

На правах рукопису

УДК 628.16

ТЕРНОВЦЕВ Віталія Омелянович

ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ НА ОСНОВІ ОКСИДІВ ЗАЛІЗА

Спеціальність 11.00.11 - охорона навколишнього
середовища, раціональне використання природних ресурсів

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ - 1993



АВ 28.46

Дисертація в рукопис

Роботу виконано в Київському Державному технічному університеті будівництва і архітектури.

- Офіційні опоненти:
1. Доктор технічних наук, професор
ВМСОЦЬКИЙ Сергій Павлович
 2. Доктор технічних наук, старший науковий співробітник
РОДА Ігор Григорович
 3. Доктор технічних наук, професор
ХОРУШИЙ Петро Данилович

Провідна організація: Український інститут інженерів водного господарства, м. Рівне.


30

Захист відбудеться 14 грудня 1993 р. о 14 на засіданні спеціалізованої ради Д 01.02.01 Київського політехнічного інституту за адресою:
252057, м.Київ-57, просп.Перемоги, 37, корп.4, кім.118.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського політехнічного інституту.

Автореферат розісланий " 12 " листопаду 1993 р.

Відгуки на автореферат у двох примірниках за підписом, затвердженням печатком, прохання надсилати за адресою:
252057, м.Київ-57, просп.Перемоги, 37, КПІ, Вчена рада.

Вчений секретар спеціалізованої ради  Срібний Л.Є.

ЛНБ України ім. В. Стефаника
00814013 (H)



Актуальність роботи. Якість води рік України постійно погіршується в зв'язку із скидом неочищених промислових стічних вод. Існуючі методи відділення домішок, які складають гетерогенну систему, базуються на використанні сил гравітації (відстійники), або взаємодії між домішками та засипкою (фільтри). Будівництво очисних споруд та заходи по переробці великої кількості осаду, який утворюється внаслідок очищення води, потребують значних капітальних вкладень та вилучення з сівобігу землі. Використання осадів гідроксидів металів практично не здійснюється.

Інтенсифікація методів очищення води може бути досягнута завдяки використанню магнітних сил, але основні забруднення, які знаходяться у воді, відносяться до пара- та діаманітних сполук, і це не дозволяє відділяти їх у слабких, до 1 Тл, магнітних полях. Для відділення цих домішок необхідно застосовувати реагенти, які мають феромагнітні властивості, наприклад, оксиди заліза.

Автором, виходячи з прийнятої концепції, розроблений ряд технологій очищення води від різних забруднень, які дозволяють в 5...10 разів підвищити швидкість відділення домішок, значно скоротити об'єм осадів та поліпшити якість їх використання.

Дослідження виконані згідно з комплексно-цільовими програмами: "Повищення ефективності використання топливно-енергетических ресурсів в строительстве на 1982-1985 годы", Постановление Госстроя СССР и ГКНТ СССР от 31 марта 1982 года, N 631108, "Разработка безотходных технологических процессов очистки природных и сточных вод с применением электрохимической и магнитной технологии для водоснабжения промпредприятий", РН.85.01.11", утверждённой Госпланом УССР 28.01.81 г., N 4.

Мета та задачі досліджень. Метою роботи є дослідження та розробка технологічних процесів очищення води, які б мали велику швидкість відділення домішок під впливом магнітного поля та реагентів з магнітними властивостями. Скорочення об'єму осадів внаслідок отримання оксиду заліза та розробка і впровадження в практику маловідходних технологій очищення води від іонів металів. Для досягнення наведеної мети були визначені наступні задачі: розробка теоре-

тивних основ процесів відділення забруднень магнітним полем; дослідження процесу вилучення завислих речовин з оксидами заліза; розробка реагенту з магнітними властивостями; рішення технологічних питань, пов'язаних з відділенням домішок, за допомогою магнітних фільтрів; розробка технології очищення води від завислих речовин, іонів заліза, іонів хрому, солей жорсткості та іонів міді завдяки використанню оксидів заліза; рішення питань обробки осадів, вилучених в процесі очищення води, за рахунок використання оксидів заліза.

Наукова новизна роботи міститься в наступному:

- розроблені та науково обгрунтовано очищення води з використанням сили магнітної взаємодії між магнітним елементом і реагентом з магнітними властивостями, який здатен відділяти домішки без феромагнітних властивостей;
- розроблені теоретичні основи процесу відділення з води домішок з використанням оксидів заліза; проведені експериментальні дослідження ряду технологічних процесів очищення води з використанням феромагнітних реагентів;
- зведені формули, які дозволяють розраховувати технологічні параметри систем очищення води з допомогою оксидів заліза;
- визначені основні параметри процесу відділення домішок магнітним фільтруванням при обробці води реагентами, які мають феромагнітні властивості.

Практичне значення результатів досліджень:

- розроблені технологічні схеми очищення води та повторного її використання для ряду виробництв на основі застосування оксидів заліза: освітлення пульпи горно-збагачувальних підприємств; відділення завислих речовин фільтруванням у магнітному полі з використанням феромагнітних реагентів; очищення води від іонів хрому, заліза, міді та солей жорсткості;
- розроблені технологічні схеми обробки осадів, які виникли внаслідок очищення води, що дозволяє скоротити об'єм осаду у 3...5 разів та зменшити його вологість до 72...54 %;
- розроблені технологічні схеми очищення води дозволяють інтенсифікувати процес вилучення забруднень у 5...10 разів.

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи знайшли практичне

втілені на раді підприємств держав СНД, а саме: на підприємствах Мінчермету України – Південному, Північному та Інгулецькому горно-збагачувальних комбінатах (ГЗК), м.Кривий Ріг, Каміш-Бурунському ГЗК, м.Керч, Дніпровському металургійному комбінаті, м.Дніпродзержинськ, Таганрогському металургійному з-ді, м.Таганрог; підприємствах суднобудівної промисловості: з-д ім.Гаджаєва, м.Махачкала, "Комета", м.Ульянівськ; підприємствах: ЗІЛ, м.Москва, Северодонецьке та Чернаське ВО "Азот", "Редуктор", м.Київ, "Електрон", м.Вінниця, "Зеніт", м.Татчів; очисних спорудах міст: Києва, Ужгорода, Кривого Рогу, Самарканду та інші.

Рекомендації для проектування очисних споруд передані для використання проектним інститутам: Водоканалпроект, Діпроверф, Діпроводгосп, Промбудпроект, Укрпромпроект, м.Київ.

Розроблені технології очищення води впроваджені в народне господарство. Загальний економічний ефект (в цінах 1988 року) становить 2.1 млн.крб. на рік.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи викладено на 38 науково-технічних конференціях, сімпозіумах, нарадах, в тому числі на конференціях КІБІ (Київ, 1975–1992 рр.); на конференції з інтенсифікації очищення природних та стічних вод (Рівно, 1983); на науково-технічних конференціях Харківського інженерно-будівельного інституту (Харків, 1982, 1983); на семінарі в м. Пензі (1984 р.); на ВДНГ СРСР (1987 р. – срібна медаль, 1988 р. – золота медаль, 1989 р. – срібна медаль), на ВДНГ України (1986, 1988, 1989), на Дні науки (Черкаси, 1986 р.); "Екологія" (Черкаси, 1986 р.); "Сорбенти" (Мінськ, 1990 р.); Американсько-Українській конференції по вивченню навколишнього середовища (Київ, 1993 р.); на науково-технічних зборах ГПІ Укрводоканалпроект (Київ, 1981–1983, 1991 р.), ГІНТ СРСР (Москва, 1986 р.), ВодГЕО (Москва, 1987 р.), Комітет водного господарства (Київ, 1992 р.).

Публікації. Зміст дисертаційної роботи відображений в 25 друкованих працях, в тому числі, 3-х книгах. По темі дисертації отримано 12 авторських свідоцтв та 1 патент.

Обсяг роботи. До основи дисертаційної роботи покладені дослідження автора,

виконані в 1975-1991 роках в лабораторії очищення води КІБІ. Робота виконана також в співдружності з Інститутом Гідродинаміки, Електродинаміки та Колоїдної хімії та хімії води АН України.

В розробці окремих питань, апаратури та дослідах приймали участь наукові співробітники та аспіранти: Н.К.Марич, В.Л.Михайловський, І.А.Забулонський, А.Л.Божко, І.Т.Прокопчук та інші. Обсяг дисертації – 386 стор.друкованого тексту (24 табл. 154 мал.) містить: введення, вісім глав, основні висновки, список літератури (299 найменувань, в тому числі, 92 іноземних автори) та додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведена актуальність роботи та сформульовані мета та задачі досліджень.

Перша глава присвячена аналізу методів очищення води на основі використання доміжок, які складають гетерогенну систему. Істотні методи відокремлення від води завислих речовин – освітлення води, виконуються відстоюванням, освітленням у шарі завислого осаду, фільтруванням, флотацією та центрифугуванням. Останній метод знаходить обмежене використання через низьку продуктивність.

Результати аналізу техніко-економічних показників основних споруд по вилученню з води завислих речовин наведені в табл.1 (ціни 1986 р.).

Техніко-економічні показники споруд по вилученню з води завислих речовин

Таблиця 1

Споруди по очищенню води	Навантаження	Приведені витрати
	м ³ /м ²	крб/м ³
Горизонтальні відстійники...	3,5	0,037
Тонкошарові відстійники....	3...6	0,0345
Освітлювачі з шаром завислого осаду.....	4,4	0,0312
Швидкі фільтри.....	8...12	0,005

Споруди, на яких відстоювання та освітлення води проходить під дією сил

гравітацій, мають невелике навантаження та велику вартість, але вони дозволяють очищати воду при високих концентраціях завислих речовин (до 2500 мг/л).

