

А. О. Шкоп, канд. техн. наук, докторант, О. В. Шестопапов, канд. техн. наук, доцент, Н. Г. Пономарьова, канд. техн. наук, доцент, А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, Д. І. Нечипоренко, канд. техн. наук, доцент, Д. М. Войтенко, аспірант

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЧИЩЕННЯ ТА ЗНЕВОДНЕННЯ ШЛАМІВ МОКРОЇ ГАЗООЧИСТКИ ВИКИДІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Вступ. Металургійні підприємства є одним із головних джерел забруднення атмосферного повітря, зокрема через викиди пилогазових сумішей, що утворюються в процесі виробництва феросплавів [1–3]. У плавильних цехах феросплавного заводу застосовуються різні технології очищення викидів, зокрема мокра та суха газоочистка [4].

Склад шламів газоочищення залежить від складу доменних газів, який в свою чергу залежить від шихтових матеріалів, що містять залізовмісні брикети, кварцити, вапно, деревну щепу, кокс, кам'яне вугілля та електродну масу. У результаті мокрої очищення газів утворюються шламові води з температурою +50...+70 °С, які надходять у водно-шламову систему (ВШС) підприємства і потребують очищення від завислих часток.

Накопичення шламових вод після мокрої очистки димових газів потребує належної технологічної та екологічної обробки, оскільки вони містять дрібнодисперсні тверді частинки, залишки важких металів, кремнезем, оксиди марганцю та інші сполуки, які можуть становити загрозу для довкілля та здоров'я населення у разі їх потрапляння у водні об'єкти або ґрунт. Особливу увагу заслуговує проблема утворення щільних осадів у трубопроводах водно-шламової системи, що ускладнює експлуатацію обладнання, знижує ефективність очищення й може призвести до аварійних ситуацій.

Попри широке застосування мокрої газоочистки на вітчизняних металургійних підприємствах, питання ефективного управління шламовими водами та утвореними осадами залишається недостатньо вирішеним. Відсутність комплексного підходу до переробки або безпечного видалення шламів, що накопичуються у водно-шламових системах, сприяє підвищенню екологічного навантаження на навколишнє природне середовище, зокрема на водні ресурси та ґрунти. Необхідність мінімізації обсягів утворення шламів, покращення якості очищення викидів та запобігання вторинному забрудненню зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Актуальність роботи зумовлена потребою удосконалення технологій очистки шламів та оптимізації функціонування водно-шламових систем для зменшення негативного впливу виробництва на навколишнє середовище. Запровадження сучасних підходів до очищення та утилізації шламів сприятиме зниженню техногенного навантаження, покращенню екологічної безпеки виробництва та підвищенню його сталості у межах вимог сучасного природоохоронного законодавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У вітчизняній науковій літературі питання знешкодження та утилізації шламів, що утворюються після мокрої очистки промислових викидів, розглядаються у працях таких дослідників, як Білецька Е.М., Онул Н.М., Ніконенко В.І., які аналізують екологічну небезпеку металургійних підприємств як джерела забруднення довкілля та ризику

для здоров'я населення [1], Фещенко О.Л. та Каменева Н.В., які оцінюють екологічні наслідки діяльності металургійних об'єктів в Україні [2], а також Нікітюк О.О., який підкреслює системний вплив металургійного виробництва на екологічну безпеку країни [3].

Шлами газоочистки містять дрібнодисперсні частки пилу металів, сажі і інших нерозчинних речовин [4]. Для очищення стічних вод, в тому числі шламів мокрої очистки газів, з метою їх вторинного використання в системах газоочистки використовують відстоювання з обробкою коагулянтами або флокулянтами. Процеси флокуляції й коагуляції при очищенні води детально проаналізовано у роботах [5–8], де окреслено умови ефективного осадження завислих часток за допомогою агрегатоутворюючих реагентів. Зазначено, що характеристики та особливості процесу флокуляції, включаючи розмір і структуру флокулянтів, вологоутримуючу здатність осаду та вміст вологи залежать від різних факторів, таких як склад твердої фази шламу, заряд та молекулярна маса флокулянтів, структура полімеру, дозування полімеру, жорсткість води, рН суспензії тощо.

У попередніх дослідженнях, встановлено особливості процесів очищення стічних вод, забрудненим пилом після процесів лиття як в металургійній промисловості [9, 10], так і на машинобудівних підприємствах [11]. Встановлено, що концентрація твердої фази впливає на швидкість осадження флокул, а гідромеханічний вплив на агрегати має руйнівний ефект, ступінь якого залежить від концентрації твердої фази [12]. Зокрема, збільшення швидкості руху рідини призводить до більшого пошкодження флокул, ніж збільшення часу менш інтенсивного впливу. Способом мінімізації руйнівного впливу на флокули може бути зниження швидкості транспортування суспензії внаслідок зниження продуктивності установки або збільшення поперечного перерізу каналу (трубопроводу). Ефективним способом очищення стічних вод від тонкодисперсних часток, в тому числі і шламів систем газоочищення металургійних підприємств можуть бути модульні установки, які містять устаткування для підготовки шламів до ефективної агрегації та зневоднюючі центрифуги [13]. У статті [14] було підкреслено важливість гідродинаміки та турбулентності потоку як основних рушійних сил процесу агрегації часток, що потребує проведення досліджень способів введення та змішування флокулянтів.

Разом з тим, більшість досліджень мають загальнотеоретичний характер і не враховують особливості функціонування конкретних водно-шламових систем великих металургійних підприємств. Це визначає необхідність поглибленого аналізу реального технічного стану та розробки практичних рекомендацій щодо вдосконалення систем очищення та поводження з шламами.

