

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ІЗ ВОДИ СІРКОВОДНЮ ГІДРОЕЛЕВАТОРОМ

Олена ЗОРЯ<sup>1</sup>, Олексій ТЕРНОВЦЕВ<sup>2</sup>, Микола ЦИГАНОК<sup>3</sup>,

<sup>1,2,3</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup>zoriaolena@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4878-5164>

<sup>2</sup>aternovtsev@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1761-2444>

<sup>3</sup>cganok@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0002-4926-8537>

**Анотація.** Війна в Україні спричинила значний негативний вплив на водні ресурси країни. Це призвело до погіршення якості води, загрози питному водопостачанню та довгострокових екологічних проблем. Інтенсивне забруднення поверхневих джерел призводить до того, що для питного водопостачання все частіше виникає потреба використовувати підземні води. По своїм якісним показникам підземні води України різноманітні. В них присутні значно більше допустимих концентрацій заліза, марганцю, солі жорсткості та сірководень. Концентрації останнього в різних регіонах коливаються від 1 до 20 і більше мг/дм<sup>3</sup>, що значно перевищує допустимі нормативи для використання таких вод в питному водопостачанні. В південних районах України: Херсонській, Миколаївській та Одеській областях перевищення нормативного значення по сірководню складає більше ніж 100 разів. Існуючі методи очищення води від сірководню потребують будівництва високо коштовних споруд -аераторів з різноманітним завантаженням, біологічних реакторів та окислювальних фільтрів, потребуючих значних капітальних затрат на їх будівництво і експлуатацію. Окрім того, ці споруди не завжди дозволяють отримати воду необхідної якості. Таким чином, розробка нових методів і технологій, орієнтованих на інтенсифікацію очищення води від сірководню, а також різноманітних пристроїв та споруд для їх реалізації є актуальною проблемою, пов'язаною з постачанням населенню доброякісної води.



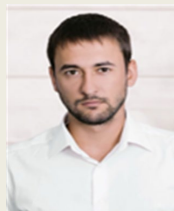
**Олена ЗОРЯ**

доцент кафедри водопостачання та водовідведення, к.т.н., доцент.



**Олексій ТЕРНОВЦЕВ**

доцент кафедри водопостачання та водовідведення, Керівник «Лабораторії води» КНУБА, к.т.н., доцент.



**Микола ЦИГАНОК**

Здобувач вищої освіти рівня PhD, кафедри водопостачання та водовідведення.

Представлено результати експериментальних досліджень очистки підземної води від сірководню аерацією з використанням гідроаератора. Визначено оптимальні параметри процесу видалення сірководню з води в залежності від його концентрації і рН води. Обґрунтовано і досліджено ефективність очистки води гідроаератором.

**Ключові слова.** Підземні води; сірководень; аерація; ефект очистки.

## ВСТУП

Національна доповідь «Цілі сталого розвитку: для України», представлена Урядом 15 вересня 2015 року, визначила базові показники для досягнення Цілей сталого розвитку (ЦСР). Шоста ціль Національної доповіді відноситься до якості питної води і має назву «Чиста вода та належні санітарні умови» і передбачає можливість забезпечення якісних послуг з постачання питної води, будівництво та реконструкцію систем централізованого водопостачання і водовідведення. Окрім того, передбачається зменшення скидання неочищених стічних вод і забезпечення впровадження інтегрованого управління водними ресурсами.

Війна в Україні має катастрофічний вплив на довкілля зокрема на водні ресурси та водну інфраструктуру, несе великі ризики для населення, сільського господарства та продовольчої безпеки [1].

На весні 2022 року ЮНІСЕФ повідомила, що через бойові дії в Україні 4.6 мільйона людей практично позбавлені доступу до питної води [2]. За даними Держкомінспекції України, за перші десять місяців війни країні завдано збитків на суму понад 55 мільярдів гривень внаслідок техногенного забруднення, засмічення і самовільного користування водними ресурсами [3]. Якість води поверхневих джерел, по різних показникам погіршилася більше, ніж в п'ять разів. Забруднення артезіанських вод, які раніше були законсервовані і вважалися стратегічним запасом держави-більш пролонгована [4]. Внаслідок бойових дій та руйнації ці свердловини забруднюються. Достатньо одного потрапляння забрудника, який розповсюджується на весь водоносний шар і робить воду непридатною до використання [5]. Підземний водообмін відбувається протягом сотень років, а поверхневий - протягом місяців.

Ще до початку військових дій відбувалося інтенсивне забруднення поверхневих джерел неочищеними або недостатньо очищеними промисловими стічними водами, побутовими відходами, добривами, що зми-

вається з сільськогосподарських угідь органічного і мінерального походження і тому для питного постачання збільшилося споживання підземних вод [6]. Так, наприклад, в місті Києві, при відсутності особливих проблем з постачанням питної води населенню, організовано бюветне водопостачання з використанням підземних водоносних горизонтів.

В підземних водах України значно перевищені гранично допустимі концентрації заліза, марганцю, солей жорсткості та сірководню. Сірководень утворюється, в основному, внаслідок відновних процесів у кислому безкисневому середовищі, в більшості при бактеріальному розкладанні і біохімічному окисленні органічних речовин природного походження (детрит, водорозчинна органіка, штучні корми, органічні добрива, мул та інші забруднення), в в результаті надходження органіки із поверхневими водами, забруднення хімікатами, побутово-промисловими стоками [7-9]. Сірководень - сильно нервовий газ, який навіть в невеликих кількостях негативно впливає на здоров'я людей і тварин, руйнує клітини крові та мозку [10-11]. Концентрації сірководню в різних регіонах знаходяться в межах від 1 до 20 і більше мг/дм<sup>3</sup>, що значно перевищує допустимі нормативи для використання таких вод для питного водопостачання. На півдні України, в Херсонській, Одеській, Миколаївській областях концентрація сірководню перебільшує більше ніж у 100 разів нормативні показники (для питної води норматив становить 0,05 мг/дм<sup>3</sup>).