Швидкі фільтри (освітлення під дією сил адгезії), які мають максимальну навантаженість та мінімальні приведені витрати, очищають воду при концентрації завислих речовин до 12 мг/л.

Інтенсифікація виробничих процесів, у тому числі й очищення води, вимагає розробки споруд та технологій з більш високими техніко-економічними показниками. Одним з напрямків інтенсифікації водопідготовки може бути застосування сили магнітної взаємодії. Існуючі магнітні системи для вилучення домішок умовно поділяються на: системи з постійними магнітами; надпровідні високоградієнтні системи; магнітні пристрої, в яких згущення продуктів здійснюється вздовж каналу.

Використання магнітних систем дозволяє інтенсифікувати процес відділення домішок та розробити фільтри з продуктивністю до $200 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Але використання розглянутих систем, як споруд для очищення води, не знаходить розповсюдження тому, що надпровідні системи, які здібні вилучати з води як магнітні, так і немагнітні домішки, мають високу вартість. Використання оксидів заліза, як феромагнітного додатку (дроблена окалина), знаходить обмежене використання в зв'язку з труднощами при приготуванні феромагнітних часток з гідравлічною крупністю часток гідроксидів металів, які з'являються в разі обробки води коагулянтами. Перспективність робіт по очищенню води за допомогою магнітних систем підтверджується добрими їх техніко-економічними показниками. У разі продуктивності $200 \text{ м}^3/\text{м}^2$, що у 20 разів вище, ніж на швидких фільтрах, наведені витрати становлять $0,02 \text{ крб./м}^3$ (нижче, ніж для гравітаційних систем вилучення домішок).

Теоретичні дослідження в галузі вилучення домішок за допомогою магнітних систем відносяться до стабільних з незмінними лінійними розмірами часток.

Застосування оксидів заліза, поряд з інтенсифікацією процесу очищення води, вирішує і проблему скорочення об'єму осадів, в яких містяться гідроксиди металів при реагентній обробці води. Такі осадки погано зневолокуються, займають великі об'єми; методи їх обробки вимагають великих площ (шламо-, осадконакопичувачі), або значних витрат (штучне ущільнення осаду).

Переведення гідроксидів заліза у магнетит дозволяє різко скоротити об'єм осаду, інтенсифікувати процес зневолошення та дає можливість повторного вико-

ристання магнетиту у виробництві. Технологія обробки осади́в з отриманням магнетиту потребує проведення додаткових досліджень для її використання.

В главі знайшли своє обґрунтування мета та задачі досліджень, спрямованих на розробку технологій очищення води за допомогою оксидів заліза.

Друга глава присвячена теоретичним дослідженням процесів очищення води за допомогою оксидів заліза. В основу запропонованих технологій покладені такі принципи: 1 - застосування часток магнетиту з лінійними розмірами до 0,42 мкм, що, наряду з адсорбційними властивостями, дозволяє застосовувати їх разом з коагулянтами, забезпечувати високий рівень очищення води і дає можливість застосування магнітної сили для вилучення домішок; 2 - утворення магнетиту у воді при достатній концентрації в ній іонів заліза.

Методи очищення води за допомогою оксидів заліза запропоновано класифікувати в залежності від вигляду домішок.

Класифікація методів обробки води на основі застосування оксидів заліза

Таблиця 2

Група, стисла характеристика домішок	Розмір часток, мкм		Метод обробки води
	1	2	
	1	2	3

ГЕТЕРОГЕННА СИСТЕМА

-5

I - завислі речовини ≥ 10

а) місткість оксидів заліза більше 500 мг/л

Осідання після агрегації у магнітному полі, магнітна сепарація

б) місткість оксидів заліза до 500 мг/л

Освітлення на магнітних фільтрах

-5 -6

II - колоїдні розчини 10 -10

а) місткість оксидів заліза більше 500 мг/л

Освітлення реагентом, отриманим з оксиду заліза, який знаходиться в складі завислих речовин, під впливом сили гравітації та при застосуванні зовнішнього магнітного поля

б) місткість оксидів заліза до 500 мг/л

Освітлення на магнітних фільтрах реагентом з феромагнітними властивостями

ГОМОГЕННА СИСТЕМА

-7

II - іонні розчини

10

карбонати і сульфати кальцію та магнію

Кристалізація на затравці та адсорбція на поверхні колоїдного оксиду заліза. Подальше відділення домішок магнітним фільтруванням

а) іони заліза концентрацією до 500 мг/л

Сорбція поверхні колоїдної затравки магнетиту при корекції рН середовища з подальшим вилученням на магнітних фільтрах

б) іони заліза концентрацією більше 500 мг/л

Використання окисно-відновних процесів при коректуванні рН з метою отримання магнетиту та наступним вилученням його на магнітних сепараторах; седиментація

Іони важких металів

Застосування солей заліза (II) з метою отримання феритів; сорбція на магнетиті з наступним вилученням на магнітних фільтрах

Фосфати

Сорбція на магнетиті з додаванням солей заліза (III) і наступним вилученням на магнітних фільтрах

Процес взаємодії часток магнетиту (m) з частками завислих речовин (кристали солей жорсткості), або з частками, що складають продукти гідролізу (n) солей металів, які додаються у воду, визначають магнітну сприйнятливість часток, які потім вилучаються з води.

Розглянувши процес взаємодії часток, як ймовірний, та застосувачи метод будування графа переходу системи із стану в стан, отримані співвідношення, які описують зміни часток у системі впродовж часу

$$\frac{C_{mt} + C_{nt}}{C_{m_0} + C_{n_0}} = \exp[-kGt(2C_{m_0} + C_{n_0})] \quad (1)$$

для випадку "частки магнетиту з частками, які отримані під час кристалізації солей жорсткості"

$$\frac{C_{mt} + C_{nt}}{C_{m_0} + C_{n_0}} = \exp[-kGt(2C_{m_0} + C_{n_0})] \quad (2)$$

"при взаємодії часток магнетиту з продуктами гідролізу коагулянту".

Для механічних камер реакції середнє значення G (градієнта швидкості) визначається співвідношенням

$$G = A \frac{Qn}{P} \quad (3)$$

Головним обладнанням для відділення феромагнітних часток, при розробці технологій очищення води на основі застосування оксидів заліза, є магнітні фільтри. Фізична модель вилучення забруднень шаром фільтрувочої заправки слідує така. Частки, які мають феромагнітні властивості, проникають в записку та, під впливом магнітної сили, утримуються на записці. Цей процес проходить із збіль-

вениями кількості часток в елементарному шарі. При збільшенні кількості часток в елементарному шарі збільшується гідродинамічна сила. Через деякий час настає рівновага магнітної та гідродинамічної сил, при цьому даний шар засипки здобуває граничне насичення та перестає вилучати домішки з води. Вилучення завислих речовин проходить в наступному шарі і т.д. Відрив часток від шару з граничним насиченням не відбувається. Це явище підтверджене експериментальними дослідженнями. Запропоновано використати, як аналог процесу вилучення домішок з допомогою магнітної сепарації, рівняння сорбції газу.

Баланс речовин

$$V \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} (G_m + c). \quad (4)$$

На базі експериментальних дослідів отримано

$$G_m = \frac{1}{K} c p \quad (5)$$

Рівняння освітлення води фільтруванням у магнітному полі

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial c}{\partial t} + LK \frac{\partial c}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Зменшення кількості завислих речовин в об'ємі фільтруючої засипки

$$\frac{\partial^2 G_m}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial G_m}{\partial t} + LK \frac{\partial G_m}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Для проведення експериментальних дослідів рівняння (6),(7) приведені до безрозмірної форми

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \partial t_1} + \frac{\partial y}{\partial x_1} + \frac{\partial y}{\partial t_1} = 0, \quad (8)$$

де $x_1 = \frac{L}{V} x$; $t_1 = \alpha k t$.

Для коефіцієнта α методом аналізу розмірностей отримане ступінне рівняння

$$\alpha = B(Re)^{y_1} \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^{y_2} \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2}\right)^{y_3} \left(\frac{V}{d_3}\right)^{y_4} \quad (9)$$

Безрозмірне вираження для x_1 , t_1 , відповідно дорівнює

$$x_1 = B(Re)^{y_1} \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^{y_2} \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2}\right)^{y_3} \left(\frac{V}{d_3}\right)^{y_4} \frac{x}{V}, \quad (10)$$

$$t_1 = B(Re)^{y_1} \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^{y_2} \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2}\right)^{y_3} \left(\frac{V}{d_3}\right)^{y_4} k t. \quad (11)$$

Показники ступенів y_1, \dots, y_4 визначені експериментально.

Для вирішення технологічних питань, пов'язаних з виділенням з води домішок фільтруванням, визначено опір фільтрувального шару засипки.

Втрати напору в чистій фільтрувчій засипці визначаються співвідношенням

$$h = \lambda k_3 x_1 \frac{L}{d_3} \frac{V^2}{2g}. \quad (12)$$

Втрати напору в фільтрувчій засипці, в залежності від величини накопиченого забруднень, запропоновано визначати за формулою

$$h_t = \lambda \left(\frac{L}{d_g} \right) K_g x_1 \left\{ \frac{\omega_0}{\omega_0 - [(G_m)_t \cdot (\rho_m L)^{-1}] x_2} \right\}^2 \quad (13)$$

Для визначення оптимальних показників роботи магнітного фільтра розглянемо наступні фізичні моделі процесу:

1 - при наближенні до фільтрувчої засипки частка, яка складається з феромагнітної та діамагнітної частин, отримує вплив магнітної та гідродинамічної сил. Остання виникає внаслідок руху в рідині - сила опору. Ці сили спрямовані в протилежні боки та намагаються розірвати частку. Магнітні та немагнітні компоненти утворюють єдиний комплекс за рахунок сил взаємодії (F). Умови, при яких зберігається єдина частка

$$F_M - F_r = F \quad (14)$$

Зважаючи на те, що F_r залежить від режиму руху часток у рідині, виконавши аналіз виявив, що режим руху турбулентний. Показано, що максимально допустима величина магнітного поля 1,15 Тл. Подальше збільшення магнітної індукції призводить до розриву частки.

