Зразок	Вид навантаження			Тривалість (діб)
1	Сухе вилежування за температури 23 ± 2 °C та вологості 50 ± 5 %			106
2	Пуск води в зворотний бік за температури 23 ± 2 °C та вологості 50 ± 5 %			104
3	Сірчана кислота. Показник рН ~ 0. Тривалість – 14 днів	Візуальний контроль. Переміщення. Тривалість – 2 дні.	Сірчана кислота. Показник рН = 1. Тривалість – 70 днів	86

Товщину шарів захисного покриття визначали у вертикально нарізаному зразку після подачі сірчаної кислоти. Визначення здійснювалося за допомогою мікроскопа для досліджень у відбитому світлі з 10-кратним збільшенням. Загальна товщина шару становила 1,7 мм.

На підставі результатів проведених випробувань зроблено наступні висновки:

- система захисного шару може бути нанесена без порушення структурування та затвердіння на поверхнево сухий (в зерні – насичений водою) бетон. Адгезійна міцність під час розтягування після сухого вилежування відповідає поверхневій міцності використаного для випробувань референтного бетону;

- за умов тривалої подачі води у зворотний бік протягом 104 діб не встановлено ніякого утворення пухирів;

- у порівнянні з будівельними розчинами, система захисного шару після подачі сірчаної кислоти не виявляє жодних змін на поверхні зразків. Відшарувань системи захисного шару не встановлено. Адгезійна міцність під час розтягування відповідає мінімальній вимозі, яка встановлена для захисного шару бетону;

- система захисного шару після подачі сірчаної кислоти є герметичною по відношенню до рідин.

Проведені випробування не дали ніяких підстав засумніватися в тому, що система захисного шару є стійкою та може застосовуватися в установках із відведення стічних вод, а також у біогазових установках [87].

Аналогічні випробування проводили для поліуретанових покриттів, які витримували у сірчаній кислоті протягом 5 років. Результати випробувань показали, що на міцність з'єднання одного з покриттів під час натурних випробувань впливали умови вологості та гідростатичний тиск води. Зразки бе-

тону цементного з покриттям з точковими отворами використовувалися для вивчення хімічної стійкості бетону до сірчаної кислоти. Зміна ваги зразків бетону з покриттям вимірювалась через регулярні проміжки часу. Результати випробувань показали, що характеристики двох покриттів помітно відрізнялися: одне покриття з точковими отворами продовжило термін служби бетону в 14 разів, а інше покриття продовжило термін служби бетону в 57 разів. Проте не встановлено прямої залежності між міцністю зчеплення та хімічною стійкістю бетону з поліуретановим покриттям. Хоча обидва покриття були на основі поліуретану, їх характеристики були різними в умовах випробувань, прийнятих у дослідженні [91].

1.4 Експлуатаційні та екологічні наслідки утворення сірководню в мережах водовідведення

1.4.1 Вплив сірководню на експлуатаційну довговічність бетонних трубопроводів водовідведення

Стічні води, що транспортуються каналізаційними трубопроводами, можна розглядати як середовище, що потенційно викликає корозію бетонних споруд водовідведення внаслідок утворення в ньому сірководню, який окислюється на незатоплюваних поверхнях мікроорганізмами до сірчаної кислоти. Корозійний процес відбувається у вологих газоповітряних умовах: в колекторах вище рівня рідини, в шахтах на всій їх висоті з внутрішньої сторони. Тому під час проєктування каналізаційних колекторів необхідно враховувати ряд факторів, пов'язаних із дією сірководню на бетонні споруди водовідведення [1, 4, 13]:

1. Сірководень може призвести до глибоких корозійних процесів незахищених каналізаційних трубопроводів, виготовлених на основі цементу (в результаті мікробіологічного окислення сірководню утворюється сірчана кислота, що впливає на стінки бетону).

2. У подібних умовах до корозії найбільш схильна внутрішня стінка трубопроводу над рівнем потоку. Ступінь корозійної дії сірчаної кислоти в каналізаційних трубопроводах залежить від матеріалу труб, концентрації кислоти й температури навколишнього середовища. Поверхня бетонних і азбестоцементних труб, а також вапняні облицювання труб із чорного металу вступають у реакцію, в результаті якої матеріал труб перетворюється в розбухлу тістоподібну масу; вона може відвалитися та відкрити нові місця для корозії.

3. Середньорічна концентрація розчинених сульфідів у невеликих каналізаційних трубопроводах може становити від 0,1 до 0,2 мг/дм³, вміст сульфідів від 0,5 мг/дм³ і вище вважається прийнятним для великих трубопроводів, в умовах рівномірного перебігу потоку. Однак там, де турбулентність потоку є високою, сірководень виділяється швидше і процеси корозії йдуть більш інтенсивно, навіть якщо концентрація сульфідів не перевищує декількох десятків міліграма на літр.

1.4.2 Небезпека газоповітряних викидів із каналізаційних шахт і колодязів для міського середовища

Газоподібні викиди з каналізаційних мереж створюють екологічну напруженість у прилеглих міських регіонах і загрозу здоров'ю населення, оскільки концентрації в них ряду сірковмісних сполук сірководню, діоксиду сірки, меркаптану, диметилсульфіду (ДМС) перевищують ГДК для населених місць і робочої зони (табл. 1.9). Крім високих абсолютних значень концентрацій цих сполук у газоподібних викидах, велику небезпеку становить синергійний ефект їх впливу, пов'язаного з наявністю в викидах діоксиду сірки [92–94].

Крім того, у випадку підвищення вимог до комфортності проживання в сучасному місті все більша увага приділяється не тільки безпеці атмосфери, але й наявності в ній речовин (одорантів), які формують неприємні запахи навіть у концентраціях, які не становлять собою загрозу для здоров'я. До таких забруднюючих речовин відносяться сполуки відновленої сірки, в першу чергу – сірководень [13, 16, 93–102].

Таблиця 1.9 – Типовий склад атмосфери каналізаційних колекторів [95]

Сполука	Порядок концентрації за об'ємом
Діоксид вуглецю	0,2–1,2 %
Вуглеводні та їх хлорпохідні	
а. Вуглеводні, головним чином, аліфатичні C ₆ -C ₁₄ , C ₈ -C ₁₂ (бензини)	до 500 ppm
б. Хлорпохідні вуглеводнів, головним чином, трихлоретилен, дихлорид етилену, тетрахлорид вуглецю	10–100 ppm
Сірководень	0,2–10 ppm
Пахучі гази та пара	
а. Сульфіді (головним чином, меркаптан, ДМС, деякі етилмеркаптани)	10–50 ppb
б. Аміни (головним чином, триметиламін та диметиламін, деякі диетиламіни)	10–50 ppb
в. Альдегіди (головним чином, масляний альдегід)	10–100 ppb

З метою отримання усереднених показників була проведена вірогідно-статистична обробка даних за вмістом газів у колекторах різних ділянок міста Харкова. Як свідчать дані, найбільше перевищення ГДК спостерігається за сірковмісними сполуками – сірководнем і ДМС [1, 2, 4].

Герметизація споруд і ділянок мережі призведе до припинення виділення летких речовин, проте викличе інтенсивне руйнування бетону на вказаній ділянці та підвищення вибухонебезпечності. Вентиляція мережі (природна або штучна) знижує інтенсивність процесів корозії, але призводить до більш інтенсивного виносу цих речовин в атмосферу.

1.4.3 Методи контролю складу атмосфери підсклепінного простору каналізаційних трубопроводів

Найбільш ефективним методом контролю складу атмосфери в технічних об'єктах є безперервний автоматичний контроль забруднюючих речовин в атмосферному повітрі та повітрі робочої зони.

Отруєння газами, що містяться в атмосфері каналізаційних колекторів, у 50 % випадків виявляються смертельними. Отруєння отримують не тільки працівники водоканалів, перевіряючи справність трубопроводів або усуваючи аварії, але й випадкові перехожі та діти, які надихалися газами та не змогли вилізти назовні.

Визначення основних компонентів газової суміші в системі водовідведення здійснюється за допомогою різних газоаналізаторів: універсального переносного газоаналізатора УГ-2, переносних сигналізаторів-аналізаторів «Дозор» тощо (рис. 1.9) [93, 102].



Універсальний газоаналізатор УГ-2



«Дозор»

Рисунок 1.9 – Прилади для контролю газової суміші в системах водовідведення

Аналіз газів, за допомогою газової хроматографії та інших технологій, демонструє широкий ряд хімічних речовин, наявних на різних стадіях транспортування, очищення та обробки стічних вод. Основні групи сполук, які визначаються за допомогою газової хроматографії: широкий ряд аліфатичних і ароматичних вуглеводнів, які називаються леткими органічними сполуками (ЛОС); сірководень; органічні сполуки сірки; альдегіди та кетони; низькомолекулярні жирні кислоти; аміак і аміни.

Газова хроматографія ідеально підходить для швидкого поділу змішаних летких компонентів. Ефективність хроматографії поліпшується точністю температурного контролю колони та постійного потоку газу-носія [95].

Переносні сигналізатори-аналізатори газів «Дозор» призначені для періодичного автоматичного контролю наявності вибухонебезпечних і/або шкідливих газів і видачі світлозвукової сигналізації у випадку перевищення

встановлених норм загазованості. Контрольовані компоненти: аміак, діоксид азоту, діоксид сірки, кисень, оксид вуглецю, сірководень, хлор.

Переносні сигналізатори розрізняють за найменуванням компонента, який визначається в газовій суміші, та кількістю вимірювальних каналів – одно- і багатокомпонентні.

Для контролю токсичних газів (CO, H₂S, NO₂) в моделях газоаналізатора «КОЛІОН» застосовуються електрохімічні сенсори, дія яких основана на виникненні струму в електроліті в результаті окисно-відновних реакцій з вимірюваним компонентом. Висока чутливість і швидкодія дозволяють використовувати переносні моделі приладу для пошуку витоків у технологічному обладнанні та виявлення слідів легкозаймистих рідин.

Сірководень (H₂S) – один із шести основних пріоритетних забруднювачів атмосферного повітря. Це безбарвний газ із різким характерним запахом, відчутний вже в незначних концентраціях. Завдання контролю сірковмісних сполук у газових середовищах пов'язані з видобутком, переробкою і використанням природних ресурсів, в тому числі природного газу та нафти. У природі найчастіше зустрічається у вулканічних газах, в сірчистих мінеральних водах, родовищах нафти та природного газу. Сірководень може міститися в повітрі у виробничих умовах у разі його застосування для осадження міді й золота з розчинів, для очищення сірчаної та соляної кислот, миш'яку, в хімічних лабораторіях, під час переробки сірчистого барію, з метою отримання інших солей барію та сірчистої сурми, у виробництві сірковуглецю [15]. Постійно міститься в повітрі фабрик штучного шовку, целюлозопереробних підприємств, на цукрових заводах, у виробництві асфальту, у стічних водах різних виробництв.

Поріг відчуття сірководню становить 0,012–0,03 мг/м³. У високих концентраціях через параліч нюхового нерва запах сірководню не відчувається, що становить потенційну небезпеку для життя людини. У випадку гострого отруєння виникає печіння та біль у горлі під час ковтання, подразнення, кон'юнктивіт, задишка, головний біль, запаморочення, слабкість, блювання, тахікардія, можливі судоми тощо. Смертельна концентрація сірководню становить 830 мг/м³ протягом 30 хвилин або 1100 мг/м³ протягом 5 хвилин. Ознаками хронічного отруєння є порушення нормальної поведінки та звичок, а також нейропсихічне відхилення: швидке стомлення або відчуття постійної втоми, сонливість або безсоння, апатія, послаблення уваги, неухважність, сильні коливання настрою. Сірководень спричиняє негативний вплив на центральну нервову систему, механізми окислювальних процесів, знижує здатність крові насичуватися киснем. У невеликих кількостях сірководень пригнічує центральну нервову систему, в помірних – збуджує, у великих – викликає параліч дихального та судинного центрів.

У випадку хронічного отруєння сірководнем здатність гемоглобіну до поглинання кисню зменшується до 80–85 %, у випадку гострого отруєння – до 15 %; спостерігається також зниження окислювальної здатності тканин. Звикання до сірководню не настає, але підвищується чутливість. Після пере-

несених легких отруєнь повторні стають можливими навіть за менших його концентрацій. У випадку комбінованого впливу, в поєднанні з різними вуглеводнями, може змінюватися й характер його токсичного впливу. Сумарний ефект комбінованої дії суміші з окремих компонентів перевищує суму дії цих компонентів окремо (синергічна дія) [103, 104]. У табл. 1.10 представлено симптоми отруєння сірководнем та їх наслідки.



Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд газосигналізатора ЛБВК

Найпростішим методом контролю газового середовища, особливо під час проведення ремонтно-відновлювальних робіт, у каналізаційних колодязях є газосигналізатор ЛБВК (лампа ІГ ЛБВК-М), призначений для виявлення загазованості повітряного середовища у водопровідних, каналізаційних та інших оглядових колодязях. Лампа ЛБВК являє собою надійну апаратуру для виявлення загазованості водопровідно-каналізаційних оглядових колодязів (рис. 1.10).

Таблиця 1.10 – Симптоми отруєння сірководнем [103, 104]

Концентрація H₂S, ppm	Симптоми отруєння сірководнем та їх наслідки
0,001–0,13	порог запаху (сильно помітний)
1–5	помірно неприємний запах; можлива нудота або головні болі за умов тривалого впливу
20–50	подрознення носа, горла та легенів, порушення травлення та втрата апетиту, органи нюху починають «втомлюватися»; для попередження про вплив газу не можна покладатися на наявність запаху
100–200	сильне подразнення носа, горла та легенів, здатність до відчуття запаху повністю зникає
250–500	потенційно смертельне накопичення рідини в легенях (набряк легенів), з боку центральної нервової системи – головний біль, нудота, запаморочення, особливо якщо вплив тривалий
Близько 500	сильне подразнення легенів, хвилювання, головний біль, запаморочення, раптовий колапс, непритомність і смерть протягом 4–8 годин, втрата пам'яті протягом періоду впливу
500–1000	дихальний параліч, нерегулярне серцебиття, колапс та практично миттєва смерть. Симптоми набряку легенів, такі як біль у грудях та задишка, можуть затягнутися до 48 годин після ураження.

Лампа газосигналізатор ЛБВК-М (ЛБВК) є обов'язковим захисним пристроєм, простота та надійність якого підтверджена більш ніж 100-річним досвідом експлуатації мереж і споруд водопровідно-каналізаційного господарст-

ва. Газоаналізатор ЛБВК-М (ЛБВК) має ряд переваг навіть перед сучасними приладами з мікропроцесорним управлінням. Незважаючи на те, що лампа ЛБВК не оснащена мікропроцесорними чіпами, що забезпечує її безвідмовну роботу, цей пристрій залишається найпростішим газоаналітичним приладом і незамінним засобом із виявлення газів.

Індикатор газу типу ІГ ЛБВК – газобезпеки бензинова лампа, призначена для виявлення загазованості повітряного середовища у водопровідних, каналізаційних, теплофікаційних, телефонних оглядових колодязях і в камерах метаном, сірководнем та вуглекислим газами.

Індикатор газу застосовується відповідно до [105, 106].

Технічні характеристики ЛБВК-М (ЛБВК) наведено в табл. 1.11.

Таблиця 1.11 – Технічні характеристики ЛБВК-М (ЛБВК)

Показник	Параметри
Висота, мм	290
Максимальний розмір у плані, мм	140
Вага в робочому положенні, кг	1,5
Тривалість безперервного горіння, год.	12
Розмір іскрового проміжку, мм	2-4
Кількість сіток, шт.	2
Кількість бензину, що заливається, мл	50
Габарити ящика з двома лампами у транспортному положенні	
Ширина, мм	120
Довжина, мм	273
Висота, мм	340
Вага ящика з двома лампами у транспортному положенні із запальними пристроями, кг	5,4

Закордонні фахівці розробили принципово новий метод для моніторингу газів у каналізаційних мережах, зокрема сірководню – дрейфуючий датчик «SewerSnort» (датчик-поплавок) [107]. Спеціально розроблений пристрій (рис. 1.11, а) опускають у потік стічної рідини в колекторі; у міру просування датчика він вимірює концентрацію сірководню в атмосфері трубопроводу. Чутливий елемент знаходиться в центрі внутрішньої трубки для запобігання його зануренню в стічну воду. Корпус пристрою досить високий, щоб в разі високої турбулентності прилад не перевернувся, оскільки габарити датчика є невеликими та становлять <30 см в діаметрі й <0,5 кг у вазі.

Вимірювання концентрації сірководню оснований на електрохімічному методі, тобто кількість електричного струму між анодом і катодом датчика є пропорційною концентрації газу. На датчику розташовані карта пам'яті, а також контролер, який дозволяє відключати датчик заздалегідь до його переміщення до точки вимірювання концентрації газу. Для локалізації датчика використовуються принципи GPS навігації, тобто під кожним люком, що становить інтерес для дослідників, встановлюють радіомаяки, які передають сигнали з інформацією про місцезнаходження на датчик-поплавок (рис. 1.11, б).

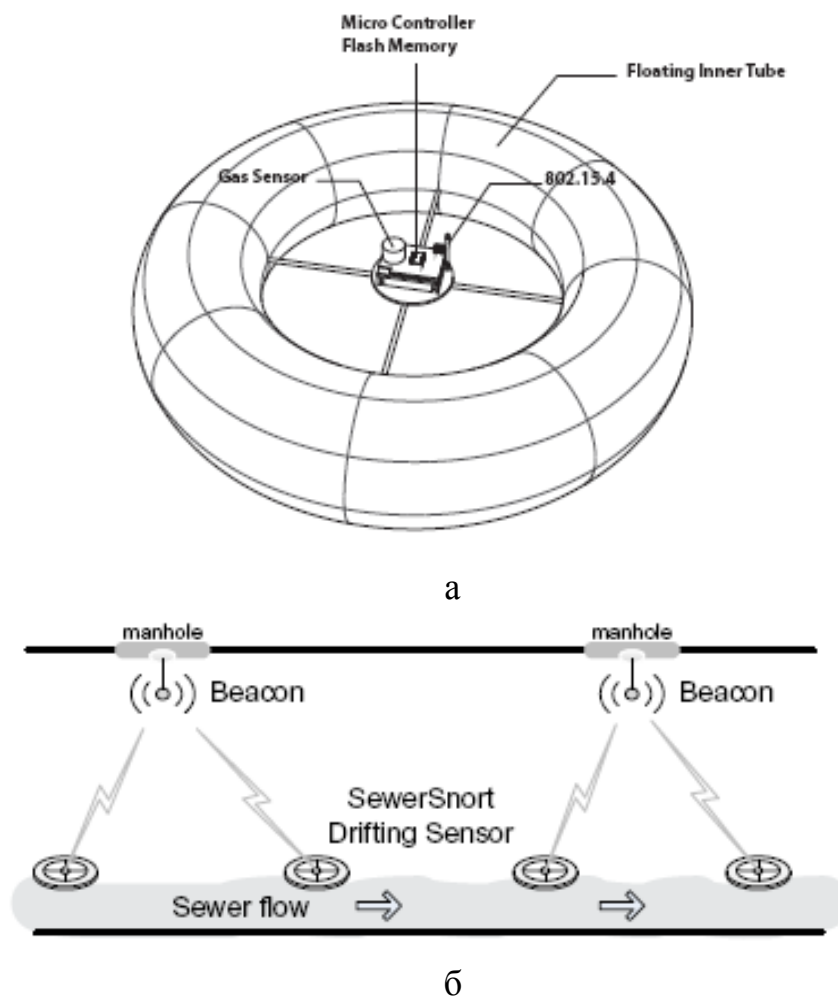


Рисунок 1.11 – Схема будови та принципу використання «SewerSnort» [107]:

а – зовнішній вигляд, б – вимірювання концентрації газів

Датчик-поплавок вводиться на ділянці вище потоку, переміщується каналізаційним трубопроводом та збирає дані вимірів концентрації газу разом з інформацією про місцезнаходження точок відбору проб. Після дослідження отримані результати вимірів концентрації газу використовують для технічного обслуговування мереж або їх ремонту. Ключовим нововведенням «SewerSnort» є повністю автоматизоване рішення для безперервного моніторингу та стратегія самолокації з малим енергоспоживанням.

Натурні експерименти, проведені в США, показали, що за допомогою датчика «SewerSnort» можна досить точно виміряти концентрацію сірководню безпосередньо в каналізаційних колекторах (помилки в межах 5 % протягом сотень метрів) [107].

1.4.4 Методи розрахунку викидів сірководню у спорудах каналізації та математичного моделювання утворення сірководню у трубопроводах водовідведення

Спосіб розрахунку викидів сірководню у спорудах каналізації пропонується у «Тимчасовій методиці розрахунку кількості забруднюючих речовин,

що виділяються від неорганізованих джерел станцій аерації побутових стічних вод», розробленій Мосводоканалом [108]. Методика призначена для визначення потужності викидів різних забруднюючих речовин під час проведення інвентаризації викидів цих речовин різними типами споруд станцій аерації.

Викид забруднюючих речовин залежить від їх концентрацій у стічній воді, які змінюються в міру проходження води через ланцюг очисних споруд і характеризуються відносною сталістю в кожному типі споруд.

Для розрахунку виділення забруднюючих речовин необхідні такі вихідні дані: температура води, що очищується; тип споруди; площа джерела виділення; за наявності часткового перекриття поверхні випаровування – площа відкритої поверхні; для споруд з аеруючим повітрям – витрата повітря; швидкість вітру тощо.

Зазначена методика дозволяє розрахувати викид і-ї забруднюючої речовини з поверхні споруди, а також концентрацію насичених парів забруднюючої речовини, знаючи концентрацію цієї речовини у воді.

Проблемами математичного моделювання процесів корозії у спорудах водовідведення та накопичення сірководню в атмосфері підсклепінного простору каналізаційних колекторів активно займалися як вітчизняні, так і зарубіжні дослідники [1, 13, 14, 30, 69, 109–123].

Для прогнозування концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору вітчизняними дослідниками був проведений ряд експериментів. В результаті була запропонована емпірична формула для визначення концентрації сірководню в анаеробних умовах, яка задовільно описується наступною залежністю [1, 14]:

$$[H_2S] = 0,0142 \cdot T^{1,744} \cdot t^{(2,878T^{-0,464})} \cdot \left(\frac{SO_4^{2-}}{ХПК} \right)^{-0,72}, \quad (1.3)$$

де $[H_2S]$ – концентрація сірководню у воді, мг/дм³;

T – температура, °С;

t – час перебування в анаеробних умовах, год;

SO_4^{2-} – концентрація сульфатів, мг/дм³;

$ХСК$ – хімічне споживання кисню, мг О/дм³.

Під час зміни турбулентності потоку води, вміст сірководню в атмосфері підсклепінневого простору задовільно описується наступною залежністю:

$$H_2S = 7 \cdot T^{0,034} [H_2S]^{0,33T^{0,357}} + [H_2S] \cdot 5,8 + 10^{-3} (Re \cdot 10^{-6})^{3,524}, \quad (1.4)$$

де H_2S – концентрація сірководню в газовій фазі над поверхнею води в місці зміни турбулентності потоку, мг/м³;

$[H_2S]$ – концентрація сірководню у воді, мг/дм³;

T – температура, °С;

Re – число Рейнольдса.

Ці залежності дозволяють прогнозувати концентрацію сірководню у воді й атмосфері підсклепінного простору ще на стадії проектування споруди.

Зарубіжними вченими для моделювання накопичення сірководню в атмосфері підсклепінного простору самопливних каналізаційних колекторів була розроблена модель WATS (Wastewater Aerobic-anaerobic Transformations in Sewers) [30, 69, 95, 117, 119]. Дана математична модель основана на останніх розробках із трансформації сполук сірки в каналізаційних колекторах. Ця модель описує та дозволяє оцінити такі процеси перетворення сполук циклу сірки в самопливному каналізаційному колекторі: утворення сірководню, хімічне та біологічне окислення сірководню біоплівки лоткової частини, емісію та реаерацію сірководню, адсорбцію сірководню стінами колектора з подальшим його окисленням на вологих стінах колектора, накопичення сірководню в підсклепінній атмосфері колектора (рис. 1.12) тощо.

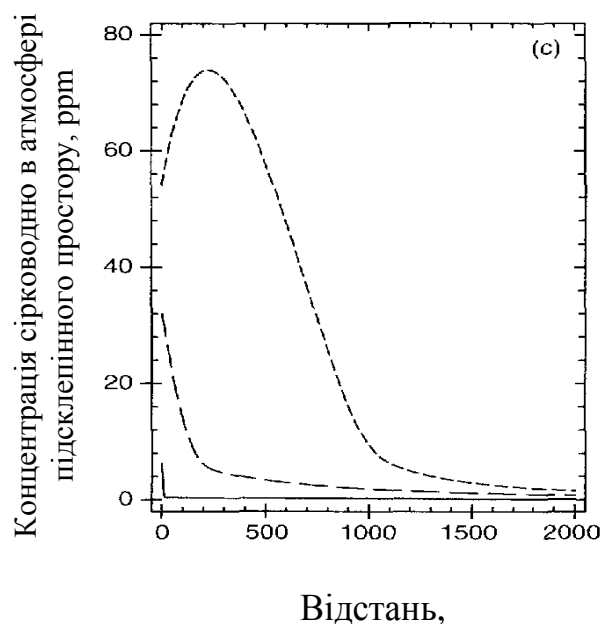


Рисунок 1.12 – Приклад моделювання накопичення сірководню в атмосфері самопливного колектора за рН 6, 7 та 8 відповідно [120]

В результаті реалізації цієї моделі було доведено вплив такого важливого параметра як значення рН стічної води, під час оцінки накопичення сірководню в атмосфері колектора. Зі збільшенням значень рН води стимулюється кінетика хімічного окислення сірководню, в той час як емісія сірководню в атмосферу колектора загальмована. Відповідно проблеми, викликані накопиченням сірководню в атмосфері колектора, пов'язані більшою мірою з підкисленими стічними водами, а не з лужними, що підтверджують і дослідження вітчизняних авторів.

Незважаючи на те, що дана модель була успішно апробована на ділянці самопливного каналізаційного колектора довжиною 2 км, автори наголошують на необхідності уточнення деяких змінних та проведення додаткових натурних експериментальних досліджень [117].

Наразі існує серйозна недостатність даних моніторингу щодо експлуатаційного стану підземних каналізаційних мереж. Дані моніторингу, що збираються водним господарством, не є ні загальнодоступними, ні достатньо повними, щоб їх можна було використовувати у відповідних аналітичних цілях для прогнозування стану каналізаційних мереж та побудови математичних моделей. Безсумнівно, доступ до таких даних має першорядне значення для перевірки достовірності розроблених математичних моделей, які можна використовувати для поліпшення експлуатації та планування майбутніх каналізаційних систем, забезпечуючи більш точні прогнози ймовірності виходу з ладу бетонних та залізобетонних каналізаційних труб. Використовуючи математичне моделювання, можна вивчити вплив кожного експлуатаційного параметра на відмову всієї системи, а також їх взаємодію один з одним. Деякі математичні моделі забезпечують також аналіз надійності мереж водовідведення для прогнозування залишкового безпечного терміну служби колекторів, що дозволяє управляти існуючими спорудами каналізації, планувати їх надійну експлуатацію протягом всього терміну служби та запобігати надзвичайним ситуаціям на цих спорудах [124].

1.4.5 Картографування концентрації сірководню у спорудах каналізації

Картографування сірководню – це найпростіша техніка взяття великої кількості вимірювань сірководню навколо очисних споруд та використання даних вимірювань для створення контурної карти концентрацій сірководню.

Така техніка розвивалася та вперше використовувалася у Великобританському Водному Дослідницькому Центрі в кінці 80-х років ХХ століття. Саме тоді, коли чутливість вимірювачів до сірководню різко підвищилася приблизно до 1 ppm, в Дослідницькому Центрі використовувалися методи, які базувалися на дії електрохімічних камер чутливістю близько 1 ppb, з використанням золотої техніки плеоптичного датчика [109].

Виробництво карти – це проста інтерпретація даних. Результируючі карти вмісту сірководню були першим зразком візуалізації проблеми запаху, пов'язаної з очищенням стічних вод. Вони й зараз залишаються дуже корисними під час визначення несприятливого впливу, спричиненого запахом, й у визначенні головних умов його виникнення. Такі карти можуть відігравати важливу та цінну роль для знаходження концентрацій сірководню в областях виявлення запаху.

З того часу, як розвинулись інші методи для кількісного визначення запаху – найбільш одориметрія, – визначення кількості початкових норм викидів стало дуже важливим. Тому наразі використовують дисперсійні моделі, які дозволяють візуалізацію впливу запаху під час урахування великої кількості умов. Зараз у галузі очищення стічних вод з'явився вагомий принцип, який полягає у визначенні кількості запаху майже виключно на вимірах концентрацій сірководню або на використанні одориметрії.

Карта концентрації сірководню – це фактично моментальний знімок, який свідчить про тривалу дію запаху на ділянці й може бути використаний для спроби класифікувати джерела запаху на спорудах очищення стічних вод.

Кількісне картографування сірководню відображає окремі викиди на різних етапах станцій очищення стічних вод: надходження стічних вод на очисні споруди; в первинному відстійнику; в мулоущільнювачі; в аеротенках.

Ізольовані виміри сірководню не можуть бути споріднені із запахом, який утворюється під час очищення стічних вод. Це пояснюється існуванням другорядних вимірних рівнів сірководню, наприклад тих, що походять від дорожнього руху. Тільки тоді, коли підвищені рівні сірководню можна точно поєднати із джерелом утворення стічних вод, можлива повноцінність використання сірководню як показника виявлення каналізаційного запаху. Ця умова й потребує сірководневої картографії.

Здійснення підготовки карти сірководню включає в себе: планування, збір даних, використання поверхні для нанесення контуру та інтерпретацію.

Таким чином, на підставі виконаного аналізу сучасного стану проблеми надійності експлуатації бетонних каналізаційних трубопроводів в умовах утворення агресивних експлуатаційних середовищ у спорудах водовідведення визначено, що найбільші експлуатаційні та екологічні проблеми для надійності бетонних мереж водовідведення створює накопичення сірководню, його похідних і продуктів окислення в експлуатаційних середовищах трубопроводів: у стічній воді, в атмосфері підсклепінного простору та конденсатній волозі на поверхні склепіння трубопроводів.

Елементами, що зазнають найбільшого аварійного пошкодження в системах водовідведення, які експлуатуються, є трубопроводи великого діаметра, виконані з бетону та залізобетону, руйнування яких становить максимальну небезпеку для життєзабезпечення систем міста та забруднення міського середовища.

Найважливішим фактором забезпечення надійної експлуатації бетонних і залізобетонних споруд водовідведення є раннє попередження надзвичайних ситуацій шляхом оперативного контролю.

Головними контрольованими попереджувальними характеристиками є швидкість і глибина корозії, а також середньорічна концентрація сірководню в атмосфері склепінного простору.

Існуючі вітчизняні та зарубіжні методи інспекції бетонних каналізаційних колекторів дозволяють отримати тільки візуальну оцінку їх стану, але не дозволяють визначити агресивність середовища на поверхні конструкцій та глибину корозійного руйнування бетону.

Методи безпосереднього інструментального контролю швидкості корозії бетонних трубопроводів водовідведення, що перебувають в експлуатації, практично відсутні, а існуючі лабораторні методи і засоби контролю корозійних процесів вельми трудомісткі та довгострокові.

Наразі в Україні кількісне визначення концентрації сірководню в мережах водовідведення здійснюється лише в деяких великих містах і тільки періодично, що не дозволяє отримати об'єктивної оцінки небезпеки газоподібного середовища.

Нові закордонні методи та пристрої для контролю концентрації сірководню у трубопроводах водовідведення в наш час недоступні для використання в Україні.

РОЗДІЛ 2. НАУКОВІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА МЕРЕЖ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

2.1 Методологія дослідження корозійного ураження бетону у спорудах водовідведення, що знаходяться в експлуатації

2.1.1 Особливості конструкції електродів корозиметра бетону – пристрою для неруйнуючого контролю стану бетонних споруд водовідведення

Мікробіологічна корозія бетону у спорудах водовідведення зумовлена біогенною кислотною агресією, яка виникає в результаті дії сірчаної кислоти мікробного походження (корозія II–III виду за класифікацією В. Москвіна) [60]. На підставі аналізу зразків бетону, уражених біогенною кислотною корозією в різній мірі, встановлено, що найбільш зручним показником для вимірювання є рН конденсатної вологи бетону. Цей же показник можна використовувати і для розрахунку глибини корозії бетонних конструкцій за допомогою розроблених математичних моделей кислотної корозії бетону, що базуються на дифузійній кінетиці. Концентрацію біогенної кислоти можна визначити за значенням рН плівки конденсатної вологи на поверхні бетону [13].

