

УДК 622.7.09 (075.8)

Л.В. ШПИЛЬОВИЙ, канд. техн. наук
(Україна, Маріуполь, ТОВ "Азов-Мінералтехніка"),

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук
(Україна, Харків, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут")

ПРОЦЕС ЗГУЩЕННЯ РУДНИХ ПУЛЬП ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Мета. Встановлення залежності швидкості осадження твердої фази рудних пульп у радіальному згущувачі від витрат флокулянта та рН середовища. Формулювання на цій основі критерію управління процесом згущення.

Методика. Структурно-функціональним, або, як його називають феноменологічним, методом виділено основні суб-процеси згущення рудних пульп у радіальному згущувачі. Методом планованого експерименту із застосуванням центрально-композиційного ротатабельного плану другого порядку Бокса-Хантера одержано статистичну математичну модель процесу згущення рудної пульпи.

Результати. Встановлено, що залежність швидкості осадження твердої фази від витрат флокулянта та рН середовища має екстремальний характер.

Наукова новизна. На основі встановленої залежності експериментальних даних сформульовано оптимальний критерій управління процесом згущення рудних пульп у радіальному згущувачі, суть якого полягає у підтримці швидкості осадження твердої фази в екстремумі-максимумі за рахунок прийнятих варіативних параметрів: витрат флокулянта та рН середовища.

Практична значимість. На основі одержаних експериментальних даних, аналізу залежностей встановлено оптимальний режим процесу осадження твердої фази рудних пульп у радіальному згущувачі. Оптимальна швидкість осадження дисперсної фази суспензії може підтримуватися на максимальному рівні за питомими витратами флокулянта Q_f та рН середовища як оператором відділення радіальних згущувачів, так і за допомогою системи автоматичного (екстремального) управління.

Результати математичного моделювання процесу згущення пульпи використані в проекті автоматизації радіального згущувача П-30 діаметром 30 м збагачувальної фабрики нефелінових сієнітів Мазурівського родовища, виконаного УкрНДІПромтехнології (м. Жовті Води) для ПАТ "Маріупільський металургійний комбінат ім. Ілліча".

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями. На збагачувальних фабриках чорної та **Збагачення корисних копалин, 2017. – Вип. 66(107)**

Автоматизація та управління процесами збагачення

кольорової металургії, вугільної та хімічної галузей промисловості згущення суспензій здійснюється звичайно у радіальних згущувачах з механічним розвантаженням осаду [1-2], найчастіше з периферійним приводом (роботи Г.Г. Чуянова). При автоматизації процесів згущення важливого значення набувають особливості технології процесу та конструкції згущувача. Практика збагачення виробила основні вимоги до технології згущення рудних суспензій [3]: мінімізація втрат дисперсної фази зі зливами згущувача; максимізація чи стабілізація густини згущеного продукту; мінімізація витрат флокулянту.

Складність процесу згущення, трудомісткість отримання інформації про вхідні та вихідні параметри процесу, недостатня вивченість радіального згущувача як об'єкта автоматичного управління ускладнюють вирішення проблеми автоматизації процесу. Дослідженню процесу згущення як об'єкта автоматизації присвячені роботи Ю.Л. Папушина, А.И. Самойлова, а також R. Hogg [4]. Відомі ґрунтовні праці Л.Г. Мелькумова, В.О. Ульшина, М.А. Бастунського, Б.Ю. Головкова, Г.Г. Колпікова, Л.А. Рейбмана, В.В. Стальського виконані для процесу згущення суспензій у вугільній та гірничо-хімічній (калійній) промисловості.

Відсутність теоретичної основи для науково обґрунтованого синтезу систем автоматичного управління процесом згущення призводить до того, що сьогодні на збагачувальних фабриках керування процесом згущення здійснюється, в основному, в ручному режимі на основі досвіду та інтуїції обслуговуючого персоналу. На окремих фабриках отримали певне розповсюдження локальні системи дозування флокулянту (В.О. Ульшин, Д.А. Зубов) і регулювання густини згущеного продукту (Б.А. Боровинський). Однак, ці системи не отримали широкого впровадження в практику зневоднення суспензій.

На фабриці компанії "Атлас мінерал" (США) висота зони проясненої рідини у згущувачі вимірюється чутливим диференційним датчиком тиску, вихідний сигнал якого потрапляє на регулятор, що керує витратами флокулянту. Застосування системи дозволило на 30 % знизити витрати флокулянту. Але для такої системи характерна інерційність об'єкта, що суттєво ускладнює автоматичне керування (Zhijian Lu, James Grau, Felicia F. Peng, Guozhang Xiao).

У роботі [5] встановлено, що швидкість осадження не залежить від висоти шару пульпи.

Система регулювання витрат флокулянту в залежності від витрат дисперсної фази, що надходить у згущувач дозволяє підтримувати співвідношення витрат дисперсної фази і флокулянту, тобто питомих витрат флокулянту, на рівні, що відповідає максимальній швидкості осадження частинок дисперсної фази і, як наслідок, мінімальній мутності зливу. Для усунення недоліків, притаманних системам розімкненого типу, в основний контур регулювання пропонується вносити коригуючий сигнал від датчика мутності зливу (Л.Г. Мелькумов, В.А. Ульшин, М.А. Бастунський), або здійснювати таку корекцію в залежності від значення висоти проясненої зони (Б.Ю. Головков, А.А. Абрамов, С.И. Горловський, В.В. Рыбаков).

Порівняння відомих методів автоматичного керування та технічних засобів реалізації з результатами їх практичного використання для автоматизації процесу згущення рудних суспензій дозволяє стверджувати, що існуючі технічні і технологічні рішення з автоматизації процесу згущення рудних пульп не відповідають потребам виробництва.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Сутність запропонованого нами системного підходу до вирішення описаної вище проблеми полягає в комплексному дослідженні процесу згущення як певної сукупності субпроцесів, взаємозв'язок, супідрядність та ієрархія яких зумовлює цілісні властивості цієї сукупності.

