

## ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

УДК 504.064.4:628.1

<https://doi.org/10.31713/vt220234>

**Филипчук В. Л., д.т.н., професор, Прокоп'єв О. К., магістр**  
(Національний університет водного господарства та природокористування м. Рівне), **Карпунін О. О., інженер**

### **ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСАДУ І ФЛОТАЦІЙНОГО ШЛАМУ, ЯКІ УТВОРЮЮТЬСЯ ПРИ ОЧИЩЕННІ СТІЧНИХ ВОД ВІД ВАЖКИХ МЕТАЛІВ**

Розглянуто питання утворення та зберігання в Україні осадів виробничих стічних вод, що містять важкі метали. Показано, що флотаційний метод розподілу фаз при очищенні стічних вод від важких металів має значні переваги в порівнянні з традиційним відстоюванням по технологічним характеристикам отриманого шламу та осаду – об'єму, питомому опору та вологості твердої фази. Наведено дані досліджень щодо фільтраційних параметрів осаду та шламу, вимивання з них іонів важких металів, таких як мідь (II), залізо (III), хром (III) та нікель (II). Продуктивність обладнання для зневоднення шламу в 4–6 разів більша ніж для осаду. Встановлено, що ступінь вимивання важких металів з флотаційного шламу значно менше ніж з осаду, отриманого шляхом реагентного осадження важких металів. Вказано на економічно вигідніше та екологічно більш безпечніше використання флотаційного методу для відділення зависі важких металів та зберігання осаду у порівнянні з відстоюванням.

**Ключові слова:** стічні води; важкі метали; відстоювання; флотація; гідроксидний осад; флотаційний шлам; зберігання осаду; вимивання металів.

**Вступ.** Важкі метали (ВМ), що знаходяться в стічних водах промислових підприємств, представляють серйозну небезпеку для навколишнього середовища. Осади, які можуть містити у своєму складі хром (III), цинк, нікель, мідь, залізо, кадмій, кобальт, ванадій, свинець, належать до I–III класів небезпеки [1].

ВМ потрапляють у гідроекологічний резервуар двома шляхами:

- з неочищеними або недостатньо очищеними стічними водами;
- мігрують у воду та ґрунт з осадів, отриманих в процесі водоочищення.

Згідно зі статистичними даними, у 2017 році у водойми було скинуто порядку 997 млн м<sup>3</sup> неналежно очищених стічних вод, у тому числі – 158 млн м<sup>3</sup> взагалі не піддавалися очистці, що складає близько 20% від загального об'єму утворюваних стічних вод [2]. За оцінкою спеціалістів у водойми України в середньому за рік потрапляє 10, 8 т хрому, 31,6 т нікелю, 9,2 т свинцю та 2,3 т кадмію [3].

Значний екологічний збиток посилюється тим, що ВМ забруднюють водойми, які є джерелами водопостачання. При цьому слід зауважити, що існуючі технології очищення води для потреб водопостачання, як правило, не в змозі видаляти ці метали.

На сьогоднішній день практично єдиним шляхом утилізації осадів промислових стічних вод є їх складування. В ідеалі для захоронення подібних осадів необхідні спеціальні полігони, які б виключали винос іонів важких металів (ІВМ) в навколишнє середовище. Через відсутність таких полігонів підприємства змушені зберігати осади на своїх виробничих майданчиках, однак ця можливість є дуже обмеженою, а для деяких – неможливою або вже вичерпаною. Дані вітчизняних вчених свідчать, що осади з вмістом ВМ постійно потрапляють на сміттєзвалища наших міст. При цьому накопичення подібних осадів відбувається у зростаючих об'ємах [2]. Зберігання осаду ВМ на відкритому просторі може призводити до поступового вимивання ВМ, які попадають у поверхневі та підземні води та забруднюють навколишнє природне середовище.

**Існуючий стан проблеми.** Для вирішення даної проблеми використовують два напрямки: переробка накопичених осадів ВМ з подальшою їх утилізацією та обробка осадів за допомогою технологій, що виключають або знижують вимивання ВМ.

Певні організації, зокрема у КПІ ім. Сікорського, розробили технологію використання гальванічних шламів та осадів у будівельних керамічних виробках [3] а також в приготуванні асфальтобетону для дорожніх покриттів [4]. Ці технології пройшли промислову апробацію, проте поки що широкого розповсюдження не отримали.

Нині для зниження вимивання ВМ з осадів реальними є

наступні шляхи:

- запобігання зволоженню осадів на полігоні складування;
- влаштування ізоляційного водонепроникного екрану;
- збільшення хімічної стійкості частинок осаду за рахунок підвищення їх лужності або їх склування (спікання);
- максимальне ущільнення осадів для зниження вилуговування токсичних речовин та зменшення фільтраційних і дифузійних процесів за рахунок зміни характеристик осаду.