Мета і задачі дослідження

Мета даного дослідження полягає у визначенні ефективності схем очищення та зневоднення шламів мокрого газоочищення. Це потрібно для удосконалення роботи та підвищення ефективності модуля очищення шламових вод від завислих часток з метою вторинного використання освітленої води у системах газоочищення та зневоднення осаду.

Для досягнення зазначеної мети потрібно було вирішити наступні задачі:

- провести дослідження седиментаційних властивостей шламів мокрого газоочищення в промислових;
- визначити ефективність роботи очисного та зневоднюючого устаткування в залежності від особливостей введення флокулянту і шламу;

– запропонувати схему удосконалення очищення стічних вод апаратів мокрого газоочищення у водно-шламовій схемі виробництва феросплавів.

Методика дослідження. Дослідження проводилось на одному з підприємств Запорізької області з використанням натурних досліджень модуля (технологічного ланцюга апаратів) очищення та зневоднення шламів газоочищення. Модуль, який складався із змішуючи пристроїв, станції приготування флокулянтів та осаджувальної центрифуги (рис. 1), налаштовувався безпосередньо під час проведення промислових досліджень за наступними етапами дослідження.



Рисунок 1 – Характеристика модуля очищення та зневоднення шламових вод під час промислових випробувань в цеху металургійного підприємства (ТОВ «НТЦ «Екомаш», Україна)

1 етап промислових досліджень. Перевірена можливість очищення шламів цеху виробництва феросплавів, узятих перед радіальним згущувачем, з введенням катіонного флокулянту ТФК-18 двома порціями в потік з подальшим очищенням шламових вод і зневодненням шламів на центрифугі. Випробування проведені за схемою наведеною на рис. 2.

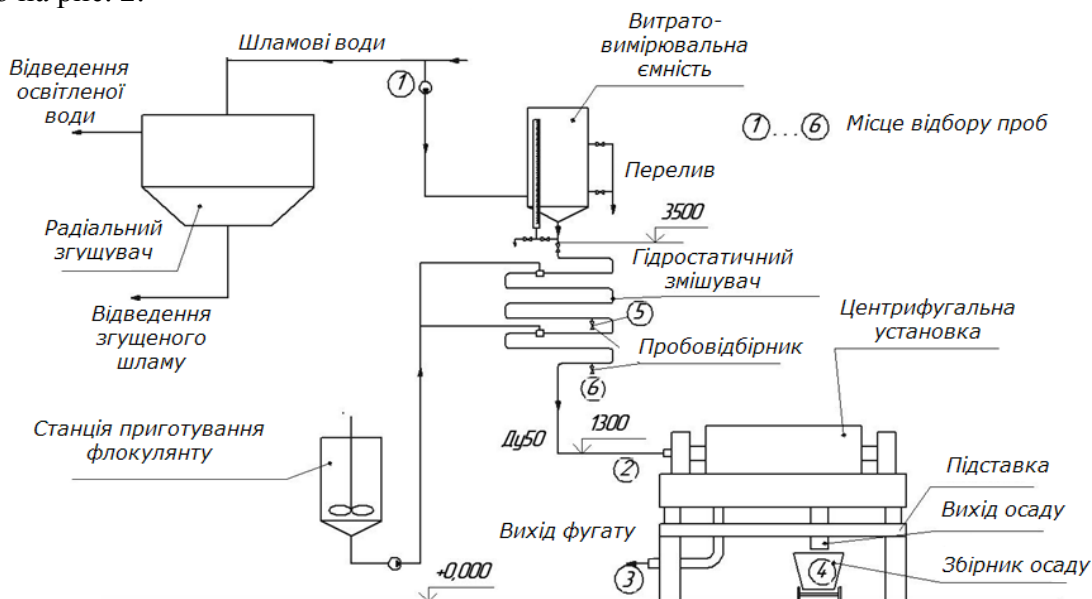


Рисунок 2 – Технологічна схема промислових випробувань на етапі 1

Згідно схеми шламові води газоочистки цеху феросплавів взяті безпосередньо перед радіальним згущувачем та подані насосом у витратно-вимірну ємність, з якої самопливом через гідростатичний змішувач (змійовик) поступають на зневоднення в центрифугальну установку. У потік шламових вод змішувача в дві крапки поданий розчин флокулянту.

2 етап промислових досліджень. Перевірена можливість очищення шламів, узятих перед радіальним згущувачем, з флокулюванням катіонним флокулянтом ТФК-18 або Aquator-PC5045 у одну крапку «під мішалку», осадженням шламів в ємності з отриманням прозорого зливу (імітація відстійника) і подальшого зневоднення шламів на центрифугі за схемою, що зображена на рис. 3.