Структурно-функціональний, або, як його називають феноменологічний [6] принцип системного підходу полягає у поділі процесу згущення на структурні елементи (субпроцеси) і визначені їхньої ролі в системі. Субпроцеси і зв'язки між ними створюють структуру системи.

Для вивчення внутрішніх і зовнішніх зв'язків процесу згущення суттєве значення має фізичне і математичне моделювання, за допомогою якого виконується опис окремих етапів згущення.

Застосування феноменологічного підходу до моделювання об'єктів дослідження є ефективним засобом виявлення суттєвих ознак явищ та процесів через вивчення елементарних субпроцесів. У збагаченні корисних копалин цей метод знаходить все більше застосування [6, 7]. Але для вивчення процесу згущення до сьогодні цей підхід практично не застосовувався.

Згідно з цим підходом у радіальному згущувачі з периферійним приводом та безперервним розвантаженням згущеного продукту у відповідності з існуючими фізичними уявленнями про закономірності процесу згущення можна виділити наступні субпроцеси:

- а) розтікання суспензії від живильної лійки до периферії згущувача;
- б) витиснення рідкої фази у злив;
- в) осадження дисперсної фази;
- г) стиснення осаду;
- д) ущільнення осаду.

Зазначимо, що в відомих роботах автори розглядали окремі з цих субпроцесів, інколи поєднуючи їх для вивчення процесу згущення пульп, проектування згущувачів та апаратури управління [8].

Крім того, на основі результатів наших попередніх досліджень процесу згущення [9, 10] виділимо ще два субпроцеси, які мають важливе значення з точки зору його автоматизації [7]: транспортування ущільненого осаду до розвантажувальної лійки і змішування його з суспензією зони стиснення.

Таким чином, процес згущення можна представити у вигляді структурної схеми, наведеної на рис. 1.

З точки зору автоматизації процесу основну роль в процесі згущення відіграють субпроцеси В, Г, Д, Д¹ і Е.

Автоматизація та управління процесами збагачення

Субпроцеси Г, Д, Д¹ і Е досліджувались співавторами цієї статті В.С. Білецьким та Л.В. Шпильовим в роботах [9-11]. Процес стиснення та ущільнення осаду вивчався експериментально в роботі [9]. В роботі [10] статичні та динамічні моделі процесу змішування в розвантажувальній лійці радіального згущувача отримані аналітичним шляхом. Автори, на відміну від відомих робіт, в яких густина згущеного продукту вважається як функція часу, виходили з припущення, що у розвантажувальній лійці радіального згущувача з периферійним приводом відбувається змішування ущільненого осаду із суспензією зони стиснення; і густина згущеного продукту $C_{сз}$, який вивантажується з лійки, визначається виключно результатами цього змішування.

Вхідними величинами субпроцесу змішування ущільненого осаду з суспензією перехідної зони (зони стиснення) в розвантажувальній лійці є витрати ущільненого осаду Q_1 та осаду зони стиснення Q_2 , концентрація дисперсної фази в цих осадах C_1 та C_2 , та витрати згущеного продукту Q_3 . Вихідною величиною процесу є концентрація дисперсної фази в згущеному продукті C_3 . Виходячи з матеріального балансу речовини автори отримали статичні та динамічні характеристики субпроцесу змішування ущільненого осаду. Розвантажувальна лійка розглянута як система з неповним перемішуванням. З достатньою точністю цю систему можна представити як таку, що складається з транспортуючих елементів (елементів переносу) та елементів повного перемішування. Такий підхід, в порівнянні з точним рішенням, дає переваги більшої простоти та наочності.

В спрощеному вигляді передавальна функція представлена:

$$W(p) = \frac{k \cdot e^{-p\tau}}{1 + pT}. \quad (1)$$

Таким чином, система "лійка – розвантажувальний трубопровід" представлена у вигляді послідовно з'єднаних ланок – аперіодичної та запізнення. Значення коефіцієнтів передавальної функції досить складно визначити аналітично; тому вони визначалися експериментально [10].

В роботі [11] авторами досліджувався субпроцесу транспортування ущільненого осаду до розвантажувальної лійки згущувача. Параметрична схема субпроцесу транспортування ущільненого осаду наведена на рис. 2.

Встановлення статичних і динамічних залежностей між вхідною величиною – витратами дисперсної фази на вході гребкового механізму ферми, – та вихідними – витратами осаду, що подається гребками ферми в розвантажувальну лійку, або висотою ущільненого осаду на дні згущувача, – є складною проблемою, яка для радіальних згущувачів розроблена авторами вперше.

Модель ланки транспортування представлена у вигляді двох паралельно сполучених ланок:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p), \quad (2)$$

$$\Delta G_{\text{шл}} \rightarrow \Delta G_1 \quad \Delta w \rightarrow \Delta G_1$$

