

О.А. Сироватський, А.С. Карагяур

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

**ДОСЛІДЖЕННЯ СЕДИМЕНТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАСТОК В НЕЙТРАЛІЗОВАНИХ ПРОМИСЛОВИХ СТИЧНИХ ВОДАХ**

В статті наведені результати досліджень седиментаційних властивостей нейтралізованих вапном кислих промислових вод (травильних відділень, виробництв двоокису титану, шахтних вод). Показані умови утворення часток забруднень. Наведено методика визначення масової концентрації завислих речовин в залежності від якісного складу стоку при нейтралізації вапном сірчано-кислих і солянокислих вод. Розглянуті механічні, фізичні та фізико-хімічні властивості часток забруднень. Проведено кількісну оцінку впливу об'ємної концентрації суспензії на процес осадження. Експериментально показаний вплив об'ємної концентрації на стиснене осадження часток. Отримані результати експериментальних досліджень з визначення швидкості осідання часток, показана перспективність методів зменшення об'ємної концентрації.

**Ключові слова:** нейтралізація, стічні води, об'ємна концентрація, швидкість осадження, гідравлічна крупність.

**Постановка проблеми**

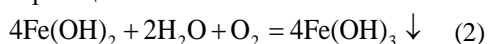
Кислі стічні води, які містять іони заліза, мінеральні кислоти та їх солі, утворюються при обробленні металу на підприємствах чорної та кольорової металургії, виробництві двоокису титану, нікелю, міді, а також при водовідливні шахтних вод.

Проблема переробки залізозмісних стічних вод виникла у зв'язку з необхідністю захисту водойм від забруднень стічними водами [1]. Такі води містять солі заліза ( $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{FeCl}_2$  та ін.), і потрапляючи в природне водоймище вони піддаються гідролізу за реакцією:



Гідроліз  $\text{FeSO}_4$  завершується при значеннях рН більше 8,5 [1-2], а оскільки рН природних вод зазвичай не перевищує 7.0-7.5, значна частина  $\text{FeSO}_4$ , що надійшли в такі води, залишається в розчиненому стані, що робить подібну воду непридатною для використання.

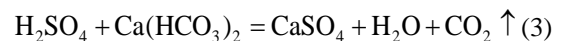
За наявності в природній воді розчиненого кисню відбувається окислення гідрату закису заліза, який поглинає розчинений у воді кисень, і окислюючись поступово переходить у гідроокис заліза (III) за реакцією:



Пластівці гідрату окису заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , випадають на дно і береги річок і водосховищ та утворюють осад яскраво-рудого кольору, природна вода втрачає кисень, що може призвести до знищення у воді певних видів мікроорганізмів і водного

органічного життя в цілому. В поверхневих природних водоймах такі стічні води можуть навіть повністю поглинути розчинений кисень.

Ще одним негативним наслідком скидання у водоймище розглянутих вод є зниження, а в деяких випадках і повне усунення бікарбонатної лужності природної води:



При інтенсивному забрудненні водойм зазначеними стічними водами в них може навіть створюватися кисла реакція середовища.

Водойми, що забруднені кислим стоком, який містить іони заліза, часто стають непридатними як джерела господарсько-питного, сільськогосподарського і технічного водопостачання [1]. Проблема негативного впливу таких стічних вод на поверхневі водоймища характерна не тільки для України, а й майже для всіх промислово розвинених країн світу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Вищесказане зумовлює актуальність проведення досліджень з розробки ефективних технологій щодо забезпечення використання залізозмісних кислих стічних вод у обороті з метою максимального скорочення або повного усунення скидання таких стоків у природні водойми.

Як зазначено вище, основними джерелами утворення кислого стоку, який містить іони заліза, є травильні виробництва [3], виробництва двоокису титану [4], нікелю, міді, інших кольорових металів,

водовідлив вугільних шахт і копалень кольорової металургії [5, 6].

Травлення – один із видів хімічної обробки поверхні металу, яке полягає в зануренні металевих виробів в розчини кислот. В результаті травлення підвищується якість поверхні металу та металевих виробів, з їхньої поверхні видаляється окалина (іржа). Травильні процеси широко використовуються як на виробництвах чорної металургії (прокатні та трубопрокатні), так і в машинобудуванні та металообробці (радіоапаратура, побутова техніка, друковані плати).

У травильному виробництві, виробництві двоокису титану, в машинобудуванні та в металообробці найчастіше використовують сірчану кислоту  $H_2SO_4$  [3], соляну  $HCl$  [7], азотну  $HNO_3$  та фосфорну  $H_3PO_4$ . У ряді випадків застосовують травлення у суміші кислот [2]. Між тим, найчастіше в промисловості використовуються саме сірчана і соляна кислоти.