Переважно ВМ виділяються із стічної води у вигляді осадів гідроксидів, а також карбонатів та сульфідів відповідних металів. Найбільш розповсюдженими технологіями очищення є реагентні, коагуляційні, електрохімічні, флотаційні. Значно рідше застосовуються сорбційні, електрокаталітичні, іонообмінні, мембранні [5]. В останніх технологіях ВМ тільки концентруються в малому об'ємі стічної води або фіксуються на деякому твердому носії, після чого повинні відділятися у вигляді осаду (шламу) на спорудах для розподілу фаз шляхом додаткової реагентної обробки і подальшого прояснення води відстоюванням та/або фільтруванням. Найбільш розповсюдженими є типові технологічні схеми, які включають реагентну обробку стічної води та відстоювання [6] або комбінацію відстоювання, фільтрування з доочищенням іонообмінним методом [7].

У випадках, коли відділення твердої фази проводиться за допомогою найбільш поширеного відстоювання, одержують обводнені гідроксидні осади ВМ з вологістю близько 99%. Зневоднення таких осадів досить дороге, а, за оцінками фахівців, вартість обладнання для зневоднення, навіть без урахування витрат на підготовку та кондиціонування осаду, може досягати 50% вартості очисних споруд [3].

Найбільш ефективним способом відділення твердої фази є флотація, яка дозволяє вилучити до 75% ВМ при нейтральних значеннях рН і 90% при лужних значеннях рН [8]. Зокрема, одним з відомих європейських виробників флотаційних установок для очищення стічної води від важких металів є компанія Kovofinis (Чехія) [9]. З 1998 р. рівненські науково-виробничі фірми «Ельф» та «ФАГС» розробляють та широко впроваджують блочно-модульні водоочисні комплекси (БМВК) для реагентно-флотаційного очищення стічних вод від ВМ на промислових підприємствах України

та Східної Європи [10]. В даних установках основна частина вилучених гідроксидів металів накопичується у вигляді флотаційного шламу або осаду. Флотаційний шлам має вологість 86–88%, об'єм у декілька разів менший об'єму осаду, який утворюється при реагентному осаджуванні ВМ у прояснювачі-відстійнику, що значною мірою визначається відмінностями фізико-хімічних характеристик осаду та шламу. Це значно зменшує експлуатаційні витрати на зневоднення флотаційного шламу та його наступне зберігання.

**Мета роботи.** Порівняння основних фізико-хімічних характеристик осаду та шламу та оцінка їх екологічної небезпеки для довкілля при тривалому зберіганні.

**Методика досліджень** передбачала визначення фільтраційних властивостей флотаційного шламу і гідроксидного осаду та ступеня вимивання ВМ із зневодненого продукту і включала наступні задачі:

- визначення вологості та питомого опору фільтруванню, а також продуктивності обладнання для зневоднення флотаційного шламу та осаду;

- дослідження вимивання іонів  $Fe^{3+}$  та  $Cr^{3+}$  з модельного гідроксидного осаду, а також з флотаційного шламу і осаду, утворених на під час очищення січних вод гальванічного виробництва.

Ступінь зневоднення осаду і шламу визначався по співвідношенню вологості вихідного та зневодненого осаду/шламу. Визначальним параметром водовіддачі суспензій є питомий опір фільтрації, який визначався на наливній воронці діаметром 4,6 см, при вакуумі 66,7 кПа. У якості фільтрувальної тканини використовувалася бавовняна тканина типу «бельтинг». Технологічні характеристики визначались для осаду, шламу та їх суміші.

Лабораторна установка по визначенню питомого пору фільтрації включала вакуум-насос, ресивер, наливну воронку, а також опускную воронку. Елементи установки з'єднані трубопроводами, на яких встановлена відповідна запірно-регулююча арматура. Величина вакууму контролювалася вакуумметром, встановленим на трубопроводі, що відходить від ресивера.

Модельний осад для досліджень вимивання отримували за наступною методикою: розчин біхромату калію  $K_2Cr_2O_7$  концентрацією 90 мг/л по  $Cr^{6+}$  об'ємом 10 л піддавали

електрокоагуляційній обробці з використанням електродної системи, що складалася з двох сталевих (із СТ3) плоскопаралельних пластин.

