

УДК 504.064

Petro Kyriienko, PhD (Tech.sc), docent of Ecology Technogenic Safety
e-mail: p.kirienko@khai.edu

Oleksandr Betin, Dr, Professor of Ecology Technogenic Safety
e-mail: o.betin@khai.edu

Mykola Zakharchenko, PhD (Chemistry), docent of Ecology Technogenic Safety
e-mail: m.zakharchenko@khai.edu

Serhii Lobov, PhD (Tech.sc), docent of Ecology Technogenic Safety
ORCID ID 0000-0002-5849-749X *e-mail*: s.lobov@khai.edu

Katerina Msallam, PhD (Tech.sc), docent of Graphic Geometry and Computer Modelling
e-mail: k.msallam@khai.edu

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF TECHNOLOGIES FOR THE EXTRACTION OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER

Abstract. *The presence of heavy metals in the environment is mainly associated with anthropogenic human activity. These are ferrous and non-ferrous metallurgy, heavy industry, energy. Due to air pollution, heavy metals enter the soil and water. The first place among the polluters of the environment with heavy metals is electroplating industry, where two categories of effluents are formed: spent concentrated effluent and diluted washing waters. In reservoirs, heavy metals have the ability to accumulate in the bottom sediments and thus are a source of second air pollution. They are not capable of biodegradation, but are able to accumulate in system components, causing a toxic effect on the animal world, humans and microorganisms. Different heavy metals affect the environment and biota in different ways. They can cause malfunction of the kidneys, liver, pancreas, accumulate in various organs and bones, causing their dysfunction. The greatest danger is heavy metals – chromium, nickel, cadmium, zinc. Their persistence, toxicity, ability to bioaccumulate and migrate through trophic chains pose a danger to the existence of hydrobionts, animals and, above all, human health. The authors offer technologies for cleaning wastewater from heavy metals: reagent technologies, bacterial purification technologies, as well as phytotechnologies. Proposed sewage treatment plants for the removal of heavy metals from wastewater. The pollution of surface water sources, human health and living organisms will depend on the reliable extraction of heavy metals from spent galvanic effluents.*

Keywords: *treatment facilities; heavy metals; galvanic drains; technology reagents; bacterial cleaning technologies; phytotechnology; wastewater treatment scheme.*

© П.Г. Кириєнко, О.В. Бетін, М.І. Захарченко, С.О. Любов, К. Мсаллам, 2023

П.Г. Кирієнко, О.В. Бетін, М.І. Захарченко, С.О. Лобов, К. Мсаллам

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ІЗ ПРОМИСЛОВИХ СТИЧНИХ ВОД

***Анотація.** Наявність важких металів в навколишньому середовищі головним чином пов'язана з антропогенною діяльністю людини. Це чорна і кольорова металургія, важка промисловість, енергетика. Через забруднення повітря важкі метали попадають в ґрунт і воду. Перше місце серед забруднювачів навколишнього середовища важкими металами посідають гальванічні виробництва, де утворюються дві категорії стоків: відпрацьовані концентровані стоки та розведені промивні води. У водоймах важкі метали мають здатність накопичуватись у донних відкладах і тим самим є джерелом вторинного забруднення. Вони не здатні до біорозкладання, але здатні накопичуватись в компонентах систем, спричиняючи токсичну дію на тваринний світ, людину та мікроорганізми. Різні важкі метали по-різному впливають на навколишнє середовище і біоту. Вони можуть порушувати функціонування нирок, печінки, підшлункової залози, накопичуватись в різних органах і кістках, спричиняючи їх дисфункцію. Найбільшу небезпеку становлять важкі метали – хром, нікель, кадмій, цинк. Їхня стійкість, токсичність, здатність до біоаккумуляції та міграції по трофічних ланцюгах створює небезпеку для існування гідробіонтів, тварин та насамперед здоров'я людини. Автори пропонують технології очищення стічних вод від важких металів: реагентні технології, технології бактеріального очищення, а також фітотехнології. Запропоновані очисні споруди вилучення із стічних вод важких металів. Від надійного вилучення важких металів із відпрацьованих гальванічних стоків буде залежати забруднення поверхневих джерел вод, здоров'я людей і живих організмів.*

***Ключові слова:** очисні споруди; важкі метали; гальванічні стоки; реагентні технології; технології бактеріального очищення; фітотехнології; схема очищення стічних вод.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.54-65>

Постановка проблеми

Важкі метали (ВМ) в навколишнє середовище потрапляють двома шляхами. Перший – це природні аномалії, а другий – це антропогенний вплив промислового виробництва. Природні аномалії можуть вплинути на навколишнє середовище точково, а промислове забруднення – на дуже великі території атмосфери, літосфери і гідросфери. Всі міри середовища нерозривно зв'язані між собою.