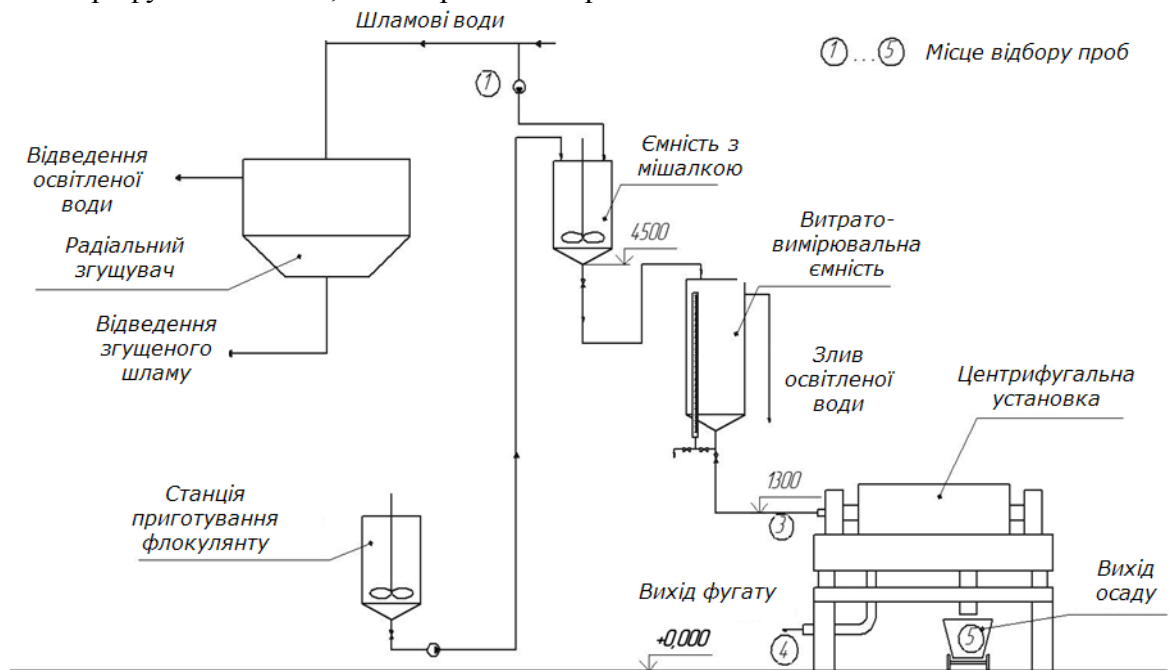


Рисунок 3 – Технологічна схема промислових випробувань на етапі 2

Згідно схеми шламові води газоочистки насосом подавались в ємність з мішалкою. У цю ж ємність подавався розчин флокулянту. Шламові води змішані з флокулянтом самопливом поступають у витратно-вимірну ємність при закритому нижньому зливні, в якій відбувається відстоювання шламу. Прозорий продукт самопливом зливався через перелив місткості. Осаджені завислі речовини накопичуються на дні місткості. Після заповнення місткості згущеним шламом подача живлення і флокулянта припинялась, нижній злив відкривався і шлам самопливом направлявся на зневоднення в центрифугальну установку.

3 етап промислових досліджень. Для підбору резервного флокулянту були проведені порівняльні випробування з катіонними флокулянтами Aquator-PC5045 або ТФК-7 в дві крапки в потік з подальшим очищенням шламових вод в центрифугі за схемою, наведеною на рис. 2.

4 етап промислових досліджень. Перевірена можливість очищення суміші шламів при змішуванні живлення радіального згущувача та його згущеного шламу у

різних пропорціях (концентрації завислих речовин суміші складала від 10 до 30 г/л) з введенням флокулянту в одну крапку під мішалку з подальшим зневодненням у центрифугу за схемою на рис. 4.

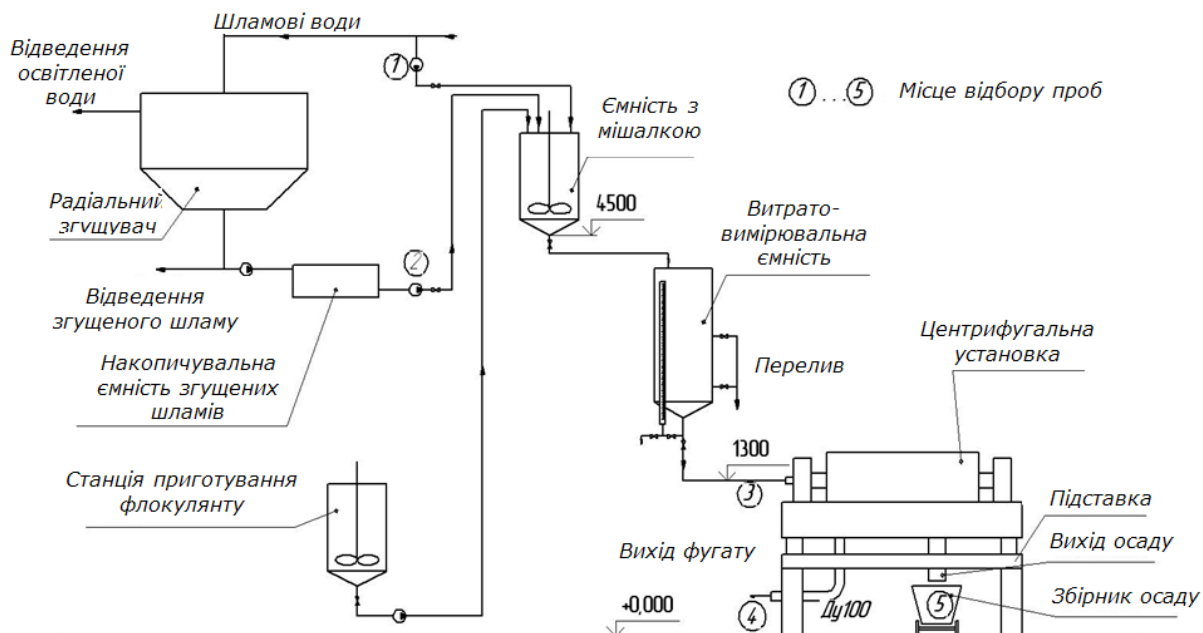


Рисунок 4 – Технологічна схема промислових випробувань на етапі 4

Згідно схеми згущені у радіальному згущувачі шлами насосом подавали в накопичувальну ємність, з якої їх перекачували в ємність з мішалкою. У цю ж ємність подавався розчин флокулянту. Співвідношення (витрати) шламових вод і згущених шламів регулювалися ручними засувками для отримання необхідної концентрації завислих речовин. Шламові води, змішані з флокулянтом самотпливом поступали у витратно-вимірвальну ємність, а потім на зневоднення у центрифугу.

