

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ОСАДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ СУСПЕНЗІЇ

Шпильовий Л.В.

Підвищення ефективності функціонування радіального згущувача на збагачувальних фабриках за рахунок вдосконалення системи автоматичного управління є досить актуальним. Особливої актуальності це питання набирає сьогодні, з огляду на необхідність інтенсифікації всіх збагачувальних процесів, в тому числі згущення, через постійне зниження якості руди, що залучається до переробки, та необхідність забезпечення зростання обсягів виробництва. Необхідність вдосконалення існуючих САУ процесом згущення зумовлена також вимогами економії реагентів (флокулянтів), а також підвищеною увагою до стану забруднення навколишнього середовища зливами згущувачів.

Спроби інтенсифікувати процес згущення за рахунок більш ефективного автоматичного дозування флокулянту в радіальний згущувач відомі давно [1–3]. Так, в [1] пропонувалося флокулянт подавати в залежності від масових витрат дисперсної фази в суспензії живлення згущувача, що мало б забезпечити наперед визначені оптимальні питомі витрати флокулянту, за яких швидкість осадження частинок дисперсної фази була б максимальною. В роботах [2,3] автоматичне дозування флокулянта пропонується здійснювати за допомогою систем регулювання замкненого типу. При цьому в якості вихідного параметру процесу пропонуються посередні показники – мутність зливу [2], чи висота зони проясненої рідини у згущувачі [3]. Останні САУ мають ту перевагу, що реагують на всі можливі збурення процесу згущення. Але через велику інерційність об'єкту, особливо на згущувачах великого діаметра, якість автоматичного регулювання та ефективність застосування флокулянтів і в цих випадках залишається незадовільною [4]. Невідповідність сучасного стану автоматизації дозування флокулянтів в процесах згущення вимогам практики зневоднення концентратів та продуктів збагачення корисних копалин пояснюється недостатньою дослідженістю основних закономірностей процесу осадження дисперсної фази зфлокульованих суспензій та відсутністю математичних моделей, придатних для побудови ефективних алгоритмів управління.

Сучасний рівень вивченості механізму флокуляції хоч і дає якісну характеристику процесу, та не дає кількісних залежностей, які для конкретного типу промислової суспензії характеризували б вплив основних технологічних її параметрів на швидкість осадження дисперсної фази; дозволяли визначити раціональні режими процесу і розрахувати оптимальні витрати флокулянту, за яких забезпечується найвища швидкість осадження. При недостатньому дозуванні флокулянту не відбувається злипання частинок в агрегати через малу товщину покриття поверхні частинок дисперсної фази; при передозуванні флокуляція не відбувається через стабілізацію суспензії. Звичайно оптимальні витрати флокулянту визначають в залежності від витрат дисперсної фази суспензії живлення згущувача. Але відомо, що ступінь флокуляції суттєво залежить від електрокінетичного потенціалу на поверхні частинок дисперсної фази, який визначається концентрацією іонів водню в рідкій фазі суспензії [5]. Тому вибір флокулянту та його витрат має бути узгодженим з мінералогічним та гранулометричним складом дисперсної фази, а також іонним складом рідкої фази суспензії. Цей вибір може бути обґрунтований лабораторними дослідженнями осадження суспензій.

Тож невирішеним залишається вивчення умов та визначення раціональних режимів осадження дисперсної фази за спільного та одночасного впливу основних параметрів процесу на швидкість падіння зфлокульованих частинок, встановлення характеру

залежності, розробка математичної моделі, придатної для цілей управління, та алгоритму оптимального управління процесом згущення.

Метою статті є розробка регресійної моделі процесу осадження польовошпатового концентрату та алгоритму управління автоматичним дозуванням флокулянту в радіальний згущувач.

Завдання вирішували шляхом дослідження впливу найбільш важливих параметрів процесу осадження, які визначалася попередніми нашими дослідженнями різних типів промислових суспензій [6,7] та аналізом відомих аналітичних залежностей [8], на швидкість осадження дисперсної фази.