2 - частка затримується фільтрувчою засипкою. Феромагнітна компонента утримується магнітною силою; гідродинамічна сила прагне розірвати її, відділяючи неферомагнітну компоненту. Цей випадок відповідає максимальному насиченню фільтрувчої засипки

$$\frac{0,16 I_2 H M_g}{\rho_{\text{ж}} \cdot \frac{d_2 d_3^2}{V^2 x^2}} = 1 \quad (15)$$

Якщо концентрація феромагнітних часток велика, більше 500 мг/л, що характерно для стічних вод травильного виробництва, які містять залізо, можливо рекомендувати очищати воду у дві стадії з вилученням домішок на першому етапі стрічковим магнітним сепаратором.

Рівняння балансу речовин для стрічкового сепаратору

$$(VC_{x_1} - VC_{x_2})S\Delta t = (G_{mt_2} - G_{mt_1})S\Delta x, \quad (16)$$

або при $\Delta x \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0$:

$$-V \frac{dc}{dx} = \frac{dG_{mt}}{dt} \quad (17)$$

Припускаючи, що градієнт концентрації підкоряється лінійному закону, а накопичення домішок на стрічці сепаратору залежить від магнітних характеристик сепаратору та домішок, отримане рівняння зміни завислих речовин у воді після подачі на стрічку магнітного сепаратора

$$\frac{c}{c_0} = \exp\left(-\beta \frac{M_2 x}{H\mu_0}\right) \quad (18)$$

Для визначення навантаження на стрічковий магнітний сепаратор запропоновано використовувати таке співвідношення

$$G_{mt} = a \left(\frac{M_2}{H\mu_0}\right)^{x_1} \cdot \left(\frac{c_0 L d_0^2}{t}\right)^{x_2} \quad (19)$$

В процесі вилучення домішок за допомогою магнітної сепарації здійснюється

Ух зневолоення.

Об'єм рідини, яка видаляється в процесі ущільнення осаду

$$\Delta W = \frac{H_0}{\nu_{рж}} R_H H^2 \frac{d_0^2}{y} \left(\frac{1-C}{C} \right)^2 \quad (20)$$

Наведені співвідношення дозволяють визначити основні параметри процесу очищення води від домішок за допомогою магнітної сепарації, а класифікація домішок та запропонований на її базі метод очищення води розкриває великі можливості цієї технології.

В третій главі наведені експериментальні пристрої, методики проведення дослідів та обробки одержаних результатів.

При проведенні експериментальних досліджень по розробці технологій очищення води на основі використання оксидів заліза приймався ряд пристроїв.

Дослідження обробки пульпи залізорудного горно-збагачувального комбінату здійснювались на установці, яка має: пластинчатий відстійник, електромагнітний апарат, який у зазорі 25 мм дозволяє відтворювати магнітну індукцію до 1,21 Тл, та реагентного господарства. Мета досліджень – вивчення ефекту освітлення пульпи в залежності від флокуляції часток під впливом магнітного поля.

Дослідження відділення завислих речовин фільтруванням проводилось з використанням електромагнітних апаратів дільного та соленоїдного типу з засипкою фільтруючих колонок сталеної вати марки 79 НМ, діаметром 0,2 мм. Зовнішнє магнітне поле досягало 0,8 Тл, що дозволяло намагнічувати засипку до $2,0 \cdot 10^4$ А/м. Крім електромагнітних апаратів використовувались фільтри з постійно намагніченими елементами із сплаву ІБ БА з дрібністю засипки різноманітної форми 5...10 мм. Максимальна намагніченість засипки досягала $6,4 \cdot 10^4$ А/м. Фільтри обладнувались фототіндалометрами для визначення мутності фільтрованої води, багатократковим самописцем для запису вимірів мутності води і п'езометричним шпитом для дослідження втрат напору в процесі фільтрування суспензії крізь засипку.

Для визначення ефекту очищення води при високій концентрації магнетиту використовувався стрічковий магнітний сепаратор. Одержували магнетит з солей

заліза (II) частковим окисленням до заліза (III) з послідовним коректуванням рН розчину, а також за допомогою електрокоагулятора з обертаючими електродами, що дозволяло отримувати високу концентрацію заліза в розчині при безпасиваційному функціонуванні електродів. Частота обертів електродів змінювалась у межах 0...100 с⁻¹.

Обробка осаду гідроксиду заліза проводилась з застосуванням сгущувача, реакторів та вакуумфільтрів. Тарировка електромагнітних апаратів виконувалась теслометром Ф-455. Вивчення намагніченості зразків - по зміні сили, діючої на них у магнітному полі. Для вивчення седиментаційних характеристик часток речовин, які знаходились у воді, використовувались тензометричні терези. Зміна в розчині концентрацій домішок заліза, міді, хрому проводилась за стандартними методиками з використанням фотоколориметра, а концентрація кальцію - плазменним аналізатором рідини ПАВ-1.

Результати експериментальних досліджень оброблялись по схемах одно- та багатореакторного експерименту на різних рівнях з визначенням доверительного інтервалу та дисперсії.

Четверта глава присвячена дослідженням процесу освітлення пульпи залізорудних горно-збагачувальних підприємств. На основі вивчення складу пульпи виявлено: концентрація завислих речовин - 45 г/л, гранулометричний склад - частки діаметром від 0,5 до 0,05 мм (основна маса, до 42 %, розміром 0,045 мм), щільність твердої фази - 3000 кг/м³. За технологію концентрація завислих речовин не повинна перебільшувати 500 мг/л. У "хвостах" міститься до 30 % оксидів заліза. Вивчення намагніченості "хвостів" показує її збільшення із зменшенням розмірів часток. Вивчення зміни об'єму осаду впродовж часу та гідравлічної крупності часток показало, що осідання завершується за 5...6 хвилин, а швидкість осідання змінюється в широких межах: від 0,5 до 40 мм/с.

Вивчення інтенсифікації освітлення пульпи проводили з допомогою реагентів та зовнішнім магнітним полем, яке сприяло агрегації феромагнітної компоненти. На ділянці трубопроводу, у межах якого впливає магнітне поле, відбувається зміни опору рідини в залежності від критеріїв Рейнольдса та Гартмана. Процес зміни опору залежить від часу, що пояснюється збільшенням феромагнітної компоненти в об'ємі магнітного апарату. Із збільшенням часу руху рідини процес стає

установленні. Показано, що на початковому етапі втрати опору визначаються безрозмірним комплексом $\frac{3172t}{\mu c}$, а для установленого процесу - тільки Re та Na. Враховуючи, що в "хвостах" міститься до 30 % магнетиту запропоновано вилучати коагулянт безпосередньо з "хвостів" пульпи обробкою їх кислотою. Процес залежить від часу та визначається рівнянням кінетики гетерофазної реакції

$$\frac{C_t}{C_0} = e^{kt}, \quad (21)$$

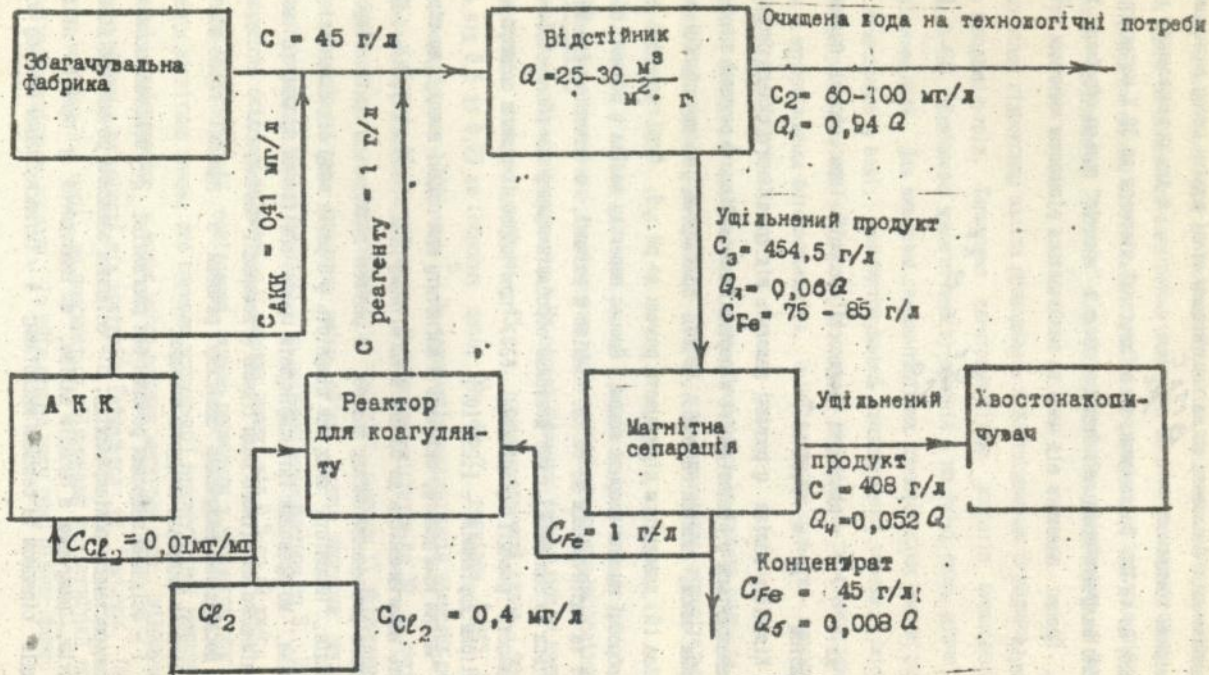
де k - константа швидкості реакції (при обробці пульпи сірчаню кислотою $k = -7,83 \cdot 10^{-4}$).