При травленні металу утворюються дві групи стічних вод: відпрацьовані травильні розчини (ВТР) та промивні води (ПВ) [8]. Витрати стічних вод є досить значними і становлять у середньому  $0,1 - 0,5 \text{ м}^3$  ВТР та  $1-3 \text{ м}^3$  ПВ на 1 т продукції. На 1 т використаної кислоти утворюється близько  $10 \text{ м}^3$  ВТР і  $100 - 400 \text{ м}^3$  ПВ. Загальний сток від процесу травлення складається з  $10 - 15\%$  ВТР і  $85 - 90\%$  ПВ.

В цих стічних водах разом з вільними кислотами містяться також їх солі заліза ( $FeSO_4$ ,  $FeCl_2$  та ін.) і завислі частки переважно у вигляді окалини, іржі та інертні домішки. Якісний склад ВТР і ПВ є схожим, проте концентрації забруднень у ВТР в десятки разів вище ніж в ПВ. Так, ВТР містять до  $5-120 \text{ г/л}$  вільних кислот,  $150-250 \text{ г/л}$  мінеральних солей та  $1-5 \text{ г/л}$  інертних завислих речовин. У ПВ концентрація вільної кислоти становить  $0,1-1,1 \text{ г/л}$ , мінеральних солей –  $1,2-2,4 \text{ г/л}$ , інертних часток –  $0,1-0,4 \text{ г/л}$  [2, 3].

Усереднений якісний склад стічних вод травильних виробництв наведено в таблиці 1.

На виробництвах невеликої потужності ВТР і ПВ як правило оброблюють сумісно і частково нейтралізований і очищений сток направляють в загальну систему промислової каналізації. На середніх і великих підприємствах сток ВТР і ПВ розділяють і оброблюють кожен окремо [2].

Необхідність розробки методів коригування та регенерації ВТР обумовлена високою вартістю кислот та солей. В даний час методи регенерації або утилізації ВТР розроблені практично для будь-яких способів травлення металів, але найбільш широкого поширення знайшли методи кристалізації залізного купоросу [4] з ВТР сірчаноокислотного травлення та методи термічної регенерації ВТР соляноокислотного травлення окису заліза [7, 9, 10]. Переробка ВТР травлення сталі легованих марок, ВТР на основі

сірчаної кислоти з добавками різних солей сумішей азотної та плавикової кислот практикується лише в поодиноких випадках [2, 11].

Таблиця 1.

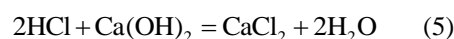
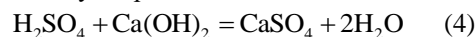
Усереднена якісна характеристика стічних вод сірчаноокислотних та соляноокислотних травильних виробництв чорної металургії

Якісний показник	Відпрацьовані травильні розчини (ВТР)	Промивні води (ПВ)
Температура, $^{\circ}C$	25 – 90	15 – 30
Завислі речовини, г/л	1 – 5	0,1 – 0,4
pH	1-2	4-5
$H_2SO_4$ , г/л	30 – 120	0,3 – 1,1
$HCl$ , г/л	5 – 30	0,1 – 0,9
Двовалентне залізо ( $Fe^{2+}$ ), г/л	50 – 140	0,1 – 1,5

За класифікацією академіка Кульського Л.А. [12-13] стічні води, які містять розчини мінеральних кислот та їх солей, є гомогенними системами і відносяться до четвертої групи вод. Мінеральні кислоти та водні розчини їх солей відносяться до сильних електролітів, що дисоціюють практично повністю. За тією ж класифікацією для очищення подібних стічних вод можуть застосовуватися методи, що забезпечують нейтралізацію кислот та утворення малорозчинних гідратів оксидів металів. Тобто, споруди нейтралізації повинні забезпечити вирішення двох основних завдань: нейтралізацію вільних кислот та переведення іонних розчинів солей заліза в малорозчинний гідрат закису  $Fe(OH)_2$ .

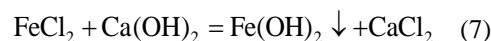
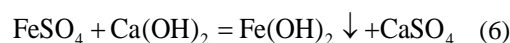
Для вирішення цих завдань застосовують обробку подібних стічних вод розчинами лугів. У переважній більшості випадків використовують вапняне молоко  $Ca(OH)_2$  через його доступність і низьку вартість [2, 14]. Іноді можливе застосування соди  $Na_2CO_3$  або їдкою натру  $NaOH$  [1, 12].

На стадії нейтралізації вільних кислот відбуваються наступні реакції:



Усунення вільної сірчаної кислоти забезпечується вже за значень pH нейтралізованих стоків  $5,0-5,5$ . Ця стадія процесу відбувається майже миттєво при змішуванні ПВ із розчином луку [15].