Під дією електричного струму відбувалося анодне розчинення заліза та насичення розчину іонами  $Fe^{2+}$ , які відновлювали  $Cr^{6+}$  в  $Cr^{3+}$ . В результаті обробки утворювався осад із суміші гідроксидів  $Fe(OH)_3$  та  $Cr(OH)_3$ . Утворений осад відстоювався у конусному відстійнику протягом 24 годин, після чого зливався для аналізу. У осаді визначалася концентрація  $Fe^{3+}$  та  $Cr^{3+}$  за методикми [11; 12]. У зв'язку з тим, що ці методики розраховані на малі концентрації, проводилося попереднє розведення осаду у 50 разів та його підкислення.

Моделльний осад гідроксидів  $Cu(OH)_2$  та  $Ni(OH)_2$  отримували шляхом підлужування відповідних солей  $CuSO_4$  та  $NiSO_4$  1-н розчином їдкого натру. Осад і флотаційний шлам для досліджень були відібрані відповідно з прояснювача та флотатора водоочисної установки (БВМК «УКОС ВМ-5»), що працює на підприємстві машинобудівного профілю у м. Рівне.

Концентрація ВМ визначалася за стандартними методиками [13; 14]. Методика для оцінки ступеня санітарної небезпечності зневоднених осадів, що містять ВМ, ґрунтується на виявленні іонів металів у твердій речовині та у рідкій фазі. Для рідких осадів спочатку проводиться відокремлення мулової води фільтруванням для визначення в ній іонів важких металів.

Оцінка вимивання проводилася при співвідношенні «тверда речовина осаду – вимивна рідина» рівним 1:10. Як вимивну рідину використовували дистильовану воду. Ступінь вимивання ВМ оцінювали по величині, яка показує масу вимивної речовини в мг на 1 кг сухого осаду. При виборі методики проведення хімічного аналізу промивної рідини враховували, що концентрація окремих компонентів, як правило, не перевищує 1 мг/л.

Дослідження проводилося 3 рази з однією й тією ж пробую осаду в наступній послідовності:

- відбиралася проба осаду, яка містить 10 г сухої речовини в природному стані і проводився хімічний аналіз осаду в пробі;
- проводилось зневоднення осаду (шламу) шляхом фільтрування під вакуумом через мембранний фільтр до утворення тріщин на зневодненій твердій речовині, після чого проводився хімічний аналіз на наявність іонів ВМ у фільтраті ( $C_0$ );
- до зневодненого осаду додавали 100 мл дистильованої води, осад повільно перемішувався та витримувався впродовж 24 годин

без доступу повітря, далі осад зневоднювався під вакуумом і проводився хімічний аналіз на наявність іонів ВМ у відфільтрованій рідині ( $C_1$ );

- послідовно проводилося ще два досліди по вимиванню ВМ із цієї проби осаду дистильованою водою та хімічний аналіз відфільтрованої рідини ( $C_2$  та  $C_3$ ).

**Результати досліджень.** Залежності швидкості осадження зависі малорозчинних сполук важких металів в осаді з установки БВМК від тривалості процесу представлені на рис. 1. Швидкість осадження спочатку різко збільшується та досягає свого максимального значення на 5-тій хвилині ущільнення, а потім стрімко зменшується. Графіки швидкості осадження від часу можна умовно поділити на 3 інтервали: вільного осадження – 0–300 с; стиснене осадження – 300–3600 с; ущільнення осаду – 3600–7200 с.