Кількість заліза у розчині залежить від фракційного складу оксидів заліза, що знаходиться у відповідності з першим законом Фіка. В розчині знаходиться, головним чином, залізо (II) (96...98 %). Враховуючи, що при обробці води солями заліза (II) доводиться підлужувати розчин до pH > 9 , були проведені дослідження по обробці пульпи хлорною водою. Процес переходу заліза у розчин обмежений у часі та закінчується за 60 хв. Залізо у розчині, в основному (до 80 %), складається із заліза (III), яке дозволяє обробляти пульпу при pH = 6,5. Константа швидкості реакції у рівнянні (21) при обробці пульпи соляною кислотою та повітрям дорівнює $k = -1,299 \cdot 10^{-4}$.

Частки коагулянту, вилучені з магнетиту при подачі в воду, що обробляється, мають намагніченість до 53 А/м в магнітному полі $H = 1 \cdot 10^5$ А/м. Це вказує на неповне розчинення оксиду заліза. В розчині знаходиться суміш гідроксидів та оксидів, наявність яких має щільність у 5 разів вищу від щільності гідроксиду заліза, що дозволяє інтенсифікувати процес освітлення пульпи, а застосування зовнішнього магнітного поля сприяє агломерації часток.

Дослідження вилучення завислих речовин з пульпи горно-збагачувальних комбінатів включали наступні випадки:

1 - осідання завислих речовин без реагентів; 2 - осідання завислих речовин з використанням поліакриламідів; 3 - осідання завислих речовин за допомогою реагентів, вилучених з оксидів заліза, що знаходяться у пульпі, після обробки осадів сірчаню та соляною кислотами; 4 - інтенсифікація процесу осідання за-



Мал. I Технологічна схема очищення пульпи

вислих речовин за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Дослідження безреагентного вилучення завислих речовин свідчать про можливість досягти ефективність очищення 91 % впродовж 660 с. Використання зовнішнього магнітного поля дозволяє скоротити час відстоювання до 540 с. Дослідження магнітного апарату, з магнітною індукцією 250-300 мТл в фільтрувальному режимі при навантаженні $240 \text{ м}^3/\text{м}^2$, дозволило отримати необхідну за технологічними вимогами залишкову мутність, але, при більшому навантаженні пульпи, його використання недоцільне.

Обробка пульпи поліакріламідом у кількості 2 мг/л дозволяє отримати залишкову кількість завислих речовин 560 мг/л за період освітлення 80 с. Збільшення дози поліакріламіду та часу не приводить до значних змін у ході процесу.

Освітлення пульпи реагентами, вилученими з "хвостів", оброблених кислотою, показало високу ефективність очищення пульпи (99,5...99,9 %). При pH = 11 та дозі сірчаної кислоти 86 мг/л, час освітлення становив 80 с. Використання реагентів, які отримані з "хвостів" пульпи, оброблених хлорною водою, дає, практично, аналогічні результати при pH = 7.

На основі досліджень запропоновано використовувати реагент з "хвостів" пульпи, оброблених хлорною водою з додаванням активованого силікату натрію для інтенсифікації осідання завислих речовин. Результати досліджень наведені у вигляді технологічної схеми обробки пульпи горно-збагачувального комбінату, мал.1.

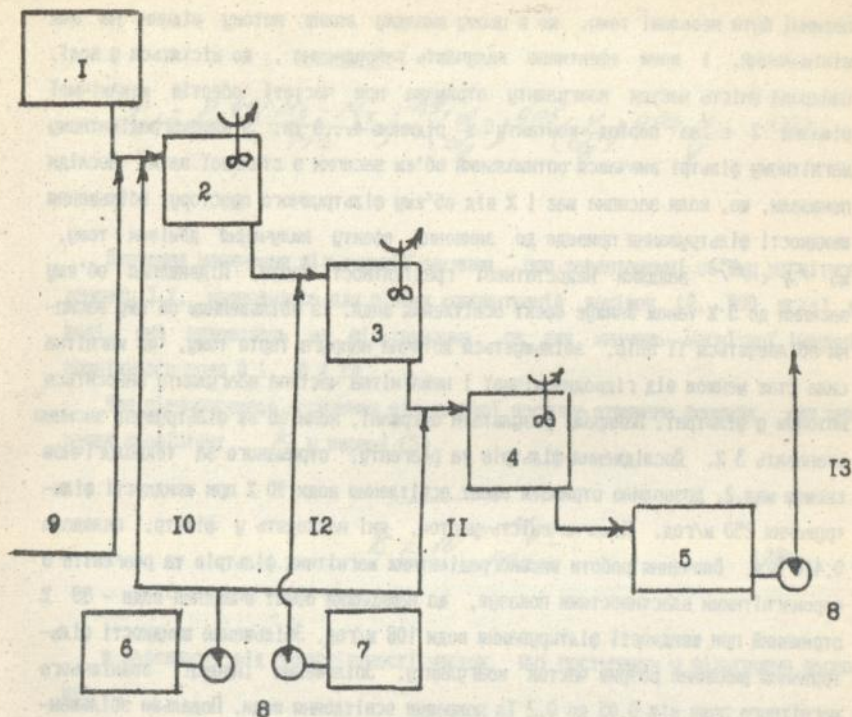
В процесі досліджень обробки пульпи реагентами вивчалась зміна об'єму осаду, що, в результаті, впливає на вибір розмірів шламонакопичувачу. Найкращі результати отримані при обробці пульпи за технологічною схемою, наведеною на мал.1.

П'ята глава присвячена вилученню завислих речовин у високоградієнтному магнітному полі. Вилучення часток немагнітних сумішей за допомогою магнітного поля може бути досягнуто завдяки використанню сумішей (немагнітний реагент та магнетит) і реагентів, які мають феромагнітні властивості. Попередні досліди сумішей сірчаноокислого глинозема та подрібненої окалини, які прийняті у дослідженнях, розглянутих у літературних джерелах, показало погану змішуваність окалини з частками коагулянту, і як наслідок, це приводить до низької швидкості

фільтрування (до 1 см/с) на магнітних фільтрах. Вимірювання гідравлічної крупності окалини та часток коагулянту ($Fe(OH)_3$) при pH = 10,5 показало, що частки окалини осідають швидше у 10...50 разів ніж гідроксиди. Тому були проведені дослідження отримання магнетиту хімічною конденсацією.

Використання травильних розчинів або солей, що містять залізо (II), після окислення хлором до співвідношення $Fe^{2+}:Fe^{3+} = 1:2$ з подальшим збільшенням pH розчину, дозволяє одержати магнетит, який має високу дисперсність. Зважаючи на те, що феромагнітні властивості має Fe_3O_4 , були проведені рентгенографічні дослідження, які підтвердили утворення магнетиту - Fe_3O_4 . Вивчення часток цієї речовини показало, що феромагнітні властивості наростають впродовж деякого часу (180 с), після чого намагніченість часток залишається незмінною. Лінійні розміри часток магнетиту складають 3...4·10⁻² мкм. Порівняння намагніченості цих часток та окалини показало, що останні мають у 6 разів меншу намагніченість. Сорбційні властивості, по відношенню до каоліну, у цих часток невеликі, і їх необхідно застосовувати разом із коагулянтами. Але таке використання реагенту нераціональне. Запропоновано проводити подальшу обробку часток магнетиту кислотою або хлором для утворення поверхневого шару з іонів заліза. Це дозволяє, після введення їх у воду та коректування pH, отримувати частки коагулянту, які мають в середині феромагнітні частки, а на поверхні - шар гідроксиду заліза з сорбційними властивостями. Технологічна схема отримання реагенту наведена на мал. 2.

Запропонований метод одержання феромагнітного реагенту рекомендується для станцій середньої та великої потужності, де є умови використання залізного купоросу. Для станцій малої потужності доцільно використовувати електрокоагулятори. Запропоновано використання електрокоагуляторів з обертаючими електродами при частоті обертання 8,33...16,7 с⁻¹, які працюють без пасивації при щільності струму 50...500 А/м². Оптимальна відстань між електродами - 3...6 мм. Одержаний реагент використовується для вилучення завислих речовин високоградієнтним магнітним полем, створеним електромагнітом. Довжина фільтруючої ділянки, заповненої сталевим ватом, 12 см; магнітна індукція зовнішнього поля змінювалась від 0 до 0,2 Тл. У процесі досліджень встановлено, що камера реакції, де проходить агломерація часток реагенту та каоліну, викрає суттєву роль у подальшому процесі очищення води фільтруванням. Розміри пластівців, з частками магнетиту,



Мал.2 Технологічна схема отримання реагенту

I - ємність розчину заліза /П/; 2 - реактор одержання магнетиту /час обробки розчину 180 с/; 3 - реактор для обробки магнетиту кислот /час обробки 120 с/; 4 - реактор підлуження /час обробки 180 с/; 5 - ємність для реагенту; 6 - ємність для розчину NaOH; 7 - ємність кислоти; 8 - насоси; 9 - трубопровід хлорної води /0,07...0,08/ Fe^{2+} мг/мг; I0 - розчин NaOH /80 мг/л/; II - розчин NaOH /0,5 мг/л/; I2 - розчин кислоти /HCl = 70 мг/л/; I3 - реагент, на водообробку.