ВМ – це група елементів з фізико-хімічними властивостями, які мають відносно високу щільність – понад 8 г/см³ та атомну масу більше ніж 50 г/моль (окрім благородних та рідкісних металів). До ВМ відносяться понад 40 металів періодичної системи Д.І. Менделєєва, серед яких, наприклад, Zn (цинк), Cr (хром), Ni (нікель), Cd (кадмій). Цинк – метал сріблясто-блакитного кольору. Цинкові покриття широко застосовують для захисту металів від корозії. Хром – метал блакитно-білого кольору з високою твердістю. Його

використовують для нанесення захисних покриттів, захисту від корозії, а також в металургії та хімічній промисловості. Кадмій – сріблясто-білий метал з синюватим відливом. Використовується для нанесення захисних покриттів на деталі конструкційних матеріалів кріплення оздоблення, а також в хімічній промисловості. Нікель – метал сріблясто-білого кольору. Характеризується високою корозійною стійкістю. Використовується для виробництва нержавіючої сталі, нанесення гальванічних покриттів, у хімічній промисловості.

Наявність ВМ в навколишньому середовищі головним чином пов'язана з антропогенною діяльністю людини. Це чорна і кольорова металургія, важка промисловість, енергетика, вихлопні гази двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Через забруднення повітря ВМ попадають в ґрунт і воду.

При попаданні ВМ в ґрунт, підземні і поверхневі води іони ВМ включаються до харчових ланцюгів, де відбувається їх подальше перетворення та нітрування.

Перше місце серед забруднювачів навколишнього середовища ВМ належить гальванічним виробництвам. При одержанні 1 м² покриттів у відходи могли попадати 0,2–2 грами металу [1]. В результаті нанесення покриттів утворюються дві категорії стоків: відпрацьовані концентровані стоки та розведені проливні води. Для промивання деталі необхідні значні обсяги води, тому вони є головним джерелом надходження ВМ в стічні води.

У водоймах ВМ мають здатність накопичуватися у донних відкладах і тим самим є джерелом вторинного забруднення. Вони не здатні до біорозкладання, але здатні накопичуватись (акумулюватись) в компонентах екосистем, спричиняючи токсичну дію на живі організми тваринного світу і людину, порушувати рівновагу екосистем.

Актуальність

Вивчення надходження в атмосферу, літосферу і гідросферу, розподілення ВМ у навколишньому середовищі, концентрації, а також перелік ВМ є предметом дослідження і актуальним завданням дослідження технології очищення стічних вод.

Не всі ВМ однаковою мірою впливають на середовище, в яке вони потрапляють, завдяки їх різній концентрації в воді, а також розповсюдженню в середовищі. Всі ВМ є деструктивними для води, а через неї мають негативні впливи на організми людей, тварин і гідробіонтів, рослини та мікроорганізми.

Виявити якісний і кількісний склад ВМ в конкретних організмах і середовищах – важкий та дорогий процес. Аналіз на наявність в людському організмі ВМ коштує, наприклад, в лабораторіях Сінево (Synevo) м. Харків: кадмій – 980 грн, хром – 1020 грн, цинк – 320 грн, свинець – 920 грн, ртуть – 720 грн, мідь – 210 грн [12].

ВМ по-різному впливають на живі організми навколишнього середовища. Вони можуть спричинити порушення функціонування нирок, печінки, підшлункової залози, накопичуватись в різних органах і кістках, призводячи до їх дисфункції. Можуть витіснити з організму корисні елементи кальцій та магній, призводити до таких захворювань, як рак, хвороби серцево-судинної, нервової систем, порушення обміну речовин [11].

Друга проблема – це очищення викидів в гідросферу, атмосферу, літосферу від ВМ. Для вирішення цієї проблеми постає два завдання: недопущення

попадання ВМ у воду і саме очищення стічної води. Для виконання першого завдання необхідно забезпечити надійними очисними спорудами, які очистять викиди в навколишнє середовище від ВМ.