або

$$W(p) = e^{-p\tau_0} + \bar{\mu}_{\text{ex}} (1 - e^{-p\tau_0}). \quad (3)$$

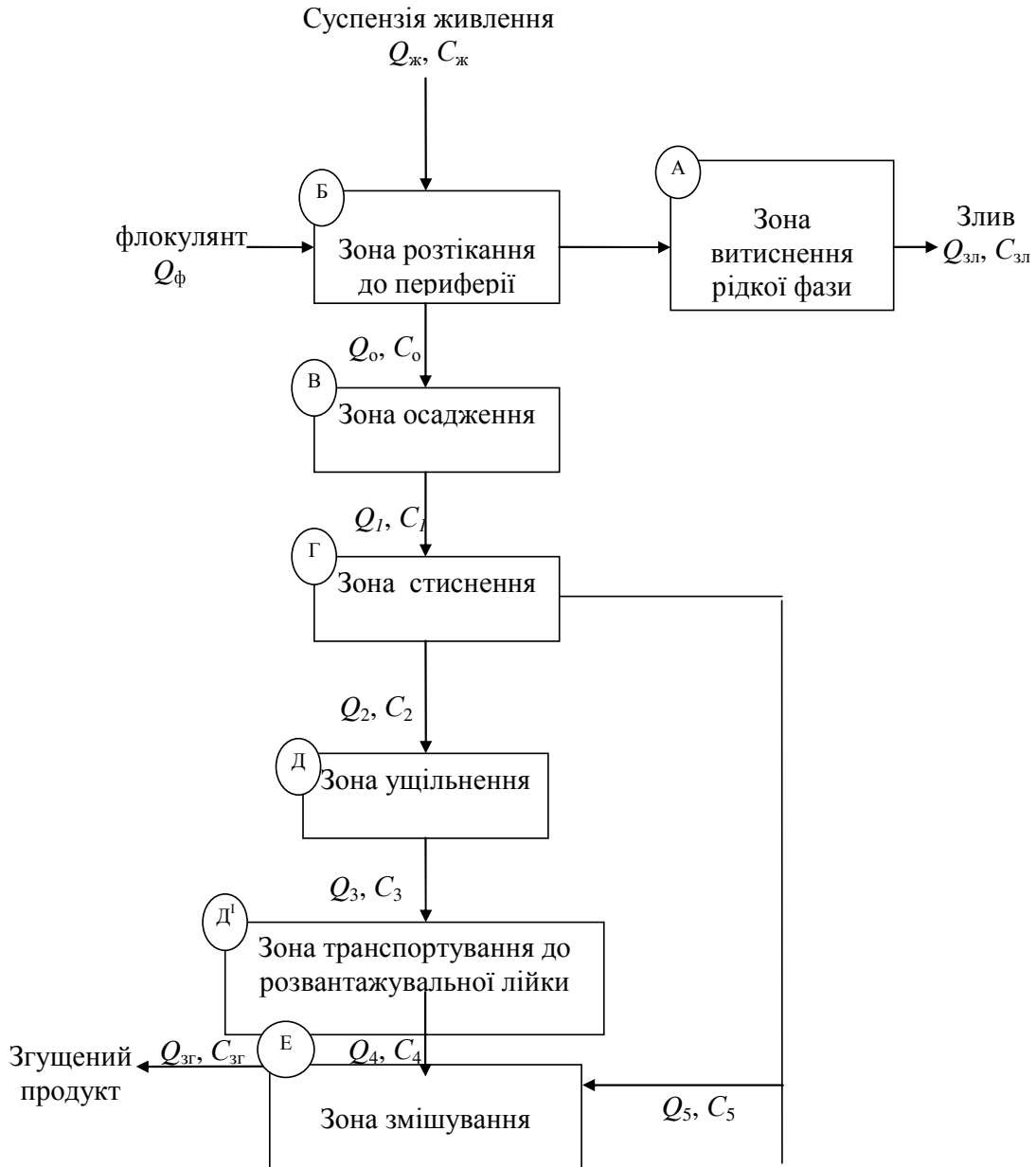


Рис. 1. Структурна схема процесу згущення.

Позначення: витрати суспензії живлення $Q_{ж}$ (м³/год), флокулянту $Q_{ф}$ (г/л), зливу $Q_{зл}$ (м³/год), згущеного продукту $Q_{зг}$ (т/год), витрати потоків проміжних

Автоматизація та управління процесами збагачення

продуктів $Q_1 - Q_5$; вміст дисперсної фази: в суспензії живлення $C_{ж}$ (г/л), в зливні $C_{зл}$, згущеному продукті $C_{зг}$ (г/л), в проміжних продуктах $C_{зг} - C_{зг}$.

Передавальна функція (3) необхідна для синтезу системи автоматичної стабілізації густини згущеного продукту.

Для розробки системи автоматичної стабілізації висоти шару ущільненого осаду на дні згущувача необхідно отримати передавальну функцію по каналах: "витрати ущільненого осаду – висота шару осаду" та "швидкість обертання ферми – висота шару осаду".

При регулюванні висоти шару осаду на дні згущувача задача полягає в приведенні до відповідності масових витрат дисперсної фази на вході в зону транспортування і виході з зони з тим, щоб висота шару ущільненого осаду на дні згущувача залишалася незмінною. Витрати на вході та на виході ($G_{уц}$, G_1), і зміни обсягу осаду в згущувачі dm / dt пов'язані наступною залежністю:

$$G_{уц} - G_1 = dm / dt.$$

При одночасній та незалежній зміні швидкості обертання ферми та витрат дисперсної фази, що надходить в зону транспортування, передавальну функцію всієї системи можна представити у вигляді двох паралельно сполучених ланок:

$$W'(p) = \frac{W_1'(p)}{\Delta G_{уц} \rightarrow \Delta H_{уц}} + \frac{W_2'(p)}{\Delta w \rightarrow \Delta H_{уц}}, \quad (4)$$

або

$$W'(p) = \frac{1}{k_1(1 + pT)} + \overline{\mu_{ax}}(1 - e^{-p\tau}) \cdot \frac{1}{k_2}. \quad (5)$$

Значення коефіцієнтів в формулі (4) і (5) досить складно визначити аналітично; тому вони визначалися авторами експериментально.

Аналітичні моделі (4) та (5) динаміки процесу транспортування ущільненого осаду до розвантажувальної лійки радіального згущувача, які враховують вплив регулюючого – швидкість обертання ферми, – та збурюючого – витрати дисперсної фази, що надходить до зони ущільнення, – діянь на вихідні показники процесу – витрати ущільненого осаду та висоту шару осаду на дні згущувача, – можуть використовуватися для синтезу і моделювання роботи систем автоматичної стабілізації густини згущеного продукту та висоти шару ущільненого осаду; оптимізації параметрів настройки автоматичних регуляторів.

Для розробки математичної моделі радіального згущувача проведена експериментальна перевірка прийнятого припущення про існування в апараті по його висоті важливих з точки зору автоматизації зон: проясненої рідини А, розтікання Б і осадження суспензії В, стиснення Г, ущільнення і перегрівання Д, змішування Е (рис. 3). Перевірка проводилася на промисловому згущувачі

польовошпатового концентрату діаметром 25 м.