Корозиметр бетону складається з вимірювального приладу та твердофазних електродів спеціальної конструкції. Корозиметр бетону (КБ) дозволяє оперативно вимірювати рН конденсатної вологи на поверхні бетону, як у лабораторних умовах, так і на об'єктах водовідведення, що знаходяться в експлуатації.

Вимоги до корозиметра бетону наведено на схемі (рис. 2.1).

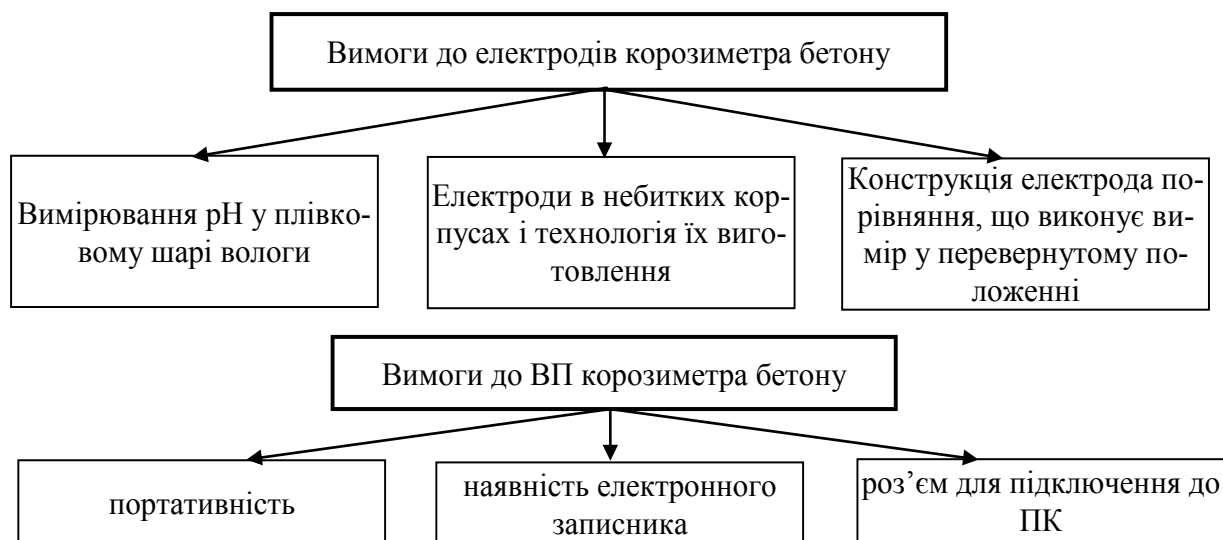


Рисунок 2.1 – Основні вимоги до електродів та вимірювального приладу (ВП), які використовуються в корозиметрі бетону

Електроди для корозиметра бетону виконано в лабораторних умовах з полімерного матеріалу в небитких корпусах (рис. 2.2, 2.3) [125–127].

Допоміжний хлорсрібний електрод порівняння в поліуретановому корпусі (лабораторний) представлено на рис. 2.3. Електрод (рис. 2.3) складається з корпусу (1), на одному кінці якого виконано контактний кінець (10), а на протилежному – знаходиться кришка (2). Електрод також містить струмопровід (8), гніт (5) та активну речовину – AgCl/Ag (6). Гніт виконаний цілим (суцільним). Крім того, корпус електрода оснащений трубкою, яка являє собою продовження контактної кінця (10); при цьому довжина трубки менше, ніж довжина корпусу. Ця конструкція забезпечує проведення вимірів електродом у будь-якому положенні (наприклад, «догори ногами»). Корпус електрода виконано із пластмаси за допомогою процесу лиття. Електрод з'єднується із приладом-перетворювачем за допомогою кабелю та штекера.

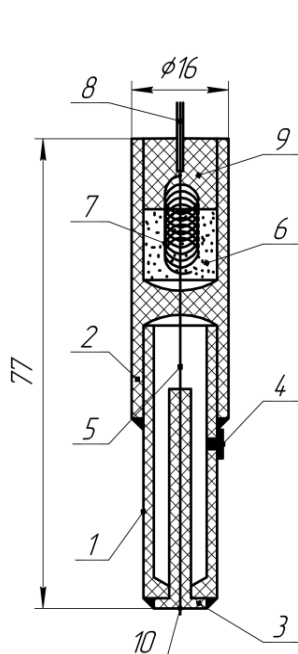


Рисунок 2.2 – Допоміжний електрод порівняння:

1 – корпус; 2 – кришка; 3 – втулка; 4 – пробка; 5 – гніт; 6 – активна маса AgCl/Ag; 7 – срібний дріт; 8 – струмопровід; 9 – пробка корпусу; 10 – контактний кінець

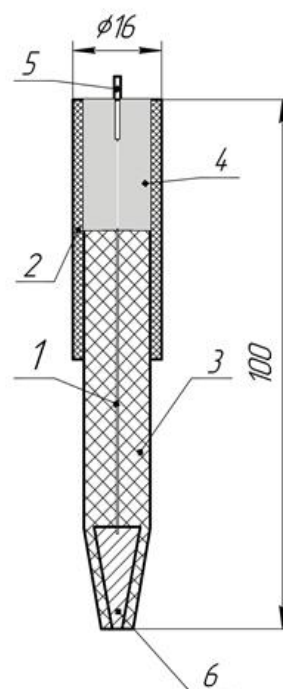


Рисунок 2.3 - Твердофазний сурм'яно-оксидний вимірювальний електрод:

1 – струмопровід; 2 – трубка; 3 – корпус; 4 – пробка; 5 – кабель; 6 – контактний кінець

Цей електрод призначено для роботи в якості допоміжного електрода порівняння в парі із сурм'яно-оксидним електродом і в комплекті з електронним перетворювачем (рН-метром 120 МА, рН 110). Діапазон вимірювань рН за температури розчину 20 °С – від 0 до 12. Діапазон температур середовища, що аналізується, від +5 ° до 35 °С. Габаритні розміри електрода: діаметр – 16 мм; довжина – 70 мм. Маса електрода становить не більше 40 г.

Вимірювання слід виконувати за умов закритого отвору для заливання хлориду калію. Для проведення вимірювань достатньо торкнутися електро-

дом до вологої поверхні (глибина занурення електрода в розчин під час вимірювання рН – 0,3 мм і більше).

Вимірювальний твердофазний сурм'яно-оксидний електрод в полімерному корпусі представлено на рис. 2.3 [125-127].

Електрод (рис. 2.3) складається зі струмопроводу, трубки, корпуса, пробки, кабелю, контактної кінця, штекера в поліуретановому корпусі. У випадку підключення до лабораторних приладів у комплекті електрода передбачений штекер.

Переваги сурм'яного електрода полягають у наступному [128]:

- швидкість встановлення потенціалу електрода;
- його можна використовувати в умовах змінної температури та в лужних розчинах;
- низький опір електрода дозволяє його застосовувати в умовах високої вологості, коли через великий виток струму порушується робота електронних підсилювачів, необхідних для вимірювання потенціалів скляних електродів;
- добре зарекомендували себе електроди малих розмірів;
- дії розчину піддається тільки кінчик металу, залитого у скляну трубку;
- поверхня електрода оновлюється поліруванням, яке видаляє невелику кількість сурми та скляної трубки, що її оточує.

Електрод розрахований для роботи в якості вимірювального в парі з допоміжним електродом порівняння та в комплекті з електронним перетворювачем (рН-метром 120 А, рН 110). Діапазон вимірювань рН за температури розчину 20 °С – від 0 до 12. Діапазон температур середовища, яке аналізують, від +50 до 35 °С. Габаритні розміри електроду: діаметр – 16 мм; довжина – 70 мм. Маса електрода – не більше 40 г.

Перш ніж приступити до вимірювань вимочений електрод в парі з допоміжним електродом порівняння та в комплекті з вимірювальним перетворювачем слід відкалібрувати за контрольними розчинами.

Перед калібруванням вимірювальний електрод відмили три рази в дистильованій воді за умов інтенсивного перемішування, змінюючи воду кожні 5 хв. Потім електрод двічі промили контрольним розчином, з якого передбачено розпочати калібрування.

Відкалібрований електрод підключили в парі з допоміжним електродом до іономіру. Налаштування приладу, наприклад 120 А, рН 110 виконували за двома розчинами, які відповідають початку та кінцю діапазону, що планується вимірювати. Після цього можна приступати до вимірювань невідомої активності контрольованого іона.

2.1.2 Особливості вимірювального приладу для корозиметра бетону

Використання корозиметра бетону в мережах водовідведення висуває до вимірювального приладу ряд вимог: портативність, наявність електронно-

го записника та роз'єму для підключення до персонального комп'ютера (ПК) [125–127].

В якості вимірювального приладу для корозиметра бетону використовували 2 прилади: рН-метр рН-150мА - КБ-1 (Білорусь) і портативний рН-метр CyberScan рН 110 - КБ-2 (США).

Прилад рН-метр рН-150мА (рис. 2.4) призначений для вимірювання значень рН, окислювально-відновного потенціалу (Eh) та температури в технологічних та інших водних розчинах, природних і стічних водах. Прилад може бути використаний у стаціонарних умовах і пересувних лабораторіях підприємств.

У мікропроцесорному приладі відсутні механічні органи управління, що виключає можливість випадкового збою налаштувань. Прилад виконано в пиловологозахисному корпусі, що дозволяє використовувати його в польових умовах. У приладі використовується багатофункціональний рідкокристалічний дисплей. Прилад є дуже простим в експлуатації. Використання стандартного датчика температури не вимагає налаштування приладу для вимірювання температури та термокомпенсації електрода. Результати налаштування зберігаються в незалежній пам'яті, відключеного від джерела живлення приладу необмежено довго.

Одним із недоліків цього вимірювального приладу є відсутність роз'єму для підключення до ПК і записної книжки, яка дозволяє «заморозити» та зберегти показання приладу у процесі виконання обстеження, а після перенести їх у ПК для подальшої обробки. Тому необхідно було знайти такий вимірювальний прилад, який відповідав би всім вимогам, що висуваються до корозиметра бетону.

В якості такого приладу використовували портативний рН-метр CyberScan рН 110 (рис. 2.5).

Портативний прилад рН-метр CyberScan рН 110 призначений для вимірювання значень рН, окислювально-відновного потенціалу (Eh) та температури в різних водних розчинах, природних і стічних водах. Прилад оснащено великим подвійним рідкокристалічним монітором і стійкою мембранною клавіатурою, що дозволяє виконувати операції навіть однією рукою. Кожна кнопка клавіатури, під час натискання, має відповідний графічний індикатор на рідкокристалічному моніторі.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд рН-метра рН-150МА



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд вимірювального приладу рН-метр CyberScan рН 110

Прилад виконано в пиловологозахисному корпусі, що дозволяє використовувати його в різних, часто екстремальних умовах. Цей портативний рН-метр також оснащено спеціальним портом RS232C, який дозволяє приладу через кабель з'єднуватися з комп'ютером або принтером для передачі даних. Крім того, прилад оснащений записником, що дозволяє зберігати в його пам'яті до 100 вимірювань.

Прилад має два режими роботи: від мережі за допомогою спеціального адаптера, або автономний – від 4 батарей типу ААА.

Технічні характеристики двох вимірювальних приладів для корозиметра бетону представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики корозиметрів бетону (КБ-1 і КБ-2)

Діапазон вимірів приладу	Значення
pH	0,00 ... 12,00
mV	-1999 ... 1999
температура	-10 ... 100 °C
Дискретність pH	0,01
mV	1
температура	1 °C
Основна похибка приладу pH	±0,05
Температурна компенсація	ручна та автоматична –10–100 °C
Живлення:	
від мережі	(220±22) В; (50±0,5) Гц
автономне	6 В (1,5 В x 4), від чотирьох вбудованих елементів живлення типу ААА
Час виміру, с	1-2
Термін безперервної роботи, год	≥ 8
Час встановлення робочого режиму, хв.	≤ 5
Режим роботи	двухелектродний
Тип дисплея вимірювального перетворювача	рідкокристалічний
Габаритні розміри вимірювального перетворювача, мм	≤ 245x110x75 (КБ-1) ≤ 187x90x40 (КБ-2)
Вага всієї конструкції, кг	0,8 (КБ-1) 0,4 (КБ-2)

Як видно з даних табл. 2.1, корозиметр бетону і першої та другої модифікацій має невеликі розміри та вагу; термін безперервної роботи – понад 8 год, а час одиничного вимірювання становить 1–2 с, що дозволяє використовувати цей портативний прилад для неруйнуючого контролю стану бетону у спорудах водовідведення.

Для проведення вимірювань достань до торкнутися електродом до вологої поверхні (глибина занурення електрода в розчин під час вимірювання рН становить 0,3 мм і більше).

Для проведення обстежень (рис. 2.6) на кожній вибраній ділянці виконується по 3 вимірювання, тривалість одиничного вимірювання складає 1–2 с. Дані вимірювань заносяться в ПК (безпосередньо через роз'єм на вимірювальному приладі, або в ручному режимі) і обробляються за спеціально розробленими програмами [126, 127].

Зняття показників проведено у двох режимах:

- під час безпосереднього виміру на поверхні бетону в режимі вимірювання окисно-відновного потенціалу – отримано проміжну характеристику – потенціал, значення якого за допомогою градувальних кривих перераховували у значення рН бетону;

- під час введення градувальної кривої в пам'ять корозиметра бетону (КБ-2) – відразу отримували значення рН бетону.

Натурні дослідження на залізобетонних конструкціях мереж водовідведення м. Харькова, які знаходяться в експлуатації та в різній мірі уражені біогенною сірчаною кислотною агресією, проводили за допомогою корозиметра бетону (КБ).

Термін експлуатації каналізаційних колекторів становив 5–45 років.

За допомогою корозиметра бетону досліджували:

- рН бетону на різній висоті від поверхні води (у трубопроводах і колодязях);
- рН на різній глибині від поверхні бетону;
- бетон конструкцій до експлуатації в мережах водовідведення;
- бетон на ділянках із низьким вмістом сірководню в атмосфері;
- бетон зруйнованих конструкцій – шахт або трубопроводів.

У лабораторних експериментах використовували стандартні бетонні зразки 4x4x16 см після експозиції в каналізаційному колекторі. Бетонні балочки поміщали на пластмасові решітчасті піддони та закріплювали, так, щоб поверхні зразків не стикалися. Піддони розташовували на склепінній частині каналізаційного колектора, що перебуває в експлуатації, на ділянці, хімічний склад атмосфери якої регулярно контролюється лабораторією на мережах комунального підприємства «Харківводоканал». Основні характеристики газоповітряного середовища, в якому знаходилися зразки: концентрація сірководню – 60 ± 20 , концентрація діоксиду сірки – 30 ± 10 мг/м³; концентрація метану – 0,1–0,5, вуглекислого газу – 0,1–0,5 об. %.

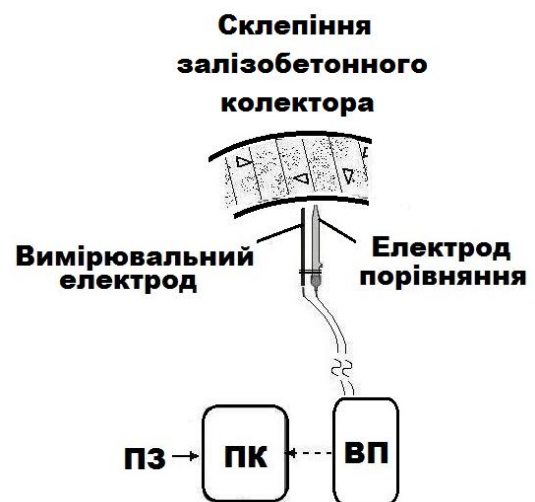
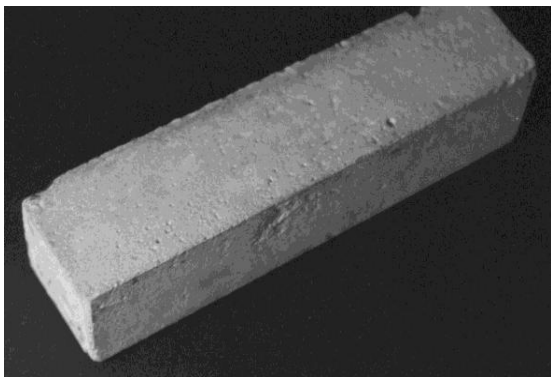


Рисунок 2.6 – Схема проведення вимірів за допомогою корозиметра бетону:

ПЗ – програмне забезпечення,

ПК – персональний комп'ютер

Для встановлення кінетичних характеристик біогенної кислотної корозії бетону в каналізаційних мережах проводили пошарове дослідження (визначення рН) бетонних балочок, які експонувалися в атмосфері підсклепінної частини каналізаційних колекторів у надзвичайно агресивних умовах (рис. 2.7).



а



б

Рисунок 2.7 – Зразки бетону до та після корозії:

а) зразок бетону, який не зазнав дії корозії; б) зразок бетону, який перебував в умовах біогенної сірчано-кислотної агресії (на склепінні діючого колектора) протягом 14 місяців

Шари товщиною ≤ 1 мм знімали за допомогою алмазного круга. Вимірювання рН бетону визначали відповідно до [128–130] та за допомогою корозиметра бетону.

Під час проведення робіт у спорудах водовідведення вимірювали динаміку зміни Eh у випадку зняття поверхневих шарів бетону, тобто визначення глибини проникнення протонів сірчаної кислоти в бетон. Кислота, що утворена на поверхні бетону тіобацилами, дифундує в товщу бетону та взаємодіє з цементними гідратами. При цьому протони кислоти витрачаються на реакцію нейтралізації з гідроксилами та концентрація протонів стійко знижується. Отже, рН бетону під час руху від поверхні вглиб бетону повинен збільшуватися. У табл. 2.2 наведено дані вимірів Eh бетону безпосередньо в мережах після зняття шарів на ділянках мереж водовідведення, в різній мірі уражених біогенною кислотною корозією.

Таблиця 2.2 – Значення Eh за глибиною бетону на ділянках мережі, в різній мірі уражених корозійним процесом

Значення Eh на поверхні, мВ	Глибина шару, см	Значення Eh після зняття шару, мВ
+108, +67, +96, +28, +117, +111, +123, +130, +144	3,0	+98, +88, +100, +75, -10, -14, -10, -56, -40
-44, -43, -47	3,5–4,0	-130, -129, -142, -135
20, 37, 22, 17, 38, 16, 14	2,5	-90, -174, -100, -99, -93, -121, -110
-90, -174, -100, -99, -93, -121, -110	0,2–0,3	-235, -242, -257, -279, -265, -233, -238

Як видно з даних табл. 2.2, значення, отримані під час вимірювання характеристик, відображають зниження концентрації протонів у бетоні за глибиною ділянки. Таким чином, можна зробити висновок, що розроблений метод адекватно відображає стан бетону, що зазнає постійної кислотної агресії.

2.2 Експериментальне встановлення основних коефіцієнтів для розрахунку глибини та швидкості корозії бетону під час біогенної кислотної агресії в мережах водовідведення

2.2.1 Встановлення залежності коефіцієнта дифузії біогенних кислот у бетон від експлуатаційних факторів

В умові дії агресивних середовищ на бетонні вироби інтенсивність корозійних процесів залежить від кінетики проникнення в нього агресивних компонентів [22]. Дослідження кінетики корозії бетону свідчить, що ці процеси ускладнюються градієнтами та деструкцією цементного каменю, що змінюються з часом. Математично ці процеси моделюють у двох напрямках – за допомогою рівнянь дифузії або хімічної термодинаміки (рівняння Гіббса). Для різних видів процесу кислотної корозії бетону запропоновано математичну модель, яка базується на рівнянні дифузії з відповідними граничними умовами [77]. Подібна дифузійна модель розроблена для цементних матеріалів, що експлуатуються під впливом кислот. В результаті розв’язання рівнянь дифузії отримують співвідношення для визначення глибини корозійної деструкції бетону, що задовільно збігаються з експериментальними даними. У більшості математичних моделей коефіцієнт дифузії бетону приймають постійним за товщиною, хоча, насправді, змінена структура бетону має інші дифузійні особливості, в порівнянні з нормальною. Причому в ряді випадків коефіцієнт дифузії може залежати від концентрації, координат або часу. У деяких випадках допущення про сталість коефіцієнта дифузії може призвести до значної недооцінки ресурсу бетонного шару, наприклад у випадку збільшення опору дифузії кислоти через відкладення продуктів корозії в поверхневих шарах бетону [77].

Аналіз літературних даних показує, що під час математичного моделювання процесу корозії бетону з використанням рівнянь дифузії, крім граничних умов, для правильної постановки завдання слід встановити реальні значення коефіцієнта дифузії. Найбільш перспективним, особливо з точки зору практичного застосування, є використання рівнянь дифузії. Однак часто не враховують, що дифузійні особливості деградованої та нормальної структури бетону суттєво відрізняються, що призводить до помилок в обчисленнях. Крім того, необхідно задати закон поширення зони корозійної деструкції бетону на підставі фізичних законів масопереносу, які б узгоджувалися з реальними явищами корозії [77].

Експериментально [28] встановлено значення коефіцієнтів дифузії розчинів сірчаної, азотної та соляної кислот у бетоні.

Глибину корозії бетонних споруд водовідведення (h_k , см) можна розрахувати за формулою [13]:

$$h_k = 1,1 \sqrt{2\tilde{D}_k \frac{C_1^0}{C_1^*} t + \delta^2} - \delta \quad (2.1)$$

де \tilde{D}_k – ефективний коефіцієнт дифузії, см²/год;

C_1^0 – початкова концентрація агресивної сірчаної кислоти на поверхні бетону, кг/м³;

C_1^* – концентрація агресивної сірчаної кислоти на фронті корозії, кг/м³;

t – час впливу агресивної сірчаної кислоти, год;

δ – глибина агресивного фронту корозії, тобто відстань дифузії агресивної сірчаної кислоти вглиб неушкодженого бетону попереду фронту корозії, см.

Для експериментального визначення коефіцієнта дифузії біогенних кислот у бетон (за дифузією протонів – H^+) були використані зразки залізобетонних труб зі споруд водовідведення, а також бетонні балочки після експозиції в каналізаційних мережах і бетонні плити, що не були в експлуатації. Під час проведення пошарових досліджень за допомогою корозиметра бетону вимірювали концентрацію протонів у бетоні – рН (від’ємний \lg концентрації H^+). Потім знімали шар бетону за допомогою шліфувального круга та знову вимірювали рН. Таким чином, з бетонних зразків було знято до 10 мм верхнього шару. Вимірювання товщини шарів бетонних зразків проводили за допомогою штангенциркуля.

Коефіцієнт дифузії протонів углиб бетону розраховували за допомогою формул 2.2 і 2.3 [131, 132].

$$z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (2.2)$$

де z – інтеграл помилок (гауссівський інтеграл);

x – глибина дифузії, мм;

D – коефіцієнт дифузії, см²/год;

t – час дифузії, год.

Звідси D :

$$D = \frac{x^2}{2z^2t}. \quad (2.3)$$

Визначення інтеграла помилок виконували за формулою:

$$C = \frac{C_0}{2}(1 - \operatorname{erf} z), \quad (2.4)$$

де c – концентрація протонів (рН) на глибині x , кг/м³;

c_0 – вихідна (задана у зразку) концентрація протонів, кг/м³.

Звідси erf z :

$$\text{erf } z = \frac{C_0 - 2C}{C_0}. \quad (2.5)$$

Концентрацію протонів на поверхні бетонного зразка (C_0) та концентрацію протонів на глибині x (C) розраховували за значенням рН бетону, тобто $C_0=10^{-\text{pH}_{\text{нп}}}$ та $C=10^{-\text{pH}_x}$, де $\text{pH}_{\text{нп}}$ та pH_x значення рН неушкодженого зразка бетону та рН прокородованого бетону на глибині x .

За експериментальними даними встановили співвідношення C/C_0 , потім за формулою (2.5) – гауссівський інтеграл erf z , після чого визначали z та коефіцієнт дифузії протонів углиб бетону.

Як показали пошарові дослідження бетону, в різній мірі ураженого біогенною кислотною агресією [133–135], коефіцієнт дифузії змінюється в залежності від концентрації кислот (показник рН) на поверхні бетону (рис. 2.7).

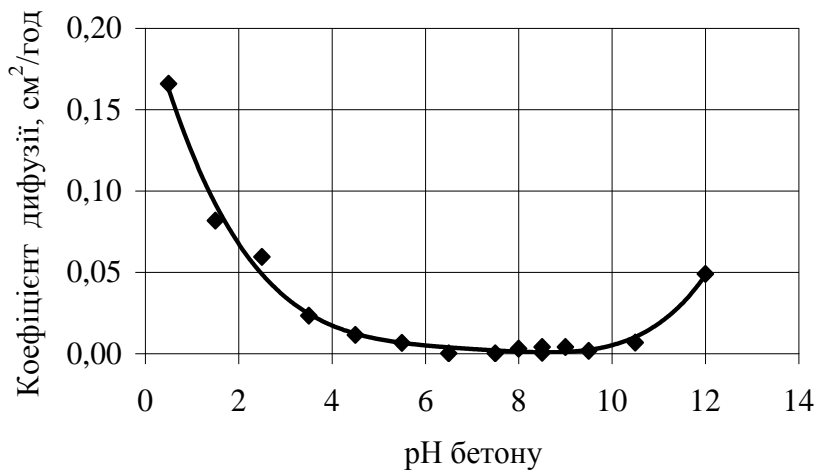


Рисунок 2.7 – Вплив глибини ураження бетону (рН) на значення коефіцієнта дифузії протонів під час біогенної агресії

Як видно, залежність коефіцієнта дифузії від глибини корозійного ураження бетону має 4 основних області: першу – у відносно здоровому бетоні (рН бетону 12–9), другу – у випадку неглибокого корозійного ураження (рН бетону 9–6), третю – у випадку інтенсивного корозійного ураження (рН бетону 6–4) і четверту – у випадку глибокого та екстремально глибокого корозійного ураження бетону (рН 4–0,5). У першій області (відносно здоровому бетоні) зі зниженням рН бетону коефіцієнт дифузії знижується, однак його значення суттєво вище, ніж у другій області, в якій цей показник зберігає постійні значення. У третій області зі зниженням рН відзначається зростання коефіцієнта дифузії до значень, близьких до значень цього показника в першій області (здоровому бетоні). У четвертій області підвищення коефіцієнта дифузії під час зниження рН описується експоненційною залежністю.

На підставі отриманих результатів побудовано залежність між значенням коефіцієнта дифузії протонів у бетон під час біогенної кислотної агресії та тривалістю експозиції зразків (рис. 2.8).

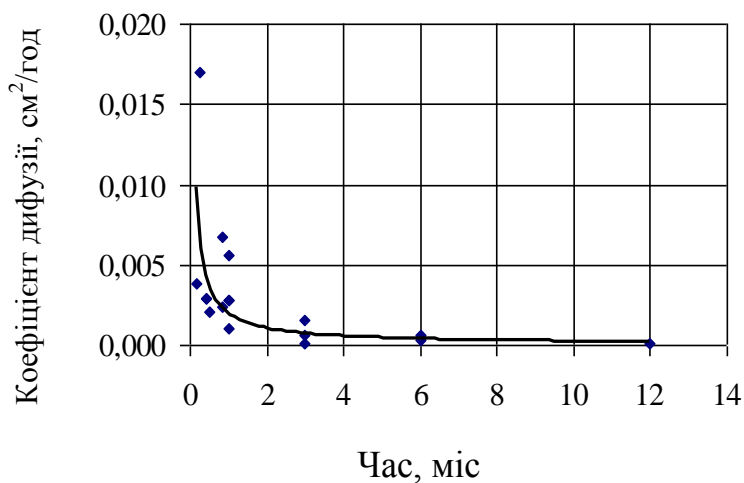


Рисунок 2.8 – Вплив тривалості експозиції зразків у мережах на значення коефіцієнта дифузії протонів в бетон

Як видно, коефіцієнт дифузії істотно підвищується під час зменшення експозиції, що зумовлено утворенням у бетоні, за умов тривалої експозиції, цілого ряду важкорозчинних сполук, які підвищують щільність бетону й ускладнюють дифузію в нього агресивних компонентів. Коефіцієнт дифузії протонів углиб бетону, який визначається за тривалості експозиції 1 добу, становить 0,049 см²/год, що дещо перевищує коефіцієнт дифузії сірчаної кислоти, представлений в роботах НДІЗБу (табл. 2.3).

Таким чином, в результаті проведених експериментальних досліджень встановлено значення коефіцієнта дифузії протонів у бетон під час біогенної кислотної агресії, необхідного для неруйнуючого визначення глибини корозії бетону в мережах водовідведення при вимірюванні рН на поверхні конструкцій. Під час обчислення глибини та швидкості корозії бетону за допомогою формул необхідно використовувати значення коефіцієнта дифузії відповідно до глибини корозійного ураження бетону.

Таблиця 2.3 – Ефективні коефіцієнти дифузії в бетон у випадку різних видів кислотної агресії [28]

Кислотна агресія	Концентрація кислоти, н	рН	Коефіцієнт дифузії, см ² /год
HCl	0,0001–0,1	4–1	0,047
HNO ₃	0,0001–0,1	4–1	0,045
H ₂ SO ₄	0,0001–0,035	4–1,5	0,041
Біогенна	-	4–1,5	0,049

2.2.2 Встановлення величини дифузії біогенних кислот за фронт корозії в динаміці корозійного процесу

За визначенням розробників математичної моделі [77, 86, 121, 123] фронт корозії розташований на ділянці, де концентрація агресивної сірчаної кислоти дорівнює концентрації гідроксиду кальцію, тобто $\text{pH} = 7$. Але область активної корозії бетону дещо більше, тому що за фронтом корозії (δ) також відбуваються структурні зміни в бетоні.

Величину δ визначали за даними експериментальних досліджень під час пошарового дослідження прокородованих зразків бетону, в різній мірі уражених біогенною кислотною корозією після експозиції в каналізаційному колекторі. Час експозиції становив від 3 місяців до 1,5 років. Під час пошарового дослідження відзначали відстань від поверхні вглиб бетону зі значеннями pH від 7,0 (фронт корозії) до 11,5 (область неушкодженого бетону). Результати досліджень представлені на рис. 2.9.

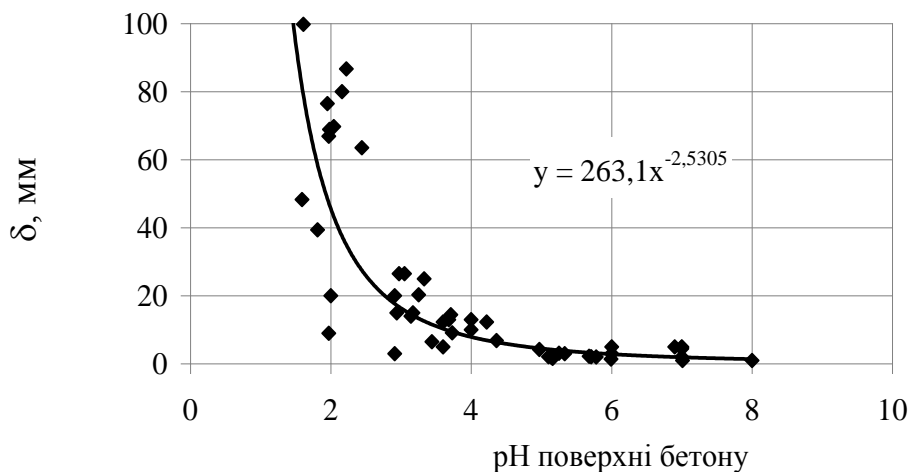


Рисунок 2.9 – Вплив значень pH на поверхні бетону на глибину дифузії біогенних кислот за фронт корозії

Як видно з даних на рис. 2.9, на кривій залежності глибини дифузії біогенних кислот за фронт корозії, від pH біогенних кислот, що впливають на бетон, можна виділити кілька ділянок значень: за умов pH від 9 до 6 δ становить 5 мм, за умов pH від 6 до 4 – 8 мм, за умов pH від 4 до 0,5 – 14 мм і більше.

У пошарових дослідженнях зразків бетону з мереж водовідведення, які перебували в умовах біогенної кислотної агресії до 20 років, встановлено вплив тривалості впливу агресивного середовища на глибину дифузії біогенних кислот за фронт корозії (рис. 2.10).

Як показує рис. 2.10, під час експлуатації бетонних споруд водовідведення до 20 років значення δ змінюється дуже істотно, але під час подальшого агресивного впливу глибина дифузії біогенних кислот за фронт корозії стрімко зростає.

