

В.О. ЮРЧЕНКО, доктор технічних наук
О.С. ЛЕБЕДЄВА, кандидат технічних наук
Харківський національний університет будівництва та архітектури
О.В. БРИГАДА, кандидат технічних наук
Національний університет цивільного захисту України
ІВАНІН П.С.
Харківський національний університет будівництва та архітектури,

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СПОРУД ВОДОВІДВЕДЕННЯ

Встановлено, що процеси мікробіологічної сульфатредукції, які утворюють H_2S в каналізаційних мережах, відбуваються переважно в біоплівці, іммобілізованій в лотковій частині трубопроводів. Розроблено метод визначення середньорічної концентрації H_2S в атмосфері каналізаційних мереж. Запропоновано методуку визначення класу екологічної небезпеки та експлуатаційної надійності окремої шахти/колодязя каналізаційних мереж.

Ключові слова: каналізаційні мережі, сірководень, експлуатаційна надійність, екологічна безпека, середньорічна концентрація сірководню, моніторинг.

Установлено, что процессы микробиологической сульфатредукции, которые образуют H_2S в канализационных сетях, происходят преимущественно в биопленке, иммобилизованной в лотковой части трубопроводов. Разработан метод определения среднегодовой концентрации H_2S в атмосфере канализационных сетей. Предложена методика определения класса опасности и эксплуатационной надежности отдельной шахты/колодца канализационных сетей.

Ключевые слова: канализационные сети, сероводород, эксплуатационная надежность, экологическая безопасность, среднегодовая концентрация сероводорода, мониторинг.

It was determined that microbiological sulfatereduction processes that form H_2S in sewerage networks occur predominantly in a biofilm immobilized in the trap of the pipelines. There was developed a method of determination of average annual H_2S concentration in the sewerage networks atmosphere. There was proposed a method of determination of the environmental hazard class and operational reliability of a separate shaft/wells of sewerage networks.

Keywords: sewerage networks, hydrogen sulfide, operational reliability, environmental safety, average annual concentration of hydrogen sulfide, monitoring.

Вступ. Каналізаційні мережі (КМ) та споруди очистки стічних вод є джерелами викидів ряду екологічно небезпечних, токсичних та маючих неприємних запах сполук – сірководню, меркаптану, метилмеркаптану, оксидів азоту, аміаку та ін. Особливу екологічну небезпеку за кратністю перевищення гранично-допустимих концентрацій (ГДК) в газоподібних викидах з КМ створює сірководень (речовина 2 класу небезпеки). Він до того ж ініціює розвиток на склепіневій частині бетонних трубопроводів біогенної сірчаноокисlotної корозії, яка кардинально зменшує експлуатаційну довговічність цих об'єктів. Маса сірководню, який надходить з КМ в міську атмосферу за рік, досягає 2,9...19,0 т, що можна порівняти з викидами промислових підприємств [1, 56; 2, 103]. Загазовані мережі часто є причиною нещасних випадків (отруєння сірководнем) обслуговуючого персоналу, а численні випадки біогенної сірчаноокисlotної корозії колекторів каналізації, яку ініціює накопичений в підсклепіневому просторі сірководень, в короткі терміни (4-10 років) здатне зруйнувати сотні тонн залізобетонних конструкцій.

Сірководень утворюється в стічних водах, що транспортуються каналізаційними мережами, внаслідок мікробіологічної сульфатредукції – відновлення сульфатів протонами органічних сполук, потім елюює в газоповітряне середовище підсклепінєвого простору трубопроводів, а з нього – в міську атмосферу [2, 22; 6, 42; 7, 50; 8, 7; 9, 99; 10, 19]. Служби експлуатації КМ потребують ефективної системи моніторингу, прогнозу та кількісного визначення концентрації сірководню в мережах для об'єктивної оцінки стану експлуатаційної надійності та екологічної безпеки окремих ділянок [2, 10; 5, 114; 8, 47].

Мета роботи – розробка методу об'єктивної оцінки усередненої концентрації сірководню в підсклепінєвому просторі КМ та системи моніторингу їх екологічної безпеки.

Об'єкти та методи досліджень. Експериментальні дослідження проводили в лабораторних умовах (моделювання процесів в лотковій частині каналізаційних трубопроводів) та на ділянках каналізаційних мереж м. Харкова.

Вимірювання концентрації сірководню в стічних водах, що транспортуються мережами, виконували по нормативним вимогам фотоколориметрично при взаємодії сірководню з сірчаноокислю сіллю діметілпарафенілендіаміна в присутності хлорного заліза [3, 911]. Мікробіологічні показники - концентрацію сапрофітів, гнильних бактерій, сульфатредукуючих, автотрофних тіонових (окислювальних S^{2-} та S^0) та міксотрофних тіонових, встановлювали за методиками, рекомендованими [4, 100].