При подальшому підлучуванні відбувається гідроліз розчинених солей заліза, що протікає по реакціях:



З підвищенням pH середовища цей процес зсувається праворуч і повністю закінчується при pH

= 8,5-10. Тому термін “нейтралізація” слід розуміти дещо умовно, тому що він відповідає лише першій фазі обробки промивних вод - нейтралізації вільної кислоти, яка міститься у розчині. Подальше додавання реагенту необхідне створення умов завершення гідролізу. Гідроліз солей заліза починається вже за значень рН = 4,0-4,5, але повністю завершується лише при значеннях рН = 8.5-10. Тільки при досягненні таких значень рН можна повністю виділити зі стічних вод іони заліза [5].

Гідрат закису заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  (розчинність при 25 °С - 0.44 мг/л) утворюється у вигляді колоїдного розчину, здатного до коагуляції при значеннях рН = 2,5 - 9,0. В результаті коагуляції колоїдні частинки  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  об'єднуються в агрегати, флокуляція яких призводить до утворення пластівців, здатних випадати в осад. У цій стадії нейтралізовані стічні води, за класифікацією Л.А. Кульського, відносяться вже до гетерогенних систем – першої групи вод, для якої використовується процес коагуляції у вільному об'ємі [12-13].

Властивості завислих часток осаду, що утворюється при нейтралізації, і можливість регулювання цих властивостей визначають ефективність, умови роботи, розміри седиментаційних споруд (відстійників, освітлювачів) та споруд зневоднення.

Гідрат закису заліза в нейтралізованих ПВ під дією кисню швидко переходить в гідрат окису заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (2), розчинність якого при тих же умовах в  $2 \times 10^3$  разів нижче ніж  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  [5]. Для цього нейтралізовані стоки барботують стисненим повітрям. Крім того, пластівці  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  краще осаджуються, а осад (шлам), який при цьому утворюється, легше піддається зневодненню [15]. Гідрати закису і окису заліза утворюють пластівці, при осадженні яких утворюється сильно гідратований рихлий осад.

Основною особливістю шламів, що утворюються, є їх висока обводненість, що обумовлена колоїдно-дисперсною структурою гідроксидів заліза та малими розмірами частинок (до 0,01 мкм) [5]. Пластівці, що утворюються при нейтралізації, дуже нестійкі, в процесі осадження вони здатні злипатися, руйнуватися, змінюючи свої розміри і форму. Об'ємна вага таких часток мало відрізняється від об'ємної ваги води і становить 1,003 – 1,005 г/см<sup>3</sup>, а їх об'ємна концентрація - 15-30% [16], що обумовлює низьку ефективність використання традиційних конструкцій відстійних споруд. Одночасно, слід відмітити, що методи їх розрахунку потребують уточнення..

При сірчанокислотному травленні також має місце утворення ще одного компонента осаду – кальцієвої солі сірчаної кислоти – двоводного гіпсу  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  (4, 6), який має відносно невисоку

розчинність (2 г/л за нормальних умов). Об'ємна вага цих кристалів значно вища, ніж гідратів заліза, однак процес кристалізації в цьому випадку проходить досить повільно і мікрокристали, що утворюються, можуть в умовах оборотного водопостачання створювати пересичені розчини. Такі розчини є нестабільними, що може призводити до появи сольових відкладень в комунікаціях установок і в промивних ваннах [15].

Крім вказаних компонентів осаду, до його складу при нейтралізації вапном також входить і певна кількість важких часток: окалина, іржа, інертні частки, що містяться в товарному вапні (табл. 1). Ці складові частки осаду легко видаляються в умовах коагуляції [16].

## Мега статті

В зв'язку з цим, авторами роботи поставлено задачу вивчення седиментаційних властивостей шламу, що утворюється при нейтралізації залізозмісних кислих стічних вод.

При проектуванні відстійних споруд одним з головних чинників є допустима швидкість осадження часток забруднень для досягнення необхідного ефекту очистки. Для визначення допустимої швидкості осадження, на нашу думку, необхідно провести низку експериментальних досліджень, спрямованих на визначення впливу вагової та об'ємної концентрацій забруднень у вихідній воді, сольового складу на величину допустимої швидкості осадження. Це дасть змогу оцінити необхідний об'єм відстійних споруд, їх будівельні розміри при очищенні вапном кислих залізозмісних промислових стоків з метою їх подальшого використання у виробництві.

## Виклад основного матеріалу

Для розрахунку і проектування відстійних споруд одним з ключових є визначення вагової концентрації завислих речовин в нейтралізованих промивних водах, а також їх седиментаційні характеристики.

Дослідження загальної вагової концентрації завислих речовин в нейтралізованому стоку проводили за стандартною методикою експериментальним шляхом на штучно приготовлених розчинах (КНД 211.1.4.039-95 Методика гравіметричного визначення завислих (суспендованих) речовин в природних і стічних водах). Модельний розчин імітував за якісним складом нейтралізовану сірчанокислу стічну воду травильного процесу (див. табл 1). Для приготування розчинів використовували хімічно чисті сірчану кислоту і сульфат заліза (II), а також технічне вапно  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  з вмістом активної речовини 5 – 10%. Розчини готували на звичайній водопровідній воді.