Результати аналізу діючої водно-шламової схеми очищення шламів газоочищення

На досліджуваному підприємстві продукти горіння плавильних цехів піддаються сухій і мокрій очистці. Від цехів виробництва феросплавів та феросиліцію шламові води мокрої газоочистки самотпливом поступають у радіальний згущувач, перед яким змішуються в розподільному колодязі. У точці змішення потоків вводиться розчин катіонного флокулянта з концентрацією 0,025–0,05 %. Далі потік шламових вод по похилому трубопроводу поступає в завантажувальний пристрій радіального згущувача.

Радіальний згущувач виконаний у вигляді циліндрової чаші з конічним днищем (рис. 5) об'ємом 1500 м³. Надходження шламових вод і відведення освітленого продукту проводиться безперервно. Відкачування згущеного продукту проводиться в періодичному режимі згідно циклу роботи камерних фільтр-пресів, які його зневоднюють.

Освітлена вода (злив радіального згущувача) самотпливом поступає на вхід насосів які перекачують освітлену воду в градирню на охолодження. Після градирні освітлена вода та охолоджена вода подається на апарати мокрої газоочистки підходящих з цехів газів. Згущений осад відцентровим насосом ГШН-150-30 подається в цех зневоднення. Зневоднений продукт фільтр-пресів вивантажується в думпкери (вагони), які

вивозять тверді відходи на полігон для поховання. Надлишок згущеного шламу (близько 30 тон на добу) вивозяться цистернами на полігон рідких відходів.

В результаті схеми було виявлено, що при існуючому виробничому навантаженні має місце небаланс виділення шламів і їх зневоднення через недостатню продуктивність існуючого зневоднюючого устаткування – фільтр-пресів, що потребує додаткових зневоднюючих пристроїв. Збільшення потужностей із зневоднення шламів призведе до зменшення кількості рідких відходів, які вивозяться у вигляді шламу, а також втрати води з цими відходами.

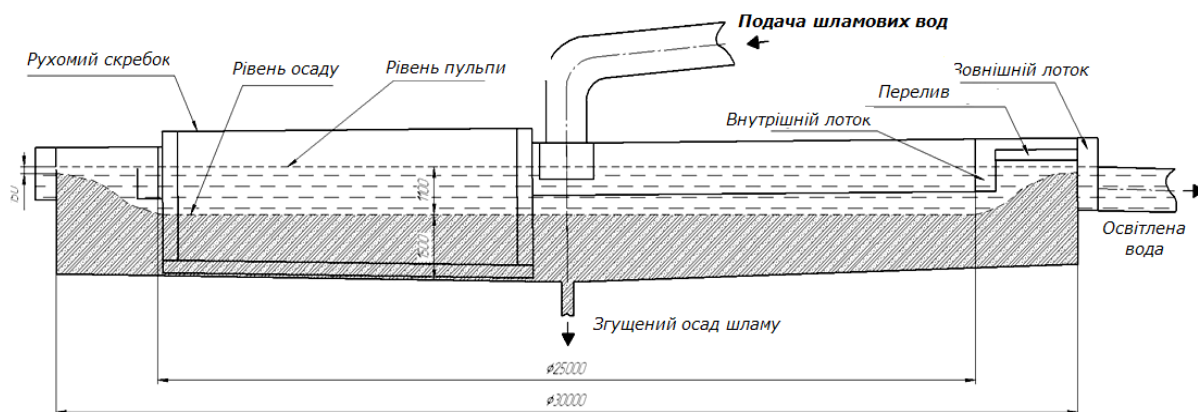


Рисунок 5 – Схема радіального згущувача

Седиментаційний аналіз виробничих шламів. В процесі промислових дослідів оцінювалась кінетика осідання проб шламу безпосередньо із виробничих цехів до їх потрапляння у радіальний згущувач: шламові води цеху виробництва феромарганцевих сплавів (проба 1); шламові води цеху виробництва феросиліцію (проба 2); шламові води безпосередньо перед радіальним згущувачем (проба 3), які є сумішшю шламів проб 1 і 2. Результати кінетики осадження проб 1, 2, 3 наведені в таблицях 1 та 2, а також рис. 6.

Таблиця 1 – Порівняння швидкості осадження зважених речовин в пробах

Час, хви- лин	Проба 1		Проба 2		Проба 3	
	Швидкість осідання часток, мм/с	Розмір часток, мкм	Швидкість осідання часток, мм/с	Розмір часток, мкм	Швидкість осідання часток, мм/с	Розмір часток, мкм
1	4,2	100...40	-	60...40	-	60...40
2	2,1		2,1		2,1	
5	0,84	40...14	0,84	40...14	0,84	40...14
10	0,42		0,42		0,42	
20	0,21		0,21		0,21	
30	0,14		0,14		0,14	
60	0,07	14...5	0,07	14...5	0,07	14...5
120	0,035		0,035		0,035	

Виконаний візуальний аналіз кінетики осідання часток, наведений на рис. 6, дозволяє використовувати набір технологічних тестів для приблизного візуального оперативного аналізу якості флокуляції та визначення вмісту завислих часток твердої фази у живленні та у фугаті.

Таблиця 2 – Вихід завислих часток за результатами седиментаційного аналізу

№ п/п	Клас, мкм	Проба 1		Проба 2		Проба 3	
		Вихід, г	Вихід, %	Вихід, г	Вихід, %	Вихід, г	Вихід, %
1	більше 40	1,85	80	0,8	60	0,25	30
2	40...14	0,15	9	0,35	25	0,15	25
3	14...5	0,05	3	0,05	5	0,1	5
4	менше 5	0,2	12	0,2	10	0,25	30

Аналіз результатів дослідження свідчить, що шлами проб 2 та 3 містять дрібнодисперсні завислі частки 40–60 % часток менше 40 мкм, які повільно осідають і до 30 % часток менше 5 мкм, що потребує ефективної флокуляції шламів перед відстоюванням з урахуванням особливостей агрегатоутворення дрібнодисперсних часток.