Проби відбиралися з ферми радіального згущувача на відстані 3, 6 та 9 метрів від його центру з різної глибини. Відібрані проби об'ємом 1,0 дм³ зважували з похибкою $\pm 0,1\%$ для визначення густини суспензії, та усереднювали. Загальна похибка визначення густини складала $\pm 1,0\%$.

Криві розподілу густини для різних режимів, побудовані за результатами опробування, наведено на рис. 4.

Як показує аналіз кривих розподілу густини, в радіальному згущувачі польовошпатового концентрату можна умовно виділити чотири зони. Верхня – зона **A**, – характеризуються майже незмінною густиною до глибини 1,00...1,25 м, яка мало змінюється з ростом навантаження на згущувач по дисперсній фазі. Ця зона відповідає зоні проясненої рідини. Нижче, в зоні **B**, спостерігається зростання густини суспензії з глибиною. Причому, тим значніше, чим більше навантаження згущувача по суспензії живлення.

Положення нижньої межі зони **B** залежить від навантаження згущувача по суспензії, тобто не є фіксованим. Висота зони **B** зменшується при зростанні навантаження. Тому на кривій розподілу можна виділити деякі точки **B^I...B^{III}**, що відповідають межі розподілу зони осаджування та зони стиснення при різних режимах живлення згущувача. Так, при витратах дисперсної фази з суспензією живлення 38 т/год нижня межа зони (точка **B^I**) сягає глибини 2,5 м; при навантаженні 48 т/год – 2,25...2,35 м (точка **B^{II}**), а при навантаженні 55 т/год – тільки близько двох метрів (точка **B^{III}**). В зоні **B** відбувається осадження дисперсної фази.

В зоні **B**, яка простягається до глибини 3,20...3,30 м, густина суспензії несуттєво, але монотонно зростає. Для різної величини навантаження по дисперсній фазі спостерігається досить значна різниця густини суспензії. В цій зоні відбувається стиснення флокул дисперсної фази. На глибині 3,2...3,3 м спостерігається різкий стрибок густини осаду до значення 1890...1895 кг/м³ (перегин кривої в точці **B**, рис. 4). Третя зона – зона **B**, – характеризується практично незмінною густиною по висоті згущувача та незалежністю густини від навантаження по суспензії живлення, що відповідає режиму ущільнення осаду.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що максимальна густина осаду дорівнює 1890...1895 кг/м³.

Аналогічний характер зміни густини суспензії по висоті промислового згущувача спостерігався нами на згущувачі П-50 піритного концентрату збагачувальної фабрики Гайського ГЗК при витратах дисперсної фази в суспензії живлення 140 т/год.

Отже, результати експериментальних досліджень розподілу густини суспензії по висоті згущувача як польовошпатового, так і піритного концентратів, підтверджують наше припущення про існування згаданих вище характерних зон у згущувачі, які є результатами вказаних субпроцесів. Такий підхід до процесу згущення рудних пульп як об'єкту автоматизації дозволяє по-новому підійти до обґрунтування критеріїв управління

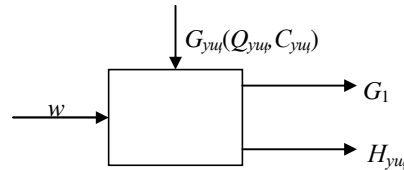


Рис. 2. Параметрична схема субпроцесу транспортування ущільненого осаду:
 $G_{уц}$, $Q_{уц}$, $C_{уц}$, $H_{уц}$ – масові та об'ємні витрати дисперсної фази із зони стиснення, концентрація та висота шару ущільненого осаду, відповідно;
 G_1 – масові витрати дисперсної фази, що подається до розвантажувальної лійки;
 w – швидкість обертання ферми

Для створення оптимальних алгоритмів управління процесом згущення на-самперед сформулюємо критерії оптимальності.

На критерії управління в системі АСУ збагачувальної фабрики розповсюджується принцип ієрархічності, тобто основним критерієм має бути критерій для фабрики в цілому. Цьому критерію має підпорядковуватися критерій управління дільницею зневоднення концентрату, а вже критерію АСУП зневоднення має підпорядковуватися критерій управління процесом згущення.

Для всієї дільниці зневоднення збагачувальної фабрики критерій оптимальності має відображати найвигідніший хід технологічного процесу і тому, з врахуванням складності виробничої схеми, він може бути лише економіко-технологічним. Щоб вибрати якийсь частинний (локальний) критерій управління, що охоплює одну структурну одиницю, корисно прийняти в першому наближенні наступний "принцип декомпозиції критеріїв". Кожна з підсистем, як структурна одиниця системи, забезпечує деякий економічний чи технологічний екстремальний режим і не порушує обмежень, які накладаються системою в цілому на підсистему. Найменшою вимогою прийнятого принципу є така: критерій, що стоїть на ступінь нижче в ієрархічному ланцюжку, не суперечить критерію, що стоїть на ступінь вище, тобто не погіршує показники виробництва.

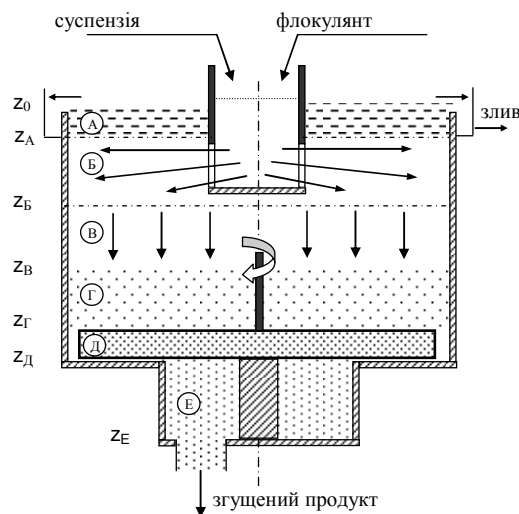


Рис. 3. Схема розподілу технологічних зон в радіальному згущувачі

Виходячи з цього, слід було б спочатку визначити критерій для АСУТП збагачувальної фабрики, а вже слідом – дільниці зневоднення та процесу згущення. Але критерій управління відділенням зневоднення у цьому відношенні є винятком. Зневоднення починається тоді, коли концентрат вже отримано, він готовий, і залишається лише вилучити з нього воду. Процес зневоднення – останній в ланцюжку апаратів збагачувальної фабрики (рис. 5). На нього впливають всі попередні процеси, в той час як він – на жоден з них. Іншими словами, на кількість і якість суспензії, що надходить на зневоднення, впливає безліч факторів, і тому якість готового продукту, його собівартість, втрати та інші параметри є частково функцією вибраних критеріїв управління. Але технологічні та економічні зміни, що відбуваються в процесі зневоднення концентрату, практично не впливають на процеси в попередніх апаратах. Тому можна вважати прийнятним вибір незалежного автономного критерію оптимального управління для дільниці зневоднення.