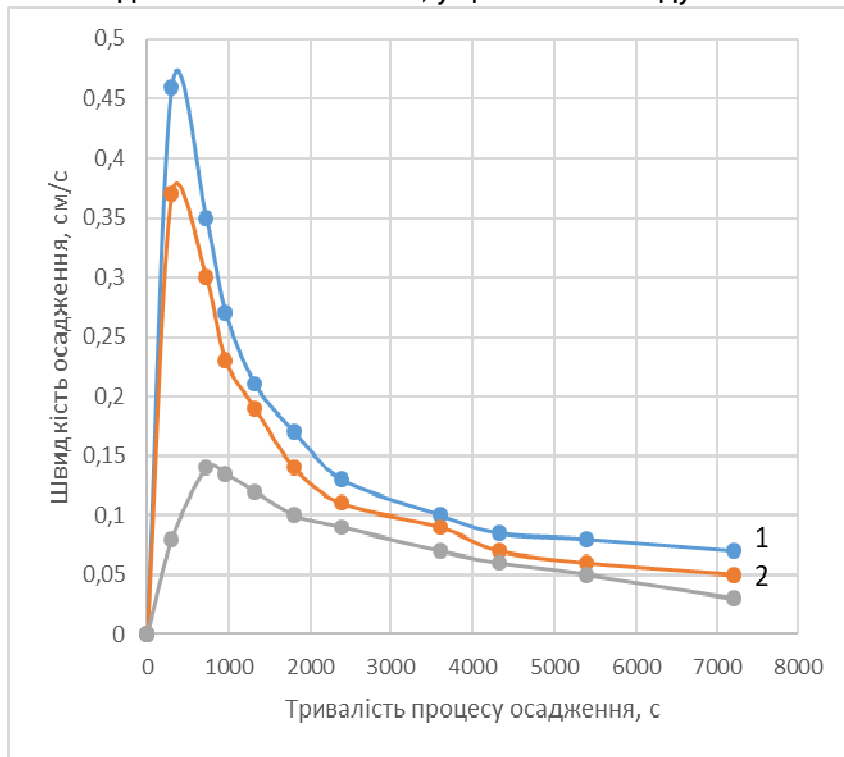


Рис. 1. Залежності швидкості осадження зависі осаду з установки БВМК від тривалості процесу при початкових концентраціях твердої фази  $C_0$ : 1 – 1,04 г/л; 2 – 1,36 г/л; 3 – 2,04 г/л

Флотаційний шлам, що утворюється в процесі електрохімічної очистки промивних вод гальванічного цеху на БВМК, представляє

собою висококонцентровану суспензію коричневого кольору вологістю 95,0–92,0% при часі накопичення 1–2 доби. При вихідній вологості 95,0–96,0%, питомий опір фільтрації складає  $(60–190) \cdot 10^{10}$  см/г, а продуктивність вакуум-фільтра при його зневодненні становить 4,6–4,8 кг/м<sup>2</sup>·год (табл. 1).

Збільшення часу накопичення шламу до 5 діб призводила до зменшення вихідної вологості до 86,0–88,0%. Питомий опір фільтрації флотаційного шламу становив  $(80–130) \cdot 10^{10}$  см/г і мало відрізнявся від цієї величини при фільтруванні осаду та суміші шламу і осаду. Продуктивність вакуум-фільтра при зневодненні шламу складала 4,4–4,8 кг/м<sup>2</sup>·год і практично не залежала від його початкової вологості.

Осад з прояснювача-відстійника виглядав як суспензія червоно-коричневого кольору з концентрацією твердої фази 2,0–3,3 г/л. Питомий опір осаду складав  $(100–250) \cdot 10^{10}$  см/г, а продуктивність вакуум-фільтра – 0,7–1,4 кг/м<sup>2</sup>·год, що в 4–6 разів менше ніж при фільтруванні флотошламу.

Графіки ущільнення осаду з прояснювача-відстійника БМВК залежно від тривалості процесу при різних вихідних концентраціях представлено на рис. 2. Найбільш інтенсивно процес ущільнення осаду проходить протягом першої години, при цьому концентрація ущільненого осаду досягає 4,8–5,5 г/л, а після двох годин ущільнення складає 6–7 г/л.

Ущільнення осаду впродовж 3 годин призводило до зменшення вологості до 98,8–99,2%, а продуктивність вакуум-фільтра при його зневодненні дещо підвищується до 1,2–1,6 кг/м<sup>2</sup>·год.

При зневодненні суміші флотаційного шламу та осаду (1:1) і вологістю 97,0–98,0% продуктивність вакуум-фільтра становить 2,5–2,8 кг/м<sup>2</sup>·год. Вологість шламу і осаду після зневоднення вакуумним фільтруванням складає відповідно 80,6–82,4% та 89,6–88,2%. Зневоднений флотаційний шлам добре відокремлюється від діафрагми, а осад – погано.