Дуже часто сірководень виявляється в глибоких свердловинах, оскільки там мінімальний доступ кисню. Неприємний запах, за яким одразу можна визначити наявність сірководню, з'являється внаслідок життєдіяльності анаеробних бактерій. Вони перетворюють сполуки сірки (сульфати і сульфіді) в сірководень. Ідеальні умови для розмноження цих бактерій - безкисневе середовище [12]. Крім того, перевищення показників сірководню у воді зі свердловини або колодязя свідчить про те, що там активно йдуть процеси гниття і потрібно вживати

термінових заходів з очищення. Вода з підвищеним вмістом сірководню здатна привести в непридатність всю систему водопостачання, так як сірководень викликає сильну корозію металів. У поєднанні з залізом він утворює осад сірчистого заліза, труби дуже швидко забиваються.

В представленій статті досліджували підземні води з вмістом сірководню до 20мг/дм<sup>3</sup>.

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В природній воді сірчані сполуки знаходяться у вигляді молекулярно розчиненого HS<sup>-</sup> та S<sup>2-</sup>. Вміст у воді різних форм сірчаних сполук та їх пропорції напряму залежить від рН води [13, 14]. Наприклад, при рН > 9, H<sub>2</sub>S у воді практично відсутній, а вміст у воді HS<sup>-</sup> і S<sup>2-</sup> максимальний. При рН < 5 майже всі сірчані сполуки представлені сірководнем H<sub>2</sub>S [15,16,17].

Аналіз проведених нами літературних джерел показав, що в залежності від форми існування сірчаних сполук у воді методи її очистки можна поділити на три групи:

1. Вилучення H<sub>2</sub>S з води безреагентними методами [17].
2. Вилучення реагентними методами [18].
3. Вилучення біохімічними методами, в яких сірчані сполуки окислюються сіркобактеріями [19].

Існуючі методи мають свої переваги та недоліки. Фізичні - безреагентні методи вилучення з води сірководню, засновані на використанні протиттечійних дегазаторів або установок тривалої аерації, які потребують значних капітальних витрат на виготовлення і можуть бути рекомендовані для вод з вмістом сірководню до 3мг/дм<sup>3</sup>. Реагентні методи вилучення з води сірководню дозволяють очищати воду, що містить сірководень до 20мг/дм<sup>3</sup>. Біохімічні потребують створення спеціальних умов для життєдіяльності бактерій. До недоліків методів слід віднести заростання фільтруючого завантаження карбонатом кальцію внаслідок нестабільності води і ефективність методу значно.

Проаналізувавши всі викладені методи, можна зробити висновок про їх недосконалість і наявність майже в кожному певних недоліків. Деякі з методів потребують будівництва доволі великих споруд, інші потребують утримання реагентного господарства та складного обладнання [20,21].

З урахуванням актуальності питання -вилучення з води сірководню, мета нашої роботи полягає в розробці методів і технологій інтенсифікації процесів вилучення сірководню з підземних вод аерацією гідроелеватором.

Гідроелеватори (інжекційні пристрої) знайшли широке застосування у хімічній технології для процесів екстракції та адсорбції. Інжекційні пристрої використовують кінетичну енергію потоку, що з сопла в звуженої його частини. У результаті звуженої частини сопла створюється вакуум, що призводить до засмоктування рідини або повітря. Інжектори використовуються у вигляді окремого апарату, а також багатоступінчастої колони [18.22].

Використання енергії витікання рідини із сопла забезпечує високий ступінь турбулізації потоку після насадки, сприяючи виділенню газової фази. Швидкість закінчення рідини з насадки визначається величиною напору на вході в ежектор. Таким чином, можна вважати, що визначальними факторами поведінки рідини в ежекторі є гідродинамічні умови його роботи. Для однофазних систем, без урахування підсмоктування, зв'язок основних величин [17] визначається як:

$$= f \left[ \left( \frac{F_1}{F_2 - F_3} \right)^k, \left( \frac{d_1 - d_2}{L} \right), q_p, \gamma_n \right] \quad (1)$$

*F*1 – площа вихідного отвору сопла;

*F*2 – площа початкового перерізу камери змішування;

*F*3 – зовнішня площа перерізу сопла;

*d*1 – діаметр на вході у сопло;

*d*2 – діаметр на виході сопла.

$$Eu = f(Re, \Gamma) \quad (2)$$

де

$$Eu = \frac{\Delta h g}{W_C^2} \quad \text{– критерій Ейлера,}$$

$$Re = \frac{W_C d_{BH}}{\nu} \quad \text{– критерій Рейнольдса,}$$

$\Delta h$  - втрати напору, м;

$W_C$  - швидкість витікання рідини із сопла, м/с;

$d_{BH}$  - діаметр вихідного отвору сопла, м;

$\Gamma$  - геометричний комплекс.

Величина втрат енергії в струменевому апараті визначається режимом витікання рідини і геометричними показниками апарату. Під час підсмоктування ежектувальним струменем повітря або іншої рідини виникає двофазний потік. Оцінка кількості рідини, що підсмоктується, для різних рідин залежить від гідродинамічних характеристик пристрою. Поведінку ежекторів розглядають зазвичай у двох режимах:

- витікання робочої рідини без підсмоктування;
- витікання робочої рідини з підсмоктуванням другої рідини.