При проведенні досліджень варіювали вміст кислоти і сульфату заліза в межах їх реального вмісту в стічній воді. Вапно дозували до досягнення рН води значень 9 – 10.

Концентрацію завислих речовин вимірювали гравіметричним способом за допомогою аналітичних терезів АДВ-200М, мембранних лабораторних фільтри №4 діаметром 35 мм і пристрою Оліхова-Зейтца із скляною трубкою.

Приготовлений розчин відстоювали протягом 15 хвилин, рівномірно перемішували і відбирали пробу об'ємом 50 – 100 мл. Пробу фільтрували на пристрої Оліхова-Зейтца через мембранний фільтр. Після фільтрування фільтр с осадом просушували в термошафі при температурі 60 °С. Кількість твердої речовини в пробі визначали за різницею маси чистого і забрудненого фільтра.

Проведений цикл досліджень дозволив визначити стехіометричні закономірності між масовим складом твердих продуктів нейтралізації та їх кількістю у вихідному розчині [16]. Отже загальна концентрація завислих речовин  $C$ , г/л, в нейтралізованому вапном залізовмісному сірчанокиислому стоку визначиться як сума концентрацій гідрату закису заліза,  $C_{Fe(OH)_2}$ , г/л, двоводного гіпсу, який утворює завись,  $C_{CaSO_4}$ , г/л, і інертних домішок, що вносяться з вапняним молоком,  $C_{ин}$ , г/л:

$$C = C_{Fe(OH)_2} + C_{CaSO_4} + C_{ин} \quad (8)$$

Концентрації гідрату закису заліза,  $C_{Fe(OH)_2}$ , г/л і двоводного гіпсу, який утворює завись  $C_{CaSO_4}$ , г/л можна визначити з наступних стехіометричних формул:

$$C_{Fe(OH)_2} = 1,6C_{Fe} \quad (9)$$

$$C_{CaSO_4} = 1,13C_{FeSO_4} + 1,75C_{H_2SO_4} \quad (10)$$

Ваговий вміст сульфату заліза (II),  $C_{FeSO_4}$ , г/л:

$$C_{FeSO_4} = 2,7C_{Fe} \quad (11)$$

де  $C_{Fe}$  - вміст іонів заліза у вихідному розчині, г/л;

$C_{H_2SO_4}$  - вміст вільної кислоти в розчині, г/л.

$$C_{ин} = D_B(1 - C), \quad (12)$$

де  $D_B$  - доза вапна, що вводиться для нейтралізації, г/л;

$C$  – активність вапна.

В реальних виробничих умовах до складу нейтралізованого стоку також входять і інші важкі інертні домішки (окалина, пісок, іржа тощо) з високою щільністю і вагою в кількості 0,1 – 0,4 г/л [2-3]. В проведених дослідженнях вміст і вплив цих домішок не враховувався.

Необхідна ступінь очищення нейтралізованих вапном стічних вод залежить від вимог до її якості, які в свою чергу, зумовлюються подальшим використанням цієї води: скид у водойми або повторне використання. При скиді очищених стічних вод у водойми або в систему централізованого водовідведення, якість цих вод повинна відповідати вимогам [17]. При використанні очищеного стоку в повторних промивках металевих виробів, вимоги до якості води в основному визначають двома факторами: умови нормального і якісного промивання та відсутність сольових відкладень в комунікаціях.

Узагальнені показники якості стічних вод при їх повторному використанні на потреби промивання металу наведені в табл. 2 [2, 8, 11, 16].

Таблиця 2

Усереднені вимоги до якості води, що подається на потреби промивки металу в травильних і гальванічних відділеннях.

Показник	Од. вим.	Травильні виробництва	Виробництво двоокису титану
Завислі речовини	мг/л	200 – 300	До 200
рН	-	6 – 9	7 – 9
Солевміст	мг/л	До 3000	До 2000
Хлориди	мг/л	1000	500
Сульфати	мг/л	2000	1500
Залізо	мг/л	100	10 – 20

Як видно з даних таблиці 2, вимоги до якості при скиді стічних вод в мережі централізованого водовідведення або у відкриті водойми є значно жорсткішими, ніж при їх повторному використанні, що зумовлює доцільність запровадження на таких виробництвах систем оборотного водопостачання або повторного використання промивних вод. Це дасть можливість уникнути (або суттєво зменшити) скиду стічних вод у поверхневі водотоки, а також полегшити експлуатацію очисних споруд комунального водовідведення [2, 3, 11].

Як вже було зазначено, для нормальної роботи системи нейтралізації промивних вод травильних відділень і близьких до них по складу стоків, важливе значення мають властивості зависі, яка утворюється в процесі нейтралізації. Умови освітлення нейтралізованих вод, швидкість осадження завислих речовин, ущільнення осаду залежать від фізико-хімічних властивостей часток зависі: щільності, об'ємної і вагової концентрацій, міцності, схильності до флокуляції. Ці властивості і визначають найважливіший показник роботи відстійних споруд – допустиму швидкість руху твердої частки в потоку.