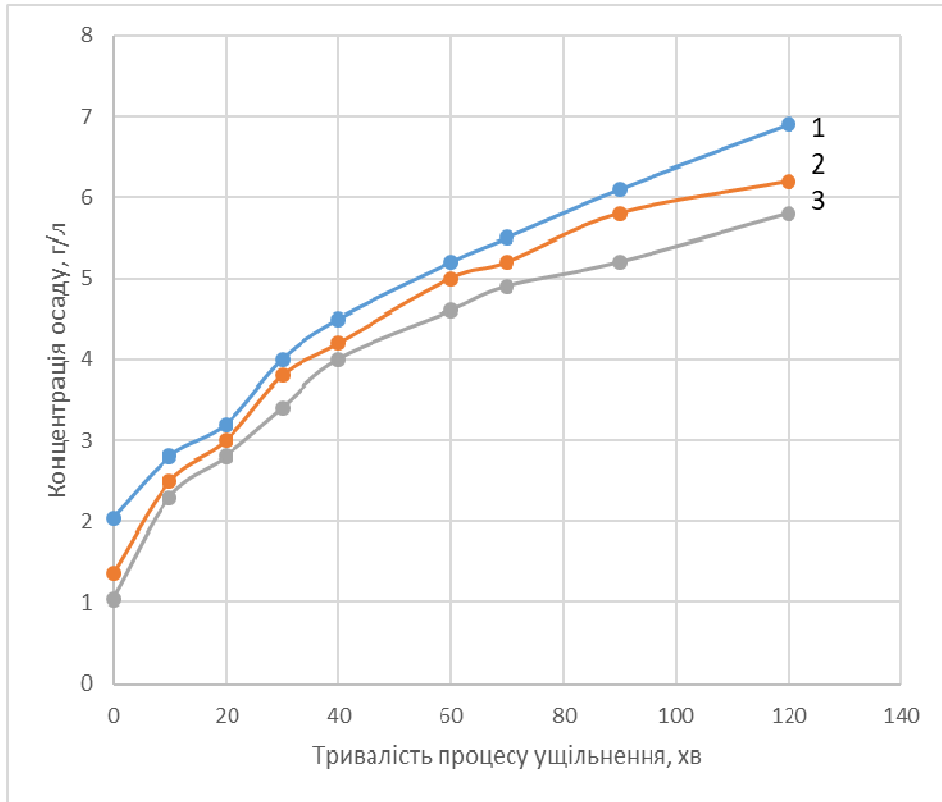


Рис. 2. Залежності зміни концентрації твердої фази в осаді з установки БМВК від тривалості його ущільнення при початкових концентраціях твердої фази  $C_0$ : 1 – 2,04 г/л; 2 – 1,36 г/л; 3 – 1,04 г/л

Узагальнені фільтраційні характеристики флотаційного шламу та осаду ВМ з БМВК представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Узагальнені фільтраційні характеристики флотошламу та осаду, що утворюються при очищенні стічної води від ВМ

Вид утворюваних відходів	Вологість утворюваного шламу (осаду), %	Питомий опір фільтрування $10^{10}$ см/г	Продуктивність вакуум-фільтра, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{год}$
Флотошлам після 1 доби накопичення	95,0–96,0	80–190	4,6–4,8
Флотошлам після 5 діб накопичення	86,0–88,0	80–130	4,4–4,8



продовження табл. 1

Осад після 1 доби накопичення	99,7–99,9	100–250	0,7–1,4
Осад через 8 годин	98,8–99,2	70–250	1,2–1,6
Суміш флотошламу та осаду 1:1 після 1 доби накопичення	97,0–98,0	50–250	2,5–2,8

Результати досліджень по вимиванню іонів  $Fe^{3+}$  та  $Cr^{3+}$  із суміші модельних гідроксидів  $Fe(OH)_3$  та  $Cr(OH)_3$  представлені у табл. 2, іонів  $Cu^{2+}$  та  $Ni^{2+}$  із модельних гідроксидів  $Cu(OH)_2$  та  $Ni(OH)_2$  у табл. 3, осаду із прояснювача-відстійника БМВК у табл. 4, флотаційного шламу у табл. 5.

Величина  $C_0/C_1$  показує співвідношення наявності важких металів у рідині із утвореного осаду до їх концентрації у рідині після вимивання дистильованою водою із зневодненого осаду. Ця величина може служити для оцінки ступеня вимивання важких металів під дією атмосферних опадів при складуванні осаду та можливість кількісної оцінки його стабільності. Величина  $W_i$  може служити показником для оцінки умов складування осаду. Показники, наведені у стовпчику 10 (табл. 2–5), дозволяють отримати уявлення про ступінь вимивання окремих компонентів.

Порівняння величин  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  показує інтенсивність вимивання окремих компонентів осаду у часі. Як видно із отриманих даних, ступінь вимивання іонів  $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$  та  $Cu^{2+}$  із штучно створеного осаду ВМ порівняно невисока та знаходиться, відповідно, в межах 55–91, 13–17 та 90–144 мг/кг. Ступінь вимивання іонів  $Ni^{2+}$  значно вищий та становить 23650–45850 мг/кг, внаслідок чого нікельвмісні осади потрібно відносити до слабкостійких, які потребують спеціальної підготовки перед захороненням.