Перший режим за певних швидкостей витікання із сопла здатний призвести до кавітації. Для першого випадку встановлено [25], що в безкавітаційному режимі роботи задовольняється умова (3):

$$Eu \left[ \frac{L d_{BH}}{(d'_{BH})^2} \right]^{0,74} = \frac{73,5}{Re^{0,264}} \quad (3)$$

$Re < 14000$ , і для зони автомодалності  
 $Re > 14000$ :

$$Eu \left[ \frac{L d_{BH}}{(d'_{BH})^2} \right]^{0,74} = 1,85 \quad (4)$$

Слід зазначити, що у (2), (3), (4) прийманий критерій Ейлера, залежить від геометричного чинника, а у зоні до автомодалності процес залежить від критерію Рейнольдса. У роботах з гідромеханіки та масопередачі як визначальний критерій приймається критерій Ейлера для опису процесів,

що протікають в ежекторах. У дослідженнях, що належать до кавітації [22, 23, 25] як визначальний параметр приймається число кавітації  $k_i$ , практично аналог критерію Ейлера:

$$k_i = 2 Eu. \quad (5)$$

Враховуючи, що в нашому випадку розглядається, поряд з гідроелеватором – кавітатор, для одноманітності термінології при розгляді процесів у гідроелеваторі та кавітаторі як визначальну величину прийнято число кавітації  $k_i$ .

При вивченні впливу відносної кількості підсмоктуваної рідини і пов'язаного з ним перепаду тиску в ежекторі за рахунок робочої рідини, як остання прийнята вода, а як підсмоктується рідини в [22] розглядали рідини  $\rho_{ж} > \rho_v$  (чотирихлористий вуглець, бутілацетат).

Поведінка ежектора за невеликого підсосу рідини викликає невелике збільшення втрат тиску до певної межі, а потім незначне його зниження. Це пояснюється зміною ефекту вихроутворення під час підсосу рідини. Під час розширення робочого струменя, що витікає із сопла, відбувається підсмоктування рідини з інтенсивним вихроутворенням. Збільшення витрати робочої рідини веде до збільшення кількості рідини, що підсмоктується, і зменшення зони вихроутворення. Пропонується співвідношення, що визначає коефіцієнт підсмоктування залежно від низки факторів:

$$k \left( \frac{F_1}{F_2 - F_3} \right)^{0,5} \left( \frac{\gamma_n}{\gamma_p} \right)^{0,5} \left( \frac{d_1 - d_2}{L} \right) = 2,62 q_p^{-0,585} \quad (6)$$

Вираз (6) враховує співвідношення густин через відношення щільностей.

У цьому разі ежектор працює в досить широкому діапазоні підсмоктувань і, як показали проведені нами експерименти, цей діапазон становив 0 - 10 для різних значень числа кавітації. Підставою використання інжекційного апарату для видалення з води розчинених газів, зокрема сірководню, стало інтенсивне змішання робочої рідини з рідиною, що підсмоктується, з утворенням розвиненої поверхні фазового контакту за

відносно невеликий проміжок часу. Визначальною величиною слід визнати коефіцієнт підсмоктування. У наших дослідах для незмінних конструктивних параметрів апарата і за підсмоктування робочою рідиною (водою) повітря, залежність цього коефіцієнта або підсмоктування залежала від числа кавітації  $k_i$ , яке було прийняте як визначальний фактор.

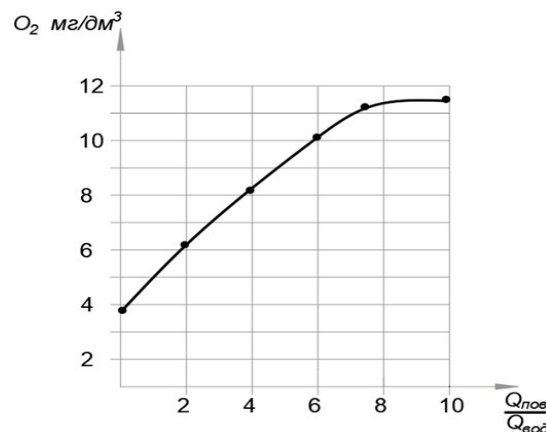
Процеси масопередачі в інжекційно-струменевих пристроях розглядалися в роботах з екстракції [23]. Показано, що за досить інтенсивного режиму витікання робочої рідини настає момент, коли кількість робочої рідини, що витікає, практично не впливає на ефективність підсмоктування і на ефективність турбулізації потоку. Дослідні дані з вивчення екстракційних здібностей ежекторних апаратів показали, що ефективність розділення для них порівняно з насадочними колонами, що працюють в аналогічних умовах, більша в 4 рази.

Як параметр, що характеризує зміну тиску в стислій зоні, використовувалася безрозмірна  $k_i = \frac{\Delta P}{\rho \frac{v^2}{2}}$  величина. Існуючі теоретичні розробки з видалення сірководню в дегазаторах враховують тільки перехід газу в атмосферу завдяки зміні парціального тиску

при створенні великої площі контакту між рідиною, що стікає по різній насадці, і навколишнім середовищем. Під час руху води в гідроелеваторі, після досягнення вакууму в стислій зоні, відбувається розрив суцільності потоку з утворенням емульсії вода - повітря. Площа поверхні контакту між водою і навколишнім середовищем створює насичення води киснем і перехід газу в навколишнє середовище за рахунок зміни парціального тиску газу. Отже, під час використання гідроелеватора відбуваються процеси, аналогічні процесам, що відбуваються в дегазаторах плівкового типу. Зміна вмісту у воді сірководню пов'язана як з його виділенням у повітря, так і з окисленням киснем повітря [24].