Вимірювання концентрації сірководню в атмосфері підсклепінневого простору проводили за допомогою трьох газоаналізаторів: УГ-2, «Дозор», шахтного інтерферометра ШІ-11. Корозійні процеси в залізобетонних трубопроводах водовідведення досліджували в натурних умовах за допомогою корозиметра бетону – розробленого для оперативного неруйнуючого контролю стану залізобетонних споруд водовідведення [6, 43; 8, 52]. Пристрій дозволяє оперативно вимірювати рН конденсатної вологи на бетоні і з допомогою розроблених програм розраховувати швидкість корозії бетонних споруд. Корозиметр бетону сертифіковано в Національному науковому центрі «Інститут метрології» (м. Харків), № свідоцтва 5682. Для аналізу й статистичної обробки отриманих даних й при електронному картографуванні використовували програми Excel, MathCAD, Corel Draw.

Результати та обговорення. У водному середовищі споруд водовідведення можна виділити дві екологічні ніші:

– стічні води, що транспортуються. Видовий склад мікроорганізмів цієї ніші коливається в широких межах, так як і співвідношення між різними мікробними популяціями;

– біоплівки, іммобілізовані на поверхні лотка і, внаслідок цього, що розвиваються у відносно більш стабільних умовах. Видовий склад цієї ніші більш постійний. Саме ця ніша обумовлює домінуючі мікробіологічні перетворення компонентів стічних вод.

Порівняльні показники чисельності мікроорганізмів циклу сірки в стічних водах і біоплівці, встановлені при мікробіологічних дослідженнях, представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Чисельність мікроорганізмів кругобігів сірки в водних середовищах в лотковій частини колекторів

Мікробіоценози	Сапрофіти	Гнильні	Сульфатредукуючі	Тіонові
Стічних вод* в кол. 2	$2 \cdot 10^7$	$0,5 \cdot 10^7$	$0,5 \cdot 10^5$	10
Кол. 3	$3,0 \cdot 10^7$	10^7	10^4	10^2
Кол. 4	10^6	10^5	10^5	10
Кол. 5	10^5	10^3	10^3	0
Біоплівки** донної поверхні (лаб. мод.)	$(7,5 \dots 11,2) \cdot 10^7$	$(2,0 \dots 5,9) \cdot 10^6$	$(1,0 \dots 12) \cdot 10^8$	$0 \dots 10^2$

Умовні позначення * – кл/см³, ** – кл/г сух. речовини

Як видно, в стічних водах серед мікроорганізмів, що трансформують сірку, найбільш активно розвивалися гнильні бактерії і бактерії відновного етапу циклу сірки – сульфатредуктори. Тіонові бактерії, що окислюють відновлені сполуки сірки, в стічних водах розвивалися вкрай слабо. При інкубації проб стічних вод в лабораторії (в фізико-хімічних умовах,

аналогічних умовам на обстежених ділянках колекторів) сульфатредукція не відбувається. Цей результат узгоджується з даними зарубіжних авторів, які вважають, що процес активного утворення H_2S та інших газоподібних сполук в спорудах водовідведення обумовлений життєдіяльністю мікроорганізмів, що розвиваються не в водній товщі, а в осадах або біоплівці, які утворюються в лотковій частині трубопроводів. Імобілізовані на поверхні лотка мікробіоценози, які формуються шляхом автоселекції у відносно стабільних фізико-хімічних умовах, можна розглядати як специфічні або "аборигенні" для екосистем каналізаційних трубопроводів. Імобілізовані мікробіоценози мають більш стабільний склад і стійкі доміанти, а також мають ряд переваг для виживання в порівнянні з вільноплаваючими. Як видно з даних табл. 1, на відміну від водної фази в іммобілізованому мікробіоценозі стійко домінують сульфатредукуючі бактерії. До того ж в донних відкладеннях Eh нижче, ніж у водній товщі, і більш сприятливий для такого облігатно анаеробного процесу як сульфатредукція. Таким чином, анаеробні мікробіологічні процеси, що утворюють H_2S , відбуваються переважно в біоплівці або осадах, іммобілізованих в донній частині лотка. Картографування КМ м. Харкова за вмістом H_2S в стічних водах представлено на рис.1.