Таблиця 2

Дослідження вимивання іонів  $Fe^{3+}$  та  $Cr^{3+}$  із суміші модельних гідроокисів  $Fe(OH)_3$  та  $Cr(OH)_3$ 

Назва речовини	Вміст вимитої речовини в осаді, мг	Кількість вимитої речовини у фільтраті, мг				Сумарна кількість вимитих речовин, $\sum C_{1-3}$ , мг	Співвідношення $C_0 / C_1$ , мг	Вимивання речовин $W_t$ , мг/кг осаду	Ступінь вимивання в залежності від маси їх в осаді, %
		$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$				
$Fe^{3+}$	3300	0,010	0,142	0,083	0,045	0,270	0,071	82	0,008
$Cr^{3+}$	900	0,015	0,010	0,005	-	0,015	1,50	17	0,0017
$Fe^{3+}$	3300	0,0086	0,093	0,063	0,024	0,180	0,092	55	0,0055
$Cr^{3+}$	900	0,012	0,007	0,005	-	0,012	1,71	13	0,0011
$Fe^{3+}$	3300	0,012	0,158	0,090	0,052	0,300	0,076	91	0,0091
$Cr^{3+}$	900	0,015	0,008	0,006	-	0,014	1,88	16	0,0016

Таблиця 3

Дослідження вимивання іонів  $Cu^{2+}$  та  $Ni^{2+}$  із модельних гідроокисів  $Cu(OH)_2$  та  $Ni(OH)_2$ 

Назва речовини	Вміст вимитої речовини в осаді, мг	Кількість вимитої речовини у фільтраті, мг				Сумарна кількість вимитих речовин, $\sum C_{1-3}$ , мг	Співвідношення $C_0 / C_1$ , мг	Вимивання речовин $W_i$ , мг/кг осаду	Ступінь вимивання в залежності від маси їх в осаді, %
		$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$				
$Cu^{2+}$	2000	0,088	0,04	0,058	0,14	0,238	0,2	119	0,0119
$Ni^{2+}$	2000	2,07	20,4	16,4	10,5	47,3	0,1	23650	2,365
$Cu^{2+}$	2000	0,025	0,135	0,058	0,095	0,288	0,01	144	0,0144
$Ni^{2+}$	2000	16,9	22,6	20,5	15,4	58,5	0,07	29250	2,925
$Cu^{2+}$	2000	0,039	0,039	0,060	0,081	0,180	0,1	90	0,009
$pH$	-	8,02	7,96	7,57	7,08	-	-	-	-
$Ni^{2+}$	2000	2,05	33,6	37,6	20,5	91,7	16,3	45850	
$pH$	-	7,62	7,26	6,78	6,50	-	-	-	-

Дослідження вимивання іонів  $Fe^{3+}$  та  $Cr^{3+}$  із флотаційного шламу БМВК

Назва речовини	Вміст вимитої речовини в осаді, мг	Кількість вимитої речовини у фільтраті, мг				Сумарна кількість вимитих речовин, $\sum C_{1-3}$ , мг	Співвідношення $C_0/C_1$ , мг	Вимивання речовин $W_t$ , мг/кг осаду	Ступінь вимивання в залежності від маси їх в осаді, %
		$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$				
$Fe^{3+}$	16120	0,237	0,088	0,056	0,0044	0,1484	2,69	9	0,00092
$Cr^{3+}$	4860	-	0,013	-	-	0,013	0	3	0,00027
$pH$	-	8,35	8,15	7,90	7,95	-	-	-	-

Таблиця 5

Дослідження вимивання іонів  $Fe^{3+}$  та  $Cr^{3+}$  із осаду прояснювача БМВК

Назва речовини	Вміст вимитої речовини в осаді, мг	Кількість вимитої речовини у фільтраті, мг				Сумарна кількість вимитих речовин, $\sum C_{1-3}$ , мг	Співвідношення $C_0/C_1$ , мг	Вимивання речовин $W_t$ , мг/кг осаду	Ступінь вимивання в залежності від маси їх в осаді, %
		$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$				
$Fe^{3+}$	2900	0,055	0,083	0,040	0,010	0,133	0,66	46	0,005
$Cr^{3+}$	810	-	0,025	0,013	-	0,036	-	10	0,005
$pH$	-	9,22	8,73	8,13	7,8	-	-	-	-
$Fe^{3+}$	2900	0,068	0,092	0,056	0,012	0,160	0,74	55	0,0055
$Cr^{3+}$	810	0,005	0,030	0,012	-	0,042	0,17	11	0,0052
$pH$	-	8,95	8,65	8,42	8,05	-	-	-	-



Ступінь вимивання іонів  $Fe^{3+}$  та  $Cr^{3+}$  із осаду прояснювача становить відповідно 45–55 та 10–11 мг/кг, що знаходиться в межах вимивання цих іонів з хімічно отриманих гідроксидів металів. Ступінь вимивання із флотаційного шламу цих компонентів відповідно 9 та 3 мг/кг, що значно менше ніж із осаду, отриманого відстоюванням сполук важких металів. Це вказує на більшу стабільність осаду флотаційного шламу важких металів під дією атмосферних опадів та необхідність і перспективність застосування флотаційного очищення стічних вод з важкими металами для подальшого безпечного для довкілля складування металовмісного осаду.