Для визначення вмісту кисню у воді внаслідок аерації проведено серію дослідів на водопровідній воді. Результати досліджень у вигляді графіка  $C_{O_2} = f\left(\frac{Q_{п о в}}{Q_{в о д}}\right)$  наведено на Рис. 1. Початковий вміст у воді кисню  $C_{O_2}$  становив 5.2 мг/дм<sup>3</sup>.

Збільшення вмісту кисню спостерігалось зі збільшенням  $\frac{Q_{п о в}}{Q_{в о д}}$  до 7,3, подальше збільшення  $\frac{Q_{п о в}}{Q_{в о д}}$  до 10 мало призвело до видимих змін.



**Рис. 1.** Зміна вмісту у воді кисню в залежності від  $\frac{Q_{п о в}}{Q_{в о д}}$ .

**Fig.1.** Change in oxygen content in water depending on  $\frac{Q_{п о в}}{Q_{в о д}}$

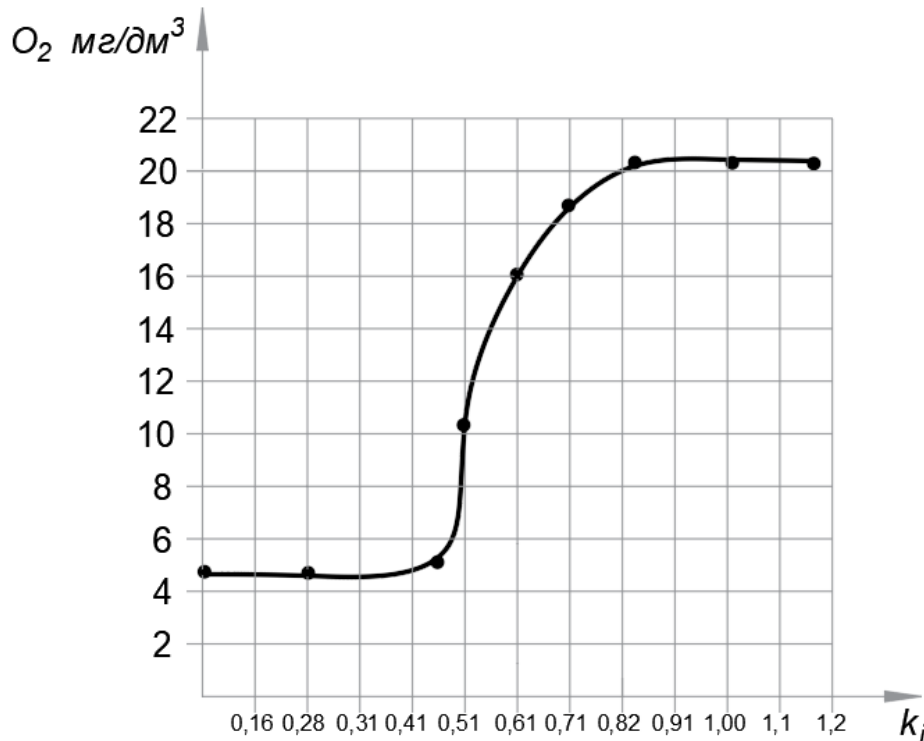
Гідроелеватором вдалося збільшити вміст у воді повітря до 20,6 мг/л. Кількість повітря, що підсмоктується водою, пов'я-

зана з параметром  $k_i$ . Обробка експериментальних даних щодо зміни вмісту у воді по-

вітря залежно від енергетичної характеристики потоку  $k_i$  дала змогу отримати співвідношення:

$$\left(\frac{Q_{\text{пов}}}{Q_{\text{вод}}}\right)^2 = 268k_i^2 - 126k_i - 4,5 \quad (7)$$

В дослідах із вимірювання кількості кисню у воді розраховували параметр  $k_i$ , зв'язок якого з киснем, що міститься у воді, наведено у вигляді графіка на рис. 2.



**Рис. 2.** Зміна вмісту у воді кисню залежно від  $k_i$ .  $^{\circ}k_i = 0,8$ ;  $\cdot k_i = 0,6$ ;  $\times k_i = 0,5$   
**Fig. 2.** Change in oxygen content in water depending on  $k_i$ .  $^{\circ}k_i = 0,8$ ;  $\cdot k_i = 0,6$ ;  $\times k_i = 0,5$

При зміні  $k_i$  від 0 до 0,46 - підсмоктування повітря відсутнє і вміст у воді кисню залишається постійним.

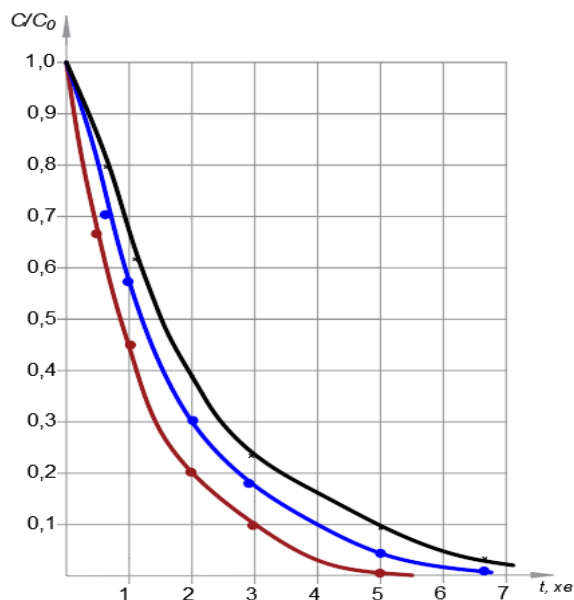
Вода, що містить сірководень, при обробці повітрям поводить інакше. У такій системі одночасно проходять процеси, що залежать від рН розчину. При величині рН до 8 основна частина сірководню знаходиться у вигляді газу. При рН 8 у воді практично відсутній сірководень, а основну частину складають сульфіди.