повинні бути невеликі тому, що в цьому випадку вплив потоку рідини на них мінімальний, і вони ефективно вилучають забруднення, що містяться у воді. Найкраща якість часток коагулянту отримана при частоті обертів механічної мішалки 2 с^{-1} за період контакту з рідиною $4...8 \text{ хв}$. У високоградієнтному магнітному фільтрі вивчався оптимальний об'єм засипки з сталевोї вати. Досліди показали, що, коли засипка має 1% від об'єму фільтрувального простору, збільшення швидкості фільтрування приведе до зниження ефекту вилучення домішок тому, що $F_{\text{ст}} < \bar{F}$ завдяки недостатній градієнтності поля. Підвищення об'єму засипки до 5% також знижує ефект освітлення води. Із збільшенням об'єму засипки збільшується її опір, збільшується дотична напруга тертя тому, що магнітна сила стає меншою від гідродинамічної і немагнітна частина коагулянту виноситься потоком у фільтрат. Найкращі результати одержані, коли об'єм фільтрувальної засипки становить 3% . Дослідження фільтрів та реагенту, отриманого за технологічною схемою мал.2, дозволило отримати ефект освітлення води 90% при швидкості фільтрування 250 м/год . Намагніченість часток, які надходять у фільтр, складала $0,410 \text{ А/м}$. Вивчення роботи високоградієнтних магнітних фільтрів та реагентів з феромагнітними властивостями показує, що найкращий ефект очищення води - 99% отриманий при швидкості фільтрування води 108 м/год . Збільшення швидкості фільтрування викликає розрив часток коагулянту. Збільшення індукції зовнішнього магнітного поля від $0,05$ до $0,2 \text{ Тл}$ покращує освітлення води. Подальше збільшення магнітної індукції не змінює ефект очищення води. Неферомагнітні частки каоліну проходять крізь фільтр. Феромагнітних часток (при $B > 0,1 \text{ Тл}$) у воді після фільтра не спостерігалось. Обробка експериментальних даних проводилась з використанням співвідношень (9)...(11).

Оцінка показників ступеню у формулі (11) з урахуванням їх значимості дозволила записати для t_f

$$t_f = \left(\frac{M_B - M_c}{M_c} \right)^{-0,99} \left(\frac{V}{d_f} \right)^{0,03} \kappa t \quad (22)$$

Вираз (10) добуває вигляду

$$\alpha_1 = Re^{14} \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2} \right)^{-0.99} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0.05} \left(\frac{V}{d_1} \right)^{0.03} \frac{x}{V} \quad (23)$$

Вивчення насичення фільтрувочої засипки, при завантаженні об'єму магнітного апарату 3%, проводилось для різних концентрацій домішок (0...500 мг/л) у воді, яка подавалась на фільтрування, та для значень магнітної індукції зовнішнього поля 0,1...0,4 Тл.

Для рівновагового насичення фільтрувочої засипки отримана формула, яка визначає коефіцієнт K у виразі (5)

$$K = 10^{-4} \frac{M_1}{M_2} \quad (24)$$

в залежності від намагніченості часток, які поступають у фільтрувочу засипку.

Для технічного використання високоградієнтних магнітних фільтрів необхідно знати опір фільтрувочої засипки. Початковий, до подачі води з завислими речовинами, опір засипки визначений в результаті експериментальних дослідів, як

$$h_0 = \lambda \frac{L}{d_1} K \frac{16 V^2}{2g} \quad (25)$$

де $\lambda = \frac{15 K_3}{Re^{0.17}}$ при $Re = 100...2500$.

Зміна опору фільтрувочої засипки, в залежності від кількості накопичених домішок у процесі фільтрування, розрахована для гідравлічного ухилу

$$\frac{L_t}{i_0} = \left\{ \frac{1}{1 - \left[\frac{(G_m)t}{\rho_m k \omega_0} \right]^{0.18}} \right\}^2 \quad (26)$$

Дослідження роботи високоградієнтних магнітних фільтрів дозволило з'ясувати ряд питань технологічного характеру, необхідних для використання фільтрів в системах очищення води.

У востій главі розглянуті технології очищення води від іонів металів. В главі запропонована технологія, яка дозволяє очищати воду від заліза як при малих концентраціях його у воді (близько 50 мг/л) – природні води, так і великих (вимірюється в г/л) – стічні води травильного виробництва.

Вилучення розчиненого у воді заліза при високій його концентрації звичайно зводиться до зміни рН середовища, утворенню гідроксидів заліза та відокремлення його від води у гравітаційному полі. Гідравлічна крупність частинок гідроксиду заліза не перевищує 0,02 мм/с, а об'єм осаду, який погано віддає воду, сягає 40 % місткості відстійних споруд.

Запропонована технологія очищення води від заліза (при його концентрації більше 500 мг/л) полягає в обробці розчину з утворенням в ньому магнетиту, відокремлення якого від води виконується магнітною сепарацією. Враховуючи, що травильний розчин містить, головним чином, залізо (II), запропоновано використовувати як окислювач хлор в кількості 0,07–0,08 мг хлору на 1 мг заліза (II) з наступним коректуванням рН розчину до 9,5–10. При оптимальному співвідношенні $Fe^{2+}:Fe^{3+} = 1:2$ та рН розчину 9,5, гідравлічна крупність часток становить 1,8 мм/с. Дослідженнями встановлено, що отримання магнетиту у розчині можливо тільки при вмісті в ньому заліза більше 160 мг/л.

У ряді технологічних процесів: нікелювання, кадмування та ін., у гальва-

нистій ванні накопичуються іони заліза (III) які переходжать нанесеною гальванічного покриття. Розчин скидається, звичайно, у каналізацію. Дослідження показали, що при додаванні магнетиту у кількості 10 мг на 1 мг Fe^{3+} при pH = 2 зникається у розчині кількість Fe^{3+} на 50 %, а при pH = 4 проведено повне глибоке очищення розчину вани з поверненням його у виробництво. Регенераційна технологія очищення ван від іонів заліза (III) при малих pH дозволяє здійснювати практично безвідхідну технологію нанесення гальванічних прокріттів.

Результати експериментальних досліджень дозволили уточнити співвідношення (18) для очищення розчинів від магнетиту

$$\frac{C}{C_0} = \exp(-0,114 \frac{\mu_c V t}{n F_0 d_c}) \quad (27)$$

Очищення води від іонів заліза при невеликій його кількості (питна вода) пропонується з додаванням магнетиту при коректуванні pH розчину. При pH = 7,8 та співвідношенні $Fe^{2+}:Fe^{3+} Q$ 1 : 10 повністю вилучається залізо (II) з розчину.

Скорочення дози магнетиту та зменшення pH середовища можна досягти окисленням заліза (II) у залізо (III). В цьому випадку технологія очищення природних вод стає подібною до аналогічної технології регенерації гальванічних ван.

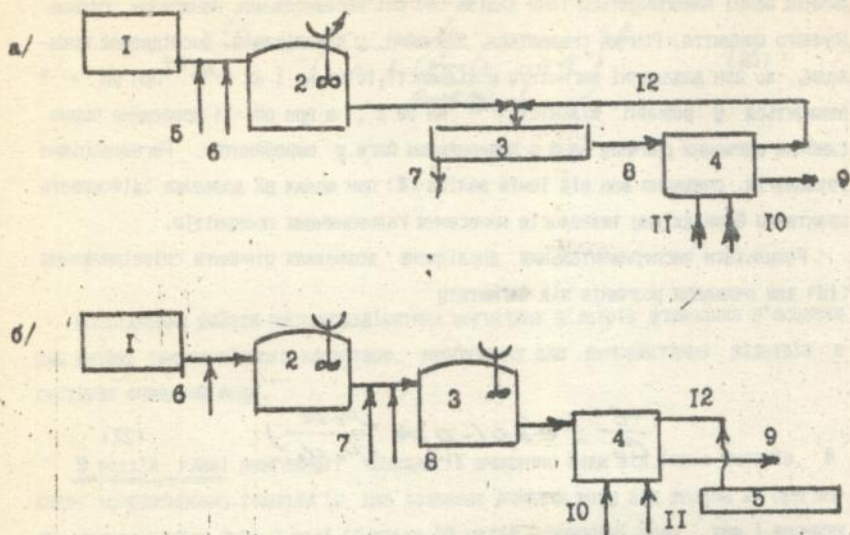
Технологічні схеми очищення води від заліза наведені на мал.3.

Одним з актуальних питань очищення води гальванічних виробництв є очищення стічних вод, які містять хром. Вилучення хрому виконується відновленням його до Cr^{3+} та наступним вилученням у вигляді гідроксиду хрому.

Нами розроблені технології очищення води від хрому з різким скороченням об'єму осаду за допомогою магнетиту:

1 - очищення води від хрому за допомогою магнетиту з підігрівом розчину; 2 - очищення води від хрому з допомогою магнетиту без підігріву.

Перша технологічна схема рекомендується для очищення води від хрому при таких співвідношеннях $Cr^{6+}:Fe^{2+} = 1 : 8$ (1 : 7), pH = 8,5-9, $t = 60^\circ C$ Швидкість осідання часток складала 4 см/с, частки мають феромагнітні власти-



Мая.3 Технологічні схеми очищення води від заліза /П/

а/ заліза /П/ більше 500 мг/л.