Аналіз результатів відстоювання проб шламів показав, що швидкість їх відстоювання у зразках 1 та 2 вища, ніж у суміші шламів, що свідчить про можливість стабілізації дисперсної системи внаслідок утворення колоїдних часток і хімічної взаємодії. Такі спостереження дозволяють рекомендувати роздільне очищення шламів мокрого газоочищення викидів від різних цехів, які можуть мати різний хімічний склад як твердої, так і рідкої фаз.

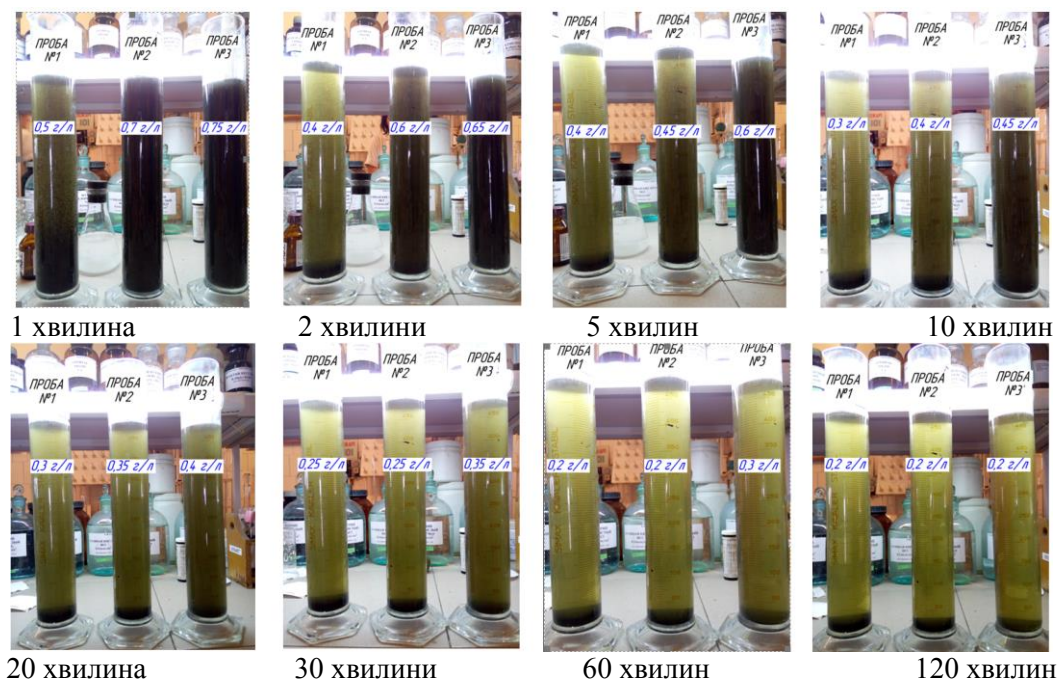


Рисунок 6 – Фотографії кінетики осідання твердої фази виробничих шламів

Результати випробувань Модуля очищення шламових вод і зневоднення шламів. Результати промислових випробувань способів змішення шламів з флокулянтами під час очищення і зневоднення шламів наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати промислових випробувань очищення та зневоднення шламів газоочищення

Марка флокулянта	Режим роботи			Навантаження			Технологічні параметри	
	Частота обертання ротора, об/хв	Відносні оберти шнеку, об/хв	Потужність живлення (м ³ /годину)	Концентрація твердої фази у живленні, г/л	Витрата флокулянта, г/т	Кількість твердої фази у живленні, кг/час	Фугат	Кек
	N _{рот}	ΔN _{шн}	Q _ж	C _ж	G _ф	T	Концентрація твердої фази, г/л C _ф	Вологість, % W
Етап 1 (рис. 2)								
ТФК-18	2450	10	5,2	3,927	2204	20,42	0,163	50,25
ТФК-18	2450	4	6,6	3,914	1742	25,823	0,67	51,2
ТФК-18	2450	4	4,5	1,306	1276	5,877	0,348	39,49
ТФК-18	2200	4	5,20	3,692	4469	19,198	0,162	52,02
ТФК-18	2200	8	5,20	3,692	4469	19,198	0,199	52,5
ТФК-18	2680	4	5,20	3,126	4429	16,255	0,211	39,81
ТФК-18	2680	13	5,20	3,126	4429	16,255	0,204	50,27
ТФК-18	3000	4	5,20	3,126	4429	16,255	0,192	49,82
ТФК-18	3200	4	5,20	2,553	4972	13,276	0,211	48,68
Етап 2 (рис. 3)								
ТФК-18	2450	4	4,5	12,022	2540	54,1	4,138	47,6
РС5045	2450	4	6,3	34,419	1470	154,9	1,214	49,6
Етап 3 (рис. 2)								
ТФК-7	2450	4	3,27	3,235	1418	10,58	0,519	49,4
ТФК-7	2450	4	3,27	2,705	1187	8,85	0,587	46,9
ТФК-7	2450	4	3,27	2,775	1157	9,07	0,573	49,8
ТФК-7	2450	4	3,27	3,074	895	10,05	0,758	49,7
РС5045	2450	4	3,27	3,263	843	10,67	0,581	51,6
Етап 4 (рис. 4)								
ТФК-7	2450	4	6,3	19,257	1236	121,32	4,006	49,1
РС5045	2450	4	6	12,891	1939	77,35	1,069	50,2