Вплив двох факторів: ступеня агресивності середовища, що впливає на бетон, і часу агресивного впливу на величину δ – встановлено виходячи з визначення швидкості потоку сірчаної кислоти на бетон склепінної частини каналізаційного колектора.

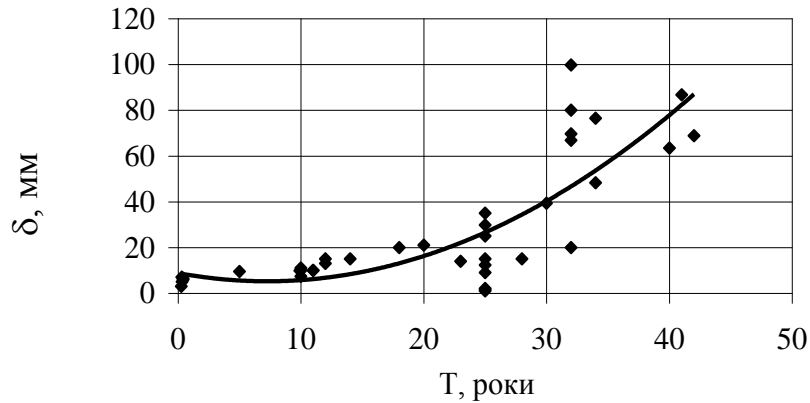


Рисунок 2.10 – Вплив тривалості впливу агресивного середовища на глибину дифузії біогенних кислот за фронт корозії

Швидкість потоку сірчаної кислоти дорівнює швидкості потоку сірководню на склепіння колектора. Потік сірководню (моль/год), необхідний для утворення кількості сірчаної кислоти, яка забезпечує вимірювану кислотність середовища на склепінні площею S ділянки, довжиною l , розраховували за формулою [13]:

$$q_2 = m_{\text{H}_2\text{SO}_4} \cdot f / C_T, \quad (2.6)$$

де $m_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ – маса сірчаної кислоти, утворена під час окислення сірководню на склепінній частині колектора, та яка підтримує визначене значення рН конденсатної вологи, моль;

f – швидкість розбавлення плівкової конденсатної вологи на склепінні площею S_{CB} , год⁻¹.

C_T – експериментально встановлений коефіцієнт співвідношення $S\text{--H}_2\text{S}/S\text{--H}_2\text{SO}_4$ під час окислення сірководню, 0,8.

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{к.в.}} \cdot V_{\text{к.в.}}, \quad (2.7)$$

де $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{к.в.}}$ – концентрація сірчаної кислоти в плівковій конденсатній волозі, моль/м³;

$V_{\text{к.в.}}$ – об'єм плівкової конденсатної вологи на склепінні на ділянці довжиною l , м³.

Звідси:

$$q_{\text{H}_2\text{S}} = C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{к.в.}} \cdot V_{\text{к.в.}} \cdot f / C_{\text{T}}, \quad (2.8)$$

Значення f визначено з рівняння:

$$f = \frac{q_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{к.в.}}}, \quad (2.9)$$

де $q_{\text{H}_2\text{O}}$ – потік води на склепіння на ділянці довжиною l (0,001), м³/год.
Значення $V_{\text{к.в.}}$ визначали з рівняння:

$$V_{\text{к.в.}} = S_{\text{ск}} \cdot c, \quad (2.10)$$

де $S_{\text{ск}}$ – площа склепінної частини, м²;
 c – товщина плівки конденсатної вологи, м (0,5–1,0)·10⁻³.
Підставивши значення f до рівняння (2.8):

$$q_{\text{H}_2\text{S}} = C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{к.в.}} \cdot V_{\text{к.в.}} \cdot \frac{q_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{к.в.}} \cdot C_{\text{T}}} = \frac{C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{к.в.}} \cdot q_{\text{H}_2\text{O}}}{C_{\text{T}}}. \quad (2.11)$$

Таким чином, маса сірчаної кислоти ($m_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{T}}$, моль), яка впливала на бетон протягом певного часу, складає:

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{T}} = q_{\text{H}_2\text{S}} \cdot t_{\text{a}} = \frac{C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{к.в.}} \cdot q_{\text{H}_2\text{O}}}{C_{\text{T}}} \cdot t_{\text{a}} \quad (2.12)$$

де t_{a} – час впливу сірчаної кислоти, год.

Аналіз експериментальних даних показав, що діапазон зміни часу агресивного впливу сірчаної кислоти становить 2 порядки, а діапазон зміни концентрації сірчаної кислоти в конденсатній волозі – 10 порядків, таким чином саме останній фактор справляє більш істотний вплив на величину $m_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{T}}$. Результати розрахунків наведені на рис. 2.11.

Як видно з даних рис. 2.11, залежність величини дифузії біогенних кислот за фронт корозії від негативного логарифма маси сірчаної кислоти, що впливає на бетон, свідчить про те, що у випадку $-\lg m_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{T}}$ менше, ніж 2,2 (що відповідає екстремально низьким значенням рН – менше 3,0 та великій тривалості експлуатації – більше 40 років), значення δ підвищуються екстремально, а у випадку $-\lg m_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{T}}$ більше 2,2 практично не змінюються.



Рисунок 2.11 – Вплив маси сірчаної кислоти, що діє на бетон протягом певного періоду часу, на глибину дифузії біогенних кислот за фронт корозії

2.2.3 Встановлення поправочного коефіцієнта, що враховує вплив повного заповнення трубопроводу на швидкість корозії склепінної частини

У процесі експлуатації самопливних залізобетонних каналізаційних колекторів часто відбувається їх підтоплення. Наприклад, після рясних і тривалих опадів самопливні колектори працюють у режимі повного заповнення. В результаті зі склепінної частини трубопроводів відбувається змив агресивних продуктів, що викликають корозію, і, як наслідок, збільшується значення рН на поверхні бетону.

Кількісне визначення впливу підлужувального підтоплення виконано на підставі залежностей, які встановлено експериментально. Бетонні балочки після експозиції в каналізаційному колекторі обробляли стічними водами. При цьому виконували вимірювання значень рН на поверхні бетону до та після обробки (рис. 2.12) [136, 137].

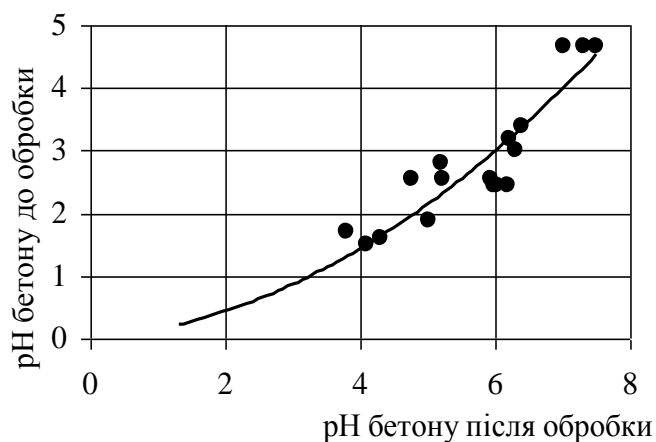


Рисунок 2.12 – Вплив підтоплення на агресивність середовища на поверхні бетону

Як свідчать дані рис. 2.12, під час обробки бетону, який зазнав корозійного впливу, стічною водою в результаті повного заповнення трубопроводу рН на його поверхні змінюється за такою залежністю:

$$pH_{\text{до обробки}} = 0,09 \cdot pH_{\text{після обробки}}^2 - 0,07 pH_{\text{після обробки}} + 0,07. \quad (2.13)$$

Зміна рН на поверхні бетону в результаті впливу стічних вод веде до кардинальної зміни ступеня агресивності середовища, що впливає на бетон. Подібна обробка зрушує рН бетону до області із найбільш низькими D , і, таким чином, створює своєрідне інгібування корозійного процесу. Саме цим пояснюється позитивний вплив підтоплень на бетон каналізаційних трубопроводів водовідведення, уражених біогенною кислотною агресією.

РОЗДІЛ 3. ОБСТЕЖЕННЯ ДІЛЯНОК КАНАЛІЗАЦІЙНИХ МЕРЕЖ М. ХАРКОВА

3.1 Обстеження споруд водовідведення в м. Харкові

Обстеження стану залізобетонних конструкцій у мережах водовідведення за допомогою корозиметра бетону в м. Харкові проводили спільно зі службою експлуатації мереж і лабораторією телевізійної діагностики мереж КП «Харківводоканал».

Для проведення комплексного обстеження було обрано 17 ділянок на мережах водовідведення м. Харкова: залізобетонних та бетонних камер і трубопроводів.

Обстеження виконували в наступних умовах: концентрація в газоповітряному середовищі: сірководню – до 80, діоксиду сірки – до 30 мг/м³; вуглекислого газу – до 0,5, метану – до 0,5 об. %. Також під час проведення досліджень враховували вологість повітря, яка сягала 98 %, оскільки цей показник також впливає на швидкість карбонізації та активність корозійних процесів [138].

Під час обстеження кожного об'єкта за допомогою корозиметра бетону проводили вимірювання на склепінній частині трубопроводів. Потім за спеціально розробленими програмами обчислювали активну реакцію середовища (рН) — конденсатної вологи на поверхні бетонних стін. На окремих ділянках досліджували не менше 3 поверхонь, що знаходяться на різній висоті від рівня стічної води, і на кожній поверхні виконували 8–10 вимірювань. Тривалість вимірювання складала 2–5 с. Проведення всіх робіт було зафіксовано на відеоплівку. Результати обстеження наведені в табл. 3.1. Глибину та швидкість корозії розраховували за формулою 2.1.

Показники, що отримано під час вимірювання рН бетону, на ділянках, що не перевищують 1 дм², перебували в межах довірчого інтервалу, розрахованого під час статистичної обробки даних лабораторних досліджень. У випадку глибокого ураження бетону каналізаційних мереж ці значення на різних ділянках становили: + 145–+ 155; + 43–+ 65 мВ; + 5–+ 20 мВ, а за умов задовільного стану бетону – -323–329.

За результатами вимірювань, виконаних безпосередньо в мережах водовідведення за допомогою корозиметра бетону, можна зробити висновок, що майже на всіх ділянках каналізаційної мережі м. Харкова відзначається надзвичайно агресивне середовище, що впливає на бетон. Це ділянки шахти № 4б і № 15 Північної групи заводів, камера № 3 Павловського колектора, камера по вул. Моїсеєвській, камера № 3 розвантажувального колектора (комплексу біологічного очищення «Безлюдівський»), ділянки колектора ХТЗ.

Теоретично швидкість корозії бетону (з урахуванням дифузії за фронт корозії) на цих ділянках перевищує 50 мм/рік. Ряд вимірів, проведених як у камерах, так і безпосередньо у трубопроводах, дозволили оцінити залишковий ресурс трубопроводів на вказаних ділянках мережі (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Результати обстеження бетонних споруд водовідведення в м. Харкові

Ділянка колектора	Рік введення в експлуатацію	рН плівкової вологи бетону	Глибина дифузії до фронту корозії, мм	Глибина з урахуванням дифузії біо-ген. кислот за фронт корозії, мм	Швидкість корозії, мм/рік	Залишковий ресурс, роки
Камера 17а Харківського колектора	1973	2,91 1,97	2,1 7,0	22,06 73,88	0,69 2,31	- -
Камера ПЕКС, вул. Моїсеєвська	1990	-0,66	117,1	на всю товщину конструкції	39,48	-
Камера 17б Харківського колектора	1973	2,04	7,2	76,89	2,40	-
Колодязь на вул. Новгородській	1965	2,44	6,4	69,99	1,75	-
Шахта № 6 Північна група заводів	1990	3,73	0,9	10,02	0,40	9,18
Шахта № 15 Північна група заводів	1990	-0,82	126,0	на всю товщину конструкції	53,05	-
Шахта № 9 Північна група заводів	1990	2,94	16,0	16,56	0,66	аварійний стан
Камера № 3 Павловського колектора	1965	-0,24	174,0	на всю товщину конструкції	48,43	-
Камера № 3 розвантажувального колектора (Безлюдівські ОС)	1975	0,04	153,1	на всю товщину конструкції	55,10	-
Шахта № 4б Північна група заводів	1990	-0,35	151,4	на всю товщину конструкції	66,05	-
Колектор ХТЗ, шахта № 4	1971	1,98	7,2	76,07	2,24	аварійний стан
Колектор ХТЗ, ш. № 5	1971	3,70	1,1	12,11	0,36	9,25
Колектор ХТЗ, ш. № 6	1971	3,50	1,3	14,54	0,43	аварійний стан
Колектор ХТЗ, ш. № 10	1971	3,20	1,82	19,72	0,58	аварійний стан
Колектор ХТЗ, ш. № 12	1971	1,93	7,9	84,45	2,48	аварійний стан
Ріг пров. Забайкальський та вул. Ньютона	1963	3,05	2,7	29,19	0,69	аварійний стан
Роганський житловий масив	1992	1,27	12,8	135,8	10,45	аварійний стан

Визначення прогнозного терміну до граничного стану труб, тобто довговічність конструкцій в умовах встановленої активності мікробіологічної агресії, й терміну залишкового ресурсу залізобетонних труб, виконували за [13], виходячи з наступного співвідношення:

$$T_{г.с.} = \frac{(L_T - h_K) - L_T \cdot k_{г.к.}}{V_K}, \quad (3.1)$$

де $T_{г.с.}$ – термін від початку мікробіологічної агресії до граничного стану залізобетонних труб, роки;

L_T – номінальна товщина труби, мм;

$k_{г.к.}$ – величина граничної корозії (для труб ТН60-II і ТН60-III дорівнює 0,75 і 0,7 відповідно);

h_K і V_K – глибина (мм) і швидкість (мм/рік) корозії відповідно.

Звідси термін залишкового ресурсу ($T_{з.р.}$, роки) становить:

$$T_{з.р.} = T_{г.с.} - (T_e - 0,5), \quad (3.2)$$

де T_e - термін експлуатації залізобетонного трубопроводу, роки.

На більшості обстежених ділянок (шахти № 4, 12 колектора ХТЗ, колектор пров. Забайкальський і вул. Ньютона тощо) залізобетон трубопроводів уражений корозійним процесом майже на всю товщину конструкції, тобто споруди знаходяться в аварійному стані й руйнування склепінної частини трубопроводу може статися в будь-який момент. Саме ці ділянки вимагають прийняття рішень, спрямованих на підвищення експлуатаційної довговічності бетону: встановлення абонентів, які скидають стічні води, що ініціюють таке агресивне середовище (вода, що містить SO_4^{2-} , органічні стоки), зниження концентрації сірководню за допомогою доступних експлуатаційних заходів: провітрювання, підвищення окислювально-відновного потенціалу за допомогою хімічних реагентів або аерації, зв'язування сірководню за допомогою хімічних реагентів.

За даними вимірів, виконаних під час обстеження, можна зробити ряд висновків, щодо наявності спотворень у показаннях приладу в результаті впливу наведених полів у мережах водовідведення, адекватності одержуваних показань експлуатаційного стану бетону, відповідності одержуваних даних про глибину корозійного ураження бетону.

3.2 Аналіз вмісту сірководню в мережах водовідведення

Сучасні уявлення про кількісні характеристики забруднення повітряного та водного середовища в мережах водовідведення та інших технічних і природних об'єктів базуються на проведенні великої кількості вимірювань і статистичної обробки отриманих даних. У різних місцях одного й того ж каналізаційного колектора процес корозії може протікати з різною швидкістю. Особливо інтенсивно корозійні процеси спостерігаються в місцях із більш високим рівнем турбулентності та дегазації стічних вод і, як наслідок, з більш високою концентрацією сірководню в атмосфері підсклепінного простору [139, 140].

Отже, концентрація сірководню в атмосфері мереж водовідведення є основним показником проблеми, що впливає на швидкість корозії бетонних споруд водовідведення та спричиняє екологічні проблеми, зумовлені запахом, що надходить до доквілля з цих споруд. Саме тому необхідно проводити ретельний моніторинг вмісту сірководню в каналізаційних мережах.

За літературними даними відзначається надзвичайно велика розбіжність у концентраціях сірководню, що міститься в атмосфері підсклепінного простору мереж водовідведення в залежності від часу доби, пори року тощо (рис. 3.1) [141].

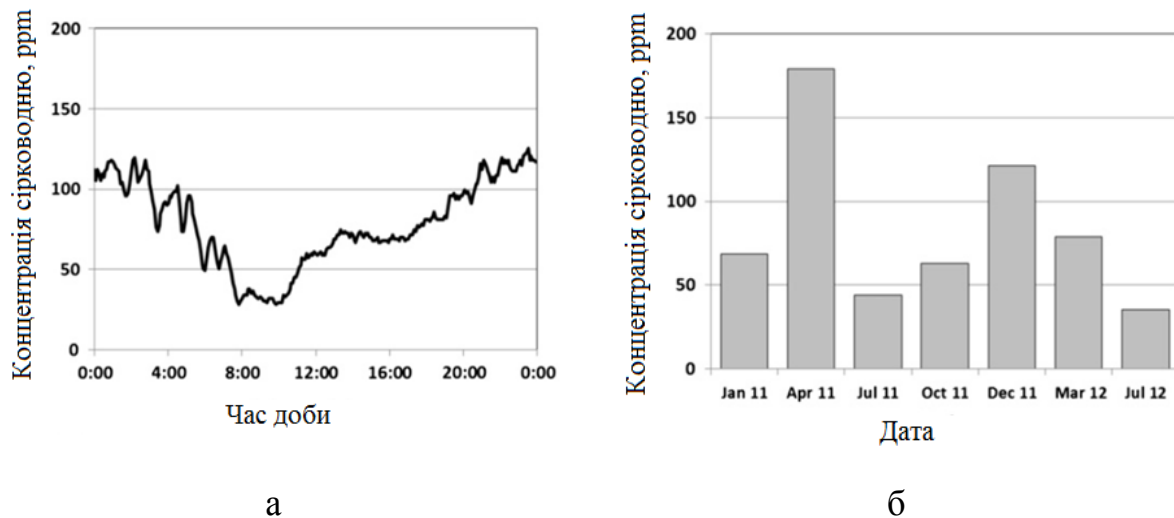


Рисунок 3.1 – Динаміка концентрації сірководню в бетонних колекторах водовідведення протягом доби (а) та за сезонами (б) відповідно

Як видно з наведених даних, середньодобова концентрація сірководню в газовому середовищі колектора за період дослідження становила 79 ppm. Загалом концентрація сірководню в атмосфері каналізаційного колектора коливалась від 7 до 411 ppm. Проте концентрація сірководню зазвичай у значній мірі змінюється протягом доби; при цьому концентрація змінювалась до 100 ppm протягом будь-якого 24-годинного періоду. Середні сезонні значення за період, що досліджувався (рис. 3.1, б), також демонструють певні коливання: як правило, найбільший вміст сірководню спостерігався в літньо-осінній період – середньодобове значення сірководню зі 100 ppm змінювалось до ~ 40 ppm взимку [141].

Статистична обробка даних вимірювань концентрації сірководню в атмосфері каналізаційної мережі м. Харкова в різні сезони року представлена в табл. 3.2.

Як видно з даних табл. 3.2, значення концентрацій сірководню в атмосфері каналізаційної мережі м. Харкова змінюються в широкому діапазоні та надзвичайно залежать від пори року.

Як видно з даних рис. 3.2, за досліджуваний період часу концентрація сірководню на всіх ділянках колектора ХТЗ мала загальну тенденцію до підвищення.

Таблиця 3.2 – Значення концентрації сірководню в атмосфері каналізаційних колекторів у різні періоди року

Шахта	Середнє за рік			Літній період			Зимовий період		
	Сер. значення	Довірчий інтервал	Сер. значення з урахуванням довірчого інтервалу	Сер. значення	Довірчий інтервал	Сер. значення з урахуванням довірчого інтервалу	Сер. значення	Довірчий інтервал	Сер. значення з урахуванням довірчого інтервалу
№8 Грековського колектора	20,1	3,38	23,46 (16,7)	24,3	4,30	28,55 (19,9)	15,3	2,30	17,6 (13)
№4 колектора ХТЗ	24,6	2,81	27,41 (27,79)	24,0	4,01	28,01 (19,99)	25,1	4,07	29,17 (21,03)
№5 колектора ХТЗ	13	1,96	14,96 (11,04)						
№6 колектора ХТЗ	17	1,96	18,96 (15,04)	17	1,96	18,96 (15,04)			
№10 колектора ХТЗ (761 м/р)	15,5	6,86	22,36 (8,64)	15,5	6,86	22,36 (8,64)			
№11 колектора ХТЗ (761 м/р)	20	19,59	39,59 (0,41)	20	19,59	39,59 (0,41)			
№7 Іванівського колектора	11,3	1,31	12,6 (9,99)	11,3	1,31	12,6 (9,99)			
№2 Головного колектора	15	3,85	18,85 (11,15)	16	8,0	24 (8)	14	1,60	15,6 (12,4)
№3 Головного колектора	22	3,92	25,92 (18,08)	22	3,92	25,92 (18,08)			
№12 колектора ХТЗ	28,5	6,86	35,36 (21,64)	28,5	6,86	35,36 (21,64)			
Колектор «Авто-запчастина»	21,8	6,23	28,03 (15,57)	21	9,89	30,89 (11,11)	22,9	9,60	32,5 (13,3)

Середньорічні концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору на різних ділянках трубопроводів водовідведення м. Харкова, розраховані за даними вимірів 2001–2010 рр., представлені на рис. 3.2. Кількість вимірювань на кожній шахті становила 4–85.

Як видно з наведених даних, на всіх досліджуваних ділянках середньорічна концентрація сірководню перевищує ГДК робочої зони, яка складає 10 мг/м³.

Як свідчать дані спостережень, на різних ділянках каналізаційної мережі концентрація сірководню в атмосфері підсклепінного простору трубопроводів у значній мірі змінюється не тільки протягом року, за минулими сезонами, але і протягом сезону (кварталу) (рис. 3.3) – весни, і навіть протягом доби, причому вельми кардинально (рис. 3.4).

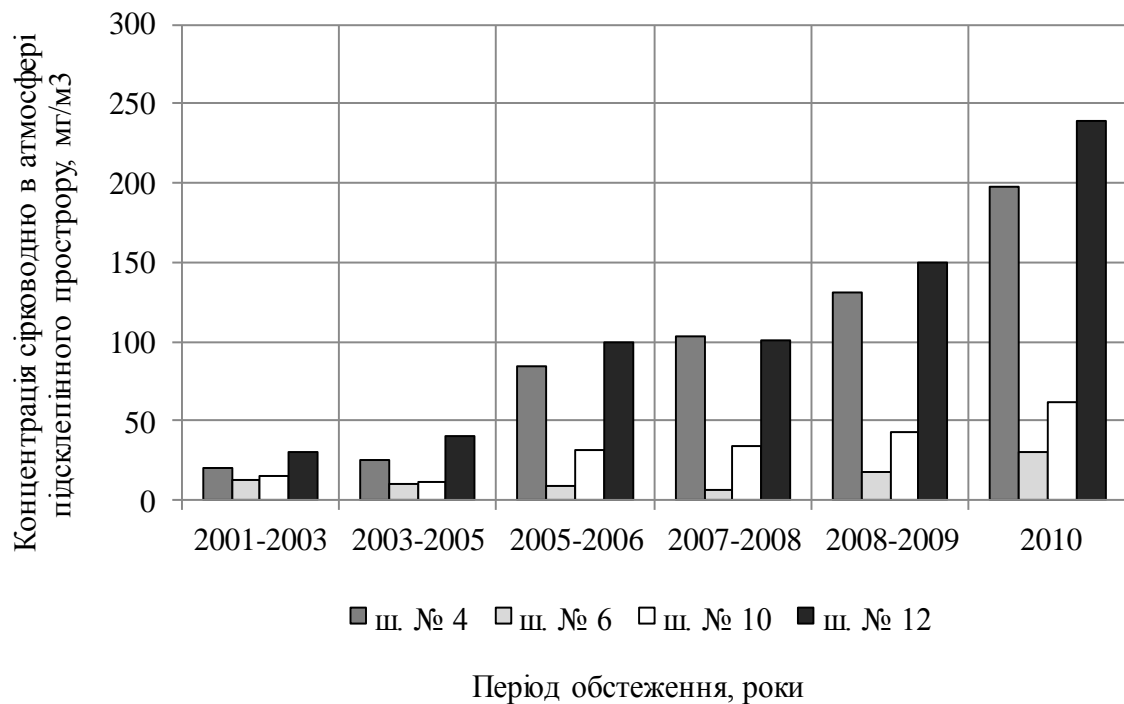


Рисунок. 3.2 – Динаміка концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору на ділянках колектора ХТЗ [137, 142, 143]

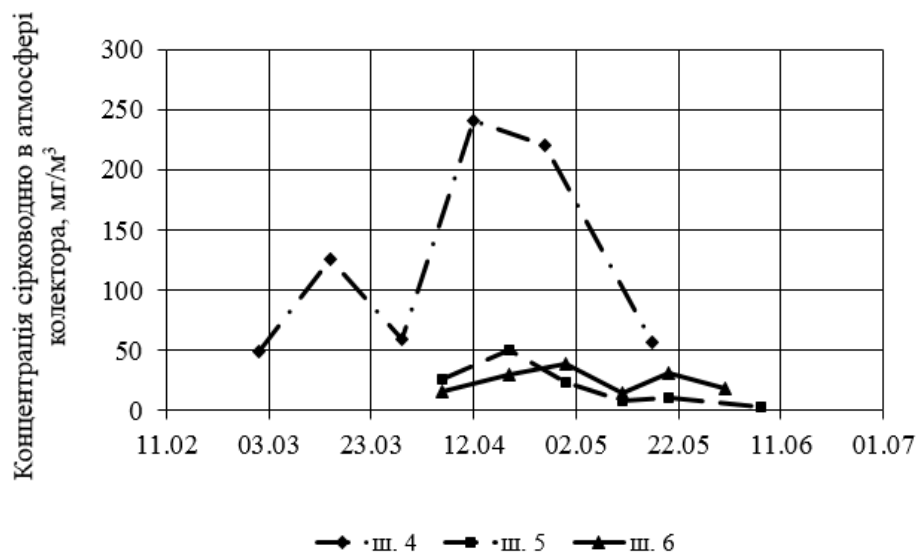


Рисунок 3.3 – Динаміка концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору на ділянці колектора ХТЗ [137, 142, 143]

Динаміка концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору на ділянці колектора ХТЗ підсклепінного простору шахти № 4 колектора ХТЗ за період з березня по червень змінювалася від 47 до 240 mg/m^3 , тобто більш ніж на 400 %. Протягом доби концентрація сірководню в атмосфері підсклепінного простору шахти № 5 Іванівського колектора змінювалася від 7,9 до 37,8 mg/m^3 , тобто практично на 400 %.

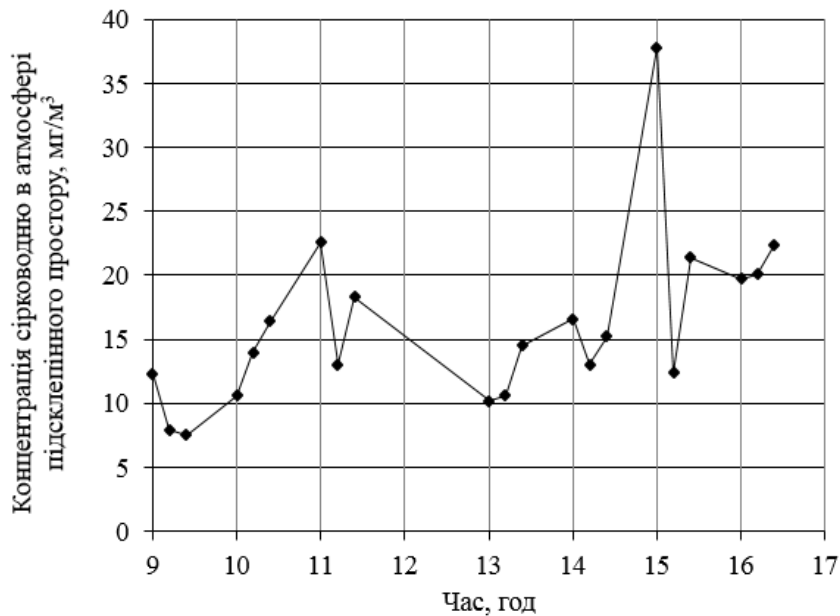


Рисунок 3.4 – Добові зміни концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору Іванівського колектора (шахта № 5) [137, 142, 143]

Таким чином, поодинокі вимірювання концентрації сірководню в атмосфері трубопроводів водовідведення не відображають реальної ситуації накопичення сірководню на ділянках, а отже, об'єктивного рівня накопичення сірководню на склепінній поверхні, тобто рівня загроз експлуатаційній надійності та екологічній безпеці водовідведення.

Крім того, на всіх досліджувальних ділянках концентрація сірководню постійно перевищує гранично допустиму концентрацію робочої зони, що може спричинити надзвичайні ситуації та загрожує безпеці працівників.

3.3 Електронне картографування накопичення сірководню в мережах водовідведення м. Харкова

Досвід експлуатації каналізаційних мереж м. Харкова, обсяг даних, накопичений службами експлуатації, науково-дослідними та навчальними інститутами, дозволяють детально простежити динаміку перевищення концентрацій сірководню, який вивільняється з каналізаційних мереж м. Харкова. Традиційне подання даних вимірювань складу газоподібного середовища в мережах водовідведення на паперових носіях не відповідає сучасному рівню візуалізації даних і картографії сірководню.

Як згадано вище, сірководень утворюється у стічних водах, які транспортуються трубопроводами водовідведення. На певних ділянках мережі внаслідок дії гідродинамічних, фізичних, хімічних й аеродинамічних чинників сірководень виділяється з водного середовища в підсклепінну атмосферу споруд. Концентрація сірководню в атмосфері підсклепінного простору є пропорційною концентрації цієї сполуки у стічних водах. Тому для визначення рівня надійності мережі, екологічної безпеки водовідведення та можливості ви-

никнення надзвичайних ситуацій на цих спорудах необхідно контролювати вміст сірководню, а також його похідних у кожному експлуатаційному середовищі. Під час проведення картографування концентрації сірководню в каналізаційній мережі м. Харкова виконано дві операції:

- картографування каналізаційної мережі м. Харкова за вмістом сірководню у стічних водах, що транспортуються каналізаційними трубопроводами (рис. 3.5);
- картографування каналізаційної мережі м. Харкова за вмістом сірководню в атмосфері підсклепінного простору (рис. 3.6).