I - ємність розчину заліза /П/; 2 - реактор одержання магнетиту /час обробки розчину 10...15 хвилин; pH = 9,5...10; доза хлору /0,07... 0,08/ Fe^{2+} , мг/; 3 - стрічковий магнітний сепаратор; 4 - магнітний фільтр; 5 - подача хлорної води; 6 - подача піддувального розчину; 7 - магнетит вологістю 70 %; 8 - розчин з залишками магнетиту; 9 - очищена вода; 10 - подача промивної води; II - подача повітря; I2 - на магнітну сепарацію;

б/ заліза /П/ до 50 мг/л

I - ємність розчину заліза /П/; 2 - реактор-окислювач /час обробки розчину 5...10 хвилин/; 3 - сорбційний реактор /час обробки розчину 3 хвилини, pH \geq 4,5/; 4 - магнітний фільтр; 5 - стрічковий магнітний сепаратор; 6 - подача хлорної води / $Cl_2 = 0,64Fe^{2+}$, мг/; 7 - подача магнетиту //8...10/ мг/; 8 - подача розчину для піддування; 9 - очищений розчин; 10 - подача промивної води; II - подача повітря; I2 - промивна вода

вості і можуть відокремлюватись від розчину магнітною сепарацією. Об'єм осаду при наведеній технології зменшується у 8 разів через 15 хвилин відстоювання.

Зміна властивості зависі, залежно від рН та $t^{\circ}\text{C}$ при співвідношенні $\text{Fe}^{2+} : \text{Cr}^{6+} \approx 1 : 1$ (7 : 1), визначається співвідношеннями:

- намагніченість часток

$$M_z = 80 \exp(-0,369t^{\circ}\text{C} + 0,15\rho\text{H} - 0,059\rho\text{H}t^{\circ}\text{C}), \quad (28)$$

- швидкість осідання для часток (U_M) порівняно до традиційної технології (U_{HM})

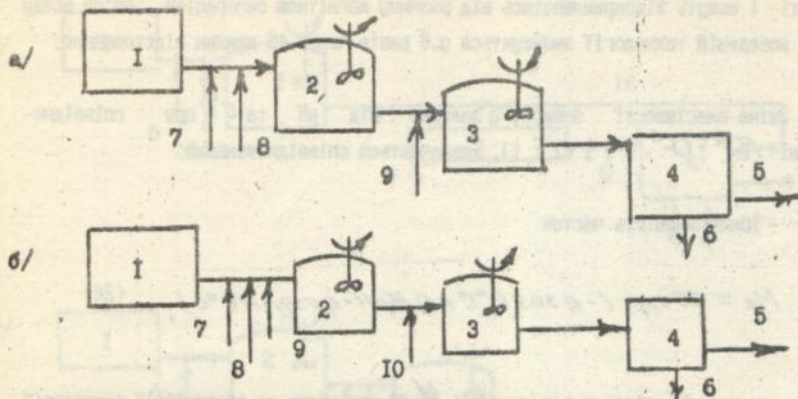
$$\frac{U_M}{U_{HM}} = \exp(-0,945M_z + 0,104M_z^2), \quad (29)$$

- об'єм осаду за 15 хвилин відстоювання (W_0) : (W_{0M})

$$\frac{W_0}{W_{0M}} = 0,75 \exp(-1,92 \cdot 10^{-2} M_z^2) \cdot 100\%. \quad (30)$$

Подальше збільшення часу практично не змінює об'єм осаду. За технологією очищення стічних вод від хрому без підігрівання проходить із збільшенням магнетиту. Зниження кількості іонів у розчині на 70 % настає при дозі магнетиту 120-140 мг на 1 мг Cr^{6+} . Період вилучення хрому - 7...10 хвилин при перемішуванні у реакторі з частотой 0,5-0,66 с при рН = 9. Очищення води від хрому до гранично допустимої концентрації (ГДК) провадиться магнетитом з додаванням заліза (П).

Ефект очищення води від хрому (УІ) за технологією без підігріву ($t^{\circ}\text{C} = 15-20^{\circ}\text{C}$) визначається за формулою



Мал.4 Технологічна схема вилучення з води хрому

а/ з підігрівом

І - ємність з розчином Cr^{6+} ; 2 - реактор-відновлювач /pH = 2...3; час обробки 5...10 хвилин; $Fe^{2+}: Cr^{6+} = 7$; 3 - сорбційний реактор /pH = 9, $t^{\circ}C = 70^{\circ}C$; час обробки 10 хвилин/; 4 - устрій для відділення магнітної суміші; 5 - очищений розчин; 6 - феромагнітні частки; 7 - подача кислоти; 8 - подача розчину Fe^{2+} ; 9 - подача розчину для піддування.

б/ без підігріву

І - ємність з розчином Cr^{6+} ; 2 - реактор-відновлювач /pH = 2...3; $Fe^{2+}: Cr^{6+} = 6$; $Fe_3O_4: Cr^{6+} = 60$; час обробки 7...10 хвилин/; 3 - сорбційний реактор /pH = 9...9,5; час обробки 5...10 хвилин/; 4 - устрій для відділення магнітної суміші; 5 - очищений розчин; 6 - феромагнітні частки; 7 - подача кислоти; 8 - подача магнетиту; 9 - подача розчину Fe^{2+} ; 10 - подача розчину для піддування.

$$\frac{C_{\text{нал}}^{6+}}{C_{\text{кон}}^{6+}} = 4 - \frac{Fe^{2+}}{C_{\text{п}}^{6+}} - 0,064 \frac{Fe_3O_4}{C_{\text{п}}^{6+}} + 0,016 \frac{Fe^{2+}}{C_{\text{п}}^{6+}} \frac{Fe_3O_4}{C_{\text{п}}^{6+}} \quad (31)$$

Вилучення з води хрому до ГДК досягається при наступних параметрах проведення процесу очищення води: $pH = 9,5$; $Fe^{2+}:Cr^{6+} = 4$; $Fe_3O_4:Cr^{6+} = 60$. Гідравлічна крупність часток та об'єм осаду відповідають параметрам, які отримані за технологією без підігріву.

Технологічні схеми очищення стічних вод від хрому наведені на мал.4.

В процесі обробки друкованих плат (радіотехнічна промисловість) утворюється розчин з концентрацією міді до 200 г/л. Традиційні технології очищення таких розчинів, це - електродіаліз, цементация та реагентна, із застосуванням реагентів, які мають лужність. Розроблена нами технологія дозволяє вилучити з розчину мідь, очистити його до ГДК по міді - 0,1 мг/л.

Вилучення міді здійснюється в дві стадії: 1 - цементация міді в реакторі з сталевим стружком; 2 - отримання фериту міді та відокремлення його від розчину магнітною сепарацією. Ефективність очищення на першій стадії становить 97-99 %. На другій стадії здійснюється очищення міді до ГДК. Максимальний ефект очищення води - 98,5 % - досягнутий при цементации на сталевій стружці Ст.3.

Розрахунок реактору з обертаємим сталевим стружком запропоновано проводити з допомогою співвідношення, яке описує кінетику процесу вилучення міді

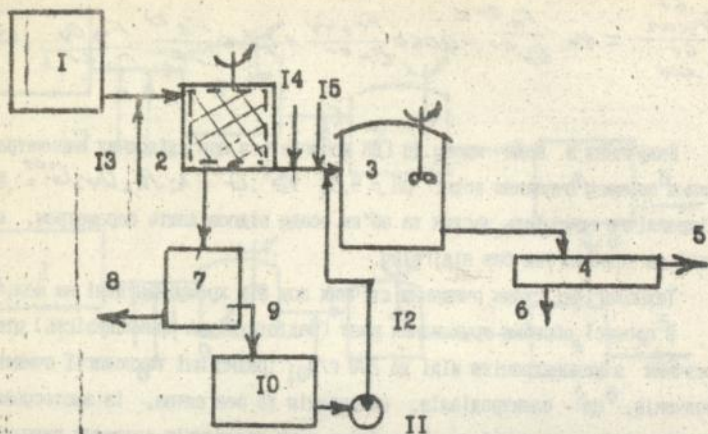
$$\frac{C_t}{C_0} = e^{-kt} \quad (32)$$

Дослідженнями встановлено, що $k = 0,034 h^{-1} n$, де h' - висота підйому рідини при роботі в реакторі, обчислюється

$$J = \frac{h'}{2R} = 0,0766 \frac{\omega^2}{g} \quad (33)$$

де $\omega = 2\pi n$

Подальше очищення води від міді виконується у феритизаторі. Технологічна



Мал. 5 Технологічна схема очищення розчину від міді

I - ємність з розчином міді; 2 - реактор-цементатор /отружка в Ст.З; рН = 1,5...2; час обробки 10...15 хвилини/; 3 - реактор-фертизатор / $C_{Fe} = 10,07...0,08/Fe^{2+}$ мг, рН = 9,5...10, час обробки 3 хвилини/; 4 - стрічковий магнітний сепаратор; 5 - очищений розчин; 6 - феромагнітні частки; 7 - фільтр для міді; 8 - мідні частки; 9 - розчин заліза /П/; 10 - ємність для розчину заліза /П/; II - насос; I2 - подача розчину заліза /П/ на фертизація.

схема очищення стічної води від міді наведена на мал.5. Стічні води, насичені іонами міді, при $pH = 1,5$ надходять у реактор, завантажений сталевим стружкою (Ст.3). Період перебування води у реакторі 20-30 хвилин при $pH = 1,5...2$, частота обертання засипки з сталі Ст.3 - $2,57...2,67 \text{ с}^{-1}$. Відокремлена мідь, 90...98 %, може бути використана, а розчин обробляється хлором ($0,07-0,08 \text{ мг/мг заліза (IV)}$) та підлужнюється до $pH = 9$. Через 10 хвилин утворюється ферит міді, який відокремлюється магнітною сепарацією.