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що флотаційний метод розподілу фаз при очищенні стічних вод від важких металів має перевагу в порівнянні з традиційним відстоюванням по технологічній характеристиці отриманого шламу та осаду – об'єму, питомому опору та вологості твердої фази. Продуктивність обладнання для зневоднення шламу в 4–6 разів більша ніж для осаду.

Ступінь вимивання важких металів (хрому, заліза, міді) з флотаційного шламу значно менший ніж з осаду, отриманого шляхом реагентного осадження важких металів, що вказує на економічно вигідніше та екологічно більш безпечніше використання флотаторів для відділення зависі важких металів у порівнянні з відстійниками з погляду об'єму утвореного осаду та тривалості його зберігання.

Ступінь вимивання іонів нікелю з осаду на три порядки вищий ніж іонів заліза та хрому, у зв'язку з чим необхідно передбачати спеціальні заходи, що запобігають вимиванню нікелю атмосферними опадами при захороненні твердих відходів.

1. Рибалова О. В., Бригада О. В., Бондаренко О. О., Макаров Є. О. Новий метод оцінки ризику для здоров'я населення від впливу забруднення ґрунтів важкими металами. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2019. № 1(29). С. 79–99. 2. Основні показники використання та охорони водних ресурсів. К.: Держстат України, 2020–2023 : вебсайт. URL: [https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2006/ns\\_rik/ns\\_u/opvvr\\_u2005.html](https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2006/ns_rik/ns_u/opvvr_u2005.html) (дата звернення: 05.06.2023). 3. Астрелин И. М. Современное состояние проблемы накопления и переработки отходов водоочистки в Украине. *Вісник НТУУ «КПІ» ім. Сікорського*. 2010. № 10. С. 35–51. 4. Дрозд Г. Я., Бреус Р. В. Решение проблемы утилизации городских отходов водоочистки. *Коммунальное хозяйство городов. Сер. Экономические науки*. 2005. № 63.

С. 130–136. **5.** Naef A. A. Qasem, Ramy H. Mohammed, Dahiru U. Lawal Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review, npj. *Nature partner journals. Clean Water*. 2021. № 36. P. 1–15. **6.** «Met-Chem» США. Клівленд : вебсайт. URL: <https://metchem.com>. (дата звернення: 05.06.2023). **7.** ТОВ «Темп», м. Хмельницький : вебсайт. URL: <http://temp-mach.com>. (дата звернення: 05.06.2023). **8.** Polat H., Erdogan D. Heavy metal removal from waste waters by ion flotation. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. № 148. P. 267–273. **9.** Kovofinis, Чеська Республіка : вебсайт. URL: <https://www.kovofinis.cz>. (дата звернення: 05.06.2023). **10.** Филипчук В. Л. Очищення багатокомпонентних металовміщуючих стічних вод промислових підприємств : монографія. Рівне : УДУВГП, 2004. 232 с. **11.** МВВ № 081/12-0175-03. Поверхневі, підземні та зворотні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації заліза загального фотоколориметричним методом з роданідом. **12.** МВВ № 081/12-0114-03. Поверхневі підземні та зворотні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації хрому загального, хрому(VI) та хрому (III) екстракційно-фотоколориметричним методом з дифенілкарбазидом. **13.** КНД 211.1.4.035-95. Методика екстракційно-фотометричного визначення міді з діетилдітіокарбаматом свинцю в поверхневих та стічних водах. **14.** МВВ № 081/12-0178-05. Поверхневі підземні та зворотні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації нікелю фотоколориметричним методом.

## REFERENCES:

**1.** Rybalova O. V., Bryhada O. V, Bondarenko O. O., Makarov Ye. O. Novyi metod otsinky ryzyku dlia zdorov'ia naselennia vid vplyvu zabrudnennia gruntiv vazhkymy metalamy. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*. 2019. № 1(29). S. 79–99. **2.** Osnovni pokaznyky vykorystannia ta okhorony vodnykh resursiv. K. : Derzhstat Ukrainy, 2020–2023 : vebsait. URL: [https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2006/ns\\_rik/ns\\_u/opvvr\\_u2005.html](https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2006/ns_rik/ns_u/opvvr_u2005.html) (data zvernennia: 05.06.2023). **3.** Astrelin I. M. Sovremennoe sostoyanie problemy nakopleniya i pererabotki othodov vodoochistki v Ukraine. *Visnyk NTUU «KPI» im. Sikorskoho*. 2010. № 10. S. 35–51. **4.** Drozd G. YA., Breus R. V. Reshenie problemy utilizatsii gorodskih othodov vodoochistki. *Kommunalnoe hozyaystvo gorodov. Ser. Ekonomicheskie nauki*. 2005. № 63. S. 130–136. **5.** Naef A. A. Qasem, Ramy H. Mohammed, Dahiru U. Lawal Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review, npj. *Nature partner journals. Clean Water*. 2021. № 36. P. 1–15. **6.** «Met-Shem» SShA. Klivlend : vebsait. URL: <https://metchem.com>. (data zvernennia: 05.06.2023). **7.** TOV «Temp», m. Khmelnytskyi : vebsait. URL: <http://temp-mach.com>. (data