Визначення ефекту окислення сірководню повітрям проведено за рН = 8,5. І тут в розчині містяться сульфіди, а вміст сірководню вбирається у 4%, тобто можна вважати,

що зміна у воді сульфідів відбувається лише за рахунок їх окиснення киснем повітря.

Результати досліджень подано у вигляді графіка  $\frac{c}{c_0} = f(k_i)$ , рис. 3, тобто залежно від ступеня насичення розчину киснем повітря.

На графіках спостерігається зменшення часу обробки зі збільшенням параметра  $k_i$ . Константа швидкості окислення -  $k_2$ , в загальному вигляді має залежати від гідродинамічної характеристики потоку  $k_i$  і величини окисно-відновного потенціалу системи ( $Eh$ ), яка в свою чергу залежить від кількості підсмоктуваного повітря.



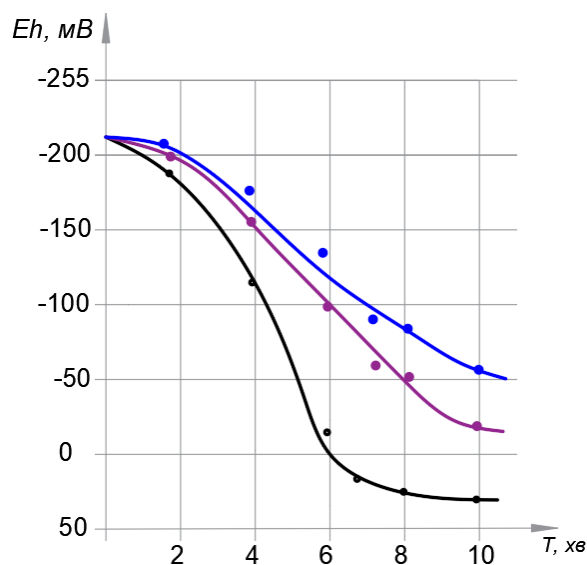
**Рис. 3.** Зміна вмісту у воді сірководню у часі  $C_0=5.4$  мг/л.

**Fig. 3.** Changes in the content of hydrogen sulfide in water over time  $C_0=5.4$  mg/l.

Прямі спостереження зміни окисно-відновного потенціалу системи залежно від  $k_i$  і часу, дали наступні значення константи швидкості окиснення рис. 4.

Дослідження окиснення сульфідів за допомогою гідроаератора показують, що при вмісті у воді сульфідів 5.4 мг/л і рН=8.5 вдається за допомогою гідроелеватора забезпечити їх окиснення за 6.5 хв.

У всіх дослідах на початковому етапі при  $T < 2$  хв, зміна окислювально-відновного потенціалу відбувається незначно, а потім зі зростанням часу, що характеризує швидкість окислення, відбувається значна зміна  $E_h$  системи пропорційна зміні  $k_i$ . Зі збільшенням останнього швидкість процесу зростає.



$$k_i = 0,8; \bullet k_i = 0,6; \bullet k_i = 0,5$$

**Рис. 4.** Зміна  $E_h$  залежно від часу  $C_0 = 5,4$  мг/л

**Fig.4.** Change in  $E_h$  depending on time  $C_0 = 5.4$  mg/l

Встановлено що  $k_i$  гідроелеватора має бути не менше 0,8, при меншому його значенні не вдається перейти в зону окисних потенціалів системи і, отже, не повністю провести процес очищення води від сірководню.

Видалення з води сірководню і сульфідів при  $pH < 8$  розглядався з урахуванням окислення і переходу газу в навколишнє середовище.

У дослідях використовувалися розчини з  $pH = 7.2$  та  $6.3$ , де вміст сірководню відповідно становить 54 та 87%.

Графіки наведені на рис. 5. для  $k_i = 0,8$  показують, що із зменшенням  $pH$  ефективність роботи гідроелеватора зростає.

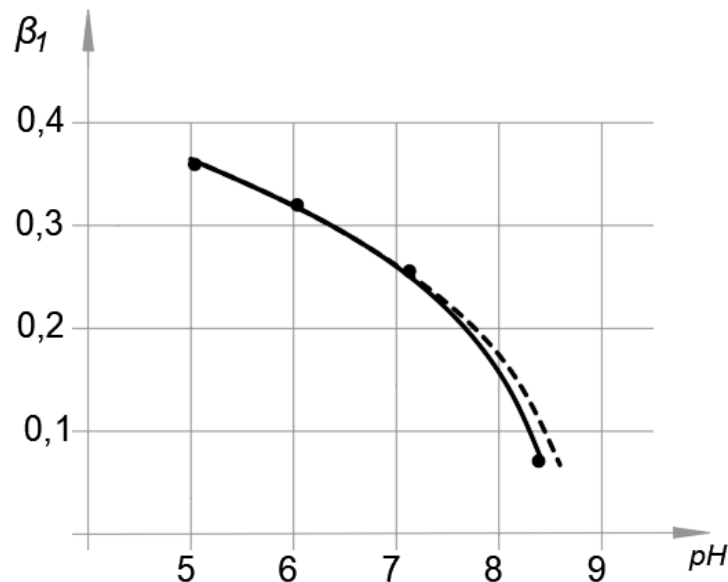


Рис 5. Зміна  $\beta_1$  залежно від  $pH$

Fig. 5. Change in  $\beta_1$  depending on  $pH$

Враховуючи, що зміна вмісту у воді сірководню тісно пов'язана з  $pH$  системи, а не тільки зі зміною гідродинамічного показника  $k_i$ , для постійного значення  $k_i = 0,8$  побудовано графіки зміни коефіцієнта десорбції  $\beta_1$ , що характеризує, в даному випадку, поведінку розчину в гідроелеваторі залежно від  $pH$  (рис. 5).