Осадження є визначальною стадією для всього процесу згущення [9]. Зростання швидкості осадження частинок дисперсної фази призводить до зросту продуктивності згущувача по твердому і зливу без зниження якості зливу. При стабільних параметрах живлення менше частинок дисперсної фази виноситься висхідними потоками рідини в злив згущувача.

З огляду на відому залежність продуктивності згущувача від швидкості осадження метою управління режимом осаджування в радіальному згущувачі має бути автоматична підтримка максимального значення швидкості осадження дисперсної фази: $w \rightarrow \max$.

Об'єктом дослідження були штучні суспензії, які готували з сухих порошків лежалих хвостів колишньої збагачувальної фабрики, що переробляла руду Маріупольського цирконового родовища. Мінералогічний склад польовошпатового концентрату, мас. доля, % : мікроклін – 44,0; альбіт – 34,4; нефелін – 20,55; егірін – 0,3; лепідомелан – 0,32; циркон – 0,05; пірохлор – 0,01; гідроокисли заліза – 0,22; інші – 0,15.

Хімічний склад концентрату відповідав технічним вимогам технологічного регламенту на виробництво польовошпатового концентрату, мас. доля, % : K_2O – 6...7; Na_2O – 5...6; SiO_2 – 60...65; Fe_2O_3 – 0,15...0,25; Al_2O_3 – 20...22; ZrO_2 – 0,04; Nb_2O_5 – 0,03; TiO_2 – 0,1.

Питома маса концентрату – 2,60...2,62 г/см³.

Дослідження проводили методом активного експерименту в лабораторних умовах за відомою методикою [10] в скляному циліндрі ємністю 500 см³.

При плануванні експерименту за незалежні фактори приймали: Q_{ϕ} – питомі витрати флокулянту, визначені як об'ємні витрати флокулянту на одиницю загальної поверхні одиниці маси дисперсної фази суспензії, $\frac{cm^3}{10M^2 / \kappa T}$; pH – концентрація іонів водню, од.; C – концентрація дисперсної фази в суспензії, %; d – вміст класу – 0,063 мм в дисперсній фазі, %; t – температура суспензії, °C.

Величину pH суспензії доводили до завданого значення розчином соди (Na_2CO_3). Як флокулянт застосовували 0,1 %-ий водний розчин поліакриламід (ПАА), який вводили в скляний циліндр піпеткою.

В якості цільової функції (Y , мм/с) прийнято швидкість осадження, яка визначалася згідно загальноприйнятих рекомендацій [10]. При проведенні експерименту слідкували за опусканням межі розподілу фаз в циліндрі. Час, за який межа розподілу фаз досягала контрольної позначки на шкалі циліндра, реєстрували за допомогою секундоміра. Швидкість осадження визначали за зміною часу проходження межею розподілу фаз контрольної позначки.

Експеримент поставлено за програмою центрального композиційного ротатабельного плану другого порядку Бокса-Хантера [11]. Ядро плану представлено напівреплікою 2^{5-1} ($1=X_1X_2X_3X_4X_5$). Реалізовані 16 дослідів на основних рівнях доповнені ще 10 дослідями в зіркових точках (величина зіркового плеча в цьому випадку дорівнює 2) та шістьма дослідями в центрі плану.

Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження вибрані за результатами попередніх експериментів і на основі апріорної інформації (табл. 1).

Область зміни незалежних факторів відповідає допустимому технологічним регламентом діапазону зміни технологічних параметрів.

Функція відгуків апроксимована поліномом другого порядку. Обробка результатів експерименту та аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою модуля „Планування експерименту” статистичної програми Statgraphics 3.0 Plus.

Значущість коефіцієнтів моделі визначалася за допомогою Р-рівня і наведено на стандартизованому Парето-графіку (рис.1). Вертикальна лінія на рис.1 відповідає 95 % статистичній значущості коефіцієнтів.

Рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів отримало вигляд:

$$Y = 7,286 + 0,579 X_1 - 0,129 X_2 - 0,588 X_3 - 0,775 X_4 + 0,554 X_5 - 0,571 X_1^2 + 0,681 X_1 X_2 - 0,590 X_2^2 \quad (1)$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому (кодованому) виді.