Аналіз таблиці 3 показав, що найефективніше зневоднення шламів досягається при використанні флокулянта ТФК-18 (вологість кеку до 39,5 %, концентрація твердої фази у фугаті до 0,162 г/л) за частоти обертання ротора 2450–2680 об/хв і помірної витрати реагенту (рис. 1). Флокулянт ТФК-7 також забезпечує стабільні результати (вологість кеку 46,9–49,8 %) при невисокій витраті. Найкращими за поєднанням ефективності та економічності є ТФК-18 і ТФК-7 при їх використанні відповідно до

схеми введення флокулянтів двома порціями у потік через гідростатичний змішувач відповідно до рис. 2. Збільшення відносних обертів шнеку та чистоти обертів ротору призводить до незначного підвищення вологості осаду внаслідок затримання тонких фракцій твердої фази, які мають більшу вологоутримуючу здатність.

Збільшення концентрації живлення центрифуги, яке імітувалось при дослідженні на етапах 2 та 4 свідчить про можливість досягнення вологості осаду центрифуги на рівні 50 %, але підвищення кількості твердої фази у фугаті до 1–4 г/л. При використанні такого ланцюгу апаратів фугат потребує доочищення або повинен повертатись у радіальний відстійник. Однак такий режим прийнятний для зневоднення згущених шламів даного виробництва та попередження вивозу рідких відходів на полігон.

В результаті проведених промислових експериментів було встановлено, що ефективна флокуляція і очищення шламів газоочистки, можлива при врахуванні основних чинників, що впливають на агрегатоутворення. Такими чинниками є концентрація твердої фази і її дисперсний склад, спосіб введення флокулянту (однією чи декілька ми порціями), спосіб змішення шламу з флокулянтами (гідростатичний чи за допомогою мішалки), температура шламу та інші фактори. Використання найбільш оптимальних умов флокуляції, очищення і зневоднення шламів дозволить знизити витрати дорогих флокулянтів, запобігти втратам води водооборотної системи і знизити об'єми і витрати на вивіз шламу.

На рис. 7 наведені фотографії відбору проб, фугату та осаду центрифуги, відібрані на етапі 1 за схемо досліджень, наведеною на рис. 2.

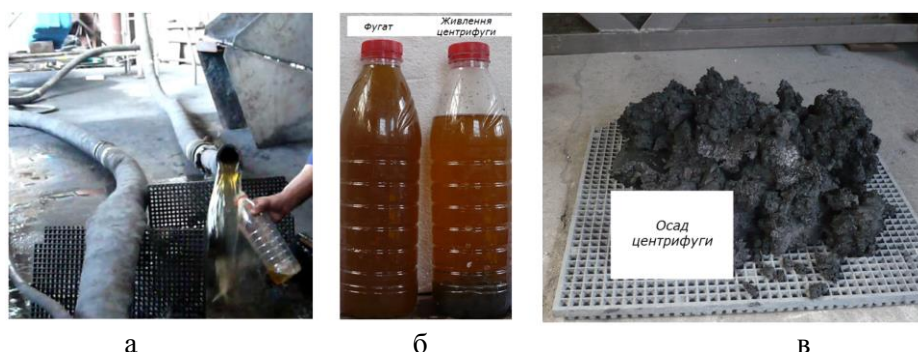


Рисунок 7 – Фотографії результатів очищення та зневоднення шламів:
а – відбір проб фугату; б – порівняння проб живлення центрифуги і фугату;
в – зневоднений осад

Для визначення можливості оптимізації процесу флокуляції складних за хімічним складом шламів необхідні додаткові дослідження чинників, що впливають на стійкість дисперсних систем, які можливо врахувати лише при дослідіх реальних виробничих шламів на конкретному підприємстві.

За результатами випробувань було запропоновано наступні схеми очищення шламових вод, які виключають існуючий небаланс потужностей діючого зневоднюючого устаткування (фільтр-пресів) та виключають вивоз рідкихшламів на полігон.

Схема 1. В існуючій водно-шламовій схемі проводити частковий відбір згущеного продукту радіального згущувача, змішувати його з живленням і після введення додаткового флокулянта (флокуляція сфлукуюваного в радіальному згущувачі шламу) в суміш в потоці подати на центрифуги.

Схема 2. Змінити водно-шламову схему шляхом окремої очистки стічних вод апаратів газоочистки різних цехів, наприклад, встановити додаткову системи очистки для

шламів цеху виробництва феросиліцію за схемою з отриманням фугату, який відповідає вимогам оборотної води виробництва із вмістом твердої фази менше 350 мг/л, а шлами цеху виробництва феромарганцевих сплавів очищати за існуючою на виробництві схемою.

Висновки

1. У результаті проведених промислових досліджень було встановлено технічну можливість задовільного очищення шламових вод, що утворюються внаслідок процесу мокрої газоочистки і характеризуються підвищеним вмістом дрібнодисперсних завислих часток ($\gamma_{40 \dots 60} = 30 \%$, $\gamma_{-14} = 45 \%$). За допомогою модернізованого обладнання – зокрема осаджувальних центрифуг типу ОГШ – вдалося досягти зниження концентрації завислих речовин менше 0,35 г/л, що свідчить про досягнення нормативних показників якості очищення. Ефективне зневоднення шламів до вологості $45 \pm 5 \%$ дозволяє зменшити обсяги утворення відходів, полегшити їх подальше транспортування, зберігання або утилізацію, а також знизити витрати на оброблення шламів.