На відміну від зернистої зависі, яка має місце в більшості стічних вод промислових підприємств, пластівчасті частки, що утворюються в процесі

нейтралізації, є вкрай нестійкими. Як показали наші спостереження, в процесі седиментації вони здатні злипатися, руйнуватися, змінюючи свої розміри і форму. В зв'язку з цим можна зробити висновок, що одним із впливових факторів на швидкість седиментації пластівчасті часток гідроксидів заліза є їх об'ємна концентрація, яка являє собою відношення об'єму пластівців до загального об'єму суспензії.

При характерних для цих стоків значеннях об'ємної концентрації вільне осадження пластівчастих часток відсутнє, а має місце стиснене осадження. Особливістю стисненого осадження є те, що швидкість осадження залежить не тільки від розмірів і маси окремих часток, але й від їх об'ємної концентрації.

Визначення величини об'ємної концентрації нейтралізованих вапном сірчаноокислих вод проводили експериментальним шляхом на штучно приготовлених розчинах, якісний склад яких описаний вище. Об'ємну концентрацію оцінювали візуальним спостереженням за кінетикою зниження кордону між осадом і освітленою рідиною в мірних лабораторних циліндрах, ємністю 1л.

В результаті проведених досліджень виявлено, що на числове значення об'ємної концентрації впливає лише вміст іонів заліза. Результати досліджень по залежності об'ємної концентрації від концентрації іонів заліза в оброблювальній воді наведені на рис. 1.

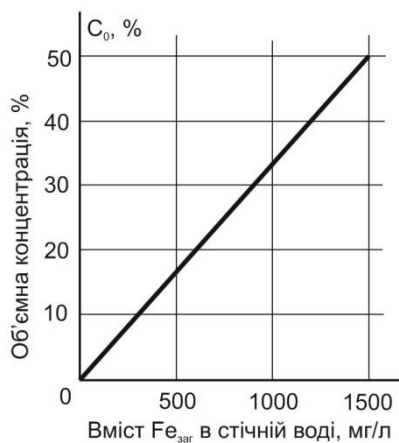


Рис. 1. Залежність об'ємної концентрації зavisі від загального вмісту іона заліза у воді

При визначенні розрахункових швидкостей осадження в методі нейтралізації стічних вод вапном на нашу думку необхідно враховувати такі основні властивості пластівчастого осаду, який при цьому утворюється:

1. Невелика об'ємна вага пластівців, близька по величині до об'ємної ваги води, а також суттєва обводненість (98-99%).

2. Висока об'ємна концентрація  $C_0$ , яка складає в таких водах до 20-35% і вище.

3. Здатність створювати нестійкі структуровані системи – пластівчасті агрегати, які мають малу міцність.

В зв'язку з цим можна зробити висновок, що швидкість стисненого осадження  $V_{oc}$ , в умовах, що розглядаються, буде дещо меншою за швидкість вільного осідання частки  $u_0$ . Це перевищення може сягати до 4-5 разів [18].

В теорії професора Д.М. Мінца залежність між швидкостями стисненого осадження  $V_{oc}$ , мм/с, вільного осадження пластівчастої частки  $u_0$ , мм/с, і об'ємною концентрацією розчину  $C_0$ , %, описана формулою:

$$V_{oc} = u_0(1 - \alpha C_0)^n = K u_0, \quad (13)$$

де  $\alpha$  і  $n$  – емпіричні коефіцієнти.

Величина коефіцієнта  $K$  не залежить від природи часток, що осаджуються і враховує вплив об'ємної концентрації на швидкість осадження пластівчастих часток. Коефіцієнт  $K$  для даних умов повністю визначається об'ємною концентрацією твердої речовини в суспензії.

Для виявлення закономірностей між величиною коефіцієнта  $K$  і об'ємною концентрацією в нейтралізованих вапном водах нами проведено дослідження кінетики осадження суспензій в лабораторних умовах. Експерименти проводили в скляних циліндрах ємністю 1л на штучно приготовлених розчинах. Вміст твердих речовин в пробах визначали гравіметричним способом.

Числове значення швидкості вільного осідання частки розраховували за формулою Стокса:

$$u_0 = \frac{d^2 \Delta \rho g}{18 \eta}, \quad (14)$$

де  $d$  – розмір частки забруднень, м;

$\Delta \rho$  – різниця густини частки забруднення і води, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta$  – динамічна в'язкість рідини при заданій температурі, Па·с.

Визначені величини  $u_0$  збігаються з даними авторів [5, 14, 18], що свідчить про достовірність розрахунків.

Проведені експериментальні дослідження дозволили отримати залежність, показану на рис. 2.