Стічні води промислових підприємств, особливо гальванічних цехів, у своєму складі містять найбільш широкую різноманітність неорганічних токсичних домішок. Серед них найбільшу небезпеку становлять ВМ – хром, нікель, кадмій, цинк. Їхня стійкість, токсичність, здатність до біоаккумуляції та міграція по природним харчовим ланцюгам створює небезпеку для існування гідробіотів, рослин, тварин та насамперед для здоров'я людини. Тому проблема очищення промислових стічних вод від ВМ є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як зазначено вище, ВМ в навколишнє середовище потрапляють в основному через антропогенний вплив. Вода забруднюється через недостатнє або відсутнє очищення у виробничих стічних водах. На кожному підприємстві, що в технологічному процесі використовує воду, повинні бути очисні споруди, які і забезпечують вилучення ВМ з відпрацьованої води. Також не проходять очищення від нафтопродуктів і ВМ і зливі води. Побутові стічні води очищуються саме від органічних сполук, але не очищуються від нафтопродуктів і ВМ.

Таким чином, ВМ потрапляють у водні об'єкти (річки, озера, моря та інш.) через те, що вода не очищується, або через те, що немає ефективних технологічних процесів очищення каналізаційних стічних вод. В ґрунт ВМ зазвичай попадають через атмосферні опади.

Очищення стічних вод промислових підприємств від ВМ передбачено Директивою Європейського Парламенту та Ради [5], Законом України «Про основні засади державної екологічної політики України на період до 2030 року» [6]. Очищення стічних вод може відбуватися різними технологічними методами: реагентним, електрохімічним, мембранним, іонообмінним, комбінованим з видалення ВМ та нафтопродуктів [7, 8].

Комбіноване очищення можливе з використанням реагентних технологій, технологій «Фітотенк» [10] з використанням вищих водних рослин (лепеха болотна, очерет, рогаза, череда, водяний перець), а також із застосуванням анаеробних бактерій [9]. Процеси бактеріального очищення води від екологічно та фізіологічно небезпечних іонів ВМ. в тому числі і шестивалентного хрому, простіші, дешевші, екологічніші за аналогічні фізико-хімічні процеси. Мікробні сульфат- і хромат-деструкція не потребують реагентів і енергетичних експлуатаційних затрат, внаслідок їхнього перебігу утворюються компактні осади не розчинних у воді сполук ВМ, а тому мають велику перспективу [11].

Мета роботи

- 1) Дослідження технологій очищення води від ВМ
 - використання реагентних технологій;
 - використання фітотехнологій в очищенні стічних вод від ВМ;
 - використання технологій бактеріального очищення.
- 2) Створення схем очисних споруд для очищення стічних вод від ВМ.

Виклад основного матеріалу

У стічні води ВМ попадають після покриття електролітичним методом з електролітів солей важких металів – цинку, кадмію, нікелю і хрому. На повноту осадження впливають фізичні (розмір часточок осадів, сольовий ефект, природа електроліту та інш.) і хімічні (рН середовища, наявність спільних іонів, комплексоутворювачів) чинники. В найпростіших випадках за відсутності комплексоутворювачів або надлишку спільних іонів можна стверджувати, що осадження ВМ повинно відбуватися відповідно до ряду розчинності їх осадів-гідроксидів або карбонатів.

Для реагентного методу вилучення ВМ із стічних вод використовували наступні реактиви: оксид кальцію CaO, гідроксид кальцію Ca(OH)₂, їдкий натрій NaOH, карбонат натрію Na₂CO₃. В якості ВМ в стічних водах будемо досліджувати: кадмій Cd, цинк Zn, нікель Ni, хром Cr (в іонній формі).

Хімічні реакції ВМ в стічних водах і реагентів в іонному виді будуть наступними:

1. Реагент Ca(OH)₂.

а) дисоціює в воді (сильний електроліт)



б) іони важких металів реагують з гідроксид-іонами за наступними реакціями:



Всі гідроксиди металів випадають в осад. Добуток розчинності (ДР) цих речовин наведений в таблиці 1.