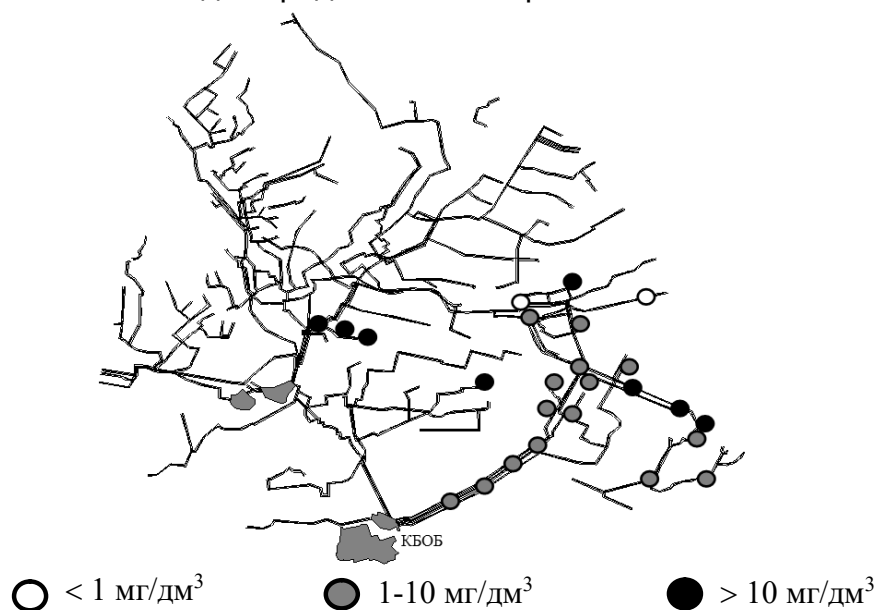


Рис. 1. Концентрація сірководню в стічних водах КМ м. Харкова

Як свідчать дані спостережень, концентрація сірководню в атмосфері підсклепіневого простору трубопроводів, значно змінюється не тільки протягом року, але й протягом доби (рис. 2).

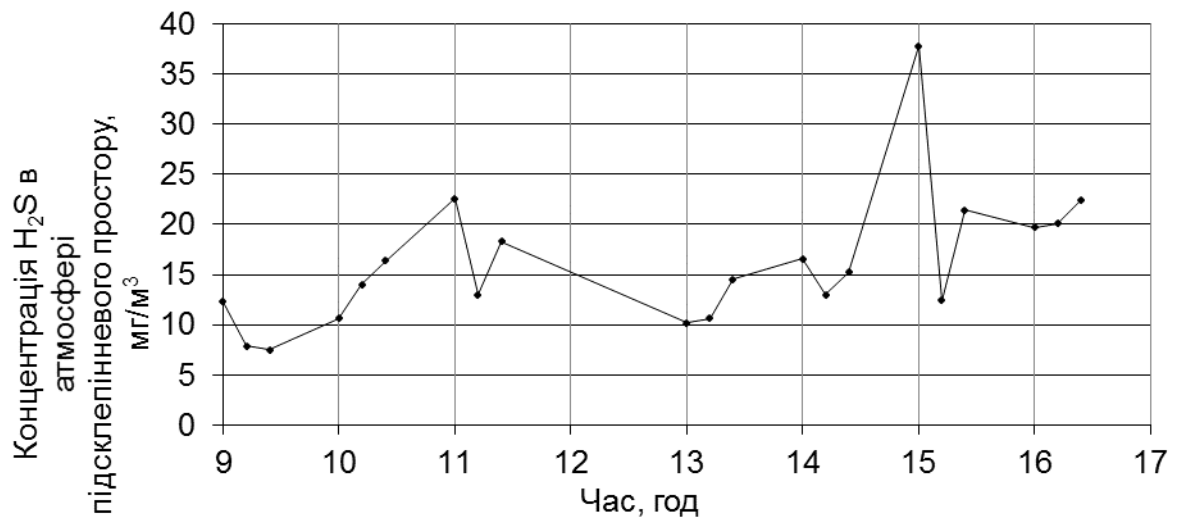


Рис. 2. Добові зміни концентрації сірководню в атмосфері підсклепінневого простору колектору

Так, протягом 6 год концентрація сірководню в атмосфері підсклепінневого простору колектору змінювалася від 7,9 до 37,8 мг/м³. Таким чином, поодинокі вимірювання концентрації сірководню в атмосфері трубопроводів водовідведення, що виконуються 1-2 рази на квартал, не відображають реальної ситуації накопичення сірководню на окремих ділянках, а, отже і концентрації сірководню в газоподібних викидах з КМ.