У діапазоні  $pH$ , що приймаються для питної води 5 – 8, при  $pH > 8$  десорбція газу відсутня, отримана емпірична залежність  $\beta_1 = f(pH)$ :  $\beta_1 = 0,41 - 6 \cdot 10^{-3} pH^{1,8}$

#### ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як показали результати наших досліджень, для використання гідроелеваторів з

коефіцієнтом, що характеризує витрати енергії в системі,  $k_i$  оптимальний режим роботи знаходиться в межах  $k_i = 0,6 - 0,8$ . Збільшення цієї величини веде до непродуктивного використання енергії, т.к. не збільшує вміст у воді кисню.

Гідроелеватори в якості пристрою для аераційного видалення з води сірководню можуть бути рекомендовані для вод із вмістом сірководню до 5 мг/дм<sup>3</sup>  $pH \approx 8$  зменшення  $pH$  води дозволяє дещо збільшити можливості гідроелеваторів пропорційно  $pH$  системи, але не більше, ніж до вмісту сірководню рівного 5,5 мг/л.

Подальші дослідження в цьому напрямку будуть стосуватись використання для очищення води явища кавітації, при якому відбуваються дуже швидкоплинні і високоенергетичні процеси.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Дячук М. Вода як джерело життя чи зародок війни: як крадіжка води окупантами впливає на водозабезпеченість України і Криму [Електронний ресурс]/ Марія Дячук//Екодія. - Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/voda-iak-dzerelo-zhutia.html>
2. **Water und fire** [Електронний ресурс] //UNICEF. - Режим доступу: <https://www.unicef.org/stories/water-under-fire>
3. **Право людини на воду та санітарію** [Електронний ресурс]: резолюція ООН від 28.07.2010 р. N 64/292. - Режим доступу: [https://digitallibrary.un.org/record/687002/files/A\\_RES\\_64\\_292-RU.pdf](https://digitallibrary.un.org/record/687002/files/A_RES_64_292-RU.pdf).
4. **Strokal V. & Kovpak A.** (2022). Military conflicts and water:consequences and risks. *Scientific Journal of "Ecological Sciences "*, 5(44). <http://www.ecoj.dea.kiev.ua/archives/2022/5/14.pdf>.
5. **Makarenko N.A., Strokal V.P., Berezniak Y.M., Pavliuk S.D.,Vagaliuk L.V, Kovpak A.V.** (2022) The war consequences on natural resources of Ukraine: analyses and methodologies. *Scientific reports of NULES of Ukraine, 2022(4(98))*: <http://journals.Nubia.edu.ua/index.php/Dopovid/article/view/16137>.
6. **Огляд року війни** для водних ресурсів України. ГО «Екологія-право-людина»URL: <http://epl.org.ua/announces/oglyad-roku-vijny-dlya-vodyh-resursiv-ukrayiny>
7. **Horn B., Richard's G.** Use of degradable, non-oxidising biocides and bio dispersants for the maintenance of capacity in nutrient injection wells. *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments. Water and Energy. 2010. V.13. Article 5.*
8. **Запольський А.К.** Водопостачання, водовідведення та якість води. -К.: Вища школа, 2005.-612с.
9. **Каталог водоочисного обладнання фірми «Деграмон» у 2-х томах . М.: Ін.літ.2005, Т.1. —344с.**
10. **Lukins V.W., Adams I.Q.** Summary of GAC research at several water utilities //AWWA Annu. Conf. (Dallas, Tex., June 10-14, 1984).-Denver, Colo, s.a., 1984.-279-294.
11. **Орлов В.О., Квартенко О.М., Мартинов С.Ю, Гордієнко Ю.І.** Знезалізнення підземних вод для питних цілей: монографія / під загальною редакцією В.О. Орлова. Рівне: Видавничий центр УДУВГП, 2004.-153с.
12. **Edwards S., Alharthi R. and Ghaly A.E.** Removal of Hydrogen Sulphide from Water *American Journal of Environmental Sciences* 7(4):2011, p.295-305.
13. **Lloyd D.** Hydrogen sulphide:clandestine microbial messenger. *Trends in Microbiology* 14:456-462.DOI: [10.1016/j.time.2006.08.003](https://doi.org/10.1016/j.time.2006.08.003)
14. **Li L, A .Hsu and P.K.More,** 2009. Actions and interactions of nitric oxide carbon monoxide and hydrogen sulphide in the cardiovascular systems and in inflammation -a tale of three gases. *Pharmacology and Therapeutics.* 123:386-400. DOI:[10.1016/j.phafma.thera.2009.05.005](https://doi.org/10.1016/j.phafma.thera.2009.05.005).
15. **Орлов В.О.** Очистка підземної води від сполук заліза та розчиненого сірководню за допомогою установки баштового типу з пінополістирольним фільтром./ Орлов В.О., Мартинов С.Ю, Трохимчук М.М. // Вісник НУВГП: Збір.наук.праць. Вип. 1(41).-Рівне, 2008.—С. 252-258.
16. **Патент України на винахід N 48339 А.** Спосіб одержання фільтруючого матеріалу для очищення води. *Терновцев В.О., Терновцев О.В., Зоря О.В. -Заявляє. 28.09.1998р. Опубліковано. 15.08.2002, Бюл. N8, 2002р.*
17. **Мельник Л.Г.** Економіка природокористування і еколого-економічні проблеми// *Механізм регулювання економіки/ Л.Г.Мельник, І.Б. Дехтярьова.-К:Наук. думка, 2012.-245с.*
18. **Ou H.W., Chou M.S. and Chang H.Y.** (2020) Removal of Hydrogen Sulphide from Biogas Using a Bubbling Tank Fed with Aerated Wastewater.*Aerosol Air Quality. Res.* 20: 643-653. <https://DOI.org/10.4209/aaqr.2019.12.0647>
19. **Слюзар А. В., Знак З.О. , Калімон Я.А., Буклів Р.Л.** Методи очищення і переробки сірководеньвмісних газів(огляд). *Voprosy khimii I kimicheskoi tehnologii, 2019,N.3, p.83-97. DOI:10.32434/0321-4095-2019-124-83-97.*
20. **Sobotta L., Ducom G., Germain P.** Adsorption of hydrogen sulphide (H<sub>2</sub>S) on zeolite (Z) : Retentionmechanism // *Chem.Eng.J.-2016-Vol.140.-p. 1390-1398.*
21. **Wang L., Cao B. , Wang Sh., Yan Q.** H<sub>2</sub>S catalyticoxidation on imperative activated carbon: *Experiment and modelling. Chem. Eng.J.-2006.-Vol.118.-N.3.-P.133-139.*
22. **Некоз О.І.** Кавітаційна технологія очищення стічних вод від токсичних речовин. / *О.І. Некоз, О. А. Литвиненко.Р. В. Логвінський//*