В результаті аналізу і обробки масиву експериментальних даних побудована залежність допустимої швидкості осадження часток від об'ємної концентрації зavisі в нейтралізованих стічних водах. Це дає можливість в подальшому проводити технологічні розрахунки відстійних споруд і визначати їх будівельні розміри. Узагальнена залежність для нейтралізованих вапном сірчаноокислих стічних вод для умов, що розглядаються, представлена на рис. 3.

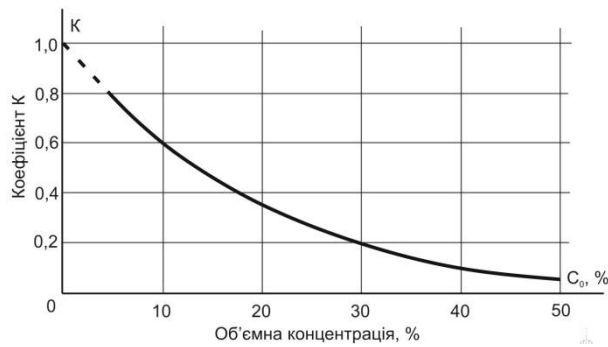


Рис. 2. Вплив об'ємної концентрації зависі в стічній воді на величину коефіцієнта K

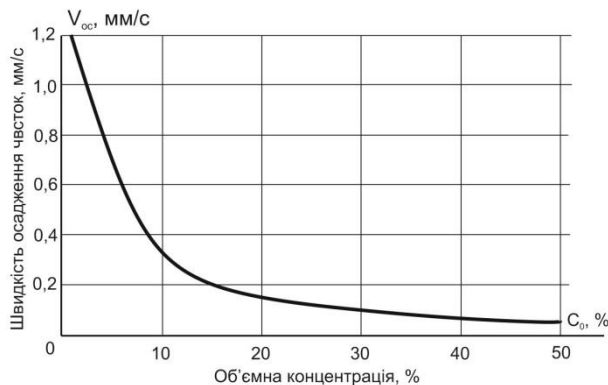


Рис.3. Залежність допустимої швидкості осадження часток зависі від об'ємної концентрації розчину

Результати проведених експериментів дають змогу зробити висновок, що величина допустимої швидкості стисненого осадження часток, представлених головним чином гідроксидами заліза, залежить від об'ємної концентрації розчину  $C_0$ , від способу нейтралізації і від загального вмісту заліза в воді.

Отримані в результаті досліджень закономірності показали якісний і кількісний характер основних залежностей для визначення допустимих швидкостей осадження при проектуванні відстійних споруд.

Між тим, проста нейтралізація кислого стоку вапняним молоком сприяє утворенню високих концентрацій (до 3 г/л і більше) легких і нестійких пластівців, які мають близьку до води об'ємну вагу і низькі швидкості осадження. Це зумовлює значні розміри відстійних споруд (відстійників, освітлювачів) для таких вод, підвищений час відстоювання, збільшені об'єми осаду, що скидається та його фільтрувальні властивості при зневодненні.

Тому, з метою підвищення ефективності осадження нейтралізованих вапном кислих стоків травильних відділень і близьких до них по якісному

складу вод (кислих шахтних вод, стоків виробництва двоокису титану, виробництв металообробки), слід вжити заходів щодо зменшення об'ємної концентрації розчинів [5, 18]. Цього можна досягти, на нашу думку, окремим або сумісним введенням синтетичних поліелектролітів (флокулянтів), зміненням режиму нейтралізації, аерацією стоку (для окиснення гідрату закису заліза II), нагрівом, внесенням добавок, що обтяжують або запровадити рециркуляцію осаду [15-16].

## Висновки

Отже, проведені експериментальні дослідження показали вплив об'ємної концентрації забруднень в кислих залізовмісних стічних водах на допустиму швидкість осадження часток в стиснених умовах. Отримані залежності дозволяють визначити основні параметри роботи відстійних споруд і їх будівельні розміри.

Подальші дослідження будуть спрямовані на зменшення об'ємної концентрації суспензії. Для отримання кількісної оцінки і визначення ефективності можливих шляхів інтенсифікації освітлення є необхідність в проведенні додаткових досліджень з метою визначення доз реагентів, обсягів рециркуляції, тривалості аерації, температури нагріву, рН оброблювальних вод.