zvernennia: 05.06.2023). **8.** Polat H., Erdogan D. Heavy metal removal from waste waters by ion flotation. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. № 148. P. 267–273. **9.** Kovofinis, Cheska Respublika : vebсайт. URL: <https://www.kovofinis.cz>. (data zvernennia: 05.06.2023). **10.** Fylypchuk V. L. Ochyshchennia bahatokomponentnykh metalovmishchuiuchykh stichnykh vod promyslovykh pidryiemstv : monohrafiia. Rivne : UDUVHP, 2004. 232 s. **11.** MVV № 081/12-0175-03. Poverkhnevi, pidzemni ta zvorotni vody. Metodyka vykonannia vymiriuvan masovoi kontsentratsii zaliza zahalnoho fotokolorymetrychnym metodom z rodanidom. **12.** MVV № 081/12-0114-03. Poverkhnevi pidzemni ta zvorotni vody. Metodyka vykonannia vymiriuvan masovoi kontsentratsii khromu zahalnoho, khromu(VI) ta khromu (III) ekstraktsiino-fotokolorymetrychnym metodom z dyfenilkarbazydom. **13.** KND 211.1.4.035-95. Metodyka ekstraktsiino-fotometrychnoho vyznachennia midi z dietylditiokarbamatom svyntsiu v poverkhnevnykh ta stichnykh vodakh. **14.** MVV № 081/12-0178-05. Poverkhnevi pidzemni ta zvorotni vody. Metodyka vykonannia vymiriuvan masovoi kontsentratsii nikeliu fotokolorymetrychnym metodom.

---

**Fylypchuk V. L., Doctor of Engineering, Professor, Prokopiev O. K.,  
Master** (National University of Water and Environmental Engineering,  
Rivne), **Karpukhin O. O., Engineer**

### **TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SEDIMENT AND FLOTATION SLUDGE FORMED DURING WASTEWATER TREATMENT OF HEAVY METALS**

**Heavy metals, which are contained in the wastewater of industrial enterprises, represent a significant danger to the environment. They enter the hydro-ecological reservoir in two ways: with untreated / or insufficiently treated wastewater or migrate into water and soil from sediments obtained in the process of water treatment during storage. Significant environmental damage is exacerbated by the fact that heavy metals pollute reservoirs, which are sources of water supply. The only practical way to dispose of industrial wastewater sludge is its warehousing. Special landfills are needed for the burial of such sediments, which would exclude the release of heavy metal ions into the environment. However, due to the lack of such operating landfills, enterprises are forced to store sludge at their production sites. Storage of heavy metal deposits in the open**



space can lead to their gradual leaching and pollution of surface and underground waters. To solve this problem, two directions are used: processing of accumulated sediments of heavy metals with their further disposal and processing of sediments using technologies that eliminate or reduce the leaching of heavy metals. The technological characteristics of hydroxide sediments obtained in the process of purification by the settling method and sludges formed during flotation purification from suspension were studied. Studies have shown that the flotation method in the purification of wastewater from heavy metals has an advantage compared to traditional settling in terms of the characteristics of sludge and sediment – volume, specific resistance and humidity of the solid phase. Productivity of dewatering equipment for sludge is 4–6 times higher than for sludge. The degree of leaching of heavy metals such as copper (II), iron (III), chromium (III) and nickel (II) from the flotation sludge is significantly less than from the sediment obtained by reactive precipitation of heavy metals. The leaching rate of nickel ions is three orders of magnitude higher than that of iron and chromium ions, therefore, it is necessary to take special measures when disposing of such waste. The advantages of using the flotation method are shown, which makes it possible to obtain smaller volumes of solid waste, which are more resistant to leaching of heavy metals, which reduces their environmental hazard during storage and long-term storage.

*Keywords:* wastewater; heavy metals; sedimentation; flotation; hydroxide sludge; flotation sludge; sludge storage; leaching of metals.

---