Таблиця 1

Основні рівні, інтервали варіювання факторів та межі області дослідження

Параметр	Позначення	Код	Одиниця виміру	Інтервал	Основні рівні				
					+2	+1	0	-1	-2
Витрати флокулянту	Q_f	X1	$\frac{см^3}{10м^2 / κΓ}$	0,05	0,20	0,15	0,10	0,05	0,00
Концентрація іонів водню	pH	X2	од.	0,80	10,0	9,20	8,40	7,60	6,80
Вміст класу - 0,063 мм в дисперсійній фазі	d	X3	%	5,00	100,0	95,0	90,0	85,0	80,0
Концентрація дисперсної фази суспензії	C	X4	%	5,00	30,0	25,0	20,0	15,0	10,0
Температура суспензії	t	X5	°C	5,00	26,0	21,0	16,0	11,0	6,00

Standardized Pareto Chart for Y

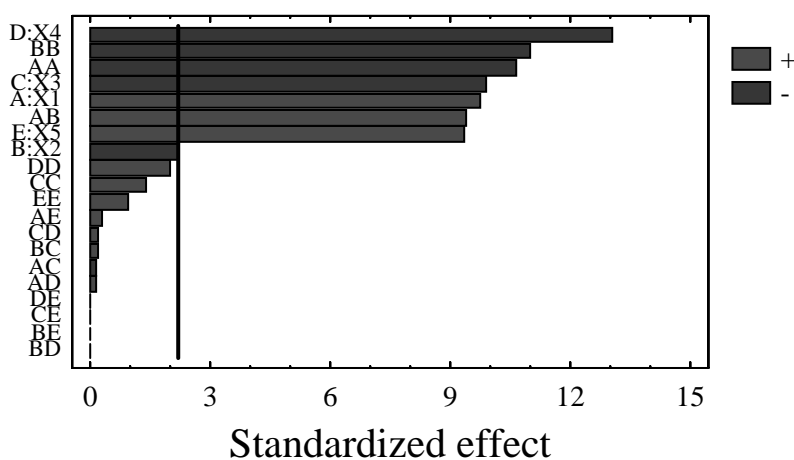


Рис. 1 Значущість коефіцієнтів моделі (Парето-графік)

Як видно з Парето – графіка, статистично значущими є коефіцієнти при лінійних членах рівняння регресії, коефіцієнти при X_1^2 та X_2^2 , та коефіцієнт при парній взаємодії членів X_1 та X_2 .

Значення коефіцієнтів регресії в рівнянні (1) визначають силу впливу відповідних факторів чи їх комбінацій на величину функції відгуку, а знак перед коефіцієнтом – характер цього впливу. Як бачимо, на швидкість осадження дисперсної фази найбільше впливають концентрація дисперсної фази в суспензії, питомі витрати флокулянту та концентрація іонів водню в суспензії. Але треба враховувати, що фактори X_1 та X_2 входять до рівняння у вигляді квадратичних членів, що призводить до заниження їх впливу на функцію відгуку при оцінці за величиною коефіцієнтів регресії. Порівняння розрахункових та експериментальних даних швидкості осадження дисперсної фази показало, що різниця між ними мінімальна (стандартна похибка $\sigma = 0,28$ мм/с), що свідчить про адекватність моделі. Останнє підтверджується також високим значенням коефіцієнту детермінації R-квадрат, який склав 97,80 %.

Аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою згаданої статистичної програми «Statgraphics 3.0 Plus». На рис. 2 наведено найбільш характерну тривимірну поверхню функції відгуку та її перетини. Зупинимося на них докладніше.

Як видно з рис. 2,а поверхня 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). Екстремальна залежність швидкості осадження від витрат флокулянту може бути пояснена тим, що при недостатніх витратах ПАА на поверхні частинок твердої фази утворюється плівка флокулянту замалої товщини, а при передозуванні флокулянту настає стабілізація суспензії [13].