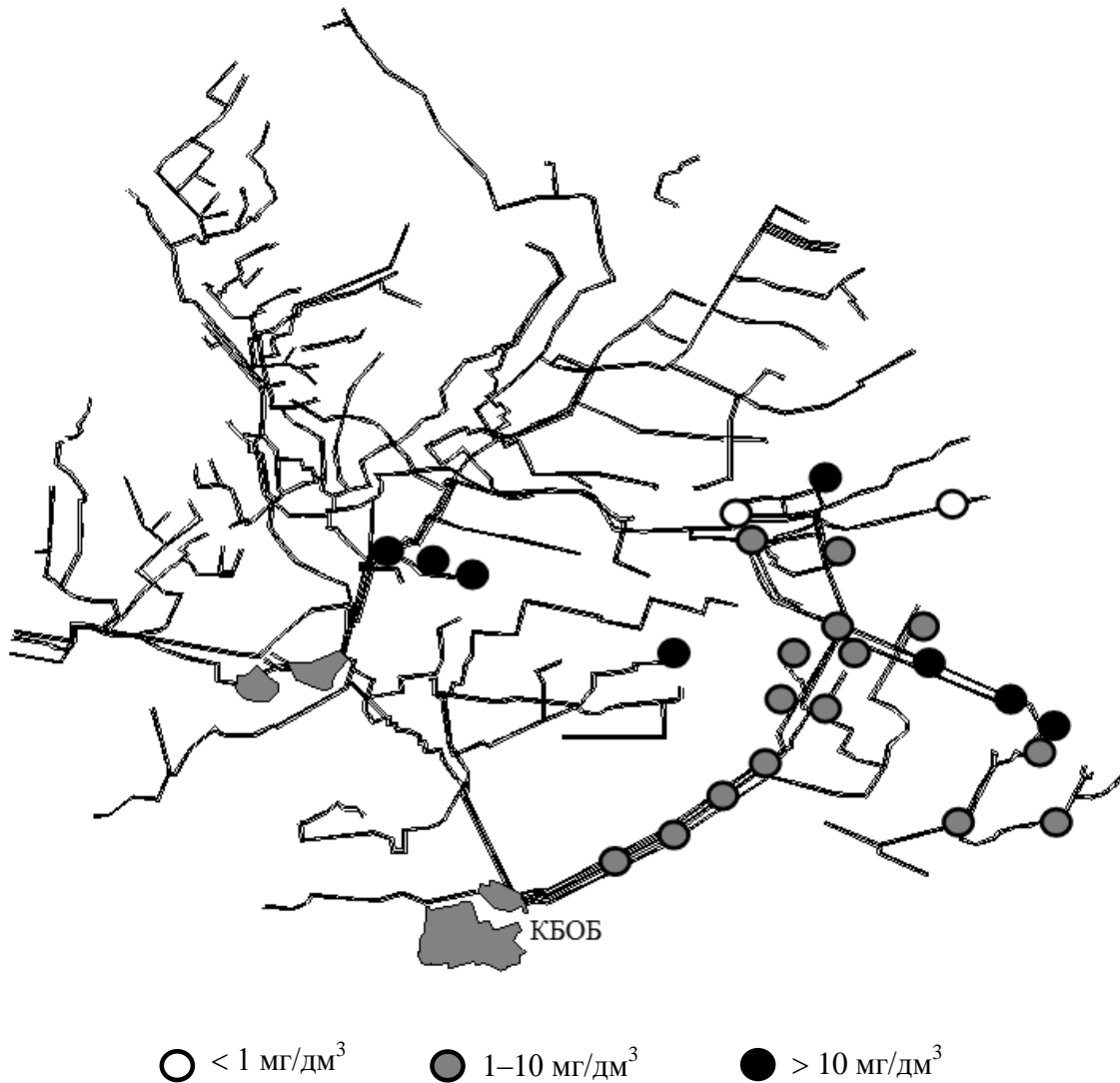


Рисунок 3.5 – Концентрація сірководню в стічних водах каналізаційних мереж м. Харкова (КБОБ – Комплекс біологічних очисних споруд «Безлюдівський»)

Картографування сірководню в атмосфері каналізаційної мережі м. Харкова виконували в сучасному цифровому форматі на геоінформаційній карті каналізаційної мережі у програмах Corel Draw. В якості вихідних даних про вміст сірководню на ділянках каналізаційної мережі м. Харкова використали за 2010 р., представлені фахівцями КП «Харківводоканал». Під час кар-

тографування вмісту сірководню у стічних водах, що транспортуються мережами водовідведення, використовували дані власних досліджень.

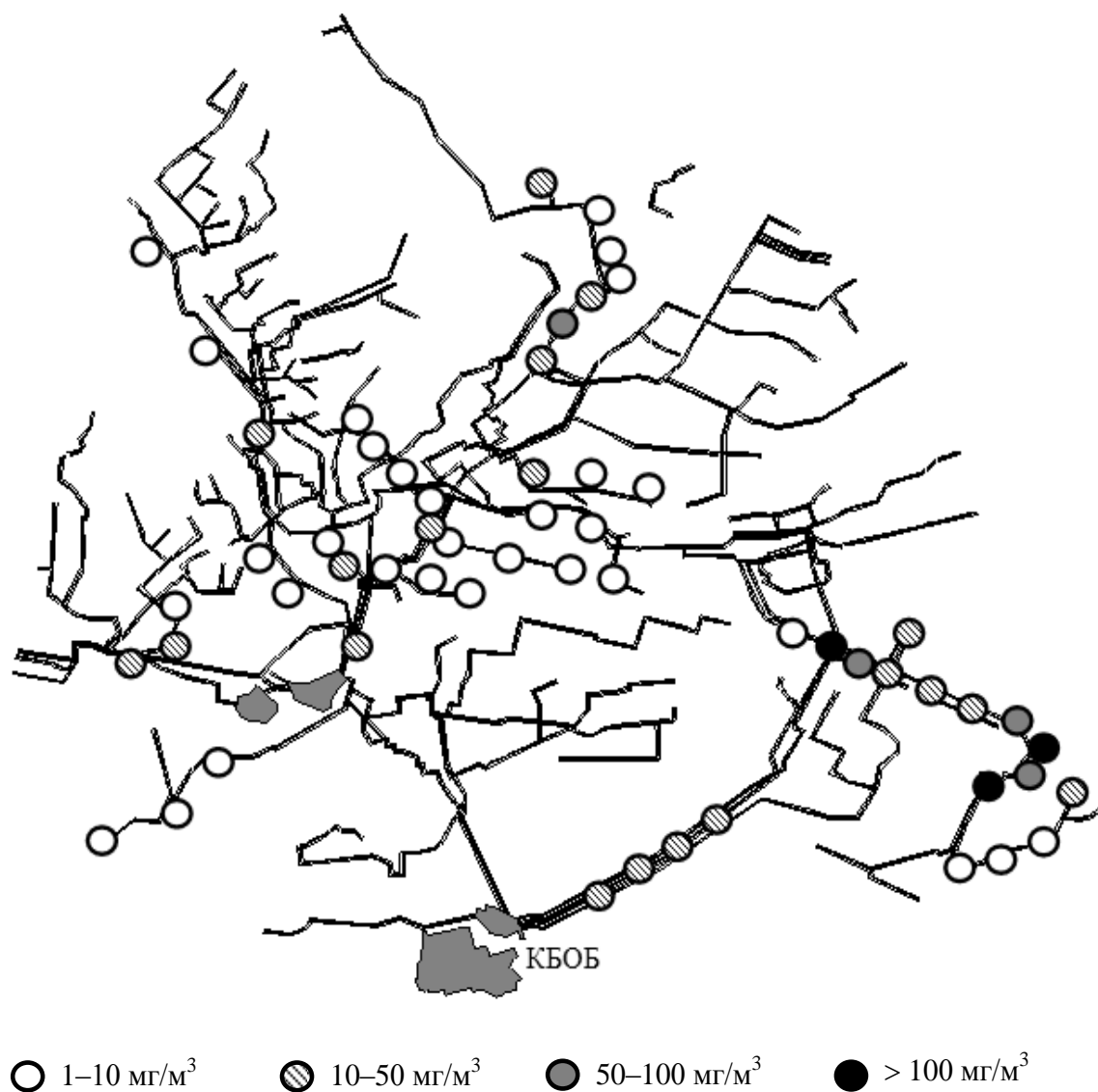


Рисунок 3.6 – Концентрація викидів сірководню в атмосферу каналізаційних мереж м. Харкова

Використані програми дозволяють розглядати як мережу в цілому, так і окремі ділянки мережі, змінюючи масштаб до необхідного. Електронна карта дає можливість змінювати або відновлювати дані, представляти дані кожного року в сучасному цифровому форматі та інші операції. Детальне картографування атмосфери та водного середовища мереж водовідведення є зручним для порівняння та виведення численних кореляцій, а також виявлення найнебезпечніших ділянок з метою запобігання надзвичайним ситуаціям на бетонних спорудах водовідведення.

РОЗДІЛ 4. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА НАКОПИЧЕННЯ СІРКОВОДНЮ В АТМОСФЕРІ ПІДСКЛЕПІННОГО ПРОСТОРУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

4.1 Математична модель виділення сірководню в атмосферу підсклепінного простору під час експлуатації самопливних каналізаційних трубопроводів

Відомо, що біохімічне перетворення сульфатів SO_4^{2-} у сульфідів S^{2-} в межах біоплівки та відкладень у лотковій частині каналізаційних колекторів супроводжується надходженням S^{2-} у потік стічних вод, що транспортується, в якому йонна форма сульфідів S^{2-} частково переходить у гідросульфід-йон HS^- , розчинений H_2S та газ H_2S . Моделювання процесу утворення сульфідів у біоплівці лоткової частини колектора та відкладеннях, переходу сульфідів у потік стічних вод, біохімічних та фізико-хімічних перетворень сульфідів у потоці стічних вод із наступною емісією сірководню в підсклепінний простір колектора включає в себе:

- моделювання процесу аеробного зростання гетеротрофної біомаси в потоці стічних вод;
- моделювання процесу аеробного зростання гетеротрофної біомаси в біоплівці лоткової частини;
- моделювання процесу споживання субстрату, що піддається ферментації, та продуктів процесу ферментації на забезпечення енерговитрат під час метаболізму мікроорганізмів;
- моделювання процесу аеробної й анаеробної гідролізації;
- моделювання процесу ферментації;
- моделювання процесу утворення сульфідів;
- моделювання процесу хімічного та біологічного окислення сульфідів у потоці стічних вод, а також окислення сульфідів в межах біоплівки лоткової частини;
- моделювання процесу емісії сульфідів у підсклепінний простір колектора через поверхню розділу фаз;
- моделювання процесу реаерації кисню з атмосфери колектора;
- моделювання гідродинамічного режиму течії потоку стічної рідини в самопливному колекторі.

Результаті вирішення даних завдань дозволяють отримати модель процесу накопичення сірководню в атмосфері колектора.

В якості основних змінних було взято:

- концентрацію розчиненої органічної речовини у вигляді субстрату, що піддається ферментації S_F , (г ХСК/м³); субстрат у вигляді продуктів ферментації S_A , (г ХСК/м³); субстрат, який швидко X_{S1} та повільно X_{S2} гідролізується (г ХСК/м³);

- сумарну концентрацію розчинених сульфідів $S_{S(-II)}$ (H_2S, HS^-, S^{2-}), г S/м³;
- концентрацію розчиненого кисню SO_2 , г O₂/м³;
- поверхневу концентрацію біомаси гетеротрофних мікроорганізмів у складі біоплівки X_{BF} , (г ХСК/м²); концентрацію біомаси гетеротрофних мікроорганізмів у стічній рідині X_{BW} (г ХСК/м³).

До даної моделі не включено концентрація сульфатів, тому що для умов транспортування стічних вод їх концентрація набагато перевищує концентрацію напівнасичення і, таким чином, не лімітує швидкості утворення сульфідів. Крім того, розглядається випадок стаціонарності біомаси мікроорганізмів у складі біоплівки та сталості щільності біомаси за довжиною ділянки колектора.

Моделювання гідродинамічного режиму течії потоку стічної рідини в колекторі передбачає оцінку впливу турбулентної дифузії, що враховує осьове (поздовжнє) перемішування рідини, й оцінку впливу конвективного переносу, який враховує течію потоку рідини в колекторі.

Модель руху стічної рідини й одночасного біохімічного утворення сульфідів з їх подальшим окисленням, субстрату, кисню, завислої біомаси мікроорганізмів за довжиною самопливного колектора в загальному вигляді видається такою:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S_F}{\partial t} = D_{S_F} \frac{\partial^2 S_F}{\partial x^2} - V \frac{\partial S_F}{\partial x} + r_{S_F}; \\ \frac{\partial S_A}{\partial t} = D_{S_A} \frac{\partial^2 S_A}{\partial x^2} - V \frac{\partial S_A}{\partial x} + r_{S_A}; \\ \frac{\partial X_{S1}}{\partial t} = D_{X_{S1}} \frac{\partial^2 X_{S1}}{\partial x^2} - V \frac{\partial X_{S1}}{\partial x} + r_{X_{S1}}; \\ \frac{\partial X_{S2}}{\partial t} = D_{X_{S2}} \frac{\partial^2 X_{S2}}{\partial x^2} - V \frac{\partial X_{S2}}{\partial x} + r_{X_{S2}}; \\ \frac{\partial X_{BW}}{\partial t} = D_{X_{BW}} \frac{\partial^2 X_{BW}}{\partial x^2} - V \frac{\partial X_{BW}}{\partial x} + r_{X_{BW}}; \\ \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial t} = D_{S_{S(-II)}} \frac{\partial^2 S_{S(-II)}}{\partial x^2} - V \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial x} + r_{S_{S(-II)}}; \\ \frac{\partial S_{O_2}}{\partial t} = D_{S_{O_2}} \frac{\partial^2 S_{O_2}}{\partial x^2} - V \frac{\partial S_{O_2}}{\partial x} + r_{S_{O_2}}. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

де $V=Q/\omega_W$ – середня швидкість течії стічної рідини в колекторі, м/с;

Q – витрати стічних вод, м³/с;

ω_W – площа поперечного перерізу потоку стічних вод у колекторі, м²;

t – час перебування стічних вод на ділянці самопливного колектора, який розглядається, с;

x – координата за напрямком руху потоку води, м;
 D_{S_F} , D_{S_A} , $D_{X_{S1}}$, $D_{X_{S2}}$, $D_{X_{BW}}$, $D_{S_{S(-II)}}$, $D_{S_{O_2}}$ – відповідні коефіцієнти турбулентної дифузії (продольної дисперсії), м²/с;

r_{S_F} – швидкість зміни концентрації субстрату, що піддається ферментації, г ХСК/м³·с;

r_{S_A} – швидкість зміни концентрації продуктів ферментації, г ХСК/м³·с;

$r_{X_{S1}}$ та $r_{X_{S2}}$ – швидкість зміни концентрації субстрату, який гідролізується швидко та повільно, г ХСК/м³·с;

$r_{X_{BW}}$ – швидкість зміни концентрації гетеротрофних мікроорганізмів в стічній рідині, г ХСК/м³·с;

$r_{S_{S(-II)}}$ – швидкість зміни концентрації сульфідів в стічній рідині, г S/м³·с;

$r_{S_{O_2}}$ – швидкість зміни концентрації розчиненого кисню, г O₂/м³.

Для розв'язання системи необхідно задати граничні умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S_F}{\partial x} = \frac{V}{D_{S_F}} (S_F(0) - S_F^0); \\ \frac{\partial S_A}{\partial x} = \frac{V}{D_{S_A}} (S_A(0) - S_A^0); \\ \frac{\partial X_{S1}}{\partial x} = \frac{V}{D_{X_{S1}}} (X_{S1}(0) - X_{S1}^0); \\ \frac{\partial X_{S2}}{\partial x} = \frac{V}{D_{X_{S2}}} (X_{S2}(0) - X_{S2}^0); \\ \frac{\partial X_{BW}}{\partial x} = \frac{V}{D_{X_{BW}}} (X_{BW}(0) - X_{BW}^0); \\ \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial x} = \frac{V}{D_{S_{S(-II)}}} (S_{S(-II)}(0) - S_{S(-II)}^0); \\ \frac{\partial S_{O_2}}{\partial x} = \frac{V}{D_{S_{O_2}}} (S_{O_2}(0) - S_{O_2}^0). \end{array} \right. \quad \text{при } x=0 \quad (4.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S_F}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial S_A}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial X_{S1}}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial X_{S2}}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial X_{BW}}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial S_{O_2}}{\partial x} = 0. \end{array} \right. \quad \text{при } x=1, \quad (4.3)$$

де l – довжина даної ділянки колектору, м.

$S_F^0, S_A^0, X_{S1}^0, X_{S2}^0, X_{BW}^0, S_{S(-II)}^0, S_{O_2}^0$ – відповідні концентрації у стічній рідині перед входом потоку стічних вод на дану ділянку колектора.

Перша гранична умова (4.2) (при $x=0$) означає, що повинна виконуватися балансова умова для потоків субстратів, сульфідів, кисню та біомаси в початковому перерізі колектора, тобто:

$$\begin{aligned} V(S_F(0) - S_F^0) - D_{S_F} \frac{\partial S_F}{\partial x} &= 0; \\ V(S_A(0) - S_A^0) - D_{S_A} \frac{\partial S_A}{\partial x} &= 0; \\ V(X_{S1}(0) - X_{S1}^0) - D_{X_{S1}} \frac{\partial X_{S1}}{\partial x} &= 0; \\ V(X_{S2}(0) - X_{S2}^0) - D_{X_{S2}} \frac{\partial X_{S2}}{\partial x} &= 0; \\ V(X_{BW}(0) - X_{BW}^0) - D_{X_{BW}} \frac{\partial X_{BW}}{\partial x} &= 0; \\ V(S_{S(-II)}(0) - S_{S(-II)}^0) - D_{S_{S(-II)}} \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial x} &= 0; \\ V(S_{O_2}(0) - S_{O_2}^0) - D_{S_{O_2}} \frac{\partial S_{O_2}}{\partial x} &= 0. \end{aligned}$$

Оскільки концентрація субстратів, сульфідів, біомаси та розчиненого кисню змінюється стрибкоподібно за рахунок повздовжнього перемішування віссю колектора та:

$$\begin{aligned} S_F(x=0) &\neq S_F^0 \\ S_A(x=0) &\neq S_A^0 \\ X_{S1}(x=0) &\neq X_{S1}^0 \\ X_{S2}(x=0) &\neq X_{S2}^0 \\ X_{BW}(x=0) &\neq X_{BW}^0 \\ S_{S(-II)}(x=0) &\neq S_{S(-II)}^0 \\ S_{O_2}(x=0) &\neq S_{O_2}^0 \end{aligned}$$

Друга гранична умова (4.3) (при $x=1$) означає, що на виході з даної ділянки колектора процес зміни концентрацій сульфідів, субстратів, кисню та біомаси закінчений (так звана «м'яка» гранична умова).

Представляючи систему рівнянь (4.1) за допомогою безрозмірних змінних:

$$\tau = \frac{t}{T}, \quad z = \frac{x}{l}, \quad (4.4)$$

$$T = W/Q = l/V, \quad (4.5)$$

W – об'єм самопливного колектора, що зайнятий стічною рідиною, m^3 , отримаємо:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial S_F}{\partial \tau} &= \frac{1}{Pe_{S_F}} \cdot \frac{\partial^2 S_F}{\partial z^2} - \frac{\partial S_F}{\partial z} + r_{S_F} T; \\ \frac{\partial S_A}{\partial \tau} &= \frac{1}{Pe_{S_A}} \cdot \frac{\partial^2 S_A}{\partial z^2} - \frac{\partial S_A}{\partial z} + r_{S_A} T; \\ \frac{\partial X_{S1}}{\partial \tau} &= \frac{1}{Pe_{X_{S1}}} \cdot \frac{\partial^2 X_{S1}}{\partial z^2} - \frac{\partial X_{S1}}{\partial z} + r_{X_{S1}} T; \\ \frac{\partial X_{S2}}{\partial \tau} &= \frac{1}{Pe_{X_{S2}}} \cdot \frac{\partial^2 X_{S2}}{\partial z^2} - \frac{\partial X_{S2}}{\partial z} + r_{X_{S2}} T; \\ \frac{\partial X_{BW}}{\partial \tau} &= \frac{1}{Pe_{X_{BW}}} \cdot \frac{\partial^2 X_{BW}}{\partial z^2} - \frac{\partial X_{BW}}{\partial z} + r_{X_{BW}} T; \\ \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial \tau} &= \frac{1}{Pe_{S_{S(-II)}}} \cdot \frac{\partial^2 S_{S(-II)}}{\partial z^2} - \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial z} + r_{S_{S(-II)}} T; \\ \frac{\partial S_{O_2}}{\partial \tau} &= \frac{1}{Pe_{S_{O_2}}} \cdot \frac{\partial^2 S_{O_2}}{\partial z^2} - \frac{\partial S_{O_2}}{\partial z} + r_{S_{O_2}} T. \end{aligned} \right. \quad (4.6)$$

Граничні умови будуть мати вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S_F}{\partial z} = Pe_{S_F} \times (S_F(0) - S_F^0); \\ \frac{\partial S_A}{\partial z} = Pe_{S_A} \times (S_A(0) - S_A^0); \\ \frac{\partial X_{S1}}{\partial z} = Pe_{X_{S1}} \times (X_{S1}(0) - X_{S1}^0); \\ \frac{\partial X_{S2}}{\partial z} = Pe_{X_{S2}} \times (X_{S2}(0) - X_{S2}^0); \\ \frac{\partial X_{BW}}{\partial z} = Pe_{X_{BW}} \times (X_{BW}(0) - X_{BW}^0); \\ \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial z} = Pe_{S_{S(-II)}} \times (S_{S(-II)}(0) - S_{S(-II)}^0); \\ \frac{\partial S_{O_2}}{\partial z} = Pe_{S_{O_2}} \times (S_{O_2}(0) - S_{O_2}^0). \end{array} \right. \quad \text{при } z=0 \quad (4.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S_F}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial S_A}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial X_{S1}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial X_{S2}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial X_{BW}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial S_{O_2}}{\partial z} = 0, \end{array} \right. \quad \text{при } z=1 \quad (4.8)$$

де $Pe=Vl/D$ – критерій Пекле, що характеризує ступінь відхилення дифузійної моделі від ідеальних режимів течії.

Режим течії стічної рідини в каналізаційних колекторах можна наближено розглядати як режим ідеального витіснення, оскільки $l/d > 100$. Відхилення можуть спостерігатися на ділянках колекторів, що примикають до колодязів, у випадку переходу напірного режиму течії в самопливний, тобто на ділянках із більш розвиненою турбулентністю потоку.

У реакторі ідеального витіснення інтенсивність поздовжнього перемішування (уздовж осі потоку) наближається до нуля, тобто $D_{S_F} \rightarrow 0$, $D_{S_A} \rightarrow 0$, $D_{X_{S1}} \rightarrow 0$, $D_{X_{S2}} \rightarrow 0$, $D_{X_{BW}} \rightarrow 0$, $D_{S_{(-II)}} \rightarrow 0$, $D_{S_{O_2}} \rightarrow 0$ и $Pe_{S_F} \rightarrow \infty$, $Pe_{S_A} \rightarrow \infty$, $Pe_{X_{S1}} \rightarrow \infty$, $Pe_{X_{S2}} \rightarrow \infty$, $Pe_{X_{BW}} \rightarrow \infty$, $Pe_{S_{(-II)}} \rightarrow \infty$, $Pe_{S_{O_2}} \rightarrow \infty$, а це призводить до того, що перший член системи рівнянь (4.6) прагне до нуля, тож рівняння спрощуються.

Для ідеального витискувача отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S_F}{\partial \tau} = -\frac{\partial S_F}{\partial z} + r_{S_F} T; \\ \frac{\partial S_A}{\partial \tau} = -\frac{\partial S_A}{\partial z} + r_{S_A} T; \\ \frac{\partial X_{S1}}{\partial \tau} = -\frac{\partial X_{S1}}{\partial z} + r_{X_{S1}} T; \\ \frac{\partial X_{S2}}{\partial \tau} = -\frac{\partial X_{S2}}{\partial z} + r_{X_{S2}} T; \\ \frac{\partial X_{BW}}{\partial \tau} = -\frac{\partial X_{X_{BW}}}{\partial z} + r_{X_{BW}} T; \\ \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial \tau} = -\frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial z} + r_{S_{S(-II)}} T; \\ \frac{\partial S_{O_2}}{\partial \tau} = -\frac{\partial S_{O_2}}{\partial z} + r_{S_{O_2}} T. \end{array} \right. \quad (4.9)$$

Для ідеального витискувача в разі стаціонарності процесу отримаємо систему рівнянь у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S_F}{\partial z} = r_{S_F} T; \\ \frac{\partial S_A}{\partial z} = r_{S_A} T; \\ \frac{\partial X_{S1}}{\partial z} = r_{X_{S1}} T; \\ \frac{\partial X_{S2}}{\partial z} = r_{X_{S2}} T; \\ \frac{\partial X_{X_{BW}}}{\partial z} = r_{X_{BW}} T; \\ \frac{\partial S_{S(-II)}}{\partial z} = r_{S_{S(-II)}} T; \\ \frac{\partial S_{O_2}}{\partial z} = r_{S_{O_2}} T. \end{array} \right. \quad (4.10)$$

Граничні умови будуть мати вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_F(0) = S_F^0; \\ S_A(0) = S_A^0; \\ X_{S1}(0) = X_{S1}^0; \\ X_{S2}(0) = X_{S2}^0; \\ X_{BW}(0) = X_{BW}^0; \\ S_{S(-II)}(0) = S_{S(-II)}^0; \\ S_{O_2}(0) = S_{O_2}^0. \end{array} \right. \quad \text{при } z = 0 \quad (4.11)$$

Для відшукування розв'язання системи слід визначити швидкості зміни концентрації субстрату, кисню, сульфідів та біомаси. Дослідженням цих процесів на спорудах і в каналізаційних колекторах присвячені роботи вітчизняних і зарубіжних авторів [110–118, 144–160].

В рамках моделі WATS [161] були розглянуті аеробно-анаеробні процеси трансформації субстратів та утворення сульфідів у каналізаційних колекторах.

На підставі аналізу робіт [144–152, 161] в табличному вигляді можна представити матрицю стехіометричних коефіцієнтів для основних змінних і позначень, зазначених раніше швидкостей процесів (табл. 4.1).

На підставі аналізу табл. 4.1 можна записати швидкості зміни основних змінних у результаті біохімічних і фізико-хімічних процесів.

Швидкість зміни концентрації субстрату r_{S_F} визначається швидкістю вилучення субстрату $r_{S_{FW}}$ гетеротрофними організмами у потоці стічних вод, швидкістю вилучення субстрату $r_{S_{FBF}}$ гетеротрофних організмами в складі біоплівки, швидкістю процесу споживання субстрату, що піддається ферментації, та продуктів процесу ферментації на забезпечення енерговитрат в метаболізмі мікроорганізмів r_M , швидкістю надходження субстрату у процесі швидкої r_{AF} та повільної аеробної r_{AS} гідролізації, швидкістю надходження субстрату у процесі швидкої анаеробної r_{ANF} і повільної анаеробної r_{ANS} гідролізації, швидкістю вилучення субстрату у процесі ферментації r_F :

$$r_{S_F} = -r_{S_{FW}} - r_{S_{FBF}} - r_M + r_{AF} + r_{AS} + r_{ANF} + r_{ANS} - r_F. \quad (4.12)$$

Швидкість вилучення субстрату $r_{S_{FW}}$ в результаті процесу окислення залежить від швидкості росту гетеротрофних мікроорганізмів у потоці стічних вод r_{HW} , які використовують для своєї життєдіяльності розчинений кисень:

$$r_{S_{FW}} = \frac{r_{HW}}{Y_{HW}}, \quad (4.13)$$

де Y_{HW} – економічний коефіцієнт, що враховує утилізацію органічних забруднень у процесі приросту гетеротрофної біомаси мікроорганізмів у потоці стічних вод.

Таблиця 4.1 – Матриця стехіометричних коефіцієнтів для основних змінних та швидкостей аеробно-анаеробних процесів у каналізаційних колекторах

Назва процесу	S_F	S_A	X_{S1}	X_{S2}	X_{BW}	$S_{S(-II)}$	S_{O2}	Швидкість процесу
Процес аеробного зростання гетеротрофної біомаси в потоці стічних вод	$\frac{-1}{Y_{HW}}$				1		$\frac{1-Y_{HW}}{Y_{HW}}$	r_{HW}
Процес аеробного зростання гетеротрофної біомаси в біоплівці лоткової частини	$\frac{-1}{Y_{HBF}}$				1		$\frac{1-Y_{HBF}}{Y_{HBF}}$	r_{HBF}
Процес споживання субстрату, що піддається ферментації, та продуктів процесу ферментації на забезпечення енерговитрат у ході метаболізму мікроорганізмів	-1						-1	r_M
Процес швидкої аеробної гідролізації	1		-1					r_{AF}
Процес повільної аеробної гідролізації	1			-1				r_{AS}
Процес швидкої анаеробної гідролізації	1		-1					r_{ANF}
Процес повільної анаеробної гідролізації	1			-1				r_{ANS}
Процес ферментації	-1	1						r_F
Процес утворення сульфідів у біоплівці та відкладеннях лоткової частини колекторів						1		$r_{S(-II)}$
Процес хімічного окислення сульфідів у потоці стічних вод						-1	-1,2	$r_{CH.OX}$
Процес біологічного окислення сульфідів у потоці стічних вод						-1	-0,5	$r_{B.OX}$
Процес окислення сульфідів у межах біоплівки лоткової частини						-1	-0,5	$r_{B.OX.BF}$
Процес реаерації кисню з атмосфери колектора							1	r_{RAO2}
Процес емісії сульфідів в підсклепінний простір колектора через поверхню розділу фаз						-1		r_{EM}

Швидкість вилучення субстрату $r_{S,BF}$ в межах біоплівки лоткової частини залежить від швидкості росту гетеротрофних мікроорганізмів у біоплівці, що використовують для своєї життєдіяльності розчинений кисень:

$$r_{S_r.BF} = \frac{r_{HBF}}{Y_{HBF}}, \quad (4.14)$$

де Y_{HBF} – економічний коефіцієнт, який враховує утилізацію органічних забруднень у процесі приросту гетеротрофної біомаси мікроорганізмів у складі біоплівки.

Швидкість зміни концентрації субстрату r_{S_A} визначається швидкістю надходження субстрату у процесі ферментації r_F :

$$r_{S_A} = r_F. \quad (4.15)$$

Швидкість зміни концентрації субстрату, що швидко гідролізується $r_{X_{S1}}$, визначається швидкістю вилучення в аеробних r_{AF} та анаеробних умовах r_{ANF} :

$$r_{X_{S1}} = -r_{AF} - r_{ANF}. \quad (4.16)$$

Швидкість зміни концентрації субстрату, що повільно гідролізується $r_{X_{S2}}$, визначається повільною швидкістю вилучення в аеробних r_{AS} та анаеробних умовах r_{ANS} :

$$r_{X_{S2}} = -r_{AS} - r_{ANS}. \quad (4.17)$$

Швидкість зміни концентрації гетеротрофних мікроорганізмів $r_{X_{BW}}$ визначається швидкістю росту концентрації гетеротрофних мікроорганізмів у стічній рідині r_{HW} , швидкістю росту гетеротрофних мікроорганізмів у складі біоплівки r_{HBF} :

$$r_{X_{BW}} = r_{HW} + r_{HBF}. \quad (4.18)$$

Швидкість зміни концентрації сульфідів в стічній рідині $r_{S_{(-II)}}$ визначається швидкістю утворення сульфідів $r_{S(-II)}$ в біоплівці, швидкістю вилучення сульфідів у процесі хімічного окислення сульфідів у стічній рідині $r_{CH.OX}$, швидкістю вилучення сульфідів у процесі біологічного окислення сульфідів у стічній рідині $r_{B.OX}$, швидкістю вилучення сульфідів у процесі окислення сульфідів у межах біоплівки лоткової частини $r_{B.OX.BF}$, швидкістю вилучення сульфідів у вигляді сірководню r_{EM} в процесі емісії через поверхню розділу рідина – газова атмосфера колектора:

$$r_{S_{(-II)}} = r_{S(-II)} - r_{CH.OX} - r_{B.OX} - r_{B.OX.BF} - r_{EM}. \quad (4.19)$$

Швидкість зміни концентрації розчиненого кисню $r_{S_{O_2}}$ визначається швидкістю вилучення розчиненого кисню у процесі аеробного зростання ге-

теротрофної біомаси у потоці стічних вод r_{OXHW} , швидкістю вилучення розчиненого кисню у процесі аеробного зростання гетеротрофної біомаси в біоплівці r_{OXHBF} , швидкістю вилучення розчиненого кисню в процесі споживання субстрату, що піддається ферментації, та продуктів процесу ферментації на забезпечення енерговитрат метаболізму мікроорганізмів r_M , швидкістю вилучення розчиненого кисню у процесі хімічного окислення сульфідів у потоці стічних вод $r_{OX.CH}$, швидкістю вилучення розчиненого кисню в процесі біологічного окислення сульфідів у потоці стічних вод $r_{OX.B}$, швидкістю вилучення розчиненого кисню у процесі окислення сульфідів у межах біоплівки лоткової частини $r_{OX.BF}$, швидкістю надходження розчиненого кисню у процесі реаерації з атмосфери колектора r_{RAO_2} :

$$r_{S_{O_2}} = -r_{OXHW} - r_{OXHBF} - r_M - r_{OX.CH} - r_{OX.B} - r_{OX.BF} + r_{RAO_2} \quad (4.20)$$

Швидкість вилучення розчиненого кисню у процесі аеробного зростання гетеротрофної біомаси в потоці стічних вод r_{OXHW} :

$$r_{OXHW} = \frac{1 - Y_{HW}}{Y_{HW}} r_{HW} \quad (4.21)$$

Швидкість вилучення розчиненого кисню у процесі аеробного зростання гетеротрофної біомаси в біоплівці r_{OXHBF} дорівнює:

$$r_{OXHBF} = \frac{1 - Y_{HBF}}{Y_{HBF}} r_{HBF} \quad (4.22)$$

Швидкість вилучення розчиненого кисню у процесі хімічного окислення сульфідів в потоці стічних вод r_{OXCH} дорівнює:

$$r_{OX.CH} = 1,2 r_{CH.OX} \quad (4.23)$$

де 1,2 – стехіометричний коефіцієнт.

Швидкість вилучення розчиненого кисню у процесі біологічного окислення сульфідів у потоці стічних вод $r_{OX.B}$ дорівнює:

$$r_{OX.B} = 0,5 r_{B.OX} \quad (4.24)$$

де 0,5 – стехіометричний коефіцієнт.