## Література

- Zhenguo Chen, Xiaojun Wang, Qilong Ge, Guanchao Guo. Iron oxide red wastewater treatment and recycling of iron-containing sludge // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol.87. P. 558-566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.057>
- Водопостачання та водовідведення промислових підприємств: навчальний посібник / С.В. Лукашенко, О.А. Сироватський, О.Г. Гайдучок та ін. Харків: Мачулін, 2022. 180 с.
- Durdona Azimova, Dilnoza Salikhanova, Gulmira Nomozova, Izzat Eshmetov, Uktam Temirov. Treatment of waste water contaminated with iron ions on the basis of activated defecate // *3<sup>rd</sup> International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 377. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337703005>
- Yanjuan Zhang, Sisi Li, Songlin Fan. A stepwise processing strategy for treating highly acidic wastewater and comprehensive utilization of the products derived from different treating steps // *Chemosphere*. 2021. Vol 280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130646>
- Goodwill Mohajane, Nikolay Panichev. Treatment of iron(II)-rich acid mine water with limestone and oxygen // *Water Science & Technology*. 2014. Vol. 70. P. 209-217. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.178>
- Долина Л.Ф. Стічні води підприємств гірничої промисловості і методи їх очистки: довідковий посібник. Дніпро: Контимент, 2000. 61с.
- Arkaiz Anderez, Francisco J. Alguacil, Félix A. López, Acid pickling of carbon steel // *Revista de Metalurgia*. 2022. Vol.58. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.226>
- Yatskov M., Korchyk N., Mysina O., Budenkov N. Creation of a combined system for treatment of ironcontaining wastewater from etching operations // *Chemical engineering:*

- ecology and environmental technology. 2021. №6/3(62). P. 21-26. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.247550>
9. Шкірко І. В. Дослідження впливу сірчаної кислоти на процес кристалізації сульфату заліза з відпрацьованого травильного розчину // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2006. № 5. С. 59-62.
10. Alper Solmaz, Ömer Saltuk Bölükbaşı, Green industry work: production of FeCl<sub>3</sub> from iron and steel industry waste (mill scale) and its use in wastewater treatment // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32451-6>
11. Lawal, J.A., Anaun, T.E. An Overview of Characterization and Treatment Methods of Wastewater from Iron and Steel Industries // AJOSR. 2022. Vol. 4. P. 152-163.
12. Нестер А.А., Корчик Н.М., Баран Б.А. Стічні води підприємств та їх очищення : монографія. Хмельницький: ХНУ, 2008. 171 с.
13. Степова О.В., Трохименко Г.Г. Технології захисту водного середовища: навчально-методичний посібник. Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. 306 с.
14. Tova Jarnerud, Andrey Karasev, Pär Jönsson. Neutralization of Acidic Wastewater from a Steel Plant by Using CaO-Containing Waste Materials from Pulp and Paper Industries // Recovery of Waste Materials: Technological Research and Industrial Scale-Up. 2021. Vol.14. P. 2-11. <https://doi.org/10.3390/w14142231>
15. Пантелей Г.С., Сыроватский А.А., Лукашенко С.В., Ефремов А.Б. Усовершенствованная установка для нейтрализации кислых железосодержащих вод завода // Научный вестник строительства. 2006. № 36. С. 122-126.
16. Сыроватский А.А., Лукашенко С.В., Салюк В.А., Степаненко Н.И. Очистка минерализованных сточных вод травильных отделений металлургических предприятий // Научный вестник строительства. 2007. № 42. С. 140-144.
17. Правила приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення: Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури від 13.12.2023 №1134. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18#Text>
18. Paula Guerra, Julio Valenzuela, Consuelo Rámila. Giannina Cattaneo. Settling of Iron and Aluminum Particles in Acid Solutions for Acid Drainage Remediation // Water. 2022. Vol. 14. <https://doi.org/10.3390/w14142231>

## References

1. Zhenguo, C., Xiaojun, W., Qilong Ge, & Guanchao G. (2015). Iron oxide red wastewater treatment and recycling of iron-containing sludge. *Journal of Cleaner Production*, 87, 558-566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.057>
2. Lukashenko, S.V., Sirovatsky, O.A., Haiduchok, O.H., & Titov, A.A. (2022) *Water supply and drainage of industrial enterprises*. Kharkiv: Machulin.
3. Azimova, D., Salikhanova, D., Nomozova, G., Eshmetov, I., & Temirov, U. (2023). Treatment of waste water contaminated with iron ions on the basis of activated defecate. *3<sup>rd</sup> International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering*, 377. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337703005>
4. Yanjuan, Z., Sisi, L., & Songlin, F. (2021). A stepwise processing strategy for treating highly acidic wastewater and comprehensive utilization of the products derived from different treating steps. *Chemosphere*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130646>
5. Goodwill, M., Panichev, N. (2014). Treatment of iron(II)-rich acid mine water with limestone and oxygen. *Water Science & Technology*, 70, 209-217. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.178>