Таблиця 1. Добуток розчинності гідроксидів металів при 25⁰С

Гідроксид металу	ДР
Zn(OH) ₂	4,9·10 ⁻¹⁷
Cd(OH) ₂	1,8·10 ⁻¹⁴
Ni(OH) ₂	1,2·10 ⁻¹⁶
Cr(OH) ₃	4,0·10 ⁻¹⁵
Ca(OH) ₂	6,1·10 ⁻⁶

Із таблиці 1 видно, що у воді вказані іони в лужному середовищі (реагент Ca(OH)₂) зв'язуються з гідроксид-іонами та випадають в осад. Чим менше значення ДР, тим гірша розчинність гідроксиду металу у воді. Найменша розчинність у воді у Zn(OH)₂, а найбільша – у Cd(OH)₂. Але і Cd(OH)₂ випадає в осад. Розчинність Ni(OH)₂ і Cr(OH)₃ приблизно рівні, а осадки будуть стійкими. Відносно Ca(OH)₂, то ДР = 6,1·10⁻⁶, розчинність буде більша за розчинність інших гідроксид металів. Дисоціація цього реагенту дає достатню кількість іонів OH⁻, необхідних для протікання реакції (2–5).

Розраховані концентрації іонів металів та їх ГДК наведені в таблицях 2, 3.

Таблиця 2. Концентрація іонів металів в розчинах над сполуками

Сполука	Концентрація гідроксидів, моль/л	Концентрація іонів металів, г/л
Zn(OH) ₂	$2,31 \cdot 10^{-6}$	$2,43 \cdot 10^{-3}$
Cd(OH) ₂	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$
Ni(OH) ₂	$3,11 \cdot 10^{-6}$	$1,83 \cdot 10^{-4}$
Cr(OH) ₃	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$5,72 \cdot 10^{-3}$
Ca(OH) ₂	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$4,61 \cdot 10^{-1}$

Таблиця 3. Гранично допустимі концентрації (ГДК) іонів металів [15]

Іони металів	Вода питна, стандарт в мг/л		Природні води в річках зі скиданням промислових стічних вод
	ВОЗ	ЄС	
Zn ²⁺	3,0	0,1–5,0	0,05 мг/л
Cd ²⁺	0,003	0,005	0,05–1 мкг/л
Ni ²⁺	0,02	0,02	до 1 мг/л
Cr ⁶⁺	0,05	0,05	можуть досягати 0,1 мг/л
Ca ²⁺	не нормується	100	високий вміст Са несприятливо впливає на серцево-судинну систему

Як показують розрахунки, концентрація іонів ВМ при використанні цього реагентного методу (з дотриманням стехіометрії реагентів) в реакціях (2–5) набагато менша, ніж їх ГДК за різними стандартами та в природних водах, в яких є скиди виробничих стічних вод. Гідроксид кальцію, як реагент, характеризується ДР у воді при 25⁰С рівним $6 \cdot 10^{-6}$ і концентрацією іонів Ca²⁺ у воді рівній 100 мг/л для нормативу ЄС, що не перевищує значення максимально допустимої концентрації кальцію для питної води та природних вод зі скиданням промислових стічних вод.

Таким чином, показана ефективність використання реагентного методу очищення стічних вод від іонів ВМ (Zn²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺, Cr³⁺) сполукою гідроксиду кальцію.

Дослідження використання технологій бактеріального очищення стічних вод від важких металів

В 1964 р. Н. Путиліна із співробітниками опублікували роботу «Микробний метод обесфеноливання сточних вод», в якій запропонували спеціальні селекційовані мікроорганізми для очищення стічних вод з іонами ВМ. Під час очищення гальванічних та інших промислових стічних вод від іонів ВМ деякі бактерії використовують сульфати як окисники органічних сполук. За анаеробних умов внаслідок перебігу цього біологічного процесу утворюється водень сульфур, який вступає в хімічну реакцію з іонами ВМ, перетворюючи їх в практично не розчинні у воді сульфіді, які відділяються від води, що очищують, звичайним відстоюванням.

Існує проблема утримання окремих штамів бактерій в очисних спорудах при очищенні стічної води. Їх практично неможливо затримати в активному мулі або іммобілізувати ці бактерії на нерозчинних у воді насадках. Такими насадками можуть бути тканини, полотна, пластини й інші волокнисті речовини. Їх необхідно розвішувати у стічній воді. До цих насадок будуть прилипати і бактерії завдяки адгезії та іншим хімічним і фізичним процесам – це регулярні насадки. Як регулярні насадки можна використовувати кореневу систему. Серед нерегулярних насадок або тих, що рухаються у стічній воді, можуть бути пісок, активоване вугілля та інші.