На основі використання магнетиту розроблена технологія очищення води від солей жорсткості, яка дозволяє пом'якшувати воду при температурі $t = 10...25^\circ\text{C}$. Камеру реакції нами рекомендовано розраховувати з урахуванням градієнту швидкості $\frac{v}{r}$ оптимальна величина якого становить - 200 с^{-1} . Термін перебування води у камері реакції становить 25-30 хвилин, $pH = 10,2$. Ефект зм'якшування води у камері реакції з механічним перемішуванням досягає 72 %. Дослідження камер реакції дозволило визначити константу у співвідношеннях (1,2) $\approx 0,0014$.

Розроблена технологія дозволяє використовувати магнітні фільтри з швидкістю фільтрування 300 м/год замість двоступеневої схеми або схеми: відстійник, або відсвітлювач з шаром завислих речовин, та фільтр.

Технологічна схема зм'якшування води наведена на мал.6.

Доза феромагнітних часток не залежить від початкової жорсткості води та дорівнює 40...60 мг/л.

Головним елементом розглянутих технологій є фільтр, завантажений феромагнітними елементами з постійною намагніченістю. Дослідженнями визначені основні технологічні параметри фільтрів.

Втрати напору у фільтрувальній засипці визначають співвідношенням

$$h = \lambda \frac{L}{d_3} \frac{v^2}{2g} \quad (34)$$

$$\text{де } \lambda = 15 + \frac{1630}{\text{Re}} \quad \text{в межах } \text{Re} = 25...46, \quad \text{та}$$

$$\text{Re}$$

$$\lambda = 15 + \frac{1360}{Re^{0.22}} \text{ при } Re = 46 \dots 220, \text{ а для } Re > 220,$$

$$\lambda = 21.$$

Намагніченість засипки у дослідях дорівнювала $0,8 \cdot 10^4$ А/м. Для часток суміші з намагніченістю $0,64 \cdot 10^4$ А/м. Втрати напору, у перерахунку на гідравлічний ужим, становлять

$$\xi_t = 2,9 \xi_0 \left\{ \frac{1}{1 - \left[\frac{(G_M)_t}{\rho_m L \omega} \right]^{0,18}} \right\}^2 \quad (35)$$

Досліджувались фільтрувчі засипки крупністю: 2...3 мм; 3...5 мм; 5...7 мм; 7...10 мм. Пористість засипки у намагніченому стані збільшувалась на 4% та складала 56,8...54,4% залежно від крупності гранул. Дослідженнями встановлено оптимальну крупність засипки 3...5 мм при швидкості фільтрування 100 м/год; ефективність очищення води 90...99%. Останній параметр змінюється в залежності від намагніченості завислих речовин та засипки. Для засипок з намагніченістю $0,8 \cdot 10^4$ А/м та вище, а також часток з намагніченістю більше $0,32 \cdot 10^4$ А/м ефективність очищення води практично не змінюється. Співвідношення феромагнітної компоненти до неферомагнітної повинно бути 1 : 2. Період захисної дії фільтрувчої засипки залежить від її висоти, яка, на основі досліджень, рекомендується в 1 м.

Результати досліджень фільтрів із засипкою з феромагнітних гранул дозволила визначити параметри процесу фільтрування

$$\lambda_1 = 4,2 (Re)^{-1,25} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{-1,9} \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2} \right)^{1,53} \frac{\alpha}{Y}, \quad (36)$$

$$t_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} (Re)^{-0,25} \left(\frac{d_{\text{ш}}}{d_{\text{г}}} \right)^{-1,9} \left(\frac{M_{\text{г}} - M_{\text{ж}}}{M_{\text{ж}}} \right)^{1,53} \frac{1}{t} \quad (37)$$

Регенерація фільтрувальної засипки виконується водо-повітряною сумішшю. На основі досліджень встановлено: час промивки - 2...3 хв.; інтенсивність подачі води - 30 л/с м²; інтенсивність подачі повітря - 50...60 л/с м². Збір промивної води над поверхнею засипки без урахування її розширення, але враховуючи втрати напору при фільтруванні.

В сьомій главі розглянуті методи обробки осаду, який утворюється під час очищення води, на основі використання оксиду заліза. Запропоновані реагентні та безреагентні методи обробки осаду. На основі проведених досліджень наведені рекомендації по їх використанню. Розроблена технологія регенерації гідроксидних осадів обробкою їх кислотами з вилученням заліза. Така технологія скорочує об'єм осаду та зменшує площі, необхідні для його складування. Об'єм осаду у відстійнику, в залежності від концентрації завислих речовин, визначається за формулою

$$W_0 = 0,923 C_0^{0,21} \quad (38)$$

У згущувачі рекомендується використовувати грати з відношенням площі перемішувального пристрою до площі перемішування 0,1...0,15 з лінійною швидкістю 0,05...0,01 м/с. У згущувачі через 1,5...2 год. об'єм осаду зменшується в

1,5...1,7 рази. Після згущувача осад обробляється кислотою у реакторі. Необхідна кількість технічної концентрованої кислоти 1:20 по об'єму осаду. Змішування осаду з кислотою слід провадити стиснутим повітрям 60 с з інтенсивністю 3 л/с м². З реактора реагент подається у сховище, а кислі осад обробляються поліакріламідом (5...10 мг/л) у згущувачі. Час перебування осаду у згущувачі - 20 хв. Зневоложення провадиться на прес-фільтрі з додаванням поліакріламідів дозовою 0,6...1 мг/л. Вологість осаду після прес-фільтрів 60...66 % при навантаженні 20...30 кг/м².

При використанні прес-фільтрів необхідно попередньо осад нейтралізувати. Доза вапна 4...5 г/л з перерахуванням на CaO. Навантаження на вакуум-фільтр 20...30 кг/м², вологість осаду 60...65 %.

Обробка осаду без повернення у виробництво солей заліза може провадитись попередньою обробкою кавітацією. Кавітаційна обробка збільшує швидкість ущільнення осаду на 60 % після 30 хвилин відстоювання. Частота обертання ротору кавітатора 66,4 с⁻¹.

Продуктивність кавітатора розраховується за формулою

$$Q = 2\pi R n \omega K \quad (39)$$

$$K = 1 - 0,00432C \quad (40)$$

де K - коефіцієнт витрат кавітатора, який залежить від концентрації осаду, 0...20 кг/м³.

Після кавітаційної обробки осаду навантаження на вакуум-фільтр збільшується у 1,3...1,5 рази, а вологість знижується до 70 %.

Обробка осаду гідроксиду заліза може провадитись з отриманням магнетиту. Осад, які містять залізо (II), можна обробляти хлором 0,07 мг/мг з підвищенням рН до 11...12. Дослідження показали, що об'єм осаду за 45 хв. зменшується у 10

разів. Зміна об'єму осаду впродовж часу розраховується співвідношенням

$$\frac{W}{W_0} = 1,4e^{-5,2 \cdot 10^{-2} t} \quad (41)$$

Осади, які містять залізо (II), обробляються з додаванням відновлювача. Оптимальна доза відновлювача (Na_2SO_3) - 3,64 мг/мг рН = 12,3...12,5. Дослідами встановлене співвідношення між змінами об'єму осаду, залежно від часу, та відновлювача (D_8)

$$\frac{W}{W_0} = e^{-0,027t + 2,8D_8} \quad (42)$$

для 3,2...3,6 мг/мг.

Ущільнення осаду стрічковим магнітним сепаратором дозволяє отримати осад з вологів до 70 %.

У восьмій главі наведені техніко-економічні розрахунки основних технологічних рівень. Для електромагнітних апаратів визначені: капітальні, експлуатаційні та приведені витрати в залежності від витрат води, яка надходить на обробку на швидких фільтрах. Коли витрати води більші 1000 м³/год, різко зростають приведені витрати для електромагнітних фільтрів.

Техніко-економічні розрахунки фільтрів із засигнов з феромагнітних керамічних елементів виконані для витрат води від 12,5 до 100 тис. м³/добу для різних швидкостей фільтрування (до 100 м/год.). Приведені витрати для цих фільтрів тісно пов'язані з витратами промивної води, зростаючи з збільшенням концентрації завислих речовин у воді, яка надходить на очищення. В усіх випадках приведені витрати для фільтрів з ферокерамічними елементами менші, ніж для електромагнітних фільтрів. На основі аналізу приведених витрат рекомендовані швидкості фільтрування 20...80 м/год.

Результати досліджень впроваджені на ряді об'єктів. Загальний економічний

ефект від впровадження розглянутих технологічних рішень складав 2.1 млн.крб. у цінах 1988 року.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз тенденцій розвитку методів вилучення з води домішок показав, що використання магнітних сил та реагентів, які мають феромагнітні властивості, перспективний напрямок у галузі водопостачання.

2. Розроблені та науково обгрунтовані методи очищення води від немагнітних речовин магнітним полем та реагентом з феромагнітними властивостями.

3. Розроблені теоретичні основи очищення води на базі використання оксидів заліза. В результаті теоретичних досліджень одержано:

- класифікацію методів очищення води на основі використання оксидів заліза;
- математичну модель роботи магнітного фільтру для вилучення з води завислих речовин, які мають феромагнітні властивості;
- математичну модель зміни опору фільтрувочої засипки;
- математичну модель вилучення феромагнітних сумішей та зміни вологості осадів під час роботи стрічкового магнітного сепаратору;
- математичну модель реактору для вилучення з води колоїдних часток з допомогою феромагнітного реагенту;
- проведений аналіз поведінки домішок, які мають феромагнітні властивості, у магнітному полі, що дозволило визначити гранично можливі швидкості фільтрування в залежності від характеристик домішок.