6. Dolyna, L.F. (2000). *Wastewater of mining enterprises and methods of their treatment: a reference guide*. Dnipro: Continent.
7. Anderez, A., Alguaci, F., & López F. (2022). Acid pickling of carbon steel. *Revista de Metalurgia*, 58. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.226>
8. Yatskov, M., Korchyk, N., Mysina, O., & Budenkov, N. (2021). Creation of a combined system for treatment of ironcontaining wastewater from etching operations. *Chemical engineering: ecology and environmental technology*, 6/3(62), 21-26. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.247550>
9. Shkirko, I. V. (2006). Study of the influence of sulfuric acid on the process of crystallization of iron sulfate from the spent pickling solution. *Bulletin of the Vinnitsia Polytechnic Institute*, 5, 59-62.
10. Solmaz, A., & Bölükbaşı, O. (2024). Green industry work: production of FeCl<sub>3</sub> from iron and steel industry waste (mill scale) and its use in wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32451-6>
11. Lawal, J., & Anaun, T. (2022). An Overview of Characterization and Treatment Methods of Wastewater from Iron and Steel Industries. *AJOSR*, 4, 152-163.
12. Nester, A.A., Korchyk, N.M., & Baran B.A. (2008). *Wastewater of enterprises and their treatment: monograph*. Khmelnytskyi: KhNU.
13. Stepova, O.V., & Trokhymenko, H.G. (2022). *Water environment protection technologies*. Poltava: NU "Poltava Polytechnic named after Yuri Kondratyuk".
14. Jarnerud, T., Karasev, A., & Jonsson, P. (2021). Neutralization of Acidic Wastewater from a Steel Plant by Using CaO-Containing Waste Materials from Pulp and Paper Industries. *Recovery of Waste Materials: Technological Research and Industrial Scale-Up*, 14, 2-11. <https://doi.org/10.3390/w14142231>
15. Pantelet, G.S., Sirovatsky, O.A., Lukashenko, S.V., & Yefremov, A.B. (2006). An improved plant for neutralization of acidic iron-containing wastewater of the plant. *Scientific Bulletin of Construction*, 36, 122-126.
16. Sirovatsky, O.A., Lukashenko, S.V., Salyuk, V.A., & Stepanenko, N.I. (2007). Purification of mineralized wastewater of pickling departments of metallurgical enterprises. *Scientific Bulletin of Construction*, 42, 140-144.
17. Ministry of Community Development, Territories and Infrastructure (2023, December 13). Rules for accepting wastewater into centralized drainage systems. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18#Text>
18. Guerra, P., Valenzuela, J., Consuelo, R., & Cattaneo, G. (2022). Settling of Iron and Aluminum Particles in Acid Solutions for Acid Drainage Remediation. *Water*, 14. <https://doi.org/10.3390/w14142231>

**Автор:** СИРОВАТСЬКИЙ Олександр Анатолійович  
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
Oleksandr SYROVATSKYY  
PhD (Tech.), Docent, Associate Professor at the Department of Water and Wastewater Engineering O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv  
E-mail - [oleksandr.syrovatskyi@kname.edu.ua](mailto:oleksandr.syrovatskyi@kname.edu.ua)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1002-8579>

**Автор:** КАРАГЯУР Андрій Степанович  
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри

водопостачання, водовідведення і очищення вод  
Харківський національний університет міського  
господарства імені О.М. Бекетова  
Andrii KARAHIAUR

Dr. Sc. (Tech.), Docent, Professor at the Department of  
Water and Wastewater Engineering O. M. Beketov  
National University of Urban Economy in Kharkiv  
E-mail - andrii.karahiaur@kname.edu.ua  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8868-3189>

## THE RESEARCH OF SEDIMENTATION PROPERTIES OF PARTICLES IN NEUTRALIZED INDUSTRIAL WASTEWATER

O. Syrovatskyi, A. Karahiaur

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

*The article is devoted to the topical issue of studying the sedimentation properties of pollutant particles contained in wastewater neutralized with lime. Such wastewater is formed by metal pickling, titanium dioxide production, metal processing and mechanical engineering. A similar flow is also typical for acid mine drainage. This wastewater contains predominantly sulfuric or hydrochloric acids and their iron salt. A lime solution is most often used to neutralize such water. When discharged into open water sources, neutralization products (metal hydroxides, salts) have a negative effect (the level of dissolved oxygen and bicarbonate alkalinity of water decreases).*

*In this regard, it seems advisable to treat neutralized water to a quality that satisfies the requirements for its use in production. So, it will ultimately reduce or minimize their discharge into water sources.*

*The article presents the results of experimental laboratory studies to determine the mass concentrations of suspended substances depending on the salt composition of the source water. A method for their calculation is proposed. An analysis of the conditions for forming contaminant particles and a consideration of the physical, mechanical and physicochemical properties of metal hydroxide particles is provided.*

*A significant influence of the volume concentration of the resulting particles on their gravitational separation is shown. An experimental dependence of the volume concentration on the content of iron ions in water was obtained.*

*Due to high volumetric concentrations, low volumetric weight and water content of iron hydroxide particles, constrained precipitation occurs under these conditions.*

*Laboratory experimental studies were conducted to determine acceptable sedimentation rates in settling structures. The dependences of permissible sedimentation rates on the volumetric concentration of suspended substances have been established. The obtained data make it possible to determine the required volumes of structures for settling neutralized wastewater.*

*The prospects of methods for reducing the volume concentration of suspensions in acidic wastewater containing iron are substantiated.*

**Key words:** neutralization, wastewater, volumetric concentration, settling rate, sedimentation rate.