Облаштування анаеробної стадії на початку процесу очищення стічної води прискорює цей процес, забезпечує вилучення з води ВМ, утворення енергетично багатих газів – метану, водню – істотно зменшує експлуатаційні затрати на очищення води.

Вміст ВМ в рідкій фракції заброджених відходів у надмуловій воді дуже незначний, що спричинено осадженням ВМ у формі твердої фракції нерозчинних сульфідів. Обробка осадів дозволяє видалити з надмулової води: нікель – 89,6%, цинк – 89%, хром загальний (тривалентний та шестивалентний), кадмій – 86%. При цьому під час збруднення суміші відходів з рідкої фракції видалені органічні забруднення. Отже, рідка фракція не потребує доочищення.

Дослідження фітотехнології в очищенні стічних вод від важких металів

Людством давно було помічено, що на болотистих екосистемах, де ростуть лепеха (аір болотний), рогоз, очерет, комиш та інші вищі водні рослини в невеликих ярах, можна було набрати воду, придатну для питного споживання, приємного смаку. Українським науково-дослідним інститутом екологічних проблем (УкрНДЦЕП) м. Харкова було проведено дослідження використання фітотехнологій в очищенні стічних вод (шахтних вод, зливого стоку), а також в підготовці питної води. Там же були запропоновані технологічні схеми з використанням фітотехнології для очищення і підготовки питної води [10].

Нами була запропонована фітотехнологічна схема з використанням вищих водяних рослин – рогозу, лепехи (аір болотний), комишу, водяного перцю, череди, очерету – в поєднанні з використанням біофільтрів. Коренева система вищих рослин проникає в завантаження біофільтра, збільшує площу контакту із забрудненою водою і може її очистити, в тому числі і від ВМ.

Обговорення результатів

Для впровадження технології очищення стічних вод від ВМ необхідно створити схему, де в одній схемі об'єднати всі 3 напрямки очищення стічних вод від ВМ: реагентний метод, фітотехнології, технології бактеріального очищення. На рис. 1 зображена блок-схема очищення стічних вод від ВМ.

Блок-схема працює наступним чином: стічна вода 1 подається в блок механічного очищення 2. В ньому стічна вода очищається від механічних домішок, які через спеціальний пристрій 3 видаляються на утилізацію. Далі

вода через трубопровід 4 попадає в блок реагентного очищення 5. В блоці 5 і відбуваються хімічні реакції на іонному рівні в залежності від того, які реагенти будуть приготовлені в блоці 6 та які забруднювачі будуть в стічній воді. Осад іонних хімічних реакцій 7 спеціальними пристроями буде видалятися в пристрій зневоднення 8, а зневоднений осад буде утилізуватися в пристрої 9. Вода, яка очистилася в блоці реагентного очищення 5, буде надходити через трубопровід 11 подачі води на доочищення в фітомеліоративний блок 12. Через відкритий кран 10 на трубопроводі 11 стічна вода може одночасно надходити в блок 13 бактеріального очищення. Очищена вода в блоці 5 та доочищена в блоках 12 і 13 надходить через трубопровід 14 на повторне використання або в поверхневе джерело води.

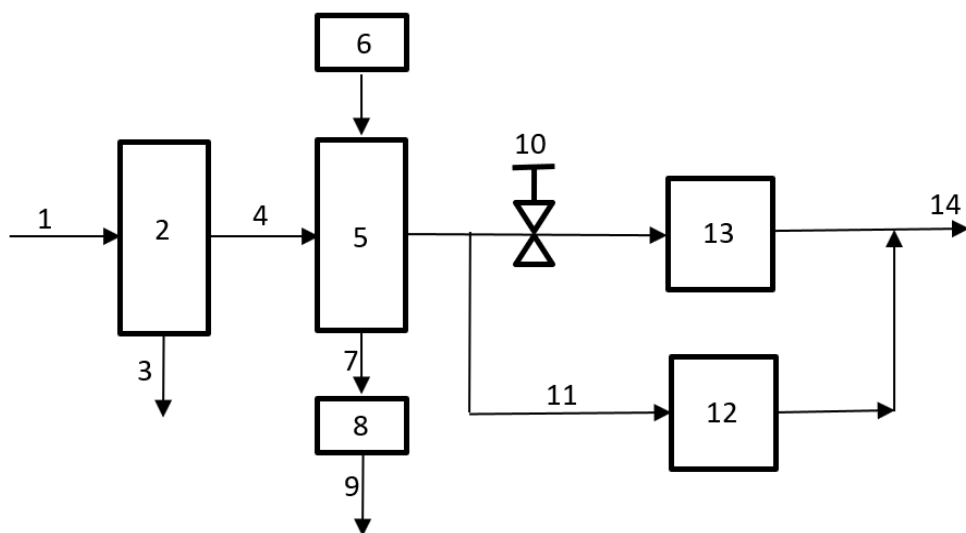


Рис. 1. Блок-схема очищення стічних вод від важких металів:

1 – стічна вода, 2 – блок механічного очищення, 3 – видалення механічних домішок, 4 – трубопровід, 5 – блок реагентного очищення, 6 – блок приготування реагентів, 7 – осад, 8 – зневоднення осаду, 9 – утилізація осаду, 10 – розподільчий кран, 11 – вода на очищення, 12 – фітомеліоративний блок, 13 – бактеріальне очищення, 14 – очищена вода

Реагентна схема видалення ВМ із стічних вод зображена на рис. 2.

Технологічна схема видалення ВМ реагентним методом працює наступним чином. Очисна споруда 1 розташована в землі для самопливного надходження стічної води, обладнана гідроізоляцією. Очисна споруда обладнана трубопроводами 3 для подачі реагентів. Реагенти через розподільні перфоровані трубопроводи 4, що розташовані в очисній споруді, змішуються зі стічною водою 5, надходять в завантаження 6, де відбувається реакція. Осад 7 з хімічної реакції осаджується в заглибленні, звідки відпомповується спеціальним пристроєм на утилізацію. Стічна вода з очищення 8 через трубопровід надходить на доочищення.

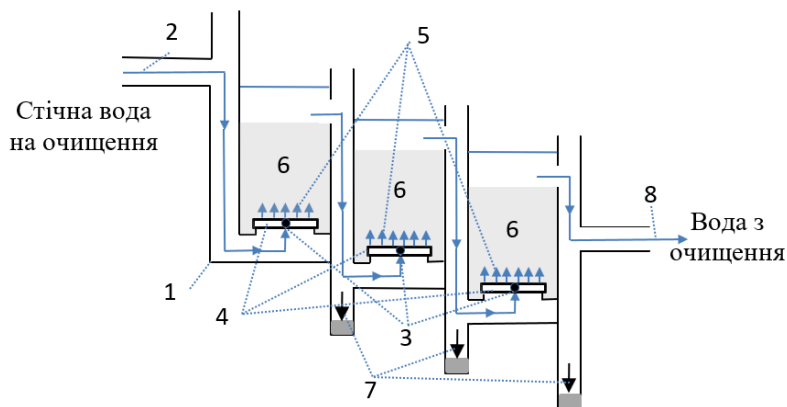


Рис. 2. Технологічна схема видалення важких металів із стічних вод реагентним методом:

1 – очисна споруда з гідроізоляцією, 2 – стічна вода, 3 – трубопроводи для подачі реагентів, 4 – розподільні перфоровані трубопроводи, 5 – стічні води, змішані з реагентами, 6 – завантаження (в якості завантаження може використовуватись щебінь, керамзит або інші матеріали), 7 – осад, 8 – вода з очищення

На рис. 3 зображено фітотехнологічний блок очищення стічних вод від ВМ.