4. Для очищення води від завислих речовин у магнітному полі розроблений реагент, який має феромагнітні властивості та може бути вироблений з відходів виробництва внаслідок травлення заліза. Експериментально визначені властивості цього реагенту та умови його використання у технології очищення води.

5. Дослідження високоградієнтних електромагнітних фільтрів дозволило визначити основні параметри їх роботи.

6. Розроблені, досліджені та перевірені на виробництві фільтри, завантажені гранулами ферокерамічного матеріалу. Визначені основні характеристики цих фільтрів та надані рекомендації їх використання для очищення води.

7. Запропоновані технологічні процеси очищення води:

- від іонів заліза в залежності від їх концентрації у воді;

- від іонів хрому, міді;
- реагентного пом'якшення води.

Розроблені технологічні процеси очищення води, які дозволяють інтенсифікувати процеси вилучення з води забруднень у 5...10 разів.

8. В результаті досліджень освітлення пульпи залізорудних горно-збагачувальних підприємств запропоновано отримувати реагент з оксидів заліза. Розроблена технологія його використання для освітлення пульпи.

9. Досліджені методи обробки осадів, які утворюються внаслідок обробки води оксидами та гідроксидами заліза. Запропоновані технології обробки осаду дозволяють зменшити його вологість до 72...54 % (в залежності від методу ущільнення) та збільшити швидкість ущільнення осаду в 3...5 разів.

10. Проведений техніко-економічний аналіз електромагнітних систем та фільтрів з феромагнітними елементами. Визначені оптимальні межі їх використання в залежності від кількості завислих речовин та швидкості фільтрування.

Основний зміст дисертаційної роботи опублікований у наступних працях:

1. Семенко В.Д., Терновцев В.Е. Комплексное использование воды в промышленном узле. - К., Будівельник, 1974, - 232 с.

2. Терновцев В.Е. Магнитные установки в системах оборотного водоснабжения. - К.: Будівельник, 1976, - 88 с.

3. Терновцев В.Е., Пухачев В.М. Очистка промышленных сточных вод. - К.: Будівельник, 1986, - 119 с.

4. Терновцев В.Е. Расширение облака пассивной примеси в неподвижной воде. Сб. Санитарная техника, Вып. XI - К.: Будівельник, 1969, 69-74 с.

5. Терновцев В.Е. Уравнение кинетики процесса хлопьеобразования и осаждения полидисперсных систем. Сб. Санитарная техника, Вып. УИ, - К.: Будівельник, 1969, 125-131 с.

6. Терновцев В.Е. Изменение поля скорости в жидкости в зависимости от концентрации осаждающихся в ней примесей. Сб. Наука і техніка в міському господарстві. Вып. XXI. К.: Будівельник, 1973, 89-96 с.

7. Терновцев В.Е. Обобщенное критериальное уравнение процесса осаждения примесей в неподвижной воде. Сб. Наука і техніка в міському господарстві,

Вип. XXII, - К. : Будівельник, 1973, 111-114 с.

8. Марковский Н.В., Терновцев В.Е., Федоренко Г.М. Модельная сверхпроводящая установка для магнитной очистки воды. Сб. Криогенная электродинамика и энергетика, - К. : Наукова думка, 1977, 90-96 с.

9. Терновцев В.Е., Шрок Е.В., Марич Н.К., Прохик Э.А. Технологическая схема утилизации осадка водоочистной станции. Сб. Наука и техника в городском хозяйстве. Вып.44, К. : Будівельник, 1980, 21-25 с.

10. Марковский Н.В., Терновцев В.Е. Технико-экономическое обоснование выбора магнитных устройств в системах охлаждения воды. Сб. Строительные материалы, изделия и санитарная техника, Вып.3. - К. : Будівельник, 1980, 87-90 с.

11. Сергеев Ш.С., Терновцев В.Е., Шовниренко П.Г. Моделирование изменения свойств осадка в процессе кавитации. Сб. Строительные материалы, изделия и санитарная техника, Вып.3. - К. : Будівельник, 1980, 90-94 с.

12. Терновцев В.Е. Гидравлическое сопротивление при движении пульпы, содержащей ферромагнитные частицы в магнитном поле. Сб. Гидравлика и гидротехника, Вып. 34, - К. : Техника, 1982, 51-55 с.

13. Терновцев В.Е., Боровский Э.Р., Марич Н.К. Интенсификация осветления пульпы железорудного горно-обогатительного комбината. Сб. Строительные материалы, изделия и санитарная техника, Вып.5, - К. : Будівельник, 1982, 111-115 с.

14. Терновцев В.Е. Михайловский В.Л. Исследование сопротивления проволочной загрузки фильтров. Сб. Гидравлика и гидротехника. Вып.35, - К. : Техника, 1983, 41-46 с.

15. Терновцев В.Е. Разработка технологий очистки воды на основе реагентов, содержащих оксиды железа. Тез. докл. Республ. научн. техн. конф. Ровно, 1983, 11-12 с.

16. Темиров У.Б., Терновцев В.Е., Рахманов М.Р. Способ очистки сточных вод, полученных после травления железа. Сб. Инженерное обеспечение объектов строительства. - Ташкент : 1984, 124-128 с.

17. Темиров У.Б., Терновцев В.Е., Рахманов М.Р. Обезжелезивание подземных вод с использованием магнитной технологии. Сб. Инженерное обеспечение объектов строительства, - Ташкент : 1984, 118-123 с.

18. Терновцев В.Е., Сергеев Ш.С., Винарская М.Д. Интенсификация удаления взвешенных веществ из высокодисперсных систем. Сб. Строительные материалы, из-

делия и санитарная техніка. Вип.7, - К. : Будівельник, 1984, 90-92 с.

19. Терновцев В.Е., Прокопчук И.Т. Экспериментальные исследования по депассивации железных электродов. Сб. Наука і техніка в міському господарстві. Вип. 53, - К. : Будівельник, 1984, 36-41 с.

20. Терновцев В.Е., Сергеев Ш.С., Зоря Е.В., Грабарева С.Д. Очистка воды от взвешенных веществ магнитным фильтрованием. Сб.9, - К. : Будівельник, 1986, 66-70 с.

21. Кульский Л.А., Терновцев В.Е., Сергеев Ш.С., Моделирование процесса очистки воды от взвешенных веществ. Ш. Химия и технология воды. т.9, № 1, Киев, 1987, 12-15 с.

22. Терновцев В.Е., Божко А.А. Очистка сточных вод производства печатных плат от меди. Сб. научных работ КПИ, Техніка, 1986, 18-21 с.

23. Терновцев В.Е. Использование высокоградиентных магнитных полей в технологии очистки воды. Сб. Строительные материалы, изделия и санитарная техника, Вип.12, - К. : Будівельник, 1989, 14-18 с.

24. Терновцев В.Е.в Михайловский В.А., Сальман Х. Получение железосодержащего реагента для очистки производственных сточных вод. Сб.Строительные материалы, изделия и санитарная техника. Вип.13, - К. : Будівельник, 1990, 25-31 с.

25. Терновцев В.Е., Кушка А.Н. Исследование гетероаглогации каолинита и феррореагента. Сб.Строительные материалы, Изделия и санитарная техника. Вип.14, - К. : Будівельник, 1991, 17-22 С.

26-38. Авторские свидетельства СССР № 805594, 857006, 899489, 1058577, 1093145, 1171431, 1435660, 14759501, 1493692, 1787591, 1787521, 1787522, 1790997.

39. Патент СССР № 1806004.

УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

C - концентрація завислих речовин, мг/л;

G - градієнт швидкості, s^{-1} ;

t - час, с;

$A, k, \alpha, \gamma, \beta$ - константи;

R - гідравлічний радіус, см;

n - частота обертання, s^{-1} ;

- r - радіус мішалки, см;
- B - магнітна індукція, Тл;
- M_2 - намагніченість засипки, А/м;
- M_c - намагніченість частки, А/м;
- d_3 - діаметр часток засипки, см;
- d_c - діаметр частки, см;
- V - швидкість просування рідини, см/с;
- x - відстань, см;
- G_m - маса речовини, г;
- h - втрати напіру, см;
- λ - коефіцієнт гідравлічного тертя;
- L - довжина фільтру, см;
- g - прискорення сили гравітації, см/с²;
- ω - площа поперечного перерізу, см²;
- ρ_m - щільність твердої фази, г/см³;
- ρ_{ox} - щільність рідини, г/см³;
- F_m - магнітна сила, Н;
- F_p - сила гідравлічної дії, Н;
- H - напруженість магнітного поля, А/м;
- χ_c - магнітна сприйнятливість часток;
- S - площа, см²;
- μ_0 - магнітна постійна, Г/м;
- ν - кінематична в'язкість, см²/с;
- W - вологість, %;
- α_i - гідравлічний ухил;
- Re - критерій Рейнольдса;
- Na - критерій Гартмана;
- Nu - критерій Нусельта;
- Pr - критерій Прандтля;
- Pe - критерій Пекле;
- Q - витрата, м³/с.

Підп. до друку 03.11.93 . Формат 60×84^{1/16}.
Папір друк. № 3 . Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 2,33.
Умовн. фарбо-відб. 2,56 . Обл.-вид. арк. 2,0 .
Тираж 100 . Зам. № 6315 , Безплатно.

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

4

1160/120

Безплатно

АВ 28.468