Пропонований метод розрахунку очікуваної концентрації H₂S ($C_{A\ H_2S}$) в атмосфері підсклепінневого простору залізобетонних каналізаційних трубопроводів, осередненої за великий проміжок часу (рік), базується на наступних положеннях:

- виміри, проведені за допомогою корозиметра бетону на бетоні, який уражений біогенною сірчаною кислотою, дозволяють визначити швидкість корозії ($V_{кор.}$) й об'єм прокородованого бетону ($V_{прокор.}$);
- маса прокородованого бетону пропорційна масі цементу ($m_{ц}$), а в ньому масі цементних гідратів (m_{CaO}), що прореагували з сірчаною кислотою, яка впливала на бетон протягом визначеного часу;
- весь сірководень (m_{H_2S}), що перейшов з атмосфери підсклепінневого простору в плівкову вологу на склепінні окислюється у сірчану кислоту (частина якої реагує з цементними гідратами і дифундує в товщу бетону $m_{H_2S\ диф.}$, а інша частина стікає склепінням в лоткову частину трубопроводу);
- потік сірководню на склепіння (Q_{H_2S}) пропорційний його концентрації в атмосфері підсклепінневого простору.

Алгоритм розрахунку очікуваної концентрації сірководню в атмосфері підсклепінневого простору залізобетонних каналізаційних трубопроводів, осередненої за великий проміжок часу, у вигляді схеми наведено на рис. 3.

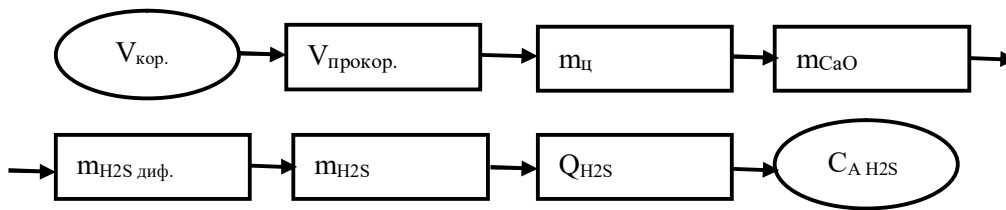


Рис. 3. Алгоритм розрахунку очікуваної концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору

Очікувану середньорічну концентрацію сірководню в атмосфері підсклепінного простору залізобетонних каналізаційних трубопроводів визначали за наступною підсумковою формулою (1):

$$C_{\text{A H}_2\text{S}} = \frac{V_{\text{кор.}} \cdot S_{\text{підск.пр.}} \cdot M_{\text{H}_2\text{S}} \cdot m_{\text{ц пит.}} \cdot \frac{p \cdot a \cdot b}{c \cdot k}}{M_{\text{CaO}} W_{\text{A}} \cdot \beta}, \quad (1)$$

де $V_{\text{кор.}}$ – швидкість корозії бетону, мм/рік; $S_{\text{підск.пр.}}$ – площа підсклепінного простору колектору, м^2 ; $M_{\text{H}_2\text{S}}$ і M_{CaO} – молекулярні маси H_2S і оксиду кальцію відповідно, кг; $m_{\text{ц пит.}}$ – маса цементу, що необхідна для приготування 1 м^3 бетону, кг; W_{A} – об'єм атмосфери підсклепінного простору, м^3 ; β – коефіцієнт масопереносу H_2S , дїб^{-1} ; p – частка CaO в цементі, що вступила в реакцію з H_2SO_4 на конкретній ділянці каналізаційного трубопроводу, долі, 0,6; a – перерахунковий коефіцієнт кг/мг , 10^6 ; b – коефіцієнт, який враховує стікання частини H_2SO_4 зі стін колектору в стічну воду, 1,2; c – перерахунковий коефіцієнт рік/дїб , 365; k – перерахунковий коефіцієнт мм/м , 1000.

Результати розрахунку концентрації H_2S в атмосфері ділянок каналізаційної мережі з допомогою розробленого методу представлено в табл. 2. Для оцінки їх відповідності реальній концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору наведено середньорічні дані інструментального вимірювання цього показника (табл. 2).

Таблиця 2

Результати розрахунків концентрації сірководню в атмосфері підсклепінного простору каналізаційних трубопроводів за розробленим методом

Ділянка відбору проби	Середньорічна концен-трація H_2S за даними хімічного аналізу, мг/м^3	Концентрація H_2S (мг/м^3), розрахована за розробленим методом	Відхилення від даних хімічного аналізу, %
Шахта № 1	198,0	209,0	7,78
Шахта №2	20,0	17,5	1,77
Шахта №3	30,6	33,2	1,84
Шахта №4	10,5	12,5	1,41
Шахта №5	62,4	60,1	1,63
Шахта №6	239,7	251,0	7,99

Як видно, використання корозиметра бетону дозволяє достатньо точно оцінити середньорічну концентрацію сірководню в атмосфері підсклепіневого простору залізобетонних каналізаційних трубопроводів, не вимагаючи при цьому вимірювання великої кількості параметрів.