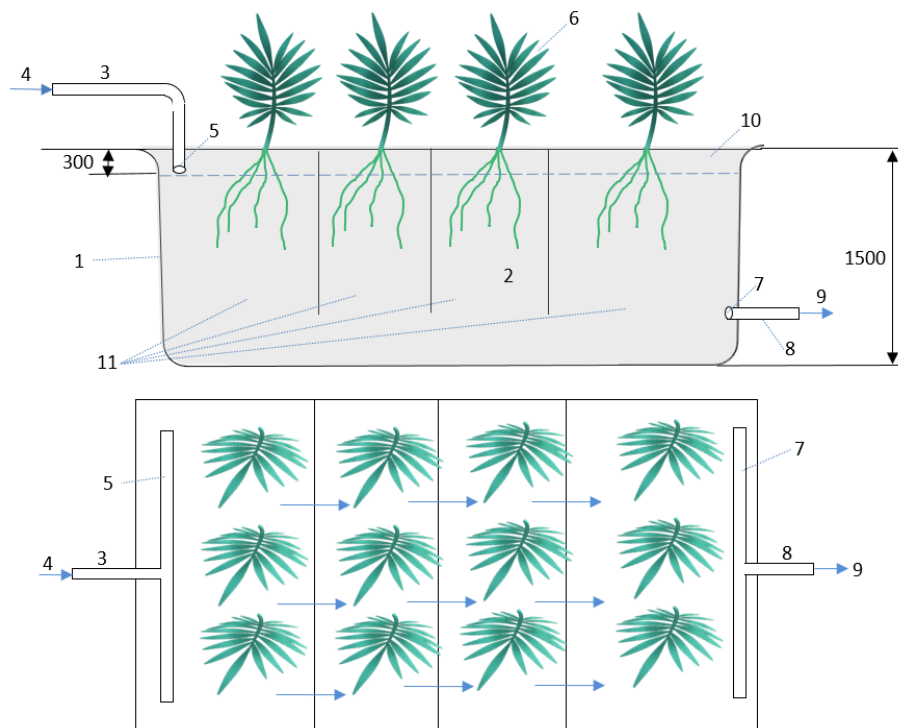


Рис. 3. Фітотехнологічний блок очищення стічних вод від ВМ:

1 – гідроізоляція, 2 – завантаження (гравій й керамзит), 3 – трубопровід для подачі стічної води, 4 – стічна вода, 5 – розподільчий перфорований трубопровід, 6 – рослинність (рогіз, лепеха (air), комиш, череда, очерет та ін.), 7 – перфорована труба, 8 – відвідний трубопровід, 9 – очищена стічна вода, 10 – коренева підстилка (суміш торфу з великозернистим піском), 11 – відсіки для окремих видів рослинності

Фітотехнологічний блок очищення стічних вод від ВМ працює наступним чином. Очисна споруда розташована в землі, гідроізольована, і стічна вода самопливно проходить через очисну споруду за 2–3 години. Коріння рослин проростають в завантаження, і на них і біоплівці завантаження відбувається вилучення ВМ.

Стічна вода 4, через трубопровід подачі води 3, надходить в розподільчий перфорований трубопровід 5 і просочується в завантаження 2, розділене перфорованими перегородками на секції 11, в яких посаджені окремі види рослинності. Для кращого росту рослин над завантаженням розташовано шар із піску і торфу (як в природних умовах) 10 товщиною 300 мм. Вода проходить через коріння і завантаження і через перфоровану трубу 7 надходить у відвідний трубопровід 8, виводиться як очищена вода 9.

Висновки

1. Утилізація відпрацьованих електролітичних розчинів без вилучення ВМ неможлива.
2. Основним методом вилучення ВМ із стічних вод відпрацьованих електролітів є реагентний метод.
3. В якості допоміжних методів очищення стічних вод від ВМ можна використовувати технології бактеріального очищення та фітотехнології.
4. На кожному підприємстві, де використовуються технології електролітичного нанесення покриттів, необхідно облаштовувати очисні споруди очищення відпрацьованих електролітів від ВМ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Екологічна безпека гальванотехніки. Частина 1. Стічні води. Механічна та сорбційна очистка: навч. пос. / М.І. Данченко, С.В. Фроленкова – К.: НТУ “КПУ”. 2016–2020.
2. Кирієнко П.Г., Ключко Т.О., Хоменко І.Є., Дурневич Г.М. Дослідження міграції важких металів у рослинних відходах сільського господарства. *Екологічна безпека та природокористування*, 36(4), 32–40. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.32-40>.
3. Бичков С.А., Кирієнко П.Г., Варламов Є.М., Бетін О.В., Мірсултанова Л.Р. Реконструкція очисних споруд для очищення зливових вод на підприємстві ДП «Антонов». *Екологічна безпека та природокористування*, 37(1), 35–43. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.35-43>.
4. Кирієнко П.Г., Варламов Є.М., Бетін О.В., Бичков С.А., Мірсултанова Л.Р. Патент на винахід №120726 від 27.01.2021, біол. №2. Пристрій для очищення зливних вод від нафтопродуктів і завислих речовин.
5. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2000 р. “Про встановлення рамок діяльності співтовариства у сфері водної політики”.
6. Закон України “Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року” від 28.02.2019 №2697 – VIII. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2018-17>.
7. Аналіз методів очищення стічних вод від іонів важких металів. Ціпук В.Я., Саблій Л.А. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського.”
8. Черниш Є.Ю. Утилізація осадів стічних вод сульфідогенною асоціацією мікроорганізмів. Суми 2014 – 233 с.
9. Безцілий О.О. Відтворення відпрацьованих стічних вод, забруднених іонами важких металів. Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Україна.