Вібрації в техніці та технологіях. -2012. - N2. - С. 112-115.

23. **Вашкурак У. Ю. Шевчук Л.Л.** Кавітаційне очищення стічних вод жиркомбінату від органічних забруднень в присутності газів різної природи. *Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2018, Випуск 1, номер 1. С. 105-110.

<https://doi.org/10.23939/ctas2018.01.105>

24. **Терновцев О.В.** Очистка воды від сірководню за допомогою окислювачів. // *Вісник Рівненського державного технічного університету*. - Вип. 2.-Р.-2000.-С. 143-146.

25. **Терновцев О.В.** Очистка воды від сірководню аерацією. // *Меліорація і водне господарство*. Вип. 87., -К:-Аграрна наука.-2001.-С.203-208.

## REFERENCES

1. **Diachuk M.** Voda yak dzherelo zhyttia chy zarodok viiny: yak kradizhka vody okupantamy vplyvaie na vodozabezpechenist Ukrainy i Krymu [Elektronnyi resurs]/ *Mariia Diachuk//Ekodiia*. - *Rezhym dostupu*: <https://ecoaction.org.ua/voda-ia-k-dzerelo-zhutia.html>

2. **Water und fire** [Elektronnyi resurs] // *UNICEF*. - *Режим доступу*: <https://www.unicef.org/stories/water-under-fire>

3. **Pravo liudyny na vodu** ta sanitariiu [Elektronnyi resurs]: rezoliutsiia OON vid 28.07.2010 r. N 64/292. - *Rezhym dostupu*: [https://digitallibrary.un.org/record/687002/files/A\\_RES\\_64\\_292-RU.pdf](https://digitallibrary.un.org/record/687002/files/A_RES_64_292-RU.pdf).

4. **Strokal V. & Kovpak A.** (2022). Military conflicts and water: consequences and risks. *Scientific Journal of "Ecological Sciences"*, 5(44). <http://www.ecoj.dea.kiev.ua/archives/2022/5/14.pdf>.

5. **Makarenko N.A., Strokal V.P., Bereznik Y.M., Pavliuk S.D., Vagaliuk L.V, Kovpak A.V.** (2022) The war consequences on natural resources of Ukraine: analyses and methodologies. *Scientific reports of NULES of Ukraine*, 2022(4(98)): <http://journals.Nubia.edu.ua/index.php/Dopovid/article/view/16137>.

6. **Ohliad roku viiny** dlia vodnykh resursiv Ukrainy. HO «Ekolohiia-pravo-liudyna» URL: <http://epl.org.ua/announces/oglyad-roku-vijny-dlya-vodyh-resursiv-ukrayiny>

7. **Horn B., Richard's G.** Use of degradable, non-oxidising biocides and bio dispersants for the

maintenance of capacity in nutrient injection wells. *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments. Water and Energy*. 2010. V.13. Article 5.

8. **Zapolskyi A.K.** Vodopostachannia, vodovidvedennia ta yakist vody. -К.: *Vyshcha shkola*, 2005.-612s.

9. **Kataloh vodochysnoho obladdnannia** firmy «Dehramon» u 2-kh tomakh . М.: *In.lit*.2005, T.1. —344s.

10. **Lukins B.W., Adams I.Q.** Summary of GAC research at several water utilities // *AWWA Annu. Conf. (Dallas, Tex., June 10-14, 1984)*.-Denver, Colo, s.a., 1984.-279-294.

11. **Orlov V.O., Kvarthenko O.M., Martynov S.Iu, Hordiienko Yu.I.** Znezalznennia pidzemnykh vod dlia pytnykh tsilei: monohrafiia / *pid zahalnoi redaktsiieiu V.O. Orlova*. Rivne: *Vydavnychiy tsentr UDUVHP*, 2004.-153c.

12. **Edwards S., Alharthi R. and Ghaly A.E.** Removal of Hydrogen Sulphide from Water *American Journal of Environmental Sciences* 7(4):2011, p.295-305.

13. **Lloyd D.** Hydrogen sulphide: clandestine microbial messenger. *Trends in Microbiology* 14:456-462. [DOI: 10.1016/j.time.2006.08.003](https://doi.org/10.1016/j.time.2006.08.003)

14. **Li L, A .Hsu and P.K.More**, 2009. Actions and interactions of nitric oxide carbon monoxide and hydrogen sulphide in the cardiovascular systems and in inflammation -a tale of three gases. *Pharmacology and Therapeutics*. 123:386-400. [DOI:10.1016/j.phafma.thera.2009.05.005](https://doi.org/10.1016/j.phafma.thera.2009.05.005).