Швидкість вилучення розчиненого кисню в процесі окислення сульфідів в межах біоплівки лотковою частини $r_{OX.BF}$ дорівнює:

$$r_{OX.BF} = 0,5 r_{B.OX.BF} \quad (4.25)$$

де 0,5 – стехіометричний коефіцієнт.

На підставі аналізу публікацій [110–119, 144–154] щодо аеробно-

анаеробних процесів можна привести залежності значень швидкостей зазначених раніше процесів.

Швидкість зростання гетеротрофних мікроорганізмів у потоці стічних вод r_{HW} , що використовують для своєї життєдіяльності розчинений кисень, дорівнює:

$$r_{HW} = \mu_{max} X_{BW} \cdot k_1, \quad (4.26)$$

де μ_{max} – максимальна питома швидкість росту гетеротрофної завислої біомаси мікроорганізмів, 1/с;

k_1 – мультиплікативний коефіцієнт, що відображає можливе лімітування приросту біомаси за двома субстратами – розчиненим киснем та температурою середовища:

$$k_1 = f(S_{Sw}) \cdot f(S_{O_2}) \cdot f(T_w)$$

$$f(S_{Sw}) = \left(\frac{S_S}{K_{Sw} + S_S} \right) = \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{Sw} + (S_F + S_A)} \right), \quad S_{Sw} = (S_F + S_A)$$

$$f(S_{O_2}) = \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right), \quad f(T_w) = 1.07^{T-20},$$

де K_{Sw} – константа напівнасичення за субстратом по відношенню до завислої біомаси, г ХСК/м³;

K_{O_2w} – константа напівнасичення за розчиненим киснем по відношенню до завислої біомаси, г О₂/м³;

T_w – температура стічної рідини, °С.

Швидкість зростання гетеротрофних мікроорганізмів у біоплівці r_{HBF} , які використовують для своєї життєдіяльності розчинений кисень, дорівнює:

$$r_{HBF} = k_{1/2} S_{O_2}^{1/2} \alpha \left(\frac{Y_{HBF}}{1 - Y_{HBF}} \right) \cdot k_2, \quad (4.27)$$

де $k_{1/2}$ – константа 1/2 порядку питомої швидкості приросту біомаси за киснем, г О₂^{1/2}/(м^{1/2}·с);

α – питома площа біоплівки лоткової частини, залежить від діаметру колектора та його наповнення, $\alpha = f(d, h)$, м²/м³;

k_2 – мультиплікативний коефіцієнт, що відображає можливе лімітування приросту біомаси субстратом і температурою середовища в біоплівці:

$$k_2 = f(S_{sf}) \cdot f(T_{BF})$$

$$f(S_{sf}) = \left(\frac{S_s}{K_{sf} + S_s} \right) = \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{sf} + (S_F + S_A)} \right), \quad f(T_{BF}) = 1,05^{T-20},$$

де K_{sf} – константа напівнасичення за загальним субстратом по відношенню до прикріпленої біомаси, г ХСК/м³;

T_{BF} – температура біоплівки, °С.

Швидкість процесу споживання субстрату, що піддається ферментації, та продуктів процесу ферментації на забезпечення енерговитрат метаболізму мікроорганізмів дорівнює:

$$r_M = k_M X_{BW} \cdot r_M, \quad (4.28)$$

де k_M – питома швидкість споживання субстрату на забезпечення енерговитрат у ході метаболізму мікроорганізмів, 1/с;

k_3 – мультиплікативний коефіцієнт, що відображає можливе лімітування процесу концентрацією розчиненого кисню та вплив температури середовища:

$$k_3 = f(S_{O_2}) \cdot f(T_w).$$

Швидкість процесу швидкої аеробної гідролізації дорівнює:

$$r_{AF} = k_{h1} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot k_3 \frac{\left(\frac{X_{S1}}{X_{BW}} \right)}{\left(K_{X1} + \frac{X_{S1}}{X_{BW}} \right)}, \quad (4.29)$$

де k_{h1} – питома швидкість процесу швидкої аеробної гідролізації, 1/с;

K_{X1} – безрозмірна константа напівнасичення за субстратом для швидкої аеробної гідролізації, г ХСК/г ХСК;

ε – коефіцієнт частки активної біомаси у складі біоплівки.

Швидкість процесу повільної аеробної гідролізації дорівнює:

$$r_{AS} = k_{h2} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot k_3 \frac{\left(\frac{X_{S2}}{X_{BW}} \right)}{\left(K_{X2} + \frac{X_{S2}}{X_{BW}} \right)}, \quad (4.30)$$

де k_{h2} – питома швидкість процесу повільної аеробної гідролізації, 1/с;

K_{X2} – безрозмірна константа напівнасичення за субстратом для повільної аеробної гідролізації, г ХСК/г ХСК.

Швидкість процесу швидкої анаеробної гідролізації дорівнює:

$$r_{ANF} = h_{fe} k_{h1} \frac{\left(\frac{X_{S1}}{X_{BW}} \right)}{\left(K_{X1} + \frac{X_{S1}}{X_{BW}} \right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot k_4, \quad (4.31)$$

де h_{fe} – частка анаеробної гідролізації;

k_4 – мультиплікативний коефіцієнт, що відображає можливе інгібування процесу концентрацією розчиненого кисню та вплив температури середовища;

$$k_4 = (1 - f(S_{O_2})) \cdot f(T_w).$$

Швидкість процесу повільної анаеробної гідролізації дорівнює:

$$r_{ANS} = h_{fe} k_{h2} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot k_4 \frac{\left(\frac{X_{S2}}{X_{BW}} \right)}{\left(K_{X2} + \frac{X_{S2}}{X_{BW}} \right)}. \quad (4.32)$$

Швидкість процесу ферментації дорівнює:

$$r_F = k_{fe} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot k_5, \quad (4.33)$$

де k_{fe} – максимальна питома швидкість ферментації, 1/с;

k_5 – мультиплікативний коефіцієнт, що відображає можливе лімітування процесу концентрацією субстрату, що піддається ферментації, інгібування процесу концентрацією розчиненого кисню та вплив температури середовища;

$$k_5 = f(S_F) \cdot (1 - f(S_{O_2})) \cdot f(T_w),$$

$$f(S_F) = \left(\frac{S_F}{K_{fe} + S_F} \right),$$

де K_{fe} – константа напівнасичення по субстрату для процесу ферментації, г ХСК/м³.

Швидкість утворення сульфідів $r_{S(-II)}$ в біоплівці дорівнює:

$$r_{S(-II)} = k_{S(-II)} \alpha(S_F + S_A + X_{S1})^{1/2} \cdot k_6, \quad (4.34)$$

де $k_{S(-II)}$ – константа питомої швидкості утворення сульфідів, г S/(г ХСК^{1/2}·м²·с);
 k_6 – мультиплікативний коефіцієнт, що відображає можливе інгібування процесу утворення сульфідів у біоплівці концентрацією розчиненого кисню та вплив температури в біоплівці на процес утворення сульфідів;

$$k_6 = f(1 - S_{O_2}) \cdot f(T_{S(-II)})$$

$$f(1 - S_{O_2}) = 1 - \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2bf} + S_{O_2}} \right) = \left(\frac{K_{O_2bf}}{K_{O_2bf} + S_{O_2}} \right), \quad f(T_{S(-II)}) = 1,03^{T-20}$$

де K_{O_2bf} – константа напівнасичення за розчиненим киснем по відношенню до прикріпленої біомаси біоплівки, г O₂/м³.

Швидкість вилучення сульфідів у процесі їх хімічного окислення у стічній рідині дорівнює:

$$r_{CH.OX} = k_{CH.OX} S_{S(-II)} S_{O_2}^{0.1} \cdot f(T_w), \quad (4.35)$$

де $k_{CH.OX}$ – коефіцієнт питомої швидкості хімічного окислення сульфідів, (г O₂/м³)^{-0.1}·год⁻¹;

$$f(T_w) = 1,07^{T-20}.$$

Коефіцієнт питомої швидкості хімічного окислення сульфідів $k_{CH.OX}$ визначається в залежності від рН:

$$k_{CH.OX} = \frac{0,04 + \frac{0,5K_{a1}}{(1/10)^{pH}}}{1 + \frac{K_{a1}}{(1/10)^{pH}}} \quad (4.36)$$

де K_{a1} – перша константа дисоціації сульфідів, що дорівнює 8,913·10⁻⁸.

Швидкість вилучення сульфідів у процесі біологічного окислення сульфідів у стічній рідині дорівнює:

$$r_{B.OX} = k_{B.OX} S_{S(-II)} S_{O_2}^{0.1} \cdot f(T_w), \quad (4.37)$$

де $k_{B.OX}$ – константа питомої швидкості біологічного окислення сульфідів, (г O₂/м³)^{-0.1}·год⁻¹;

$$f(T_w) = 1,10^{T-20}.$$

Швидкість вилучення сульфідів у процесі окислення сульфідів у межах біоплівки лоткової частини дорівнює:

$$r_{B.OX.BF} = k_{B.OX.BF} S_{S(-II)}^{1/2} S_{O_2}^{1/2} \alpha \cdot f(T_{S(-II)}), \quad (4.38)$$

де $k_{B.OX.BF}$ – константа питомої швидкості окислення сульфідів в межах біоплівки, $(\text{г S/м}^3)^{1/2}/(\text{г O}_2/\text{м}^3)^{1/2} \cdot \text{м} \cdot \text{год}^{-1}$.

Швидкість вилучення сульфідів у процесі емісії через поверхню розділу рідина – газова атмосфера колектора дорівнює:

$$r_{EM} = k_L a_{H_2S} b (S_{H_2S} - S_{sat.H_2S}) \cdot f(T_{H_2S}), \quad (4.39)$$

де k_L – коефіцієнт масопереносу сірководню, м/с;

a_{H_2S} – питома площа перенесення або відношення площі дзеркала рідини до її об'єму, м^{-1} .

b – коефіцієнт, що враховує вплив фізико-хімічного складу стічної рідини на масопереніс сірководню в порівнянні з чистою водою, $b = 0,6$;

S_{H_2S} – концентрація розчиненого сірководню, г S/м^3 ;

$$S_{H_2S} = k_{pH} S_{S(-II)}, \quad (4.40)$$

k_{pH} – коефіцієнт, що враховує частку сірководню в загальній кількості розчинених сульфідів у залежності від рН, визначається з рівняння дисоціації розчинених сульфідів:

$$k_{pH} = \frac{1}{1 + 10^{\text{pH} - \text{pKa}1}}, \quad (4.41)$$

де $\text{pKa} = -\log K_a$;

$S_{sat.H_2S}$ – концентрація насичення розчиненим сірководнем по відношенню до газової фази, тобто по відношенню до концентрації в атмосфері колектора, г S/м^3 ;

$$S_{sat.H_2S} = \frac{S_{A.H_2S} \beta}{C_{H.W/A.H_2S}}, \quad (4.42)$$

де $S_{A.H_2S}$ – концентрація сірководню в атмосфері колектора, г S/м^3 ;

$C_{H.W/A.H_2S}$ – безрозмірне значення константи закону Генрі (м^3 водної фази/ м^3 газової фази) для сірководню, дорівнює 0,3616;

β – коефіцієнт, що враховує вплив фізико-хімічного складу стічних вод на концентрацію насичення сірководню, $\approx 0,97 \div 1$;

$$f(T_{H_2S}) = 1,034^{T-20}.$$

Для самопливних колекторів питома площа перенесення – це відношення площі поперечного перерізу потоку стічних вод до ширини потоку за дзеркалом води тобто середня гідравлічна глибина, $(h_{mean})^{-1}$.

Коефіцієнт масопереносу сірководню можна подати через коефіцієнт масопереносу кисню [116, 117, 120]:

$$k_{L_{H_2S}} = 0,86 K_{L_{O_2}}, \quad (4.43)$$

де $K_{L_{O_2}}$ – коефіцієнт масопереносу кисню для умов самопливних колекторів, що дорівнює, м/год [116, 117, 120]:

$$K_{L_{O_2}} = 0,86(1 + 0,2Fr)(iV)^{3/8}, \quad (4.44)$$

Fr – значення критерію Фруда,

$$Fr = \frac{V^2}{gh_{mean}},$$

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

i – похил колектора.

Таким чином, питома швидкість видалення сірководню з потоку стічних вод за рахунок емісії дорівнюватиме:

$$k_L a_{H_2S} = 0,86 \cdot \left(0,86 \cdot \left(1 + 0,2 \frac{V^2}{gh_{mean}} \right) \cdot (iV)^{3/8} \right) \cdot (h_{mean})^{-1}, \text{ год}^{-1}. \quad (4.45)$$

А швидкість вилучення сульфідів у процесі емісії сірководню через поверхню розділу рідина – газова атмосфера колектора дорівнює:

$$r_{EM} = 0,86 \cdot \left(0,86 \cdot \left(1 + 0,2 \frac{V^2}{gh_{mean}} \right) \cdot (iV)^{3/8} \right) \cdot (h_{mean})^{-1} \cdot b \times \\ \times k_{pH} \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{A.H_2S} \beta}{k_{pH} C_{H.W/A.H_2S}} \right) \cdot 1,034^{T-20}, \quad \text{г S}/(\text{м}^3 \cdot \text{год}), (4.46)$$

Швидкість процесу реаерації кисню з атмосфери колектора дорівнює:

$$r_{RAO_2} = k_L a_{O_2} (\gamma S_{satO_2} - S_{O_2}) \cdot f(T_{O_2}), \quad (4.47)$$

де S_{satO_2} – концентрація насичення води розчиненим киснем, г $O_2/м^3$;

$$S_{satO_2} = 14,652 - 4,102 \cdot 10^{-1} T + 7,991 \cdot 10^{-3} T^2 - 7,777 \cdot 10^{-5} T^3, \quad (4.48)$$

γ – коефіцієнт, що враховує вплив фізико-хімічного складу стічних вод на рівноважну концентрацію розчиненого кисню;

$k_L a_{O_2}$ – питома швидкість реаерації кисню з атмосфери колектора, год⁻¹;

$$k_L a_{O_2} = \left(0,86 \cdot \left(1 + 0,2 \frac{V^2}{gh_{mean}} \right) \cdot (iV)^{3/8} \right) \cdot (h_{mean})^{-1}, \quad (4.49)$$

$$f(T_{O_2}) = 1,024^{T-20}.$$

Таким чином, розрахункові залежності швидкостей зазначених раніше процесів матимуть вигляд, представлений в табл. 4.2.

Значення біохімічних і фізико-хімічних швидкостей для основних змінних матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} r_{S_F} = & -\frac{\mu_{max}}{Y_{HW}} X_{BW} \cdot \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{S_w} + (S_F + S_A)} \right) \cdot \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \cdot 1,07^{T-20} - k_{1/2} S_{O_2}^{1/2} \alpha \left(\frac{1}{1 - Y_{HBF}} \right) \times \\ & \times \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{S_f} + (S_F + S_A)} \right) \cdot 1,05^{T-20} - k_M X_{BW} \cdot \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \cdot 1,07^{T-20} + \\ & + k_{h1} \frac{\left(\frac{X_{S1}}{X_{BW}} \right)}{\left(K_{X1} + \frac{X_{S1}}{X_{BW}} \right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \cdot 1,07^{T-20} + k_{h2} \frac{\left(\frac{X_{S2}}{X_{BW}} \right)}{\left(K_{X2} + \frac{X_{S2}}{X_{BW}} \right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \times \\ & \times \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \cdot 1,07^{T-20} + h_{fe} k_{h1} \frac{\left(\frac{X_{S1}}{X_{BW}} \right)}{\left(K_{X1} + \frac{X_{S1}}{X_{BW}} \right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{K_{O_2w}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \cdot 1,07^{T-20} + \\ & + h_{fe} k_{h2} \frac{\left(\frac{X_{S2}}{X_{BW}} \right)}{\left(K_{X2} + \frac{X_{S2}}{X_{BW}} \right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{K_{O_2w}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \cdot 1,07^{T-20} - \\ & - k_{fe} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{S_F}{K_{fe} + S_F} \right) \cdot \left(\frac{K_{O_2w}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \cdot 1,07^{T-20}; \\ r_{S_A} = & k_{fe} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{S_F}{K_{fe} + S_F} \right) \cdot \left(\frac{K_{O_2w}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \cdot 1,07^{T-20} \end{aligned}$$

$$r_{X_{S1}} = -k_{h1} \frac{\left(\frac{X_{S1}}{X_{BW}}\right)}{\left(K_{X1} + \frac{X_{S1}}{X_{BW}}\right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \times \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}}\right) \times 1.07^{T-20} -$$

$$- h_{fe} k_{h1} \frac{\left(\frac{X_{S1}}{X_{BW}}\right)}{\left(K_{X1} + \frac{X_{S1}}{X_{BW}}\right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \times \left(\frac{K_{O_2w}}{K_{O_2w} + S_{O_2}}\right) \times 1.07^{T-20}$$

Таблиця 4.2 – Значення швидкостей аеробно-анаеробних процесів

Назва процесу	Вид залежності
1	2
Процес аеробного зростання гетеротрофної біомаси в потоці стічних вод	$r_{HW} = \mu_{max} X_{BW} \cdot \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{Sw} + (S_F + S_A)}\right) \cdot \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}}\right) \cdot 1.07^{T-20}$
Процес аеробного зростання гетеротрофної біомаси в біоплівці лоткової частини	$r_{HBF} = k_{1/2} S_{O_2}^{1/2} \alpha \left(\frac{Y_{HBF}}{1 - Y_{HBF}}\right) \cdot \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{sf} + (S_F + S_A)}\right) \cdot 1.05^{T-20}$
Процес споживання субстрату на забезпечення енерговитрат у ході метаболізму мікроорганізмів	$r_M = k_M X_{BW} \cdot \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}}\right) \cdot 1.07^{T-20}$
Процес швидкої аеробної гідролізації	$r_{AF} = k_{h1} \frac{\left(\frac{X_{S1}}{X_{BW}}\right)}{\left(K_{X1} + \frac{X_{S1}}{X_{BW}}\right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}}\right) \cdot 1.07^{T-20}$
Процес повільної аеробної гідролізації	$r_{AS} = k_{h2} \frac{\left(\frac{X_{S2}}{X_{BW}}\right)}{\left(K_{X2} + \frac{X_{S2}}{X_{BW}}\right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}}\right) \cdot 1.07^{T-20}$
Процес швидкої анаеробної гідролізації	$r_{ANF} = h_{fe} k_{h1} \frac{\left(\frac{X_{S1}}{X_{BW}}\right)}{\left(K_{X1} + \frac{X_{S1}}{X_{BW}}\right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{K_{O_2w}}{K_{O_2w} + S_{O_2}}\right) \cdot 1.07^{T-20}$

1	2
Процес повільної анаеробної гідролізації	$r_{ANS} = h_{fe} k_{h2} \frac{\left(\frac{X_{S2}}{X_{BW}}\right)}{\left(K_{X2} + \frac{X_{S2}}{X_{BW}}\right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{K_{O2w}}{K_{O2w} + S_{O2}}\right) \cdot 1,07^{T-20}$
Процес ферментації	$r_F = k_{fe} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \cdot \left(\frac{S_F}{K_{fe} + S_F}\right) \cdot \left(\frac{K_{O2w}}{K_{O2w} + S_{O2}}\right) \cdot 1,07^{T-20}$
Процес утворення сульфідів у біоплівці та відкладеннях	$r_{S(-II)} = k_{S(-II)} \alpha (S_F + S_A + X_{S1})^{1/2} \cdot \left(\frac{K_{O2bf}}{K_{O2bf} + S_{O2}}\right) \cdot 1,03^{T-20}$
Процес хімічного окислення сульфідів у потоці стічних вод	$r_{CH.OX} = k_{CH.OX} S_{S(-II)} S_{O2}^{0.1} \cdot 1,07^{T-20}$
Процес біологічного окислення сульфідів у потоці стічних вод	$r_{B.OX} = k_{B.OX} S_{S(-II)} S_{O2}^{0.1} \cdot 1,10^{T-20}$
Процес окислення сульфідів у межах біоплівки лоткової частини	$r_{B.OX.BF} = k_{B.OX.BF} S_{S(-II)}^{1/2} S_{O2}^{1/2} a \cdot 1,03^{T-20}$
Процес емісії сульфідів у підклевпінний простір колектора через поверхню розділу фаз	$r_{EM} = 0,86 \cdot \left(0,86 \cdot \left(1 + 0,2 \frac{V^2}{gh_{mean}}\right) \cdot (iV)^{3/8}\right) \cdot (h_{mean})^{-1} \cdot b \cdot k_{pH} \cdot \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{A.H2S} \beta}{k_{pH} \cdot C_{H.W/A.H2S}}\right) \cdot 1,034^{T-20}$
Процес реаерації кисню з атмосфери колектора	$r_{RAO_2} = 0,86 \cdot \left(1 + 0,2 \frac{V^2}{gh_{mean}}\right) \cdot (iV)^{3/8} \cdot (h_{mean})^{-1} \cdot (\gamma S_{satO_2} - S_{O2}) \cdot 1,024^{T-20}$

$$r_{X_{S2}} = -k_{h2} \frac{\left(\frac{X_{S2}}{X_{BW}}\right)}{\left(K_{X2} + \frac{X_{S2}}{X_{BW}}\right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \times \left(\frac{S_{O2}}{K_{O2w} + S_{O2}}\right) \times 1,07^{T-20} -$$

$$- h_{fe} k_{h2} \frac{\left(\frac{X_{S2}}{X_{BW}}\right)}{\left(K_{X2} + \frac{X_{S2}}{X_{BW}}\right)} (X_{BW} + \varepsilon X_{BF} \alpha) \times \left(\frac{K_{O2w}}{K_{O2w} + S_{O2}}\right) \times 1,07^{T-20}$$

$$\begin{aligned}
r_{X_{BW}} &= \mu_{max} X_{BW} \times \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{S_w} + (S_F + S_A)} \right) \times \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \times 1.07^{T-20} + \\
&+ k_{1/2} S_{O_2}^{1/2} \alpha \left(\frac{Y_{HBF}}{1 - Y_{HBF}} \right) \times \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{S_f} + (S_F + S_A)} \right) \times 1.05^{T-20} \\
r_{S_{S(-II)}} &= k_{S(-II)} \alpha (S_F + S_A + X_{S1})^{1/2} \times \left(\frac{K_{O_2bf}}{K_{O_2bf} + S_{O_2}} \right) \times 1.03^{T-20} - k_{CH.OX} S_{S(-II)} S_{O_2}^{0.1} \times 1.07^{T-20} - \\
&- k_{B.OX} S_{S(-II)} S_{O_2}^{0.1} \times 1.10^{T-20} - k_{B.OX.BF} S_{S(-II)}^{1/2} S_{O_2}^{1/2} \alpha \times 1.03^{T-20} - 0.86 \times \\
&\times \left(0.86 \times \left(1 + 0.2 \frac{V^2}{gh_{mean}} \right) \times (iV)^{3/8} \right) \times (h_{mean})^{-1} \times b \times k_{pH} \times \\
&\times \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{A.H_2S} \times \beta}{k_{pH} \times C_{H.W/A.H_2S}} \right) \times 1.034^{T-20} \\
r_{S_{O_2}} &= - \left(\frac{1 - Y_{HW}}{Y_{HW}} \right) \times \mu_{max} X_{BW} \times \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{S_w} + (S_F + S_A)} \right) \times \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \times 1.07^{T-20} - \\
&- k_{1/2} S_{O_2}^{1/2} \alpha \times \left(\frac{(S_F + S_A)}{K_{S_f} + (S_F + S_A)} \right) \times 1.05^{T-20} - 1.2 k_{CH.OX} S_{S(-II)} S_{O_2}^{0.1} \times 1.07^{T-20} - \\
&- 0.5 k_{B.OX} S_{S(-II)} S_{O_2}^{0.1} \times 1.10^{T-20} - 0.5 k_{B.OX.BF} S_{S(-II)}^{1/2} S_{O_2}^{1/2} \alpha \times 1.03^{T-20} - k_M X_{BW} \\
&\times \left(\frac{S_{O_2}}{K_{O_2w} + S_{O_2}} \right) \times 1.07^{T-20} + 0.86 \times \left(1 + 0.2 \frac{V^2}{gh_{mean}} \right) \times (iV)^{3/8} \times (h_{mean})^{-1} \times \\
&\times (\gamma S_{satO_2} - S_{O_2}) \times 1.024^{T-20}
\end{aligned}$$

Використовуюючи ці вирази після чисельного розв'язання системи рівнянь 4.6, 4.9 або 4.10, отримаємо значення основних змінних для конкретних умов транспортування стічних вод.

Однак для коректного розв'язання системи рівнянь 4.6, 4.9 або 4.10 її необхідно доповнити рівнянням, що враховує зміну концентрації сірководню в атмосфері самопливного колектора $S_{A.H_2S}$ за його довжиною. Це означає, що необхідно скласти рівняння швидкості зміни концентрації $S_{A.H_2S}$ в газовій фазі за рахунок перенесення, за рахунок надходження в результаті емісії сірководню з потоку стічних вод, а також за рахунок вилучення сірководню в результаті біохімічних і фізико-хімічних процесів на поверхні склепіння колектора. Тоді система рівнянь (4.1) набуде вигляду:

$$\begin{cases} (4.1), \\ \frac{\partial S_{A.H_2S}}{\partial t_A} = D_{A.H_2S} \frac{\partial^2 S_{A.H_2S}}{\partial x^2} - V_A \frac{\partial S_{A.H_2S}}{\partial x} + r_{S_{A.H_2S}} \end{cases}, \quad (4.50)$$

де $r_{S_{A.H_2S}}$ – швидкість зміни концентрації сірководню в атмосфері колектора за рахунок емісії сірководню з потоку стічних вод, за рахунок швидкості ви-

лучення сірководню в результаті біохімічних і фізико-хімічних процесів на поверхні склепіння колектора, $\text{г S}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$;

$V_A = Q_A / \omega_A$ – середня швидкість потоку повітря в атмосфері колектора, $\text{м}/\text{с}$;

Q_A – витрата газової фази, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω_A – площа поперечного перерізу газової фази колектора, м^2 ;

$D_{S_{A.H_2S}}$ – коефіцієнт турбулентної дифузії (поздовжньої дисперсії) сірководню в потоці повітря, $\text{м}^2/\text{с}$.

t_A – поточний час перебування газової фази на даній ділянці самопливного колектора, с ,

t_A – поточний час перебування газової фази на даній ділянці самопливного колектора, с ,

Граничні умови для системи 4.50 матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} (4.2); \\ \frac{\partial S_{A.H_2S}}{\partial x} = \frac{V}{D_{A.H_2S}} (S_{A.H_2S}(0) - S_{A.H_2S}^0) \end{array} \right. \quad \text{при } x=0, \quad (4.51)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (4.3); \\ \frac{\partial S_{A.H_2S}}{\partial x} = 0. \end{array} \right. \quad \text{при } x=1, \quad (4.52)$$

де $S_{S_{A.H_2S}}^0$ – концентрація сірководню в атмосфері колектора перед входом потоку повітря на дану ділянку колектора, $\text{г S}/\text{м}^3$.

Площа поперечного перерізу потоку повітря в атмосфері колектора ω_A пов'язана із площею поперечного перерізу потоку стічних вод в самопливному колекторі:

$$\omega_A = \omega - \omega_W, \quad (4.53)$$

де ω – площа поперечного перерізу колектора, м^2 ;

Беручи $V_A \approx (0.1 \div 0.3) \cdot V$, отримаємо витрату потоку повітря в атмосфері колектора.

Представляючи рівняння (4.51) за допомогою безрозмірних змінних:

$$\tau_A = \frac{t_A}{T_A}, \quad z = \frac{x}{l}, \quad (4.54)$$

де T_A – час перебування газової фази на даній ділянці колектора, с ;

$$T_A = W_A / Q_A = l / V_A, \quad (4.55)$$

W_A – обсяг атмосфери даної ділянки колектора, м^3 ;
отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} (4.10), \\ \frac{\partial S_{A.H_2S}}{\partial \tau_A} = \frac{1}{Pe_{S_{A.H_2S}}} \cdot \frac{\partial^2 S_{A.H_2S}}{\partial z^2} - \frac{\partial S_{A.H_2S}}{\partial z} + r_{S_{A.H_2S}} T_A. \end{array} \right. \quad (4.56)$$

Граничні умови 4.51, 4.52 матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} (4.11), \\ \frac{\partial S_{A.H_2S}}{\partial z} = Pe_{S_{A.H_2S}} \cdot (S_{S_{A.H_2S}}(0) - S_{S_{A.H_2S}}^0) \end{array} \right. \quad \text{при } z=0 \quad (4.57)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (4.12), \\ \frac{\partial S_{A.H_2S}}{\partial z} = 0 \end{array} \right. \quad \text{при } z=1 \quad (4.58)$$

Розглядаючи рух газової фази у стаціонарному режимі ідеального витіснення, рівняння системи 4.56 отримуємо у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} (4.10), \\ \frac{\partial S_{A.H_2S}}{\partial z} = r_{S_{A.H_2S}} T_A. \end{array} \right. \quad (4.59)$$

Граничні умови для системи матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} (4.15), \\ S_{S_{A.H_2S}}(0) = S_{S_{A.H_2S}}^0. \end{array} \right. \quad \text{при } z=0 \quad (4.60)$$

Швидкість зміни концентрації сірководню в атмосфері колектора визначається швидкістю надходження сірководню з потоку стічних вод за рахунок емісії та швидкістю вилучення сірководню в результаті біохімічних і фізико-хімічних процесів на поверхні склепіння колектора:

$$r_{S_{A.H_2S}} = r_{EM} - r_{AD.OX}. \quad (4.61)$$

Швидкість надходження сірководню з потоку стічних вод за рахунок емісії визначається відповідно до залежності 4.46.

Швидкість вилучення сірководню в результаті біохімічних і фізико-хімічних процесів на поверхні склепіння колектора дорівнює:

$$r_{AD.OX} = k_{AD.OX} \alpha_A \cdot \left(\frac{S_{A.H_2S}}{K_{S_{A.H_2S}} + S_{A.H_2S}} \right) \cdot 1,03^{T-20}, \quad (4.62)$$

де $k_{AD.OX}$ – максимальна поверхнева швидкість адсорбції сірководню з атмосфери колектора у плівці конденсатної вологи й окислення в біоплівці тіюнових мікроорганізмів на склепінні колектора, $\text{г S}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

α_A – питома площа поверхні плівки конденсатної вологи та біоплівки на склепінні колектора, м^{-1} ;

$K_{S_{A.H_2S}}$ – константа напівнасичення за газоподібним сірководнем, $\text{г S}/\text{м}^3$.

Швидкість зміни концентрації сірководню в атмосфері колектора ($\text{г S}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$) дорівнює:

$$r_{S_{A.H_2S}} = 0,86 \cdot \left(0,86 \cdot \left(1 + 0,2 \frac{V^2}{gh_{mean}} \right) \cdot (iV)^{3/8} \right) \cdot (h_{mean})^{-1} \cdot b \cdot k_{pH} \times \\ \times \left(S_{S(-II)} - \frac{S_{A.H_2S} \beta}{k_{pH} C_{H.W/A.H_2S}} \right) \cdot 1,034^{T-20} - k_{AD.OX} \alpha_A \cdot \left(\frac{S_{A.H_2S}}{K_{S_{A.H_2S}} + S_{A.H_2S}} \right) \cdot 1,03^{T-20} \quad (4.63)$$

Таким чином, система рівнянь 4.50 із граничними умовами 4.51, 4.52, система 4.56 в безрозмірних змінних із граничними умовами 4.57, 4.58, а також система 4.59 до граничних умов 4.60 для стаціонарного режиму ідеального витіснення є моделлю процесу накопичення сірководню в атмосфері колектора.

Результати графічного вирішення даної моделі наведені на рис. 4.1–4.3.