10. Режим доступу: www.phytoremediation.com.ua
11. А.К. Запольський, Н.А. Мішкова-Клименко. І.М. Астрелін та ін. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: Підручник. – К.: Лібра. 2000 – 552 с.
12. Калькулятор вартості аналізів (Сінево – vitagramma)(spravochnik.synevo.ua).
13. Краткий справочник физико-химических величин. Издание 8-е, переработанное (Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой). – Л.: Химия, 1983 – 232 с.
14. Химическая энциклопедия: в 5 т.: т2: Изд. Даффа-Меди / Редкол.: Кнунянс И.П. и др. – М.: Сов. энцик.; 1990 – 671 с.
15. Запольський А.К. Водопостачання, водовідведення та якість води: Підручник. – К.: Вища шк., 2005. – 571 с.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 29.05.2023

REFERENCES

1. Danchenko, M.I., & Frolenkova, S.V. (2016–2020). Ecological safety of electroplating. Part 1. Wastewater. *Mechanical and sorption cleaning*: textbook. Kyiv: NTU "KPU" [in Ukrainian].
2. Kyrienko, P.G., Klocko, T.O., Khomenko, I.Y., & Durnevich, G.M. (2020). Analysis of heavy metal migration in vegetable agricultural waste. *Environmental Safety and Natural Resources*, 36(4), 32–40 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.32-40>
3. Bychkov, S.A., Kyriienko, P.G., Varlamov, Y.M., Betin, O.V., & Mirsultanova, L.R. (2021). Reconstruction of treatment facilities for wastewater treatment at Antonov State Enterprise. *Environmental Safety and Natural Resources*, 37(1), 35–43 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.35-43>
4. Kirienko P.G., Varlamov Y.M., Betin O.V., Bychkov S.A., Mirsultanova L.R. Patent for invention No120726 dated 27.01.2021, biol. No2. *Device for cleaning drain water from petroleum products and suspended substances* [in Ukrainian].
5. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 "On establishing the framework for community activities in the field of water policy".
6. Law of Ukraine "On the basic principles (strategy) of the state environmental policy of Ukraine for the period up to 2030" of 28.02.2019 No2697 – VIII. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2018-17>
7. Tsipukh, V.Ya., & Sabliy, L.A. *Analysis of methods for wastewater treatment from heavy metal ions*. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" [in Ukrainian].
8. Chernysh, E.Y. (2014). *Utilization of sewage sludge by the sulfidogenic association of microorganisms*. Sumy [in Ukrainian].
9. Beztsiynyi, O.O. *Reproduction of wastewater contaminated with heavy metal ions*. Kharkiv National University of Urban Economy named O.M. Beketova, Ukraine [in Ukrainian].
10. Retrieved from: www.phytoremediation.com.ua
11. Zapolsky, A.K., Mishkova-Klimenko, N.A., Astrelin, I.M. at al. (2000). *Physico-chemical bases of wastewater treatment technology*: Textbook. Kyiv: Libra [in Ukrainian].
12. Calculator of the cost of analyzes (Synevo – vitagramma) (spravochnik.synevo.ua).
13. Ravdel, A.A., & Ponomareva, A.M. (Eds.). (1983). *A Brief Reference Book of Physical and Chemical Quantities* (8th ed., revised). Lviv: Chemistry [in Russian].
14. Knunyans I.P. et al. (Eds.). (1990). *Chemical Encyclopedia*: in 5 vol. (Vol. 2). Moscow: Sov. Entsik [in Russian].
15. Zapolsky, A.K. (2005). *Water supply, sanitation and water quality*: Textbook. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].

The article was received 22.02.2023 and was accepted after revision 29.05.2023

Кирієнко Петро Григорович

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

e-mail: p.kirienko@khai.edu

Бетін Олександр Володимирович

доктор технічних наук, професор Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», лауреат Державної премії України

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

e-mail: o.betin@khai.edu

Захарченко Микола Іванович

кандидат хімічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

e-mail: m.zakharchenko@khai.edu

Лобов Сергій Олександрович

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

ORCID ID 0000-0002-5849-749X **e-mail:** s.lobov@khai.edu

Мсаллам Катерина

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

e-mail: k.msallam@khai.edu