2. Дослідження також дозволили визначити оптимальні умови для досягнення найбільш ефективного очищення шламових вод. Встановлено, що найвищі показники очищення забезпечуються при використанні флокулянтів типу ТФК-7 та ТФК-8, які проявляють високу ефективність у широкому діапазоні концентрацій і температур.

3. В результаті промислових випробувань різних схем очищення шламів та порівняння отриманих результатів встановлено, що ефективне агрегатоутворення підвищується при гідростатичному змішуванні в потоці та введенні флокулянтів у потік двома порціями. Це призводить до кращих механізмів двостадійності процесу утворення флокул: адсорбції флокулянту на поверхні часток при введенні першої порції, а потім при введенні наступної порції утворення полімерних містків і як наслідок – крупних флокул. Здійснення процесу в потоці попереджує руйнування флокул внаслідок механічного впливу лопатей перемішуючого пристрою. Отримані результати можуть бути використані для розробки регламентів очищення шламових вод і вдосконалення технологічних схем.

Література

1. Білецька Е. М., Онул Н. М., Ніконенко В. І. Металургійні підприємства як джерело забруднення атмосферного повітря та фактор ризику погіршення здоров'я населення. *Медичні перспективи*. 2018. Т. 23, № 3–1. С. 17–22.
2. Феценко О. Л., Каменева Н. В. Оцінка впливу діяльності металургійних підприємств на навколишнє природне середовище України. *Інвестиції: практика та досвід*. 2016. № 2. С. 28–32.
3. Нікітюк О. О. Вплив металургійного виробництва на екологічний стан країни. *Актуальні питання економіки, фінансів, обліку і права*. 2022. № 43.
4. Shomanova Z., Safarov R., Tashmukhambetova Z. et al. Complex research of ferroalloys production wastes by physical and chemical methods. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*. 2021. Vol. 56, Iss. 3. P. 629.
5. Khazaie A., Mazarji M., Samal B. et al. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry. *Water*. 2022. No. 14 (6). P. 918.
6. Que Nguyen Ho, Michael Fettweis, Kate L. Spencer, Byung Joon Lee. Flocculation with heterogeneous composition in water environments: A review. *Water Research*. 2022. Vol. 213, 118147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118147>

7. Hua W., Boqiang G., Jie R. et al. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review. *Water Research*. 2018. No. 143. P. 608–631. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029>.
8. Huanjun B., Xiangsong M., Meirong W., Wei S. A review of technologies and mechanisms for the removal and recovery of manganese from mining and metallurgical wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. No. 75, 107894. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107894>.
9. Shkop A., Briankin O., Shestopalov O., Ponomareva N. Investigation of the treatment efficiency of fine-dispersed slime of a water rotation cycle of a metallurgical enterprise. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 5, No. 3 (37). P. 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112791>
10. Shkop A., Briankin O., Shestopalov O., Ponomareva N. Investigation of flocculation efficiency in treatment of wet gas treatment slime of ferroalloys production. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 5, No. 3 (37). P. 29–39. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112792>.
11. Bosiuk A., Shkop A., Kulinich S. et al. Multi-component wastewater from finely dispersed impurities treatment intensification. *Ecological Questions*. 2024. Vol. 34, No. 4. P. 1–18. doi: <https://doi.org/10.12775/EQ.2024.055>.
12. Shestopalov O., Briankin O., Tseitlin, M. et al. Studying patterns in the flocculation of sludges from wet gas treatment in metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5, No. 10 (101). P. 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181300>.
13. Shestopalov O., Briankin O., Rykusova N. et al. Optimization of floccular cleaning and drainage of thin dispersed sludges. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. No. 3. P. 75–86. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001239>.
14. Oyegbile B., Ay P., Narra S. Flocculation kinetics and hydrodynamic interactions in natural and engineered flow systems: a review. *Environmental Engineering Research*. 2016. Vol. 21, Iss. 1. P. 1–14. doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2015.086>.

Bibliography (transliterated)

1. Biletska E. M., Onul N. M., Nikonenko V. I. (2018). Metalurhiini pidpriemstva yak dzherelo zabrudnennia atmosferного povitria ta faktor ryzyku pohirshennia zdorovia naselennia. *Medychni perspektyvy*, 23, 3/1, 17–22.
2. Feshchenko O. L., Kameneva N. V. (2016). Otsinka vplyvu diialnosti metalurhiinykh pidpriemstv na navkolyshnie pryrodne seredovyshche Ukrainy. *Investysii: praktyka ta dosvid*, 2, 28–32.
3. Nikitiuk O. O. (2022). Vplyv metalurhiinoho vyrobnytstva na ekolohichniy stan krainy. *Aktualni pytannia ekonomiky, finansiv, obliku i prava*, 43.
4. Shomanova Z., Safarov R., Tashmukhambetova Z., Sassykova L., Nosenko Y., Mukanova R. (2021). Complex research of ferroalloys production wastes by physical and chemical methods. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*, 56, 3, 629.
5. Khazaie A., Mazarji M., Samal B., Osborne D., Minkina T., Sushkova S., Soldatov A. (2022). A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry. *Water*, 14(6), 918.
6. Que Nguyen Ho, Fettweis M., Spencer K. L., Lee B. J. (2022). Flocculation with heterogeneous composition in water environments: A review. *Water Research*, 213, 118147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118147>.