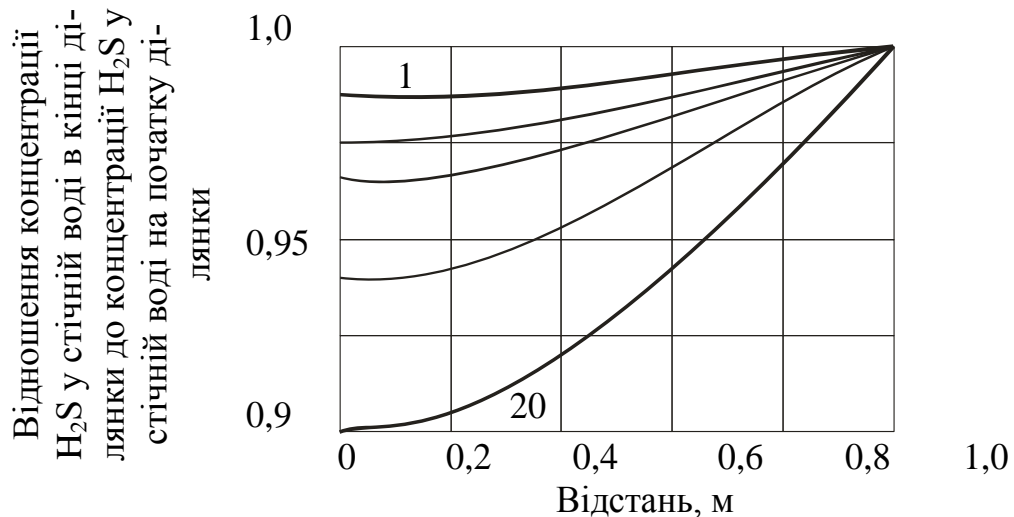


Рисунок 4.1 – Зміна відношення концентрації сірководню у стічній воді в залежності від довжини ділянки ($S_{S(-II)}$ складає 1, 5, 10, 15 та 20 $\text{г S}/\text{м}^3$ відповідно)

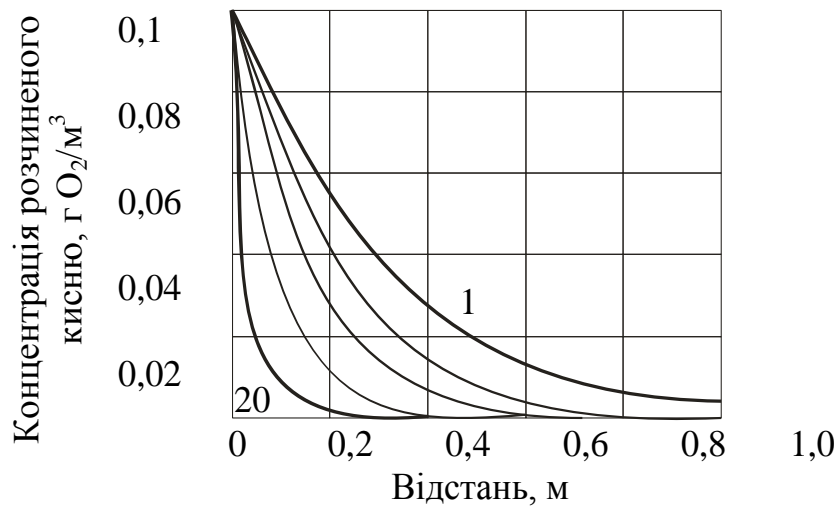


Рисунок 4.2 – Зміна концентрації розчиненого кисню у стічній воді в залежності від довжини ділянки та концентрації розчинених сульфідів у стічній воді ($S_{S(-II)}$ складає 1, 5, 10, 15 та 20 г S/м³ відповідно)

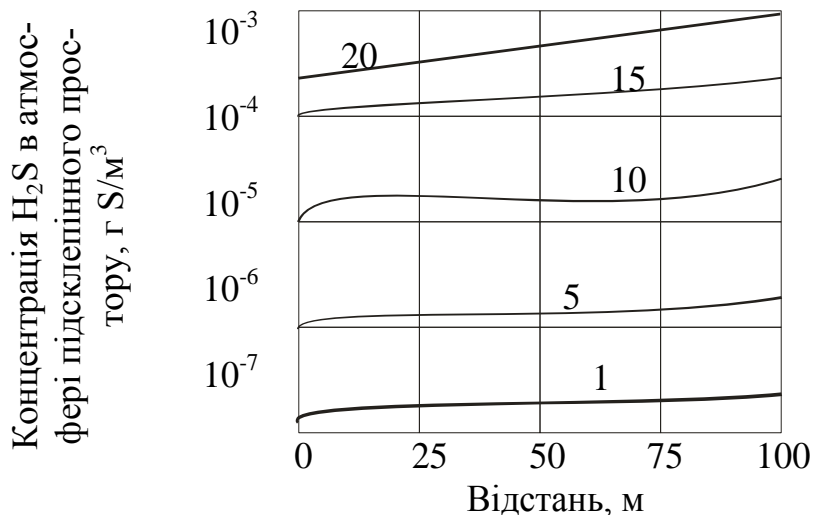


Рисунок 4.3 – Зміна концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору в залежності від довжини ділянки і концентрації розчинених сульфідів у стічній воді ($S_{S(-II)}$ складає 1, 5, 10, 15 та 20 г S/м³ відповідно) [162 – 165]

4.2 Розробка методу визначення концентрації сірководню на ділянках каналізаційної мережі, усередненої за тривалий період часу

В основу методу закладено наступні положення:

- вимірювання, проведені за допомогою корозиметра бетону на бетоні, який зазнав біогенної кислотної корозії, дозволяють визначити швидкість його корозії та об'єм бетону, що прокородував;
- маса прокородованого бетону є пропорційною масі сірчаної кислоти, яка впливала на бетон протягом певного часу;
- в сірчану кислоту (частина якої реагує з цементними гідратами та дифундує в товщу бетону, а інша частина стікає склепінням у лоткову

частину трубопроводу) окислюється весь сірководень, який перейшов з атмосфери підсклепінного простору в плівкову вологу на склепінні.

Алгоритм розрахунку очікуваної концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору бетонних каналізаційних трубопроводів, усередненої за великий проміжок часу, у вигляді схеми, наведено на рис. 4.4.

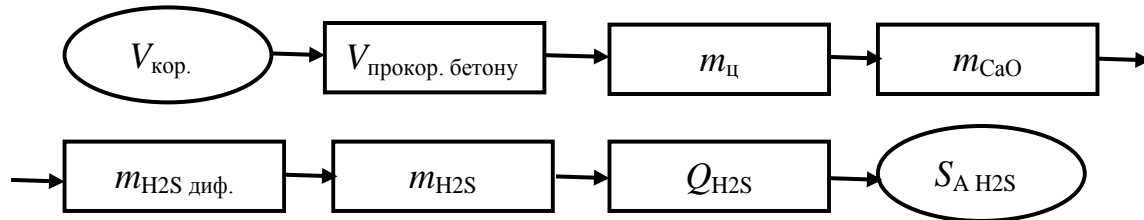


Рисунок 4.4 – Алгоритм розрахунку очікуваної концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору [142, 166, 167]

Концентрація сірководню в атмосфері підсклепінного простору на конкретній ділянці каналізаційного трубопроводу $S_{A.H_2S}$ (мг/м³) дорівнює:

$$S_{A.H_2S} = Q_{H_2S} / \beta \quad (4.64)$$

де Q_{H_2S} – потік сірководню, який дифундував з атмосфери підсклепінного простору в конденсатну вологу на склепінні та окисленого до сірчаної кислоти, мг/м³·доба;

β – коефіцієнт масопереносу сірководню, діб⁻¹ [168, 169].

Потік сірководню з підсклепінного простору на склепіння – Q_{H_2S} , можна визначити з наступного співвідношення:

$$Q_{H_2S} = a \frac{m_{H_2S}}{W_A}, \quad (4.65)$$

де m_{H_2S} - усереднена за рік швидкість окислення сірководню в сірчану кислоту на склепінній частині конкретної ділянки каналізаційного трубопроводу, кг/діб;

W_A – об'єм атмосфери підсклепінного простору, м³, що складає $W_A = h \cdot \pi R^2 L$, де h – коефіцієнт, що враховує заповнення трубопроводу; R – радіус трубопроводу, м; L – довжина ділянки трубопроводу, м;
 a – коефіцієнт перерахунку кг/мг, 10⁶.

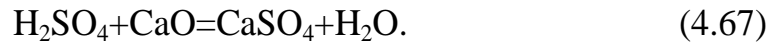
Маса сірководню (кг/добу), окисленого в сірчану кислоту за 1 добу, становить:

$$m_{H_2S} = \frac{b \cdot m_{H_2S \text{ диф}}}{c}, \quad (4.66)$$

де b – коефіцієнт, що враховує стікання частини сірчаної кислоти зі стін колектора у стічну воду, 1,2 [13];

$m_{H_2S\text{ диф}}$ – маса сірководню, окисленого в сірчану кислоту, яка дифундувала вглиб бетону у випадку експлуатації колектора 1 рік, кг/рік;
 c – коефіцієнт перерахунку рік/доба, 365.

Для обчислення m_{H_2S} приймаємо, що весь сірководень, який дифундує в конденсатну вологу, окислюється до сірчаної кислоти, яка реагує з цементними гідратами за відомим рівнянням:



Виходячи з цього рівняння, на нейтралізацію 1 моля CaO (56 г) в результаті хімічної взаємодії із сірчаною кислотою витрачається 1 моль (98 г) сірчаної кислоти. Відповідно до рівняння окислення сірководню, 1 моль (98 г) сірчаної кислоти утворюється з 1 моля (34 г) сірководню. Маса сірководню m_{H_2S} (кг), окисленого в сірчану кислоту, становить:

$$m_{H_2S\text{ диф}} = m_{CaO} \cdot M_{H_2S} / M_{CaO}, \quad (4.68)$$

де M_{H_2S} і M_{CaO} – молекулярні маси сірководню та оксиду кальцію відповідно, кг.

m_{CaO} – маса CaO в цементі, який прореагував із сірчаною кислотою на конкретній ділянці каналізаційного трубопроводу за 1 рік експлуатації, кг/рік.

Частка CaO в цементі, який прореагував із сірчаною кислотою на конкретній ділянці каналізаційного трубопроводу (p), становить 60–66 % маси цементу конструкції [170], звідси:

$$m_{CaO} = p \cdot m_{ц}, \quad (4.69)$$

де $m_{ц}$ – маса цементу в бетоні, який вступив у реакцію із сірчаною кислотою за 1 рік експлуатації, кг·м³/рік.

Оскільки для отримання 1 м³ бетону марки В25 необхідно 350–450 кг цементу [171], масу цементу можна розрахувати зі співвідношення:

$$m_{ц} = V_{\text{прокор.бет.}} \cdot m_{ц\text{ пит.}} \quad (4.70)$$

де $V_{\text{прокор. бет.}}$ – об'єм бетону, що прокородував, за рік, м³/рік;
 $m_{ц\text{ пит.}}$ – маса цементу, необхідна для виготовлення 1 м³ бетону, кг.
 Об'єм бетону, що прокородував, розраховували за формулою:

$$V_{\text{прокор.бет.}} = \frac{V_{\text{кор.}} \cdot S_{\text{підс.пр-ру}}}{k}, \quad (4.71)$$

де $V_{\text{кор.}}$ – швидкість корозії бетону, мм/рік;
 $S_{\text{підс.пр-ру}}$ – площа підсклепінного простору атмосфери колектора, м²;
 k – перерахунковий коефіцієнт мм/м, 1000.

Визначення площі підсклепінного простору атмосфери колектора із заповненням h на ділянці завдовжки l м виконували за формулою:

$$S_{\text{підс.пр-пу}}=2h\pi RL \quad (4.72)$$

Підсумкове рівняння для визначення середньорічної концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору самопливних каналізаційних колекторів:

$$S_{AH_2S} = \frac{p \cdot a \cdot b}{c \cdot k} \cdot \frac{V_{\text{кор}} \cdot S_{\text{підс.пр.}} \cdot M_{H_2S} \cdot m_{\text{цпит}}}{M_{CaO} W_A \cdot \beta} \quad (4.73)$$

Визначення найточнішого з методів розрахунку концентрації сірководню в атмосфері каналізаційних колекторів проведено на підставі порівняння з даними аналітичних визначень концентрації сірководню в експлуатаційному середовищі та рН бетону склепіння.

Дані розрахунків визначення середньорічної концентрації сірководню на ділянці завдовжки 1 м обстежених каналізаційних колекторів наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунків концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору каналізаційних трубопроводів різними методами [137, 172, 173]

Ділянка відбору проби	Дані хімічного аналізу експлуатаційних середовищ			Концентрація H_2S в атмосфері (mg/m^3), розрахована за різними методиками, та її відхилення (%) від реальної концентрації			
	Середньорічна концентрація H_2S у воді, mg/dm^3	Середньорічна концентрація H_2S в атмосфері, mg/m^3	рН бетону	За розробленою математичною моделлю	Відхилення	За розробленим методом на підставі даних вимірювання за допомогою КБ	Відхилення
кол-р ХТЗ, шахта № 4	18,6	198,0	1,98	202,1	17,2	209,0	5,6
кол-р ХТЗ, шахта № 5	12,0	20,0	3,7	23,4	25,0	17,5	14,3
кол-р ХТЗ, шахта № 6	13,0	30,6	3,50	34,0	11,1	33,2	8,5
кол-р ХТЗ, шахта № 8	6,6	10,5	4,10	10,3	26,5	12,5	19,0
кол-р ХТЗ, шахта № 10	8,46	62,4	3,20	58,5	14,3	60,1	3,8
кол-р ХТЗ, шахта № 12	31,0	239,7	1,93	238,3	19,1	251,0	4,7
Ріг вул. Забайкальської та вул. Ньютона	15,3	60,0	3,05	66,0	10,0	62,4	4,0

Як видно з даних табл. 4.3, реально оцінити концентрацію сірководню в атмосфері каналізаційних колекторів дозволяє і розроблена математична модель, і метод розрахунку середньорічної концентрації сірководню з використанням корозиметра бетону. Для розрахунку середньорічної концентрації сірководню відповідно до розробленої математичної моделі необхідний досить великий обсяг вихідних даних (концентрація органічної речовини, концентрація сірководню у воді, рН стічної води, заповнення колектора тощо), що ускладнює застосування математичної моделі в повсякденних визначеннях. Використання корозиметра бетону дозволяє достовірно оцінити середньорічну концентрацію сірководню в атмосфері підсклепінного простору залізобетонних каналізаційних мереж, не вимагаючи визначення великої кількості необхідних параметрів [137, 172, 173].

4.3 Підвищення експлуатаційної довговічності ділянок залізобетонних каналізаційних трубопроводів із різною концентрацією сірководню в експлуатаційних середовищах

Довговічність бетонних та залізобетонних каналізаційних колекторів залежить від внутрішнього експлуатаційного середовища, потенційну агресивність якого обумовлюють конструктивні рішення всієї споруди. За умов грамотного та раціонального обліку всіх несприятливих факторів та використання конструктивних заходів для придушення агресивного газоутворення під час проєктування, будівництва та експлуатації каналізаційних колекторів можна домогтися безаварійної роботи цих споруд із традиційного залізобетону протягом задекларованих 50 років. У випадку урахування тільки негативного досвіду аварійних колекторів, залізобетон необхідно замінювати або захищати полімерними, пластиковими або іншими матеріалами, що мають максимальну хімічну стійкість [174, 175].

Для підвищення експлуатаційної довговічності залізобетонних трубопроводів водовідведення використовують гідроізоляційні покриття різного складу. Наразі ринок покриттів пропонує для захисту споруд від агресивних середовищ широкий спектр різних матеріалів покриття, просочення, облицювання і т.д. Однак експлуатаційні середовища в каналізаційних мережах настільки специфічні, що захисні матеріали, які мають відмінні антикорозійні та кислототривкі характеристики, на цих об'єктах часто виявляються неефективними та швидко руйнуються. Під час вибору надійних захисних покриттів встановлювали максимальну концентрацію сірководню в атмосфері підсклепінного простору каналізаційних колекторів, за якої покриття забезпечать надійний захист цих споруд і експлуатаційну довговічність покриттів в умовах біогенної кислотної агресії.

Кількісне визначення концентрації сірководню в атмосфері бетонних споруд, за якої досліджуване покриття збереже необхідну довговічність, виконували за методикою, розробленою в УДНДІ «УкрВОДГЕО» на стандартних бетонних балочках після їх експозиції в каналізаційних мережах протя-

гом 3–4 міс. на склепінній частині ділянки каналізаційної мережі м. Харкова з екстремально високими концентраціями сірководню в атмосфері підсклепінного простору (до 260 мг/м³), а отже, з надзвичайно високою біогенною кислотною агресією. Після експозиції потенціометрично встановлювали рН плівкової конденсатної води на поверхні зразків бетону за допомогою корозиметра бетону [172, 176, 177].

З урахуванням неоднорідності умов, в яких можуть опинитися досліджувані зразки, що вміщені у сітки в колекторах, прогнозні оцінки та висновки про надійність покриття в цілому виконують за характеристиками того з трьох досліджуваних варіантів, який за результатами досліджень показав найбільше зниження рН бетону під покриттям.

На зразках, які зазнали впливу біогенної сірчаною кислотною агресії, також візуально відмічали наявність зміни кольору покриттів, зовнішніх пошкоджень, плям іржі, білих плям (гіпс, що утворився під час взаємодії цементних гідратів із сірчаною кислотою), спучування покриттів, стану поверхні тощо (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Зразки захисного покриття бетону (зліва направо: контрольний зразок, зразки після експозиції в каналізаційному колекторі)

Визначення концентрації сірководню в атмосфері споруди, за якої досліджуване покриття збереже необхідну довговічність, виконували за формулою [13]:

$$C_{H_2S} \text{ для даного покриття, що забезпечує } t_{\text{необх}} \text{ довговічність} = 2,55 \cdot (C_{H_2SO_4})^{0,45} = 2,55 \cdot \left(\frac{414,6 \cdot t_{\text{реальн}}}{t_{\text{необх}}} \right)^{0,45}, \quad (4.74)$$

де C_{H_2S} – концентрація сірководню в атмосфері об'єкта каналізації (мг/м³), в якому бетон захищений досліджуваним покриттям, що має необхідну довговічність;

$C_{H_2SO_4}$ – концентрація сірчаної кислоти у плівковій конденсатній волозі на поверхні бетону, що зазнає впливу біогенної кислотної агресії, мг/дм³;

$t_{\text{реальн}}$ – реальна довговічність покриття, діб;

$t_{\text{необх}}$ – необхідна довговічність покриття, діб.

Коливання C_{H_2S} в атмосфері реальних об'єктів каналізації складають $\bar{x} \pm 50\%$.

Загалом проведено випробування 45 органічних і 9 неорганічних (54 види) комерційних покриттів і просочень, які за основним компонентом, що входить до складу матеріалу, були класифіковані на 9 груп (рис. 4.6). Більшість цих покриттів наносяться обмазуванням і розпиленням, що є дуже економічним і технологічним, особливо під час ремонтних робіт на мережах водовідведення. Результати розрахунків концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору залізобетонних каналізаційних трубопроводів, за якої гідроізоляційні покриття (2–3 покриття з кожної групи, в тому числі обов'язково покриття, яке показало найкращий результат), є надійними протягом не менше 10 років, наведені на рис. 4.7.



Рисунок 4.6 – Схема класифікації покриттів, які досліджували, за основним компонентом, що входить до складу матеріалу

За цим же принципом представлені результати розрахунку прогнозованої експлуатаційної довговічності покриттів, виконані за методикою [13], в умовах екстремальної агресивності середовища (табл. 4.4).

Концентрація H_2S в атмосфері підклепінного простору, mg/m^3



Рисунок 4.7 – Концентрація сірководню в атмосфері підклепінного простору, за якої досліджуване покриття буде надійним більше ніж 10 років [137, 176, 178]

Таблиця 4.4 – Результати оцінки ефективності різних видів комерційних покриттів у захисті бетону від біогенної кислотної агресії [137]

Основний компонент покриття	Покриття	Прогнозна експлуатаційна довговічність покриття, днів
Поліефірний лак	«Адгезив 1»	< 30
	«Адгезив 2»	1035
Епоксидна композиція	Епоксидна композиція	115
	Просочення «Консолід-1», клейова композиція "Едмок" з наповнювачем	> 3650
	Просочення «Консолід-1», емаль «ЕПУ-71» з наповнювачем	412
Цемент	Elasto Bitumseal – 2 шари	1688
Гума та бітум	FLEXIGUM	2233
	Бітум ХГТА	< 157
Графіт	Графпласт КП-1	101
	Графпласт КП-2	> 3650
Базальт	VMX-Базальт-1	1905
	VMX-Базальт-2	> 3650
	Максил Флекс – 2 шари + Максуретан – 2 шари	2250
Поліетилен	Поліетилен	> 3650
Поліуретан	Ґрунтовка STO Rox 452 EP та 3 шари фінішного покриття STO Rox KU180	> 3650
Фторепоксидна композиція	ФЛК-2	> 3650

Як видно з даних рис. 4.6, за концентрації сірководню 100 мг/м^3 захисні покриття VMX-Базальт-2, Графпласт-2, органічні покриття з поліетилену, бітуму, поліуретану, ФЛК-2, STO Rox KU180 і просочення «Консолід-1» із клейовою композицією «Едмок» і наповнювачем забезпечать надійний захист залізобетонних каналізаційних колекторів протягом 10 років.

Як видно з наведених даних, найбільш високу розрахункову довговічність в умовах екстремальної активності біогенної кислотної агресії (не менше 3650 діб) мали покриття з неорганічних компонентів – VMX-Базальт-1 і VMX-Базальт-2, Графпласт-2, органічні покриття з поліетилену (випробування якого тривають), ФЛК-2, STO Rox KU180 і просочення «Консолід-1» із клейовою композицією «Едмок» і наповнювачем. Покриття з рідкої гуми та бітуму, що забезпечили добрий захист бетону від біогенної кислотної агресії, не можуть бути використані в каналізаційних спорудах водовідведення через відсутність адгезії до бетону.

Таким чином, для підвищення експлуатаційної довговічності ділянок каналізаційних мереж з екстремально високим вмістом сірководню в атмосфері підсклепінного простору, а також з метою запобігання надзвичайним ситуаціям на спорудах водовідведення, можна рекомендувати наступні захисні матеріали:

- обмазувальні покриття VMX-Базальт-1, -2 та Графпласт КП-2 – для санації;

- поліетиленові листи – для нового будівництва.

VMX-Базальт-1, -2 і Графпласт КП-2 – матеріали вітчизняного виробництва, вперше рекомендовані для цієї мети, є більш економічними та технологічними в порівнянні з покриттям із поліетилену, а також іншими полімерними покриттями, які показали надійний захист бетону. Покриття ФЛК-2 і STO Rox KU180 є багатошаровими та наносяться на бетон за більш складною та трудомісткою технологією, ніж VMX-Базальт-1, -2 і Графпласт КП-2. Крім того, ці покриття виготовляються за кордоном.

Для ділянок каналізаційних мереж із концентрацією сірководню в атмосфері підсклепінного простору не більше, ніж 15 мг/м^3 (помірна біогенна сірчаноокислотна агресія), можна рекомендувати наступні покриття – «Адгезив 2», Elasto Bitumseal та Максил Флекс і Максуретан [137].

РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ СПОРУД ВОДОВІДВЕДЕННЯ

5.1 Основні причини нещасних випадків на спорудах водовідведення

Експлуатація мереж водовідведення пов'язана з багатьма групами небезпечних факторів, що впливають на працівників підприємств водопровідно-каналізаційного господарства під час виконання ними ремонтних або експлуатаційних робіт на цих спорудах та навіть можуть призвести до надзвичайних ситуацій різного характеру. До таких факторів відносяться [179]:

- ймовірність вибуху газів, що накопичуються в атмосфері каналізаційних колекторів, та, як наслідок – отримання опіків та травм;
- отруєння газами (сірководень, метан, аміак та ін.), нестача кисню;
- можливість падіння до колектора та отримання травм;
- небезпека змивами потужними потоками води в колекторах великих діаметрів;
- обвалення ґрунту під час виконання земляних робіт;
- загазованість колодязів, камер, колекторів і небезпека вибуху, опіків та отруєння персоналу;
- небезпека падіння й ударів під час відкриття та закриття кришки люків колодязів і при спуску в колодязі;
- можливість падіння різних предметів у відкриті люки на співробітників у колодязях;
- небезпека впливу потоку води на працюючих в колодязях і камерах, особливо в колодязях і колекторах великих діаметрів;
- небезпека обвалення ґрунту під час виконання земляних робіт;
- небезпека наїзду автотранспорту у процесі виконання робіт на вулиці;
- санітарна небезпека при контакті зі стічною рідиною, яка містить патогенні мікроорганізми (стафілокок, віруси гепатиту, кишкову паличку, шигели, черевний тиф, різноманітні мікроміцети тощо);
- вогкість у колодязях і котлованах та ін.;
- підвищена вологість;
- психологічний фактор, що проявляється у людини, якщо вона працює у замкненому просторі.

Щороку із настанням весняно-літнього періоду в Україні і світі відбувається різке зростання рівня виробничого травматизму, у тому числі зі смертельним наслідком, на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства під час виконання робіт підвищеної небезпеки у колодязях, замкненому просторі та інших спорудах водопровідно-каналізаційного господарства. Деякі статистичні дані наведено нижче.

В червні 2019 р. в селищі Східне Білозерського району Херсонської області через отруєння каналізаційними газами померло 2 людини, які намагалися самотійно ліквідувати засор у каналізації [180].

В червні 2013 р. чотири співробітники КП «Харківводоканал» отруїлись каналізаційними газами та загинули під час проведення ремонтних робіт на спорудах каналізації по вул. Рудика (рис. 5.1). Смерть настала через порушення правил безпеки та гігієни праці – оскільки працівники не користувались ременями безпеки та протигазами [181].

В серпні 2013 р. в м. Слов'янську на перехресті вул. Жовтневої революції та вул. Фрунзе двоє робочих загинули піл час проведення робіт щодо чищення каналізаційного колектора. Причина загибелі – отруєння випарами сірководню [182].



Рисунок 5.1 – Фото з місця нещасного випадку (м. Харків, вул. Рудика) [181]

В липні 2015 р. під час експлуатації каналізаційно-насосної станції у м. Слов'янськ Донецької області стався груповий нещасний випадок. У результаті отруїлися три особи, з яких одна – смертельно. 13 липня 2015 р. під час виконання робіт з очищення каналізаційно-насосної станції у м. Золотоноша Черкаської області загинуло внаслідок утоплення троє працівників [183].

В серпні 2021 р. в м. Мелітополь 59-річний слюсар відновлювальних робіт комунального підприємства «Водоканал» спустився у водопровідний колодязь для перекриття запорної арматури й майже одразу знепритомнів. Начальник служби мереж водопостачання спробував спуститися в колодязь і витягти потерпілого, однак теж знепритомнів. Коли водій чергової машини разом із бригадою витягли обох на поверхню, начальник служби мереж водопостачання прийшов до тями, а слюсар – ні. Чоловікові протягом 5 хвилин робили штучне дихання, проте результату це не дало [184].

В червні 2019 року загинуло 7 осіб під час прочищення каналізації на в селищі Фартикуї на заході Індії. Причина смерті – отруєння токсичними па-

рами [185]. За статистичними даними в 2017 р. кожні 5 діб в Індії гинув 1 працівник під час робіт у спорудах каналізації, проте вважається, що реальний рівень смертності набагато вищий. За даними групи активістів за 2017 р. на спорудах каналізації в Індії загинуло понад 300 осіб [186].

В серпні 2019 року на Рівненщині в с. Зоря комунальники під час проведення поточних робіт отруїлися випарами з каналізації, одного з них медикам врятувати не вдалося, двох співробітників було ушпиталено [187].

В червні 2015 року в Новотроїцькому житлово-комунальному підприємстві Херсонської області під час виконання робіт із прочищення каналізації у вигрібній ямі приватного будинку загинув працівник підприємства та двоє жителів приватного будинку. За попередніми даними смерть настала від отруєння токсичними газами [188].

В червні 2019 р. у штаті Пенсільванія (США) під час перевірки трубопроводів водовідведення після отруєння каналізаційними газами загинуло 2 працівників [189].

Випадки отруєння токсичними газами в каналізації часто призводять до множинних смертей, оскільки у подібних випадках співробітники часто інстинктивно намагаються найшвидше допомогти колезі й таким чином також гинуть через отруєння.

За інформацією Державної служби України з питань праці про нещасні випадки зі смертельним наслідком та групові нещасні випадки в 2018 р. зареєстровано 6 нещасних випадків на підприємствах каналізаційно-водопровідного господарства, з них 3 випадки – зі смертельними наслідками (загинуло 4 особи). Слід відмітити, що всі випадки з летальними наслідками сталися у теплу пору року (травень та серпень 2018 р.) [190]. В холодну пору року сталось тільки 2 нещасні випадки – 4 особи отруїлись газами, що містяться в каналізаційних мережах. Після лікування всі співробітники були виписані з лікарні.

У червні 2021 р. керівник аграрного підприємства в Тернопільській області при огляді території виявив у каналізаційному колодязі без ознак життя двох різноробочих підприємства. Чоловіки загинули від отруєння газом під час виконання робіт, пов'язаних із промиванням стічної труби септика, розташованої на території підприємства. Розслідування цього нещасного випадку триває [191]. У липні 2021 р. двоє працівників комунального підприємства на Черкащині під час планового обстеження каналізаційного колодязя відчували раптове погіршення стану здоров'я та втратили свідомість. Лікарі констатували смерть чоловіків.

В 2019 р. під час ліквідації аварійних ситуацій або вході планових робіт на каналізаційних трубопроводах загинуло 10 осіб, співробітників комунальних підприємств водного господарства, та 2 особи госпіталізовано до лікарень. Основна кількість нещасних випадків сталась навесні та влітку (травень-серпень) (рис. 5.2) [180].

Таким чином, близько 75 % нещасних випадків припадає на період із травня по жовтень, а найменше число – на зимовий період. Це пояснюється

тим, що більшість ремонтних, налагоджувальних, очисних та інших видів робіт проводиться в теплу пору року. У літню пору різко підвищується температура навколишнього середовища та спостерігається більш інтенсивне утворення і виділення отруйних газів [192, 193].

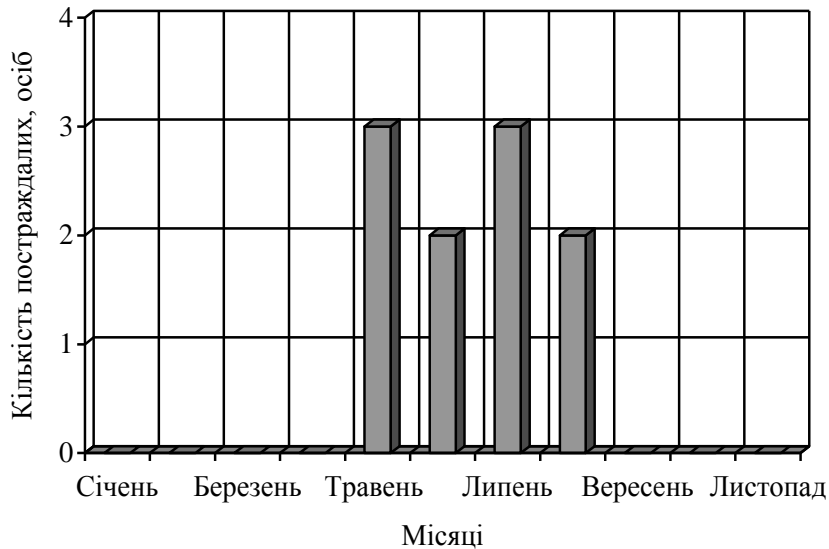


Рисунок 5.2 – Кількість співробітників водопровідно-каналізаційного господарства, що загинули в Україні за 2019 р.

Велика частина таких нещасних випадків, які фіксуються Фондом соціального страхування України, – групові, а аналіз обставин їх настання засвідчує, що головними причинами отруєння є невикористання або відсутність засобів індивідуального захисту, запобіжного та захисного інвентаря; незадовільний стан вентиляційних систем у каналізаційних насосних станціях; допуск до виконання роботи працівників без проведення відповідного навчання з питань охорони праці, без оформлення наряду-допуску; грубі порушення вимог безпеки праці.

За даними Фонду соціального страхування у місті Харкові 27 липня 2020 р. стався груповий нещасний випадок, внаслідок якого під час ремонтних робіт у триметровому каналізаційному колодязі через отруєння газами загинуло четверо працівників віком від 40 до 72 років. Протягом 2020 р. в Україні зареєстровано 8 нещасних випадків (в тому числі і групових), пов'язаних зі спорудами водовідведення та водоочищення. Загальна кількість працівників, які загинули, становила 12 осіб: 2 особи загинули внаслідок ураження електричним струмом, 1 особа – через падіння з висоти, інші – від отруєння токсичними речовинами. Протягом 10 місяців 2021 р. на підприємствах та спорудах водовідведення України вже зареєстровано 14 нещасних випадків (в тому числі і групових), в яких загинуло 16 працівників (рис. 5.3) [192].