Пропонована методика визначення класу екологічної небезпеки та експлуатаційної надійності окремої шахти/колодязя каналізаційних мереж базується на 4-ступеному ранжуванні кількісних характеристик 6 показників, що контролюються (табл.3).

Таблиця 3

Визначення класу екологічної небезпеки контрольної шахти/колодязя каналізаційних мереж

Показник	Клас			
	I	II	III	IV
Відстань до житлової забудови, м	≤ 50	100	150	≥ 150
Швидкість корозії, мм/рік	>10	5...10	1...5	< 1
Глибина дифузії біогенної H ₂ SO ₄ , мм	≥ 50	20...50	10...20	1...10
Концентрація H ₂ S в атмосфері підсклепіневого простору колектора, мг/м ³	>100	50...100	10...50	1...10
Концентрація H ₂ S на виході з шахти, мг/м ³	≥ 10	5...10	1...5	0,1...1
Концентрація H ₂ S в стічній воді, мг/дм ³	≥ 30	10...30	1...10	< 1

Створена комп'ютерна програма «Моніторинг газоподібних викидів з каналізаційних мереж» дозволяє візуалізувати ділянки мережі, що цікавить користувача, з усіма характеризуючими їх екологічними і експлуатаційними параметрами, встановлювати на підставі оброблених даних пріоритетність об'єктів водовідвідної мережі, де необхідне впровадження природоохоронних заходів, прогнозувати їх аварійність і експлуатаційну надійність та ін.

Висновки

1. Експериментально встановлено, що процеси мікробіологічної сульфатредукції, що утворюють H₂S, відбуваються переважно в біоплівці, іммобілізованій в донній частині лотка каналізаційних трубопроводів.
2. Концентрація H₂S в атмосфері КМ протягом доби може коливатися приблизно на 400 %.
3. На підставі даних експериментальних досліджень розроблено метод визначення середньорічної концентрації H₂S в атмосфері КМ.
4. Запропоновано методику визначення класу екологічної небезпеки та експлуатаційної надійності окремої шахти/колодязя КМ, яка базується на 4-ступеновому ранжуванні кількісних характеристик 6 показників, що контролюються.

Список літератури

1. *Гончаренко Д.Ф.* Эксплуатация, ремонт и восстановление сетей водоотведения: Монография / Д.Ф. Гончаренко. Харьков: Консум, 2008. 400 с.
2. *Дрозд Г.Я.* Канализационные трубопроводы: надежность, диагностика, санация / Г.Я. Дрозд, Н.И. Зотов, В.Н. Маслак. Донецк: ИЭП НАН Украины, 2008. 260 с.
3. *Унифицированные* методы исследования качества вод. Методы химического анализа вод. М.: СЭВ, 1987. 662 с.
4. *Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1989. 224 с.
5. *Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Urban Wastewater System: Future Assessment Framework and Methodology* / [A. A. Listowski, H. H. Ngo, W. S. Guo та ін.]. // *Journal of Water Sustainability*. 2011. №1. С. 113 –125.
6. *Методы* предотвращения распространения неприятных запахов от сооружений канализации / [А. Н. Пахомов, А. Р. Агевнин, Д. А. Данилович та ін.]. // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2006. №11. С. 40–47.
7. *Юрченко В.А.* Развитие научно-технологических основ эксплуатации сооружений канализации в условиях биохимического окисления неорганических соединений: дисс. докт. техн. наук: 05.23.04 / Юрченко Валентина Александровна. ХГТУСА. Харьков, 2007. 426 с.
8. *Лебедева О.С.* Захист атмосферного повітря від забруднення викидами сірководню з каналізаційних мереж: дис. кандидата техн. наук: 21.06.01/ Лебедева Олена Сергіївна. ХНУБА. Харків, 2017. 198 с.
9. *Бригада Е.В.* Мониторинг показателей эксплуатации водоотводящих со-оружений из железобетона: дисс. кандидата техн. наук: 05.23.04 / Бригада Елена Владимировна. ХНУСА. Харьков, 2013. 168 с.
10. *Данилович Д.А.* Определение выброса загрязняющих веществ в атмосферу с поверхности очистных сооружений / Д.А., Данилович, В.И. Скляр, В.А. Грачев // МГУП "Мосводоканал", Москва. 2010. 34 с.

Стаття надійшла до редакції 7.11.17