Основні очевидні технологічні вимоги, яким має відповідати критерій управління виробничим комплексом зневоднення концентрату на збагачувальній фабриці, такі:

- 1) мінімум втрат концентрату;
- 2) максимум економії реагентів та матеріалів;
- 3) максимум економії енергії;
- 4) підтримування продуктивності відділення зневоднення не нижче продуктивності основних процесів збагачення, тобто недопущення створення "вузького місця".

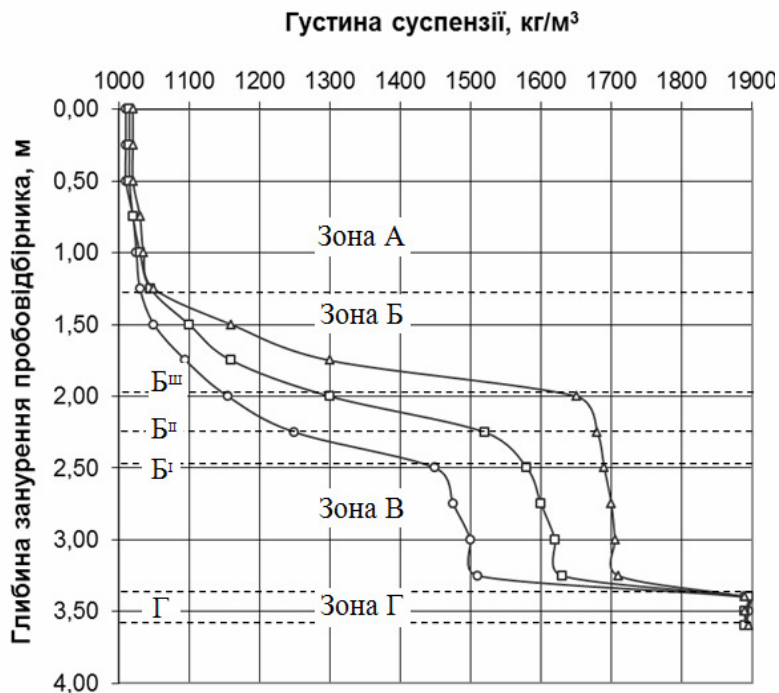


Рис. 4. Кінетика густини суспензії по висоті згущувача

Автоматизація та управління процесами збагачення

Особливо важливою є перша вимога, так як собівартість концентрату наближається до собівартості готової продукції.

Якщо використати для дільниці зневоднення принцип декомпозиції критеріїв, то можна прийняти, що витрати на переробку продукту окремими агрегатами (згущувач, вакуум-фільтр, сушарка) мінімізуються з використанням технологічних критеріїв, тоді як задача отримання найвигіднішого режиму зневоднення в цілому має вирішуватися із залученням економічного функціоналу для всього ідділення

Для окремих технологічних апаратів, в тому числі згущувачів, звичайно перевагу віддають технологічним критеріям. В роботі з автоматизації збагачувальних процесів (Е.В. Прокоф'єв, А.Я. Комаров) сформульовані основні вимоги, яким має відповідати такий критерій: універсальність, однозначність, простота розрахунку. Логічно їх доповнити вимогами до форми цільової функції (наявності екстремуму), та відповідності і керованості.

Розглянемо можливість застосування технологічного критерію оптимального управління – максимальної швидкості осадження, – при автоматизації радіального згущувача збагачувальної фабрики циркон-ніобій-танталових руд.

Основними технологічними вимогами до згущувача вважатимемо забезпечення переробки всього вхідного потоку суспензії живлення з мінімальними втратами дисперсної фази в зливах при завданих обмеженнях на густину згущеного продукту та висоту шару ущільненого осаду.