До головних причин подібних надзвичайних ситуацій можна віднести:

– невиконання співробітниками правил безпеки праці та особисту необережність потерпілих, оскільки всі загиблі під час спуску до кана-

лізаційних колекторів для виконання ремонтних робіт не використовували засоби індивідуального захисту;

– відповідальні за проведення небезпечних робіт, які повинні забезпечити правильність і повноту вжитих заходів безпеки, технічне керівництво роботою та дотриманням працюючими заходів безпеки самі порушують вимоги безпеки;

– службами охорони праці не здійснюється контроль за організацією та проведенням небезпечних робіт, а в інструкціях з організації та безпечного проведення небезпечних робіт не зазначена система контролю та форма участі в ньому служби охорони праці;

– проведення навчально-тренувальних занять на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства з імітацією аварій і рятувальних робіт, носить формальний характер або такі заняття взагалі не проводяться. І, як наслідок, персонал не готовий до виникнення реальних аварійних ситуацій, що потребують виконання рятувальних робіт.

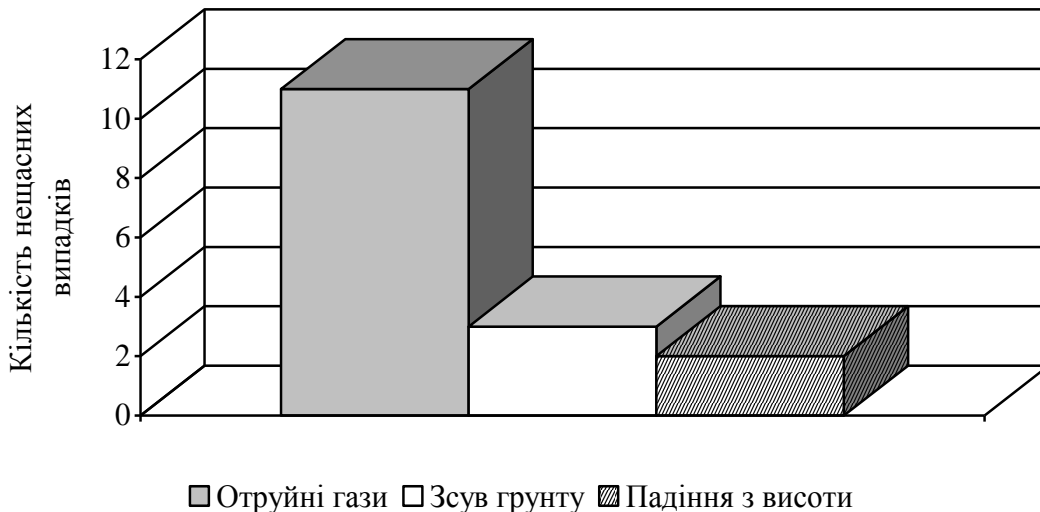


Рисунок 5.3 – Основні причини смертельних випадків під час проведення робіт на спорудах водопровідно-каналізаційного господарства України (за 10 місяців 2021 р.)

Аналізуючи випадки загибелі робітників водопровідно-каналізаційного господарства під час проведення аварійних, налагоджувальних, будівельних, ремонтних, очисних та інших видів робіт, можна класифікувати основні місця нещасних випадків (рис. 5.4) [194].

Як видно, найбільший травматизм відзначається саме в колодязях каналізаційних систем. Ці пристрої є основними елементами каналізаційної системи в містах, на промислових підприємствах і підприємствах агропромислового комплексу.

Під час проведення аналізу основних причин, що призвели до смертельних випадків, було виявлено, що найчастіше на спорудах водовідведення смерть настає через отруєння газами (рис. 5.5) [194].

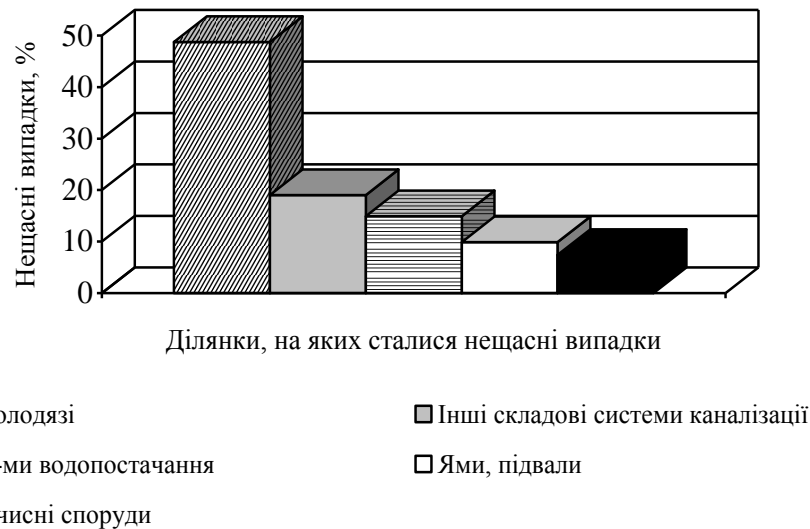


Рисунок 5.4 – Розподіл нещасних випадків співробітників водопровідно-каналізаційного господарства за місцем розташування [194]

Як видно з даних рис. 5.3, 5.5, основна причина нещасних випадків – отруєння шкідливими газами. При цьому слід відмітити, що найчастіше отруєння газами виникають саме в каналізаційних колодязях (30,5 %). Також основною причиною загибелі людей є утоплення в рідкому середовищі [194].

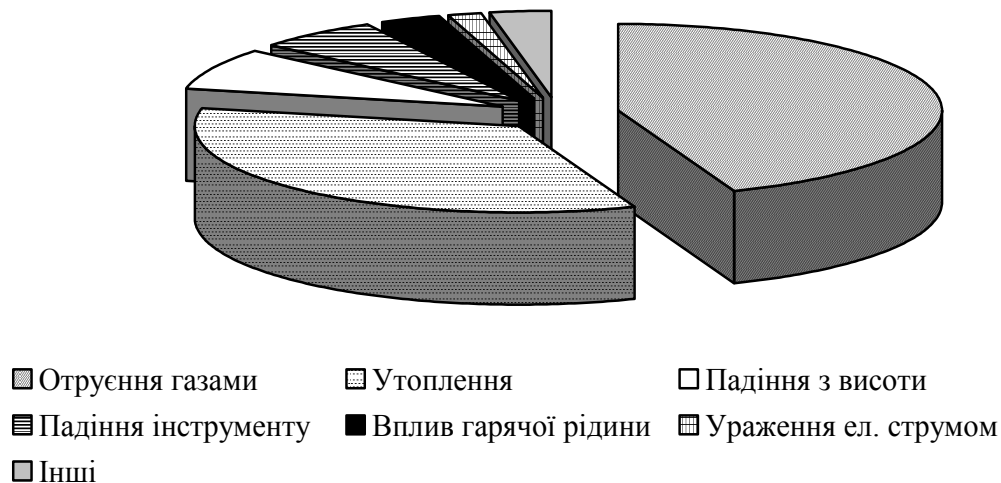


Рисунок 5.5 – Розподіл причин нещасних випадків у системах каналізаційного господарства [194]

Здавалося б, нещасні випадки мали б звернути увагу на безпечне ведення робіт у системах водовідведення та водопостачання. Однак працівники водопровідно-каналізаційного господарства часом не усвідомлюють небезпеки, яка загрожує від впливу отруйних газів, – працюють без засобів індивідуального захисту або поспішають на допомогу постраждалим також без засобів

індивідуального захисту, і події із загибеллю людей найчастіше набувають групового характеру.

5.2 Аналіз міжнародного досвіду в галузі цивільної безпеки на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства

Аналіз закордонних публікацій дозволяє зробити висновок, що іноземні фахівці також приділяють багато уваги проблемам охорони праці на каналізаційних спорудах.

З метою запобігання нещасним випадкам представники різних підприємств та міжнародні організації з охорони праці випускають короткі бюлетені-нагадування. Наприклад, Управління з охорони праці в Міністерстві праці США (Occupational Safety and Health Administration - OSHA), яке займається питаннями охорони праці та профілактики професійних захворювань, в 2016 р. випустило у світ бюлетень «Best Practices to Guard Against Hydrogen Sulfide in the Workplace», що містить наступні питання [195]:

- джерела утворення сірководню та його похідних;
- концентрації сірководню та можливі несприятливі наслідки;
- детально пояснюють наслідки отруєння;
- методи та прилади визначення концентрацій сірководню;
- пропонують засоби індивідуального захисту;
- заходи першої долікарської допомоги;
- інші заходи попередження нещасних випадків.

Основна задача OSHA – забезпечити безпечні та здорові умови праці для чоловіків і жінок за рахунок розробки стандартів у галузі безпеки та гігієни праці, забезпечити їх виконання (в тому числі – проводити перевірки, накладати штрафи і т.д.), а також проводити навчання і тренування, а також розробка різних законодавчих актів [196].

Аналогічні продукти (бюлетені, огляди, брошури) розповсюджують інші кампанії з метою поширення обізнаності серед працівників та навчання робітників підприємств.

Слід зауважити, що більшість із цих бюлетенів містять стислі заходи з охорони праці під час роботи на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства, механізм впливу сірководню та інших газів на організм людини, а також можливі негативні наслідки [197–206].

В табл. 5.1 наведено стандарти концентрацій сірководню для робочої зони у світі за даними Інституту безпеки та охорони праці при страхуванні від нещасних випадків у Германії (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 2017) [207, 208].

Як видно з наведених даних, у більшості країн світу вимоги до гранично допустимих концентрацій сірководню в атмосфері робочого місця набагато жорсткіші, ніж у нашій країні.

Таблиця 5.1 – Світові стандарти концентрації сірководню в робочій зоні каналізаційних колекторів [207]

Країна	Концентрація сірководню під час 8-годинного робочого дня	
	ppm	мг/м ³
Австралія	10	14
Австрія	5	7
Бельгія	5	7
Канада (Квебек)	10	14
Данія	10	15
Фінляндія	5	7
Франція	5	7
Германія	5	7,1
Угорщина	-	14
Ірландія	5	7
Нова Зеландія	10	14
Польща	-	7
Сінгапур	10	14
Південна Корея	10	14
Іспанія	1	-
Швейцарія	5	7,1
Нідерланди	-	2,3
США (OSHA)	4	-
Великобританія	5	7
ACGIH ¹	1	1,4
SCOEL ²	5	7

Примітки:

1. ACGIH – American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

2. SCOEL – Scientific Committee on Occupational Exposure Limit Values

В цілому закордонні фахівці відмічають аналогічні проблеми в галузі охорони праці під час експлуатації водопровідно-каналізаційного господарства [206–212]:

- небезпека сірководню та інших газоподібних сполук (оксид вуглецю, метан);
- нестача кисню;
- небезпека обмеженого простору – психологічний дискомфорт;
- ковзання та падіння у колектор;
- ураження вірусами – ентеровіруси, ротавіруси, гепатити А та В, СНІД, вірус Коксаки та багато інших;
- бактеріальне ураження – сальмонельоз, тифозна лихоманка, шигельоз, гастроентерит, амебна дизентерія, лямбліоз тощо.

Можна сформулювати деякі положення безпеки праці під час роботи у системах каналізації, якими керуються закордонні фахівці.

1. Під час роботи в каналізаційних колекторах для проведення оцінки ризику та надання рекомендацій щодо заходів безпеки та гігієни праці перед тим, як проводити роботу в обмеженому просторі, призначають «компетентну особу».

2. В обмеженому просторі каналізаційних колекторів дозволяють працювати тільки працівникам, що пройшли певну сертифікацію та мають право виконувати подібні роботи.

3. Керувати системою «дозвіл на роботу».

4. Обов'язково провести аналіз якості атмосферного повітря у каналізаційному колекторі перед входом.

5. Забезпечити належну вентиляцію.

6. Контролювати якість повітря протягом усього робочого періоду за допомогою пристрою виявлення газу.

7. Переконатись, що працівник, який залишився на поверхні землі, розміщується поза обмеженим простором для спостереження за погодними умовами та підтримання зв'язку із працівниками всередині (зазвичай за допомогою рації).

8. Забезпечити використання затвердженого дихального апарату (якщо це рекомендовано у звіті про оцінку ризику) та інших необхідних засобів індивідуального захисту працівниками всередині каналізаційного колектора.

9. Сформулювати та впровадити відповідні надзвичайні процедури для подолання серйозної чи неминучої небезпеки для працівників всередині обмеженого простору.

10. Надавати необхідні вказівки, навчання та поради всім працівникам, які працюють в обмеженому просторі каналізаційних трубопроводів або надають допомогу в таких роботах негайно за їх межами.

11. Під час проведення робіт в шахтах каналізаційних колекторів співробітники мають у своєму розпорядженні рацію для безперервного зв'язку. Необхідно відмітити, що в деяких випадках спостерігається наявність у працівника так званого «особистого сигналу тривоги», який може видавати сигнали незабаром після того, як людина втрачає рухливість (зазвичай 20 секунд). Цей спеціальний пристрій повинна носити будь-яка особа, що заходить у обмежений простір (каналізаційний колодезь, трубопровід тощо) для забезпечення своєчасного порятунку [212].

Закордонні фахівці також приділяють увагу отруйним газам у колекторах, проте вони виділяють не тільки сірководень, але й оксид вуглецю та метан. Особлива увага приділена розподілу цих газів в атмосфері колекторів, оскільки різні гази накопичуються в різних за висотою ділянках каналізаційних шахт [204].

Під час проведення робіт людина, яка спустилася недостатньо глибоко, може не відчувати запаху сірководню, оскільки він важчий та знаходиться нижче, що може спричинити смертельні наслідки. Отже, під час проведення ремонтних або експлуатаційних робіт у каналізаційних колекторах необхідно контролювати не тільки вміст сірководню, але й інших газів перед спуском у колодезі [213].

В якості засобів індивідуального захисту, окрім протигазів, закордонні фахівці рекомендують використовувати кисневі дихальні апарати різноманітних конструкцій [204].

В бюлетені, що видає Національне відділення охорони здоров'я та безпеки в Канаді, окрім постійного контролю вмісту сірководню, пропонується встановлювати газові монітори, чутливі до низьких рівнів сірководню, у ключових місцях поблизу землі. Причому такі пристрої повинні мати звукову сигналізацію, щоб попередити працівників, коли рівень сірководню досягає гранично допустимого значення [214].

ВИСНОВКИ

Визначено, що основними параметрами, які необхідно контролювати для підвищення надійності водовідведення бетонними каналізаційними колекторів, запобігання їх корозійному руйнуванню, а отже і для зменшення кількості надзвичайних ситуацій на цих спорудах, є глибина та швидкість корозії, а також середньорічна концентрація сірководню в атмосфері підсклепінного простору. Виконано аналіз сучасних методів інспектування стану надійності бетонних споруд водовідведення. Встановлено, що наразі методи оперативного інструментального контролю швидкості корозії бетонних трубопроводів водовідведення практично відсутні.

Охарактеризовано пристрій – корозиметр бетону – для оперативної неруйнуючої діагностики стану бетонних конструкцій водовідведення, що знаходяться в умовах біогенної сірчанокислотної агресії, та визначення осередненої за рік концентрації H_2S в атмосфері підсклепінного простору бетонних каналізаційних трубопроводів. Обґрунтовано вимоги до вимірювального приладу, конструкції вимірювального електрода й електрода порівняння та виготовлено їх в небитких корпусах.

Експериментально встановлено коефіцієнти, необхідні для більш детального розрахунку експлуатаційних характеристик бетонних споруд водовідведення під час проведення обстежень бетону за допомогою корозиметра бетону – D (коефіцієнт дифузії біогенних кислот углиб бетону), δ (величина дифузії біогенних кислот за фронт корозії) та залежність, що враховує вплив повного заповнення колекторів на швидкість корозії підсклепінної частини.

Експериментально встановлено, що протягом доби, місяця та року коливання концентрації сірководню в атмосфері ділянок каналізаційних мереж м. Харкова відбувається в дуже широкому діапазоні. Виконано електронне картографування мереж водовідведення м. Харкова за концентрацією сірководню в експлуатаційних середовищах (стічній воді, атмосфері підсклепінного простору).

Розроблено математичну модель накопичення сірководню в атмосфері підсклепінного простору на ділянках каналізаційних колекторів, яка враховує кінетику його мікробіологічного утворення у стічній воді, осадження, фізико-хімічні, гідродинамічні умови, емісію в атмосферу та ін.

Наведено метод оперативної інструментальної оцінки середньорічної концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору бетонних каналізаційних мереж, осередненої за великий проміжок часу, який базується на даних вимірювань, виконаних за допомогою корозиметра бетону. Шляхом порівняння різних методів розрахункового прогнозу середньорічної концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору показано, що цей метод є не тільки найбільш точним, але і найменш працевитратним.

В експериментальних дослідженнях обґрунтовано вибір гідроізоляційних матеріалів для підвищення експлуатаційної довговічності бетонних каналізаційних трубопроводів з урахуванням конкретних експлуатаційних умов на

ділянках каналізаційних мереж (концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору), а також технічних і економічних можливостей підприємства.

Проаналізовано основні фактори трудової діяльності працівників водопровідно-каналізаційного господарства, що впливають на безпеку праці. До основних причин, що впливають на стан травматизму на каналізаційних мережах можна віднести: невикористання або відсутність засобів індивідуального захисту, запобіжного та захисного інвентарю, незадовільний стан вентиляційних систем у каналізаційних спорудах; незадовільну організацію проведення ремонтних і аварійних робіт на каналізаційних спорудах, а саме: допуск до виконання роботи працівників без проведення відповідного навчання з питань охорони праці, без оформлення наряду-допуску; невиконання вимог інструкцій з охорони праці та виконання робіт із грубими порушеннями вимог безпеки праці; відсутність навчально-тренувальних занять на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства тощо. Найбільша кількість нещасних випадків на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства припадає на каналізаційні колодязі через велику загазованість останніх. Головна причина смертельних випадків на спорудах – отруєння так званими «каналізаційними» газами – сірководнем, окисом вуглецю, аміаком та метаном.

Проаналізовано закордонний досвід у галузі охорони праці на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства. Визначено, що концентрації сірководню та інших каналізаційних газів робочої зони в багатьох країнах світу мають більш жорстке нормування. Для постійного контролю вмісту сірководню встановлюють газові монітори – сигналізатори, чутливі до низьких рівнів сірководню, у ключових місцях поблизу землі. Причому такі пристрої повинні мати звукову сигналізацію для попередження працівників щодо перевищення гранично допустимої концентрації сірководню в каналізаційних колекторах.

Найбільша частина всіх нещасних випадків на спорудах водопровідно-каналізаційного господарства зі смертельними наслідками обумовлена типовими причинами організаційного характеру:

- незабезпечення працівників засобами індивідуального захисту;
- порушення потерпілими працівниками вимог нормативно-правових актів з охорони праці;
- незадовільним утриманням і недоліками в організації робочих місць;
- недоліками в навчанні та інструктажі з охорони праці постраждалих;
- невиконанням керівниками і спеціалістами обов'язків з охорони праці тощо.

Саме тому організаційні заходи є першочерговими у профілактиці нещасних випадків на мережах водовідведення. До них відносяться:

- встановлення та конкретизація прав, функціональних обов'язків і відповідальності всіх працівників;

- регламентація діяльності працівників інструкціями;
- належна підготовка робочих місць і забезпечення ЗІЗ.

Для зниження ризику загибелі працівників водопровідно-каналізаційного господарства під час обслуговування мереж водопостачання та водовідведення в першу чергу необхідно дотримуватися вимог:

- щодо визначення шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які можуть впливати на працівників у процесі роботи;
- призначення відповідальних за організацію робіт, що проводяться;
- порядку оформлення наряду-допуску;
- дотримання умов допуску працівників до роботи за відповідною професією або до виконання відповідного виду робіт (вік, стать, стан здоров'я, наявність відповідної кваліфікації, проведення навчання, інструктажів та перевірки знань з питань охорони праці тощо);
- підготовки робочого місця, засобів індивідуального та колективного захисту.

З метою зниження випадків травматизму на спорудах водовідведення працівників водопровідно-каналізаційного господарства слід забезпечувати засобами зв'язку, наприклад, раціями, а в окремих випадках – «особистими сигналами тревоги» для подачі сигналу у випадку знерухомилення. В якості засобів індивідуального захисту краще використовувати не протигази, а кисневі дихальні апарати різноманітних конструкцій.

Роботи, пов'язані зі спуском працівників у каналізаційні колодязі та камери, небезпечні й вимагають обережності та точного виконання вимог охорони праці. З метою недопущення загибелі працівників і зниження травматизму слід комплексно задіяти технічні та організаційні заходи, що забезпечують безпеку праці під час виконання оглядів і обслуговування системи каналізації.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дрозд Г.Я., Зотов Н.И., Маслак В.Н. Канализационные трубопроводы: надежность, диагностика, санация. Донецк: ИЭП НАН Украины, 2000. 260 с.
2. Гончаренко Д.Ф., Коринько И.В. Ремонт и восстановление канализационных сетей и сооружений. Харьков: Рубикон, 1999. 368 с.
3. Войтович В.А., Спирин Г.В., Монахова Т.Г., Смирнова О.Н. Биодegradация строительных материалов и сооружений. Состояние, тенденции, подавление, профилактика // Строительные материалы, 2004. № 6. С. 64–65.
4. Гончаренко Д.Ф. Эксплуатация, ремонт и восстановление сетей водоотведения: монография. Харьков: Консум, 2008. 400 с.
5. Бригада О.В., Зарубін В.В. Аналіз експлуатаційного стану залізобетонних каналізаційних колекторів м. Мелітополя // Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика: матеріали міжнародної науково-практичної конференції: НУЦЗ України, 21–22 листопада 2019 р. Харків: НУЦЗ України, 2019. С. 16–17.
6. Коваленко О.М., Паболков В.В., Шевченко Е.Ю. та ін. Програма розвитку КП «Харківводоканал» до 2026 року. Харків, 2012. 218 с.
7. Широков В.С. Железобетонные трубы и перспективы их производства. Бетон и железобетон. 2004. № 1. С. 25–27.
8. Концепция развития системы водоотведения г. Харькова до 2020 г. Харьков. 2007. 34 с.
9. Абрамович И.А. Канализация города Харькова (1912-1980 г.г.): опыт проектирования и строительства: монография. Харьков: Основа, 1997. 220 с.
10. Абрамович И.А. Новая стратегия проектирования и реконструкции систем транспортирования сточных вод. Харьков: Основа, 1996. 316 с.
11. Stein D. Rehabilitation and Maintenance of Drains and Sewers. Germany. Berlin, 2001. 808 p.
12. Иванов Ф.М., Дрозд Г.Я. О сроках службы железобетонных коллекторов. *Бетон и железобетон*, 1992. № 2. С. 25–26.
13. Юрченко В.А. Развитие научно-технологических основ эксплуатации сооружений канализации в условиях биохимического окисления неорганических соединений: дисс.... доктора техн. наук: 05.23.04 / Юрченко Валентина Александровна. ХГТУСА. Харьков, 2007. 426 с.
14. Дрозд Г.Я. Повышение эксплуатационной долговечности и экологической безопасности канализационных сетей. Диссер.... д-ра техн. наук: 21.00.08 / Донб.гос. акад. строит. и архит. Макеевка, 1998. 20 с.
15. Дрозд Г.Я., Рожанская А.М. Роль микроорганизмов в разрушении бетонных канализационных коллекторов. *Микробиологический журнал*, 1989. Т. 51. № 6. С. 86–92.
16. Кофман В.Я. Сероводород и метан в канализационных сетях. *Водоснабжение и санитарная техника*, 2012. № 11. С. 72–78.

17. Андреюк Е.И., Билай В.И., Коваль Э.З., Козлова И.А. Микробная коррозия и ее возбудители. Киев: Наукова думка, 1980. 287 с.
18. Юрченко В.А., Ольгинский А.Г., Чернявский В.Л. Биогеохимическая коррозия бетона сооружений отведения сточных вод. *Экология и ресурсосбережение*, 2001. № 6. С. 61–66.
19. Золочевская И.В. Биоповреждения каменных строительных материалов микроорганизмами и низшей растительностью в атмосферных условиях. Биоповреждения в строительстве. М.: Стройиздат, 1984. С. 257–261.
20. Козлова И.А. Микробиологическая коррозия и защита от нее. К.: Знания, 1982. С. 92–98.
21. Андреюк Е.И., Козлова И.А. Литотрофные бактерии как фактор коррозии подземных сооружений. Хемосинтез: к 100-летию открытия С.Н.Виноградским. М.: Наука. 1989. С. 229–237.
22. Федосов С.В., Базанов С.М. Сульфатная коррозия бетона. М.: Издательство АСВ, 2003. 192 с.
23. Geochemical boundary conditions relevant for assessing corrosion processes for the supercontainer design. EXTERNAL REPORT Waste & Disposal Department. M.V. Geet, L. Wang, P. Boever, M. Craen: Belgian Nuclear Research Centre August, 2006. 33 p.
24. Grant M.T., Rowe B., Foy M., Theriault S., Card H. Atlantic Canada Wastewater Guidelines Manual for Collection, Treatment, and Disposal. ABL Environmental Consultants Ltd., 2006. 432 p.
25. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник: в 2-х т. Т. 1. Под ред. А.А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987. 688 с.
26. Крыленков В.А., Власов Д.Ю., Дашко Р.Э., Старцев С.А. Проблемы сохранения жилой и производственной инфраструктуры городов от биоразрушения. *Инфострой*, 2003. № 5 (11). С. 3–13.
27. Javaherdashti R. A review of some characteristics of MIC caused by sulfatereducing bacteria: past, present and future. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 1999. Vol. 46. № 3. P. 173–180.
28. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шиссль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах: совм. изд. СССР-ЧССР-ФРГ. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
29. Monteny J., Vinckeb E., Beeldensc A., De Belied N., Taerwea L., Van Gemertc D. and Verstraeteb W. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2000. Vol. 30. № 4. P. 623–634.
30. MOUSE TRAP Technical Reference – Water Quality. DHI Water & Environment, 2007. 34 p.
31. Cwalina B. Biodeterioration of concrete. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2008. № 4. P. 133-140.

32. Jensen H.S. Hydrogen sulfide induced concrete corrosion of sewer networks. Section of Environmental Engineering, Ph.D. Dissertation. Aalborg University, 2009. 67 p.
33. Wei S., Sanchez M., Trejo D., Gillis C. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2010. Vol. 64. P. 748–754.
34. Защита строительных конструкций от коррозии: СНиП 2.03.11-85. Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 48 с.
35. Каналізаційні тунелі Харкова: QUO VADIS?: монографія: за заг. редакцією Д.Ф. Гончаренка / Д.О. Бондаренко, В.В. Булгаков, О.О. Гармаш, Д.Ф. Гончаренко, С.С. Піліграм. Х.: Раритет України, 2018. 232 с.
36. Allouche E.N., Freure P. Management and maintenance practices of storm and sanitary sewers in Canadian Municipalities. The University of Western Ontario, Geotechnical Research Centre, Department of Civil and Environmental Engineering, Institute for Catastrophic Loss Reduction. 2002. №. 18. 46 p.
37. Design Manual for Concrete Pipe Outfall Sewers. The Concrete Pipe, Infrastructural Products and Engineering Solutions (PIPES) Division of the Concrete Manufacturers Association, 2009. 49 p.
38. Muller K., Fischer B. Objective Condition Assessment of Sewer Systems. 2nd Leading Edge Conference on Strategic Asset Management Lisbon, Portugal, 17-19 October 2007. P. 1–5.
39. Stein D., Koerkenmeyer K. Possible fields of application of electrical methods for leaktightness testing and leak localizing in drains and sewers. The International Society for Trenchless Technology: Conference Papers Intl No-Dig-2003-Las Vegas, 2003. URL: http://www.istt.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=136&category_id=2&option=com_virtuemart&Itemid=62&vmcchk=1&Itemid=62
40. Глазкин Н.Е., Горнев Ю.В., Шведов В.В. Новые возможности роботов ТАРИС. *Полимергаз*, 2004. № 2. С. 38–39.
41. PIRAT - A System for Quantitative Sewer Pipe Assessment / R. Kirkham, K. Patrick D. Kearney, J. Rogers, J. Mashford. *The International Journal of Robotics Research*, 2000. Vol. 19. №. 11. 1033–1053.
42. Yang M., Su T. Automated diagnosis of sewer pipe defects based on machine learning approaches. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 2008. Vol. 35. № 3. P. 1327–1337.
43. Витюк П.С. Контроль качества железобетонных конструкций сооружений неразрушающими методами // Український міжгалузевий науково-практичного семінар „Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення”: зб. доповідей (30 червня – 1 липня 1998 р.). К.: 1998. С. 39–43.
44. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник. М.: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.

45. ГОСТ 10180 (СТ СЭВ 3978.83). Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стройиздат, 1985. 34 с.
46. Гулунов В.В. Современные методы и средства неразрушающего контроля бетонных и железобетонных конструкций. *Бетон и железобетон*, 2005. № 4. С. 19–22.
47. Лещинский М.Ю. Испытание бетона: справ. пособие. М.: Стройиздат, 1980. 360 с.
48. Поль Э. Неразрушающие методы испытаний бетона. М.: Изд-во литературы по строительству, 1967. 178 с.
49. Брожовски И. Обследование железобетонных конструкций перед ремонтом // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: зб. наук. праць у 2-х кн. Вип. 59. Кн. 2, К.: НДІБК. 2003. С. 144–149.
50. Снисаренко В.И., Файвусович А.С. К вопросу обследования железобетонных конструкций // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: зб. наук. праць у 2-х кн. Вип. 59. Кн. 2, К.: НДІБК. 2003. С. 178–185.
51. Джонс Р. Испытание бетона без разрушения. М.: Изд-во литературы по строительству, 1962. 139 с.
52. Омельченко А.А., Лещинский М.Ю. Эффективность контроля качества бетона. К.: Будівельник, 1988. 144 с.
53. Попов К.Н., Каддо М.Б., Кульков О.В. Оценка качества строительных материалов: учебное пособие. М.: Изд-во АСВ, 1999. 240 с.
54. Рекомендации по определению прочности бетона эталонным молотком Кашкарова по ГОСТ 22690.2-77/НИИОУС при МИСИ им. В.В.Куйбышева. М.: Стройиздат, 1985. 24 с.
55. Методические указания по определению прочности бетона ультразвуковым методом по ГОСТ 17624. М., 1999. 19 с.
56. Брожовски И. Измерение глубины трещин в ЖБК с применением ультразвукового импульсного метода / Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: зб. наук. праць у 2-х кн. Вип. 59. Кн. 2, К.: НДІБК. 2003. С. 150–154.
57. Чихунов Д.А. Методика и техника для контроля прочности бетонов и других искусственных каменных материалов. URL: <http://www.geospr.ru/art.php?id=a87>.
58. Чихунов Д. Методы и приборы неразрушающего контроля физических свойств бетонов. *Строительная инженерия*, 2005. № 3. С. 55–59.
59. Урбанович И.Н., Алексеев С.Н. Оценка долговечности железобетона с помощью ультразвука. *Бетон и железобетон*, 1986. № 5. С. 8–10.
60. Перкинс Ф. Железобетонные сооружения: Ремонт, гидроизоляция и защита / Под ред. Цитрона М.Ф. М.: Стройиздат, 1980. 256 с.
61. Москвин В.М. Коррозия бетона. М.: Гос. изд-во лит-ры по стр-ву и арх-ре, 1952. 344 с.
62. Москвин В.М. Методы исследования коррозии бетона. Коррозия бетона в агрессивных средах. Сб. трудов НИИЖБ. М., 1971. С. 4–10.