7. Hua W., Boqiang G., Jie R., Aimin L., Hu Y. (2018). Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review. *Water Research*, 143, 608–631. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029>.
8. Huanjun B., Xiangsong M., Meirong W., Wei S. (2025). A review of technologies and mechanisms for the removal and recovery of manganese from mining and metallurgical wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 75, 107894. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107894>.
9. Shkop A., Briankin O., Shestopalov O., Ponomareva N. (2017). Investigation of the treatment efficiency of fine-dispersed slime of a water rotation cycle of a metallurgical enterprise. *Technology Audit and Production Reserves*, 5, 3(37), 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112791>.
10. Shkop A., Briankin O., Shestopalov O., Ponomareva N. (2017). Investigation of flocculation efficiency in treatment of wet gas treatment slime of ferroalloys production. *Technology Audit and Production Reserves*, 5, 3(37), 29–39. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112792>.
11. Bosiuk A., Shkop A., Kulinich S., Samoilenko D., Shestopalov O., Tykhomyrova T. (2024). Multi-component wastewater from finely dispersed impurities treatment intensification. *Ecological Questions*, 34, 4, 1–18. doi: <https://doi.org/10.12775/EQ.2024.055>.
12. Shestopalov O., Briankin O., Tseitlin M., Raiko V., Hetta O. (2019). Studying patterns in the flocculation of sludges from wet gas treatment in metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 10(101), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181300>.
13. Shestopalov O., Briankin O., Rykusova N., Hetta O., Raiko V., Tseitlin M. (2020). Optimization of floccular cleaning and drainage of thin dispersed sludges. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 75–86. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001239>.
14. Oyegbile B., Ay P., Narra S. (2016). Flocculation kinetics and hydrodynamic interactions in natural and engineered flow systems: a review. *Environmental Engineering Research*, 21(1), 1–14. doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2015.086>.

УДК 622.793:648.326

А. О. Шкоп, О. В. Шестопалов, Н. Г. Пономарьова, А. С. Босюк, Д. І. Нечипоренко,
Д. М. Войтенко

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЧИЩЕННЯ ТА ЗНЕВОДНЕННЯ ШЛАМІВ МОКРОЇ ГАЗООЧИСТКИ ВИКИДІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

У дослідженні висвітлено результати комплексного аналізу ефективності очищення та зневоднення шламів, що утворюються внаслідок мокрої газоочистки викидів металургійного виробництва. Промислові випробування модернізованих осаджувальних центрифуг типу ОГШ засвідчили їх високу ефективність при очищенні шламових вод: концентрацію завислих речовин вдалося знизити до рівня менше 0,35 г/л. Це дає підстави стверджувати про технічну можливість досягнення нормативних показників якості очищення води у межах існуючих технологічних схем. Крім того, досягнуто ефективного зневоднення шламів до вологості 45 ± 5 %, що значно полегшує їх подальше транспортування, складування або утилізацію та зменшує витрати на оброблення. Встановлено, що зниження вологості в шламах також зменшує ризики вторинного забруднення навколишнього середовища та знижує загальне екологічне навантаження. Особливу увагу в дослідженні приділено оптимізації процесів флокуляції. Визначено,

що використання флокулянтів типу ТФК-7 і ТФК-8 забезпечує високі показники очищення в широкому діапазоні температур і концентрацій. Проведено порівняльну оцінку схем введення флокулянтів у потік шламової води. Найкращі результати досягнуто при використанні гідростатичного змішування та двоетапного введення флокулянту, що сприяє формуванню щільних і стійких флокул, які ефективно осідають у центрифугах. Отримані результати мають практичну значущість для металургійної галузі, оскільки можуть бути покладені в основу розробки регламентів очищення шламових вод, удосконалення технологічних схем водообігу, а також впровадження природоорієнтованих рішень на підприємствах з високим рівнем водоспоживання та водозабруднення. Рекомендовано впроваджувати результати дослідження як складову частину стратегії підвищення екологічної безпеки та сталого розвитку підприємств гірничо-металургійного комплексу. **Ключові слова:** шлами, очищення викидів, флокуляція, завислі частки, освітлення води, модуль очищення, осаджувальні центрифуги, екологічна безпека.

A. O. Shkop, O. V. Shestopalov, N. G. Ponomarova, A. S. Bosiuk, D. I. Nechyporenko,
D. M. Voitenko

ANALYSIS OF THE RESULTS OF CLEANING AND DEHYDRATION OF SLUDGE FROM WET GAS CLEANING OF METALLURGICAL ENTERPRISE EMISSIONS

The study highlights the results of a comprehensive analysis of the efficiency of sludge treatment and dewatering resulting from wet gas cleaning of metallurgical emissions. Industrial tests of the modernized OGSh-type sedimentation centrifuges have shown their high efficiency in sludge water treatment: the concentration of suspended solids was reduced to less than 0.35 g/l. This gives grounds to assert that it is technically possible to achieve the standard water treatment quality indicators within the existing technological schemes. In addition, effective dewatering of sludge to a moisture content of 45 ± 5 % was achieved, which greatly facilitates its further transportation, storage or utilization and reduces treatment costs. It has been established that reducing the moisture content in sludge also reduces the risks of secondary environmental pollution and reduces the overall environmental burden. Particular attention is paid to the optimization of flocculation processes. It has been determined that the use of flocculants such as TFC-7 and TFC-8 provides high purification rates in a wide range of temperatures and concentrations. A comparative assessment of the schemes for introducing flocculants into the sludge water flow was carried out. The best results were achieved when using hydrostatic mixing and two-stage flocculant introduction, which contributes to the formation of dense and stable flocs that effectively settle in centrifuges. The obtained results are of practical importance for the metallurgical industry, as they can be the basis for the development of regulations for sludge water treatment, improvement of technological water circulation schemes, as well as the implementation of environmentally friendly solutions at enterprises with high levels of water consumption and water pollution. It is recommended to implement the results of the study as an integral part of the strategy for improving environmental safety and sustainable development of mining and metallurgical enterprises.

Keywords: sludge, emission treatment, flocculation, suspended solids, water clarification, treatment module, sedimentation centrifuges, environmental safety.