15. **Orlov V.O.** Ochystka pidzemnoi vody vid spoluk zaliza ta rozchynenoho sirkovodniu za dopomohoiu ustanovky bashtovoho typu z pinopolistyrolnym filtrom. / *Orlov V.O., Martynov S.Iu, Trokhymchuk M.M.* // *Visnyk NUVHP: Zbir.nauk.prats. Vyp. 1(41)*.-Rivne, 2008.—S. 252-258.

16. **Patent Ukrainy na vynakhid N 48339 A.** Sposib oderzhannia filtruiuchoho materialu dlia ochyshchennia vody. *Ternovtsev V.O., Ternovtsev O.V., Zoria O.V.* -*Zaiavliaie*. 28.09.1998r. *Opublikovano*. 15.08.2002, *Biul. N8*, 2002r.

17. **Melnyk L.H.** Ekonomika pryrodokorystuvannia i ekoloho-ekonomichni problemy // *Mekhanizm rehuliuвання ekonomiky/ L.H.Melnyk, I.B. Dekhtiarova*.-К:*Nauk. dumka*, 2012.-245s.

18. **Ou H.W., Chou M.S. and Chang H.Y.** (2020) Removal of Hydrogen Sulphide from Biogas Using a Bubbling Tank Fed with Aerated Wastewater. *Aerosol Air Quality. Res.* 20: 643-

653. <https://DOI.org/10.4209/aaqr.2019.12.0647>
19. **Sliuzar A. V., Znak Z.O., Kalimon Ya.A., Bukliv R.L.** Metody ochyshchennia i pererobky sirkovodenvmisnykh haziv(ohliad). *Voprosu khimii I kimicheskoi tehnologii, 2019,N.3, r.83-97*.[DOI:10.32434/0321-4095-2019-124-83-97](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-83-97).
  20. **Sobotta L., Ducom G., Germain P.** Adsorption of hydrogen sulphide (H<sub>2</sub>S) on zeolite (Z) : Retentionmechanism // *Chem.Eng.J.-2016-Vol.140.-p. 1390-1398*.
  21. **Wang L., Cao B., Wang Sh., Yan Q.** H<sub>2</sub>S catalyticoxidation on imperative activated carbon: *Experiment and modelling. Chem. Eng.J.-2006.-Vol.118.-N.3.-P.133-139*.
  22. **Nekoz O.I.** Kavitatsiina tekhnolohiia ochyshchennia stichnykh vod vid toksychnykh rehovyn. / *O.I. Nekoz, O. A. Lytvynenko.R. V. Lohvynskiy// Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiakh. -2012. -N2. -S. 112-115*.
  23. **Vashkurak U. Yu. Shevchuk L.L.** Kavitatsiine ochyshchennia stichnykh vod zhyrkombinatu vid orhanichnykh zabrudnen v prysutnosti haziv riznoi pryrody. *Khimiia, tekhnolohiia rehovyn ta yikh zastosuvannia. 2018, Vypusk 1, nomer 1. S. 105-110*.  
<https://doi.org/10.23939/ctas2018.01.105>
  24. **Ternovtsev O.V.** Ochystka vody vid sirkovodniu za dopomohoiu oksyliuvachiv. // *Visnyk Rivnenskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. - Vyp. 2.-R.-2000.-S. 143-146*.
  25. **Ternovtsev O.V.** Ochystka vody vid sirkovodniu aeratsiiei. // *Melioratsiia i vodne hospodarstvo. Vyp. 87., -K:-Ahrarna nauka.-2001.-S.203-208*.

## RESEARCH ON HYDROGEN SULFIDE REMOVAL FROM WATER USING A HYDROEJECTOR

*Olena ZORIA,  
Oleksiy TERNOVTSEV,  
Mykola TSYGANOK*

**Summary.** The war in Ukraine has significantly impacted the country's water resources, leading to deteriorated water quality, threats to drinking water supplies, and long-term environmental issues. Intensive pollution of surface water sources has necessitated

increased use of groundwater for drinking purposes. The quality of groundwater in Ukraine varies greatly, often containing concentrations of iron, manganese, hardness salts, and hydrogen sulfide that exceed acceptable limits. Hydrogen sulfide concentrations in different regions range from 1 to over 20 mg/dm<sup>3</sup>, far exceeding the permissible limit of 0.05 mg/dm<sup>3</sup> for drinking water. In the southern regions of Ukraine, such as Kherson, Mykolaiv, and Odesa oblasts, hydrogen sulfide levels exceed the norm by more than 100 times. Existing water purification methods for hydrogen sulfide require the construction of expensive aeration facilities with various loadings, biological reactors, and oxidation filters, which entail significant capital and operational costs. Moreover, these facilities do not always ensure the desired water quality. Therefore, developing new methods and technologies aimed at intensifying hydrogen sulfide removal from water, along with various devices and structures for their implementation, is a pressing issue related to supplying the population with quality water.

Among the developed approaches, the use of aeration as an independent method for purification is notable; however, it is used for low hydrogen sulfide concentrations and is most effective at low water pH levels. This article presents the results of experimental studies on the purification of groundwater from hydrogen sulfide by aeration using a hydroejector. Optimal parameters for the hydrogen sulfide removal process, depending on its concentration and water pH, were determined. The effectiveness of water purification using the hydroejector was substantiated and investigated. The key operational parameters of the hydroejector were established.

**Keywords.** Groundwater; hydrogen sulfide; aeration; purification effectiveness.

*Стаття надійшла до редакції 10.05.2024*