63. Москвин В.М., Рубецкая Т.В., Бубнова Л.С., Любарская Г.В. Коррозия бетона при действии на него кислых агрессивных сред. Коррозия бетона в агрессивных средах: сб. трудов НИИЖБ. М., 1971. С. 11–21.
64. Рубецкая Т.В., Бубнова Л.С., Федорченко В.Г. и др. Скорость коррозии I вида в ненапорных конструкциях. Коррозия бетона в агрессивных средах: сб. трудов НИИЖБ. М., 1971. С. 30–35.
65. Рожанская А.А. Микробная коррозия железобетонных строительных конструкций: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. биол. наук. – Киев, 1990. 18 с.
66. Concrete Durability: Cementitious Materials and Reinforced Concrete Properties, Behavior and Corrosion Resistance / edited by Luis Emilio Rendon Diaz Miron, Dessi A. Koleva. Cham, Switzerland: Springer, 2017. 162 p.
67. Linping Wu, Chaoshi Hu, Wei Victor Liu The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel -A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, Canada. *Sustainability*, 2018, Vol. 10 (2). 517 p.
68. Yousefi, A. Accelerated biodegradation of cured cement paste by Thiobacillus species under simulation condition. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014. № 86. P. 317–326.
69. Hvitved-Jacobsen, T. Sewer Processes – microbial and chemical process engineering of sewer networks. CRC Press, 2002. 237 p.
70. Jensen, H.S. Hydrogen sulfide induced concrete corrosion of sewer networks / Section of Environmental Engineering, Ph.D. Dissertation. Aalborg University, 2009. 67 p.
71. Rhee C. Deactivation of sulfide oxidizing bacteria to prevent sewer corrosion, collapse and explosion. *International Journal of Applied Chemical Sciences Research*, 2014. Vol. 2, №. 4. P. 1–15.
72. Sakrabani R. Biodegradability of organic matter associated with sewer sediments during first flush. *Science of the total environment*, 2009. Vol. 407. № 8. P. 2989–2995.
73. Liu Y. Prediction of concrete corrosion in sewers with hybrid Gaussian processes regression model. *Royal Society of Chemistry*, 2017. № 7. P. 30894–30903.
74. Рекомендации по оценке степени коррозионного воздействия слабоагрессивных кислых сред на бетон. М.: НИИЖБ, 1986. 14 с.
75. Юрченко В.А., Бригада О.В. Ломоносова Л.В. Мікробіологічна корозія бетону у спорудах водовідведення. Біологія та валеологія: збірник наукових праць. 2002. Вип. 5. Харків: ХДПУ. С. 159–163.
76. Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах. Сб. тр. под ред. Алексева С.Н. М., НИИЖБ Госстроя СССР, 1988. 129 с.
77. Лучко Й.Й., Глагола І.І., Незаревич Б.Л. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних та залізобетонних конструкцій і споруд. НАН України; Фіз.-мех. Ін.-т ім. Г.В. Карпенка. Львів: Каменярь, 1999. 229 с.

78. Wells T., Melchers R.E. An observation-based model for corrosion of concrete sewers under aggressive conditions. *Cement and Concrete Research*, 2014. № 61–62. P. 1–10.
79. Rhee C. Deactivation of sulfide oxidizing bacteria to prevent sewer corrosion, collapse and explosion. *International Journal of Applied Chemical Sciences Research*, 2014. Vol. 2, №. 4. P. 1–15.
80. Oualit M., Jauberthie R., Rendell F., Melinge Y. External corrosion to concrete sewers: a case study. *Urban Water Journal*, 2012. Vol. 9. Issue 6. P. 429–434.
81. Драпалюк М.В., Пилипенко В.Н. Исследование причин разрушения бетонных конструкций в агрессивных средах. *Нові технології в будівництві*, 2018. №34. С. 56–60.
82. Taheri S., Ams M., Bustamante H. etc. A practical methodology to assess corrosion in concrete sewer pipes. *MATEC Web of Conferences* 199, 2018. P. 1–4.
83. Churchill P., Elmer D. Hydrogen sulfide control in wastewater collection systems. *Newea Journal*, 1999. Vol. 33. № 1. P. 57–63.
84. Гончаров В.В., Рожанская А.М. Влияние добавок на коррозионную стойкость строительных растворов в техногенных средах. *Бетон и железобетон*, № 5, 1992. С. 23–25.
85. Розенталь Н.К., Гвоздева А.А. Методы испытаний бетона. *Экспозиция. Бетоны & сухие смеси. Специализированное издание*, 2008. № 4/Б (65). С. 11–13.
86. Гусев Б.В., Файвусович А.С., Рязанова В.А. Развитие фронта коррозии бетона в агрессивных средах. *Бетон и железобетон*, 2005. № 5. С. 23–27.
87. Отчет об испытаниях Р 4255. Научно-исследовательский институт полимерных строительных материалов. Испытания системы покрытия бетона StoPox 452 EP и StoPox KU 180 для применения в качестве поверхностного защитного слоя при сильной химической коррозии в результате воздействия «биогенной серной кислоты», Германия, 2006. 22 с.
88. Mishina F., Fujimoto H., Kushiya N. Survey and Evaluation on Corrosion Protection Coatings for Concrete Structures of Wastewater Treatment Plants // Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. P. 1–7. URL.: <http://www.claisse.info/2013%20papers/data/e496.pdf>
89. Abdolvahab V. Corrosion control and reduction in sludge storing concrete tanks in wastewater treatment plants using the metal – ceramic FGM plates element. *MOJ Civil Engineering*, 2017. Volume 3. Issue 4. P. 318–324.
90. DIN EN 1766:2017-05. Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Referenzbetone für Prüfungen; Deutsche Fassung EN 1766:2017.
91. Vipulanandan C. Performance of polyurethane-coated concrete in sewer environment. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35(9). P. 1754–1763.
92. Стольберг Ф.В. Экология города. К.: Либра, 2000. 464 с.

93. Gostelow P., Parsons S. Sewage treatment works odour measurement. *Water Sci. Technol*, 2000. Vol. 41. № 6. P. 33-40.
94. Stuetz R., Frechen F.-B. *Odours in Wastewater Treatment*. IWA Publishing, London SW1H 0QS. 2001. 437 p.
95. Фізико-хімічні основи очищення стічних вод: під ред. Запольського А.К. К.: Лібра, 2001. 302 с.
96. Майоров В.А. Запахи: их восприятие, воздействие, устранение. М.: Мир, 2006. 366 с.
97. State of the art in Urban Drainage Modeling. REPORT of Project Number EVK1-CT-2001-00167, Computer Aided Rehabilitation of Sewer networks (CARE-S), Palermo-Bologna, 2003. 415 p.
98. Шлегель Г. Общая микробиология. М.: Мир, 1987. 566 с.
99. Иванов М.В. Эволюция глобального биогеохимического цикла серы. М., 1989. 199 с.
100. Каравайко Г.И. Микроорганизмы и их роль в биогеотехнологии металлов. М.: Центр международных проектов ГКНТ. 1989. С. 11–49.
101. Вредные химические вещества. Неорганические соединения V-VIII групп: справ. изд.: под ред. Филова В.А. Л.: Химия, 1989. 592 с.
102. Приймання стічних вод підприємств у міську систему каналізації. Інформаційно-аналітичний збірник (спецвипуск). К.: Державний комітет України з питань житлово-комунального господарства. 2002. 76 с.
103. Analysis of H₂S – incidents in geothermal and other industries. Preliminary analysis of data. OECD WGCA Steering Group, Geothermal H₂S-incidents, Sept. 2009. 52 p.
104. Guidotti T.L. Hydrogen Sulfide: Advances in Understanding Human Toxicity. *International Journal of Toxicology*, 2016. September 15. P. 1–13.
105. Правила технічної експлуатації систем водопостачання та водовідведення населених пунктів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-95>
106. Правила технічної експлуатації та ремонту каналізаційних колекторів діаметром більше 1500 мм. УкркомунНДІпроект, ХІБІ. Харків: УкркомунНДІпроект, 1991. 20 с.
107. SooLim J., Kim J., Friedman J. et al. SewerSnort: A drifting sensor for in situ Wastewater Collection System gas monitoring. *Ad Hoc Networks*, 2013, Vol. 11, № 4, p. 1456–1471.
108. Временная методика расчета количества загрязняющих веществ, выделяющихся от неорганизованных источников станций аэрации бытовых сточных вод. М.: МОСВОДОКАНАЛНИИПРОЕКТ, 1994. 11 с.
109. Jiang J., Kaye R. Sampling techniques for odour measurement. *Odour in Wastewater Treatment. Measurement, Modeling and Control*. London: IWA Publishing, 2001. P. 214–231.
110. Liang M.T., Qu W., Liang C.-H. Mathematical modeling and prediction method of concrete carbonation and its applications. *Journal of Marine Science and Technology*, 2002. Vol. 10. №. 2. P. 128–135.

111. Basista M., Weglewski W. Micromechanical modelling of sulphate corrosion in concrete: influence of ettringite forming reaction. *Theoretical and Applied Mechanics*, 2008. Vol. 35. № 1-3. P. 29–52.
112. Lahav O., Sagiv A., Friedler E. A different approach for predicting H₂S(g) emission rates in gravity sewers. *Water Research*, 2006. № 40. P. 259-266.
113. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Tanaka N. An integrated aerobic/anaerobic approach for prediction of sulfide formation in sewers. *Water Science and Technology*, IWA Publishing, 2000. Vol. 41. № 6. P. 107–115.
114. Nielsen A., Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J. Kinetics and stoichiometry of sulfide oxidation by sewer biofilms. *Water Research*, 2005. Vol. 39. № 17. P. 4119–4125.
115. Vavilin V.A., Vasiliev V.B., Rytov S.V., Ponomarev A.V. Modelling ammonia and hydrogen sulfide inhibition in anaerobic digestion. *Water Research*, 1995. № 29. P. 827–835.
116. Yongsiri C., Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J. Hydrogen sulfide emission in sewer networks: a two-phase modeling approach to the sulfur cycle. *Water Science and Technology*, 2004. Vol. 50. № 4. P. 161–168.
117. Nielsen A.H., Yongsiri C., Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J. Simulation of sulfide buildup in wastewater and atmosphere of sewer networks. *Water Science and Technology*, 2005. Vol. 52. № 3. P. 201–208.
118. Tsukasa I., Satoshi O., Hisashi S., Yoshimasa W. Successional Development of Sulfate-Reducing Bacterial Populations and Their Activities in a Wastewater Biofilm Growing under Microaerophilic Conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002. Vol. 68. № 3. P. 1392–1402.
119. Łagód G., Sobczuk H. Modelowanie wpływu napełnienia kolektora kanalizacji grawitacyjnej na przebieg tlenowych procesów biodegradacji ścieków (Influence of flow parameters on aerobic biodegradation of pollutants in sewer system). *Proceedings of ECOpole*, 2007. Vol. 1. № 1/2. P. 181–186.
120. Yongsiri C., Vollertsen J., Hvitved-Jacobsen T. Influence of wastewater constituents on hydrogen sulfide emission in sewer networks. *ASCE (American Society of Civil Engineers), Journal of Environmental Engineering*, 2005. Vol. 131. № 12. P. 1676–1683.
121. Гусев Б.В., Файвусович А.С., Степанова В.Ф., Розенталь Н.К. Математическая модель коррозии бетонов в жидких средах. *Известия вузов. Строительство*, 1998. № 4–5. С. 56–60.
122. Левченко В.Н., Левченко Д.В., Заруба А.В., Кельман Е.И. Статистические данные о глубине нейтрализации бетона в железобетонных конструкциях. *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*, 2009. Вип. 5 (79). С. 40–42.
123. Полак А.Ф., Хабибулин Р.Г., Яковлев В.В., Латыпов В.М. Обобщенная математическая модель коррозии бетона в агрессивных жидких средах. *Бетон и железобетон*. 1981. № 9. С. 44–45.
124. Alani A.M., Faramarzi A. Predicting the Probability of Failure of Cementitious Sewer Pipes Using Stochastic Finite Element Method. *International*

Journal of Environmental Research and Public Health, 2015. № 12. P. 6641–6656.

125. Юрченко В.А., Пилиграмм С.С., Зеленский Б.К., Бригада Е.В. Методология комплексной диагностики и прогноза надежности бетонных сетей водоотведения // Общие тематические сообщения, выступления и рекомендации Международного практического семинара «Интеграция в Европейский Союз через экологические форму общественных инициатив» (EFSI-2005), Харьков 25 октября 2005 г., Харьков. 2005. С. 51–53.

126. Патент № 84931 МПК 2006 G01F 23/28 України. Пристрій для визначення параметрів стану споруд із бетону, які зазнають впливу сірчаноокислотної агресії "Корозиметр бетону" / В.А. Юрченко, І.В. Корінько, В.Г. Михайленко, О.М. Коваленко, С.С. Піліграм, Б.К. Зеленський, О.В. Бригада, П.І. Онацький, Д.Є. Борісевич. а 200613363. Заявл. 18.12.2006. Опубл. 25.06.2008. Бюл. № 12. 8 с.

127. Юрченко В.А., Пилиграмм С.С., Зеленский Б.К., Онацкий П.И., Бригада Е.В. Методология комплексной неразрушающей диагностики надежности бетонных сетей водоотведения: сб. науч. праць XIV міжнар. наук-практ. конф. «Екологічні проблеми водного та повітряного басейнів. Утилізація відходів». Харків: УкрВОДГЕО, 2006. С. 219–222.

128. Попов Л.Н. Лабораторные испытания строительных материалов и изделий. М.: Высшая школа, 1984. 116 с.

129. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении. Утверждены Харьковским проектным и научно-исследовательским институтом (Промстройниипроект) Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1990. 38 с.

130. СТ СЭВ 4421-83. Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Электрохимический метод испытаний. Группа Ж09. Утвержден Постоянной Комиссией по сотрудничеству в области стандартизации Дрезден, декабрь 1983 г. 9 с.

131. Бейтс Р. Определение pH. Теория и практика. Л., Химия, 1972. 400 с.

132. Герцрикен С.Д., Дехтяр И.Я. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. М.: Гос. изд-во физ-мат. литературы, 1960. 564 с.

133. Юрченко В.А., Бригада Е.В., Смирнов А.В. Прогнозный расчет надежности и экологической безопасности бетонных сооружений водоотведения: збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету, 2008. № 81. 117–122.

134. Юрченко В.А., Бригада Е.В., Смирнов А.В. Экспериментальное установление констант для расчета надежности бетонных сооружений водоотведения: сб. науч. тр. XVI междунар. научно-техн. конф. «Экологическая и техногенная безопасность. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов» (9–13 июня 2008 г., Бердянск). Харьков, УкрВОДГЕО, 2008. С. 215–219.

135. Юрченко В.А., Бригада Е.В. Экспериментальное определение коэффициента диффузии протонов в бетоне при биогенной серноокислотной агрессии: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Эффективные материалы, технологии, машины и оборудование для строительства и эксплуатации современных транспортных сооружений» (3–4 декабря 2009 г. Белгород). БГТУ. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова, 2009. С. 53–58.

136. Коринько И.В., Юрченко В.А., Бригада Е.В. Влияние подтопления участков канализационных сетей транспортируемыми стоками на эксплуатационную долговечность бетонных трубопроводов. *Науковий вісник будівництва*. 2008. Вип. 49. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. С. 87–91.

137. Бригада Е.В. Мониторинг показателей эксплуатации водоотводящих сооружений из железобетона: дисс. кандидата техн. наук: 05.23.04 / Бригада Елена Владимировна. ХНУСА. Харьков, 2013. 168 с.

138. Wu L., Hu Ch., Liu W.V. The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel - A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, 2018. Canada. *Sustainability*. 10 (2). 517 p.

139. Vasil'ev V., Jung D., Hatrait L. etc. Emission of hydrogen sulfide at a water fall in sewer: study of main factors affecting H₂S emission and modelling approaches. *Water Science & Technology*, 2017. № 76 (10). P. 2753–2763.

140. Carrera L., Springer F., Lipeme-Kouyi G., Buffiere P. A review of sulfide emissions in sewer networks: overall approach and systemic modeling. *Water & Science Technology*, 2016. № 73 (6). P. 1231–1242.

141. Wells T., Melchers R.E. An observation-based model for corrosion of concrete sewers under aggressive conditions. *Cement and Concrete Research*, 2014. № 61-62. P. 1–10.

142. Юрченко В.О., Бригада О.В., Лебедева О.С. Визначення середньорічної концентрації сірководню в каналізаційних трубопроводах та в газоподібних викидах з них в атмосферне повітря. *Екологічна безпека та природокористування*, № 3-4 (24), 2017. С. 29–38.

143. Iurchenko V., Sierohlazov V., Melnikova O., Bryhada O. etc. Hydrogen Sulphide in Industrial Enterprises Water Management Infrastructure - The Factor of Chemical and Microbiological Corrosion Concrete Degradation of Water Facilities / Problems of Emergency Situations: Materials and Technologies II, Materials Science Forum, 2021, Vol. 1038, P. 401–406.

144. Вавилин В.А., Васильев В.Б., Рытов С.В. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов. М.: Наука, 1993. 208 с.

145. Вавилин В.А. Время оборота биомассы и деструкция органического вещества в системах биологической очистки АН СССР институт водных проблем. М.: Наука, 1986. 120 с.

146. Васильев В.Б., Вавилин В.А., Рытов С.В., Пономарев А.В. Имитационная модель анаэробного разложения органических веществ сообществом микроорганизмов. *Водные Ресурсы*, 1993. № 6. С. 714–725.

147. Голубовская Э.К. Биологические очистки сточных вод. М.: Высшая школа, 1978. 186 с.
148. Яковлев С.В., Карюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат 1980. 200 с.
149. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1978. 119 с.
150. Vollertsen J., Hvitved-Jacobsen T., Ujang Z., Talib S.A. Integrated design of sewers and wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 2002. Vol. 46. № 9. P. 11–20.
151. Sakrabani R., Vollertsen J., Ashley R.M., Hvitved-Jacobsen T. Biodegradability of organic matter associated with sewer sediments during first flush. *Science of the total environment*, 2009. Vol. 407. № 8. P. 2989–2995.
152. Vollertsen J. Report D6. Model testing and evaluation. 2005. Aalborg. 75 p.
153. Vollertsen J., Nielsen A., Jensen H., Hvitved-Jacobsen T. Modeling the formation and fate of odorous substances in collection systems. [*Water Environ. Res.*](#), 2008. Vol. 80. № 2. P. 118–126.
154. Tanaka N., Hvitved-Jacobsen T., Horie T. Transformations of carbon and sulfur wastewater components under aerobic-anaerobic transient conditions in sewer systems. *Water Environ. Res.*, 2000. Vol. 72. № 6. p. 651–664.
155. Eckenfelder W.W.-Jr., Ford D.L. Water Pollution control. 1970, Pemberton Press, Austing. 269 p.
156. McKinney R.E. Mathematics of Complete Mixing Activated Sludge. *J. Sanit. Eng. Div. ASCE*, 1978. Vol. 88. № 3. P. 87–113.
157. Lawrence A.W. Unified basis of biological treatment design and operation / A.W. Lawrence, P.L. Mc Carty. *J. Sanit. Eng. Div. ASCE*, 1970. Vol. 96. № 3. P. 757.
158. Vavilin V.A., Rytov S.V., Lokshina L.Ya. A description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter. *Biores. Technol.*, 1996. № 56. P. 229–237.
159. Henze M. Activated sludge model N 1. IAWPRC Task Group Mathematical Modeling for design and operation of biological waste water treatment. 1986. Denmark. 54 p.
160. Vollertsen J., Revilla N., Hvitved-Jacobsen T., Nielsen A.H. Modeling Sulfides, pH and Hydrogen Sulfide Gas in the Sewers of San Francisco. *Water Environment Research*, 2015. Vol. 87, No. 11. P. 1980–1989.
161. Hvitved-Jacobsen T. Sewer Processes – microbial and chemical process engineering of sewer networks. CRC Press, 2002. 237 p.
162. Юрченко В.А., Архипов О.В., Бригада Е.В. Моделирование процесса эмиссии сероводорода в самотечных канализационных коллекторах: сб. науч. тр. XVIII (ежегодной) междунар. научно-техн. конф. «Экологическая и техногенная безопасность. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утили-

зация отходов» (7-11 июня 2010 г., Бердянск.). Харьков, УкрВОДГЕО. 2010. С. 279–286.

163. Юрченко В.А., Бригада Е.В. Кинетические характеристики микробиологической коррозии бетона в сетях водоотведения. *Вода и экология. Проблемы и решения*, 2014. № 1 (57). С. 51–61.

164. Юрченко В.А., Архипов О.В., Бригада Е.В. Кинетика биогенной коррозии бетона в канализационных сетях. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 76 с.

165. Коваленко А.Н., Юрченко В.А., Коваленко А.В., Бригада Е.В., Лебедева Е.С. Образование сероводорода – проблема эксплуатационной надежности и экологической безопасности водоотведения. *Науковий вісник будівництва*. 2014. Вип. 77. Харків: ХНУБА, ХОТВ, АБУ. С. 218–223.

166. Бригада Е.В. Методи кількісної оцінки концентрації сірководню в підсклепінневому просторі каналізаційних колекторів. *Науковий вісник будівництва*, 2015. Вип. 2 (80). Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. С. 187–190.

167. Юрченко В.О., Лебедева О.С., Бригада О.В. Визначення середньорічної концентрації сірководню в каналізаційних трубопроводах та в газоподібних викидах з них в атмосферне повітря. *Екологічна безпека та природокористування*, № 3–4 (24), 2017. С. 29–38.

168. Усык А.А., Деркач И.Л., Шишкин Э.А. Исследование процесса массопереноса сероводорода в системе «газ-жидкость». *Коммунальное хозяйство городов*, 2010. № 93. С. 414–421.

169. Molder E., Tenno T., Mashirin A. The Effect of Surfactants on Oxygen Mass-Transfer Through the Air-Water Interface. *Environmental Science & Pollution Research*, 2005. Vol. 12, № 2. P. 66–70.

170. Невилль А.М. Свойства бетона. М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. 343 с.

171. Файнер М.Ш. Новые закономерности в бетоневедении и их практическое приложение. К.: Наукова думка, 2001. 448 с.

172. Юрченко В.А., Бригада Е.В. Инструментальные методы количественной оценки накопления сероводорода в атмосфере подсводного пространства канализационных коллекторов: сб. науч. тр. XIX (ежегодной) междунар. научно-техн. конф.: «Экологическая и техногенная безопасность. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов» (7-11 июня 2011 г., Бердянск). Харьков: УкрВОДГЕО. 2011. С.470–475.

173. Юрченко В.А. Методы количественной оценки среднегодовой концентрации сероводорода в атмосфере подсводного пространства канализационных коллекторов: сб. докл. междунар. научно-практ. конф. «Экология – образование, наука, промышленность и здоровье» (15-18 ноября 2011, Белгород). Изд-во БГТУ, 2011. Ч. 1. С. 285–287.

174. Woyciechowski P., Łukowski P., Szmigiera E., Adamczewski G. etc. Concrete corrosion in a wastewater treatment plant – A comprehensive case study. *Construction and Building Material*, 2021. Vol. 303. P. 1–15.

175. Sopov V., Danchenko J., Latorez E. Assess the Effectiveness of protective Concrete coatings of microbiological sulfuric acid Aggression. E3S Web of Conferences 97, 2019. P. 1–6.

176. Юрченко В.А., Ефанова В.В., Бригада Е.В. Защита бетона от биогенной сернокислотной агрессии в сетях водоотведения покрытием барьерного типа VMX-Базальт: зб. наук. праць XIV міжнар. наук-практ. конф. «Екологічні проблеми водного та повітряного басейнів. Утилізація відходів». Харків: УкрВОДГЕО, 2006. С. 208–215.

177. Юрченко В.А., Бригада Е.В. Расчет эксплуатационных характеристик бетона, подвергающегося биогенной сернокислотной агрессии в канализационных сетях: материалы международной научно-практической конференции (28-29 октября 2015 г.) «Эффективные технологические решения в строительстве с использованием бетоном нового поколения». Харьков: ХНУСА, 2015. С. 102–106.

178. Iurchenko V., Lebedeva E., Brigada E. Environmental Safety of the Sewage Disposal by the Sewerage Pipelines. *Procedia Engineering*, 2016. Volume 134. P. 181–186.

179. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text>

180. Статистичні дані виробничого травматизму за добу (2018-2019): веб-сайт Державної служби України з питань праці. URL: <http://dsp.gov.ua/statystychni-dani-vyrobnychoho-travmatyzmu-za-dobu-2018/>

181. ЧП возле мемориала: погибли четверо коммунальщиков. Медиа-Порт. URL: <https://www.mediaport.ua/chp-voze-memoriala-pogibli-chetvero-kommunalshchikov>

182. Смерть в канализации. В Донецкой области двое рабочих погибли при чистке канализации. URL: <https://www.ostro.org/donetsk/society/news/424186/>.

183. Держпраці ініціює проведення превентивних заходів безпеки під час експлуатації підприємств водопровідно-каналізаційного господарства. URL: <https://www.sop.com.ua/news/234-derzhpratsi-initsijuye-provedennja-preventivnikh>

184. Суспільне медіа. У Мелітополі під час службового завдання загинув слюсар міського КП "Водоканал". URL: <https://suspilne.media/152816-u-melitopoli-pid-cas-sluzbovogo-zavdanna-zaginu-v-slusar-miskogo-kp-vodokanal/>

185. В Индии попытка очистить канализацию в отеле привела к смерти семи человек. URL: <https://inshe.tv/proisshestviya/2019-06-16/445517/>.

186. Manual scavenging: death toll of Indian sewer cleaners revealed. URL: <https://www.theguardian.com/world/2018/sep/19/death-toll-of-indian-sewer-cleaners-revealed-for-first-time>

187. На Рівненщині загинув комунальник через отруйні викиди: ще двох госпіталізували. URL: <https://narodna-pravda.ua/2019/08/31/narivnenshchini-zagynuv-komunalnik-cherez-otrujni-vikidi-shhe-dvoh-gospitalizovali/>
188. Про стан травматизму, охорони праці та промислової безпеки на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства. URL: <http://rda-m-p.gov.ua/novini/pro-stan-travmatizmu-ohoroni-praci-ta-promislovoi-bezpeki-na-pidpriemstvah-vodoprovodnokanalizacijnogo-gospodarstva/>
189. Contractors Working in Sewer Found Dead, but Cause Unclear. URL: <https://www.usnews.com/news/best-states/pennsylvania/articles/2019-07-11/2-contractors-working-in-sewer-found-dead-but-cause-unclear>.
190. "Хотіли витягнути одного й непритомніли": що відомо про загибель комунальників у Харкові. URL: <https://suspilne.media/172399-na-kongresii-kulturi-u-lvovi-procitali-monologi-pro-najvazlivise-pamati-miska-barbari/>
191. Новини Тернополя. У каналізаційному колекторі на Тернопільщині знайшли тіла двох чоловіків. URL: <https://te.20minut.ua/Podii/u-kanalizatsiynomu-kolektori-na-ternopilschini-znayshli-tila-dvoh-chol-11312112.html>
192. Державна служба України з питань праці. Офіційний сайт. URL: <https://dsp.gov.ua/category/diyalnist/travmatyzm-statystyka-prychuny/>
193. Томаков М.В., Томаков В.И., Бокинов Д.В., Богатырев П.С.: Исследование причин и предупреждение гибели работников, обслуживающих системы канализации / *Известия Юго-Западного государственного университета*, 2012, № 6 (45), С. 111–118.
194. Бригада О.В. Аналіз нещасних випадків на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства: матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (21–22 листопада 2019 р.). Харків: НУЦЗ України С. 171–173.
195. Best Practices to Guard Against Hydrogen Sulfide in the Workplace. URL: <https://www.totalsafety.com/wp-content/uploads/2016/09/Best-Practices-to-Guard-Against-Hydrogen-Sulfide-in-the-Workplace.pdf>.
196. Офіційний сайт OSHA. URL: <https://www.osha.gov/>.
197. Hydrogen Sulfide Awareness Program. Winger Companies Safety & Health Manual, 2017. 8 p.
198. Toxicological review of hydrogen sulfide. In Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, 2003. 74 p.
199. Ambient Air Guidelines for Hydrogen Sulfide, «Environmental & Occupational Health Program Division of Environmental Health Maine Center for Disease Control & Prevention Maine Department of Health & Human Services», 2006. 15 p.
200. Workplace Health and Safety. Bulletin. URL: <https://open.alberta.ca/dataset/91b7ed98-abc3-4267-a71b-304e68d11f78/resource/689ff88d-54a2-4d65-9d69-7e3103b67e07/download/whs-pub-ch029.pdf>

201. Hydrogen Sulfide Safe Work Practice (SWP). URL: [https://hssestorage.blob.core.windows.net/filescontainer/GoM/Documents/Hydrogen%20Sulfide%20\(H2S\).pdf](https://hssestorage.blob.core.windows.net/filescontainer/GoM/Documents/Hydrogen%20Sulfide%20(H2S).pdf).
202. Guidelines for Safely Entering and Cleaning Vessel Sewage Tanks. URL: https://www.osha.gov/Publications/OSHA_FS_3587.pdf.
203. Confined Spaces in Construction: Sewer Systems. URL: <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3789.pdf>.
204. Prevention of gas poisoning in drainage work, «Occupational Safety and Health Branch», Labour Department, 2007, 30 p.
205. Standard Operating Procedure (SOP) for Cleaning of Sewers and Septic Tanks. Central Public Health and Environmental Engineering Organization (CPHEEO). Ministry of Housing and Urban Affairs Government of India, 2018. 32 p.
206. Wastewater Treatment Plant Occupational Health and Safety Bulletin. URL: https://d3n8a8pro7vhm.cloudfront.net/cupebcvotes2014/pages/1551/attachments/original/1457451862/Wastewater_Treatment_Plant_-_CUPE_Occupational_Health_and_Safety_Bulletin.pdf?1457451862
207. Workplace Exposure Standard (WES) review. Hydrogen sulphide. New Zealand. Wellington, 2018. 28 p.
208. Guidotti T.L. Hydrogen Sulfide: Advances in Understanding Human Toxicity, «International Journal of Toxicology», 2016, p. 1–13.
209. Shafik S.A., Hanaaabdeltawadabdelmegeed, Saad A.M., Abd El Mohsen Abo Elnour R. Occupational Health Hazards among Workers in Sewage Treatment Plants in Beni-Suef Governorate. *Journal of Nursing and Health Science*, 2019. Vol. 8. Issue 1. Ver. I. P. 4–14.
210. Brown J. Health Hazard Manual: Wastewater Treatment Plant and Sewer Workers Nellie, Manuals and User Guides. Cornell University, 1997. 54 p.
211. Jaiswal A. Sewage Work and Occupational Health Hazards: An Anthropological Insight. *Archaeology & Anthropology: Open Access*, 2018, Vol. 2, Issue 3, p. 211–217.
212. Sewerage manual. Key Planning Issues and Gravity Collection System. Drainage services department. Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2013. 107 p.
213. Jin P., Gu Y., Shi X., Yang W. Non-negligible greenhouse gases from urban sewer system. *Biotechnology for Biofuels*, 2019. 12:100. P. 1–11.
214. Hydrogen Sulfide. Health and safety fact sheet. *Cupe health & safety*. URL: <https://cupe.ca/hydrogen-sulfide>.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Ліцензія: Наказ МОН України від 17.02.2017 № 33-л

Навчальний заклад вищої освіти готує фахівців для підрозділів ДСНС України та підприємств усіх форм власності.

Студенти та курсанти мають можливість навчатись на кафедрі військової підготовки університету.

Спеціальність	Освітня програма	Інформація за телефонами
ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА	• Пожежна безпека	Факультет пожежної безпеки (057) 707-34-80 +38-063-794-56-21 +38-050-211-77-33 +38-066-289-15-37 +38-093-740-06-18 +38-050-979-56-11
	• Аудит пожежної та техногенної безпеки	
	• Пожежогашіння та аварійно-рятувальні роботи	Факультет оперативно-рятувальних сил +38-093-661-76-26 +38-093-520-24-48 +38-097-928-33-33
ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ	• Радіаційний та хімічний захист	
ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА	• Цивільний захист	Факультет цивільного захисту +38-099-620-10-25 +38-093-965-71-88 +38-095-825-79-70 +38-093-312-35-41
	• Інженерне забезпечення саперних, піротехнічних та вибухових робіт	
ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА	• Охорона праці	Факультет техногенно-екологічної безпеки
ЕКОЛОГІЯ	• Екологічна безпека	(057) 707-34-31
ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	• Техногенно-екологічна безпека	+38-067-422-96-63 +38-063-772-91-75
ПСИХОЛОГІЯ	• Екстремальна та кризова психологія	Соціально-психологічний факультет: (057) 707-34-60
	• Робота з персоналом	+38-063-164-17-96 +38-067-475-56-97
ТУРИЗМ	• Туризм	Навчально-науково-виробничий центр +38-057-707-14-31 +38-066-91-44-441 +38-050-243-25-51

З правилами прийому до Національного університету цивільного захисту України можна ознайомитись на офіційному сайті університету www.nuczu.edu.ua

Наша адреса: Україна, 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

E-mail: post@nuczu.edu.ua www.nuczu.edu.ua



Наукове видання

Бригада Олена Володимирівна

**ШЛЯХИ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ
НА БЕТОННИХ СПОРУДАХ ВОДОВІДВЕДЕННЯ**

Монографія

Дизайн обкладинки - Єлизавета Полуянова

Сектор редакційно-видавничої діяльності
Національного університету цивільного захисту України
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

www.nuczu.edu.ua

СТИЛЬ · [®]
ІЗДАТ
Д Р У К А Р Н Я
www.stil-izdat.com

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 7,67. Тир. 100 прим. Зам. 874-22.

Видавець та виготовлювач ФОП Бровін О.В.

61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (066) 822-71-30

Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру

видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