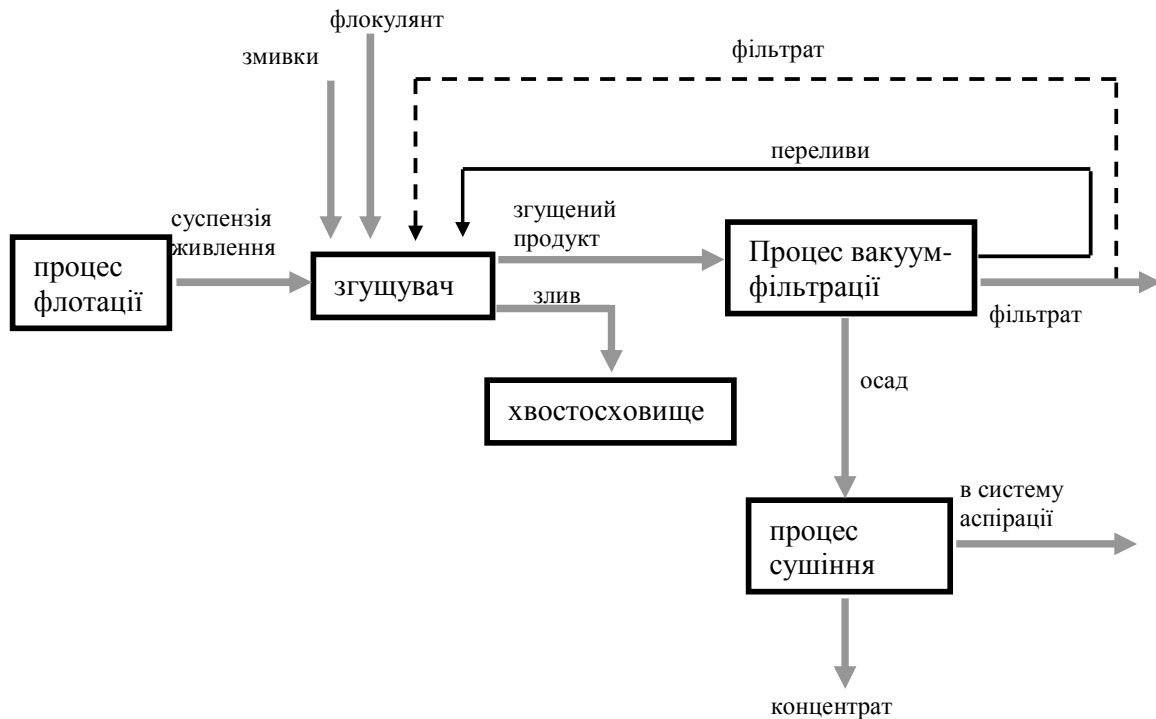


Рис. 5. Технологічна схема процесу зневоднення суспензії польово-шпатового концентрату

Мінімального вмісту дисперсної фази у зливі (мінімальних втрат концентрату) можна досягти за максимальної швидкості осадження дисперсної фази у згущувачі. Відомо, що обсяги дисперсної фази, що осідає на одиниці площі поперечного перетину згущувача в одиницю часу, тим вищі, чим вища швидкість осадження дисперсної фази [2]. Осадження є визначальною стадією для усього процесу згущення. Такий висновок впливає з аналізу відомих залежностей питомої продуктивності згущувача по дисперсній фазі і об'ємної продуктивності його по зливу від швидкості осадження дисперсної фази (Специальные и вспомогательные процессы / Под ред. О.С. Богданова, Ю.Ф. Ненарокова):

$$g = \frac{vc}{(R - R_k)}; \quad Q_{зл} = v S, \quad (6)$$

де g – питома продуктивність згущувача (кількість дисперсної фази, що осідає на одиниці площі в одиницю часу), т/(м²·доб); v – швидкість осадження дисперсної фази, м/доб; c – густина дисперсійного середовища, т/м³; R, R_k – розрідження суспензії (відношення маси води до маси дисперсної фази у верхніх шарах та в згущеному продукті, відповідно), од.; $Q_{зл}$ – продуктивність по зливу, м³/год; S – площа згущення, м².

Зростання швидкості осадження частинок дисперсної фази призводить до збільшення продуктивності згущувача по твердому і зливу без зниження якості останнього. При стабільних параметрах суспензії живлення менше частинок дисперсної фази виноситься висхідними потоками рідини у злив згущувача. Із залежності (6) витікає також, що навантаження по дисперсній фазі на згущувач може бути тим вищим (без зниження якості зливу), чим вища швидкість осадження.

Зростання швидкості осадження сприяє більш тривалому перебуванню дисперсної фази у нижній частині згущувача – в зоні стиснення, і тим самим, – густини ущільненого осаду.

Швидкість осадження твердої фази є тим інтегративним параметром, який може бути покладено в основу критерію управління процесом згущення рудної пульпи.

Виходячи з його важливості у роботі [1] методом планованого експерименту із застосуванням центрально-композиційного ротатабельного плану другого порядку Бокса-Хантера нами одержано статистичну математичну модель процесу згущення рудної пульпи.

Функція відгуку – швидкість осадження твердої фази у радіальному згущувачі (Y , мм/с).

При плануванні експерименту для моделювання процесу осадження дисперсної фази суспензії польвошпатового концентрату як варіативні фактори прийнято: Q_{ϕ} – питомі витрати флокулянту, см³/10м²; pH – концентрація іонів водню; $C_{ж}$ – концентрація дисперсної фази в суспензії, %; d – вміст класу -0,063 мм в дисперсній фазі, %; t – температура суспензії, °С.

Автоматизація та управління процесами збагачення

Вибір варіативних факторів зумовлений результатами аналізу відомих теоретичних та експериментальних досліджень різних промислових суспензій. Факторний простір представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження									
Параметр	Позначення	Код	Одиниці виміру	Інтервал	Основні рівні				
					+2	+1	0	-1	-2
Питомі витрати флокулянту	Q_{Φ}	X_1	$\frac{\text{см}^3}{10 \text{ м}^3}$	0,05	0,20	0,15	0,10	0,05	0,00
Концентрація іонів водню	pH	X_2	од.	0,80	10,0	9,20	8,40	7,60	6,80
Вміст класу -0,063 мм в дисперсній фазі	d	X_3	%	5,00	100,0	95,0	90,0	85,0	80,0
Концентрація дисперсної фази в суспензії	$C_{\text{ж}}$	X_4	%	5,00	30,0	25,0	20,0	15,0	10,0
Температура суспензії	t	X_5	°С	5,00	26,0	21,0	16,0	11,0	6,0

В якості вихідної використовували пульпу відходів збагачення рідкіснометалевих руд гранулометрична характеристика якої наведена в табл. 2.

Таблиця 2

Гранулометрична характеристика дисперсної фази відходів збагачення рідкіснометалічних руд

Клас крупності, мм	Вихід, %	Сумарний вихід, %	
		по класу «+»	по класу «-»
+0,080	3,0	3,0	100,0
-0,080+0,063	7,0	10,0	97,0
-0,063+0,050	22,0	32,0	90,0
-0,050+0,028	35,0	67,0	68,0
-0,028+0,010	24,0	91,0	33,0
-0,010	9,0	100,0	9,0
разом	100	-	-

Як флокулянт застосовували 0,1% водний розчин поліакриламід (ПАА), який готували з сухого гранульованого порошку ПАА.

Обробка результатів експерименту за допомогою модуля "Планування експерименту" статистичної програми "Statgraphics 5.0 Plus" дозволила отримати модель у вигляді рівняння регресії, яке, з врахуванням значущості коефіцієнтів, має вигляд:

$$Y = 7,286 + 0,579 X_1 - 0,129 X_2 - 0,588 X_3 - 0,775 X_4 + 0,554 X_5 - 0,571 X_1^2 + 0,681 X_1 X_2 - 0,590 X_2^2 \quad (7)$$

Середньоквадратичне відхилення (стандартна похибка) $\sigma = 0,28$ мм/с, похибка моделі складає $\pm 4,34\%$.

Характерна тривимірна поверхня функції відгуку подана на рис. 6. Гіперповерхня відгуку $Y = f(X_1, X_2)$ – це еліптичний параболоїд з екстремумом-максимумом в області $X_1 = 0,35$; $X_2 = -0,1$ (в кодованому вигляді). Таким чином, було експериментально встановлено, що швидкість осадження дисперсної фази суспензії має екстремум за питомими витратами флокулянта Q_{ϕ} та рН середовища.

Швидкість осадження дисперсної фази суспензії відповідає вимогам: універсальності, однозначності (максимізується тільки одна функція), простоти розрахунків, відповідності (характер цільової функції забезпечує найбільш успішне керування процесом при її оптимізації), та керованості (цільова функція виражена через змінні керування, які контролюються). Тому швидкість осадження може бути вибрана в якості технологічного критерію управління процесом згущення в радіальному згущувачі.

Отже, критерій управління процесом згущення рудних пульп у радіальному згущувачі матиме вигляд:

$$v(Q_{\phi}, \text{pH}, C_{\text{жс}}, d_{-0,063}, t) \rightarrow \max, \quad (8)$$

де рН – концентрація іонів водню, од.; $C_{\text{жс}}$ – концентрація дисперсної фази в суспензії, %; d – вміст класу $-0,063$ мм в дисперсній фазі, %; t – температура суспензії, °С. Вибір варіативних факторів зумовлений результатами аналізу відомих теоретичних та експериментальних досліджень різних промислових суспензій [1-5, 9, 10]. Факторний простір представлено в табл. 1.

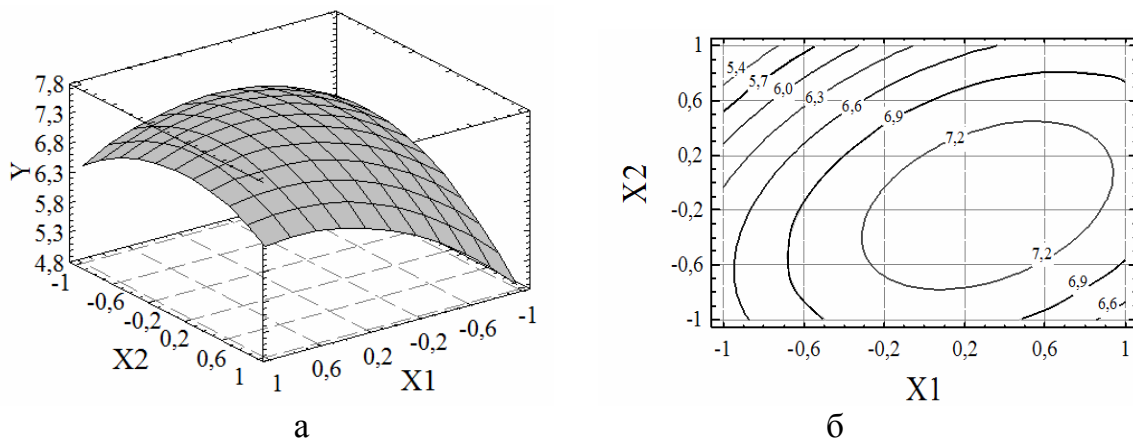


Рис. 6. Поверхня відгуку $Y = f(X_1, X_2)$ – (а), та її контурні криві – (б) при $X_3 = X_4 = X_5 = 0$

Необхідні обмеження за питомими витратами флокулянту:

$$0 \leq Q_{\phi} \leq Q_{\phi_{\max}},$$

де Q_{ϕ} – питомі витрати флокулянту; $Q_{\phi_{\max}}$ – максимально допустимі питомі витрати флокулянту.

Для систем автоматичного керування розвантаженням згущеного продукту із згущувача та висотою шару ущільненого осаду критерій оптимізації зводиться до автоматичної стабілізації цих параметрів.

Як показує аналіз математичного опису процесу згущення [1], зміна швидкості осадження не впливає на густину згущеного продукту та висоту шару ущільненого осаду (або потужність, що споживається приводом ферми). Тому для виконання вимог до згущувача по стабільності густини згущеного продукту та висоти шару ущільненого осаду основний критерій управління (8) слід доповнити частинними критеріями:

$$J_p = \int_0^{T_p} (\rho_p - \rho_s)^2 dt \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$J = \int_0^{T_h} (h_p - h_s)^2 dt \rightarrow \min, \quad (10)$$

де ρ_p, ρ_s – регульована та задана густина згущеного продукту; h_p, h_s – регульована та задана висота шару осаду; T_p, T_h – періоди інтегрування.

Необхідні обмеження за об'ємними витратами згущеного продукту і частотою обертання ферми: $Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}$; $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$, де Q – об'ємні витрати згущеного продукту; Q_{\min}, Q_{\max} – мінімальні та максимальні об'ємні витрати згущеного продукту; n – частота обертання ферми; n_{\min}, n_{\max} – мінімальна та максимальна частота обертання ферми. Частинні критерії (9) та (10) не суперечать загальному критерію (8), так як відсутні зв'язки між v, ρ_p та h .

Результати математичного моделювання процесу згущення пульпи використані в проекті автоматизації радіального згущувача П-30 діаметром 30 м збагачувальної фабрики нефелінових сієнітів Мазурівського родовища, виконаного УкрНДІПромтехнології (м. Жовті Води) для ПАТ "Маріупільський металургійний комбінат ім. Ілліча".

Подяка: Автори дякують ТОВ "Азов-Мінералтехніка" (Україна) за можливість проведення модельних експериментів із залученням промислової сировини, д.т.н. П.В. Сергєєву (Україна) за співпрацю у обробці даних планованого експерименту осадження рудної пульпи.

Висновки з даного дослідження та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі

1. Досліджено процес згущення рудної пульпи як об'єкт автоматизації. При цьому запропоновано оригінальний субпроцесний підхід до аналізу згущення пульпи у радіальному згущувачі з периферійним приводом та безперервним розвантаженням згущеного продукту і виділені наступні субпроцеси:

- а) розтікання суспензії від живильної лійки до периферії згущувача;
- б) витиснення рідкої фази у злив;
- в) осадження дисперсної фази;
- г) стиснення осаду;
- д) ущільнення осаду;
- д¹) транспортування ущільненого осаду до розвантажувальної лійки;
- е) змішування осаду з суспензією зони стиснення.

2. Показано, що субпроцес осадження дисперсної фази є основним, виконано математичне моделювання цього процесу, показано, що залежність швидкості осадження твердої фази від витрат флокулянта та рН середовища має екстремальний характер. Виходячи з одержаних експериментальних даних сформульовано оптимальний критерій управління процесом згущення рудних пульп у радіальному згущувачі, суть якого у підтримці швидкості осадження твердої фази в екстремумі-максимумі за рахунок прийнятих варіативних параметрів: витрат флокулянта та рН середовища.

3. Залежність швидкості осадження дисперсної фази зфлокульованої суспензії польвошпатового концентрату від основних незалежних факторів процесу згущення (концентрації дисперсної фази в суспензії, вмісту класу – 0,063 мм в дисперсній фазі, температури та величини рН суспензії, питомих витрат флокулянту) в умовах їх комплексного впливу можна представити у вигляді рівняння регресії другого порядку, яке адекватно та з задовільною для вимог практики точністю описує досліджуваний процес.

4. Існує екстремум швидкості осадження дисперсної фази зфлокульованої суспензії від питомих витрат флокулянту, координати якого суттєво зміщуються на статичній характеристиці як по осі ординат, так і по осі абсцис, в залежності від концентрації іонів водню в суспензії. Екстремальний характер залежностей та дрейф екстремуму має враховуватися при розробці алгоритмів ефективного (оптимального) управління процесом згущення.

5. Нелінійний (екстремальний) характер залежності швидкості осадження та густини стисненого осаду від питомих витрат флокулянту і концентрації іонів водню в суспензії є причиною малоєфективної роботи відомих систем автоматичного керування процесом згущення, розроблених без врахування цієї особливості, та має враховуватися при автоматизації процесу згущення.

6. Встановлені для досліджених типів суспензій загальні закономірності осаджування дисперсної фази та екстремальна залежність швидкості осадження дисперсної фази від питомих витрат флокулянту і концентрації іонів водню в суспензії, дозволяють обґрунтувати єдині підходи до розробки принципів і ме-

Автоматизація та управління процесами збагачення

тодів ефективного автоматичного управління режимами осаджування, структури системи управління радіальним згущувачем з врахуванням особливостей технологічних параметрів дисперсної фази та іонного складу дисперсійного середовища.

Перспектива подальших досліджень.

Для забезпечення надійного використання основного критерію оптимізації процесу згущення необхідно дослідити характер дрейфу його екстремального значення в залежності від варіації аргументів, що входять до правої частини цільової функції, чутливість критерію в умовах завод, та керованість процесу за вибраним критерієм.

Список літератури

1. Шпильовий Л.В. Технологічні основи автоматизації процесу згущення на збагачувальних фабриках. Донецьк: Східний видавничий дім. ISBN 978-966-317-087-9 [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.vuzlib.com.ua/articles/book/16877-Tekhnolog%D1%96chn%D1%96_osnovi_avtoma/4.html
2. The role of ore properties in thickening process / Majid UNESI , Mohammad NOAPARAST , Seiyd Ziaedin SHAF AEI, Esmacil JORJANI // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 50(2), 2014, 783-794. <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp140229>
3. Ruiz M.C., Rafael Padilla. Separation of liquid – liquid dispersions in a deep – lauer gravitu settler: Part 2. Mathematical modeling of the settler // Hydrometallurgy. DOI: 10.1016/0304-386X(95)00096-Y. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304386X9500096Y>
4. Hogg R. Flocculation and dewatering // Internftional Journal Mineral Processing. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00023-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00023-X)
5. Mishler, R. T. Methods For Determining The Capacities Of Slime– Thickening Tanks. Conference Papers. The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. Pages: 22. Publication Date: Jan 3, 1917. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.onemine.org/document/abstract.cfm?docid=159576&title=Methods-For-Determining-The-Capacities-Of-Slime-Thickening-Tanks>
6. Білецький В.С. Феноменологічний метод дослідження технологічних процесів у гірництві // Донецьк. Вісті Донецького гірничого інституту. – 2013. – №2. – С. 149-152.
7. Соколова В.П. Феноменологічна модель процесу флотації залізних руд при використанні суміші аполярного та геторополярного реагентів-збирачів // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2016. – Вип. 62(103). – С. 117-127.
8. Wakeman, R.J. Sedimentation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: DOI: 10.1615/AtoZ.s.sedimentation
9. Beletskij, V.S.,Borejko, M.K.,Sergeev, P.V. Study of changes in the electrokinetic properties of oxidized coal during its hydrotransport. // Solid fuel chemistry. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/291057773_Study_of_changes_in_the_electrokinetic_properties_of_oxidized_coal_during_its_hydrotransport
10. A.T. Elishevich, P.V. Sergeev, V.S. Beletskij, I.N. Nikitin. Industrial approbation of technology of selective coal flocculation by latex. // Solid fuel chemistry. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/291065362_Industrial_approbation_of_technology_of_selective_coal_flocculation_by_latex

© Шпильовий Л.В., Білецький В.С., 2017

*Надійшла до редколегії 19.04.2017 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. М.І. Сокуром*