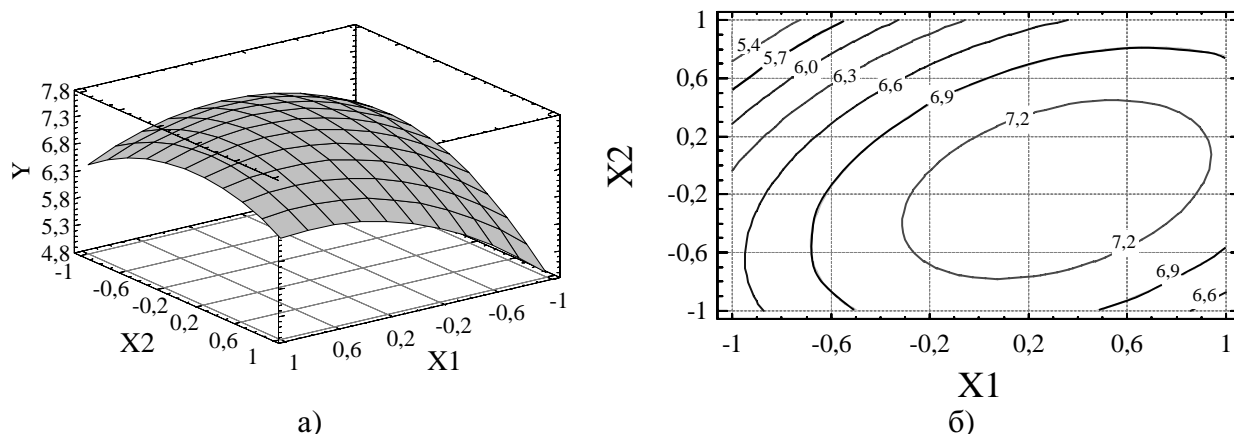


Рис. 2 Поверхня $Y = f(X_1, X_2)$ – (а), та її контурні криві – (б) при $X_3 = X_4 = X_5 = 0$

Екстремальний характер залежності швидкості осадження від величини pH середовища пов'язаний, на нашу думку, із загальноновизнаним механізмом дії електроліту на подвійний електричний шар (ПЕШ) на поверхні частинок.

Перетини поверхні відгуку $Y = f(X_1, X_2)$ при середніх (нульових) значеннях інших змінних процесу наведено на рис. 2,б.

Аналіз рівняння (1) показує, що зміни таких факторів, як вміст класу – 0,063 мм в дисперсній фазі суспензії, концентрація дисперсної фази в суспензії живлення, та температура суспензії призводять до зміни швидкості осадження, але не до дрейфу координат екстремуму питомих витрат флокулянту.

Перевірка регресійної залежності (1) в промислових умовах, яка полягала в порівнянні результатів спостережень за величиною швидкості осадження дисперсної фази суспензії в промисловому згущувачі з результатами розрахованих значень швидкості за моделлю, показала достатню збіжність (похибка 10,9 %).

На рис. 3 наведені одномірні залежності функції відгуку від питомих витрат флокулянту за різної концентрації іонів водню в дисперсійному середовищі. Як видно з

рисунка, при застосуванні флокулянту швидкість осаджування дисперсної фази збільшується приблизно в 2...5 разів. Але ефективність дії флокулянту суттєво змінюється в залежності від того, в якому за іонним складом дисперсійному середовищі відбувається процес флокуляції. Зміна концентрації іонів водню в суспензії від -2 ($pH = 6,8$) до $+2$ ($pH = 10,0$) призводить до зміни швидкості осадження. Характер залежності при цьому істотно змінюється: відхилення величини pH середовища від оптимального призводить до зниження ефективності дії флокулянту, тобто швидкості осадження. Координати екстремуму змінюються при цьому як по осі ординат, так і по осі абсцис.

Причину такого впливу концентрації іонів водню на ефективність дії флокулянту автори роботи [12] вбачають в тому, що спочатку, із збільшенням pH , спостерігається стиснення дифузної частинки ПЕШ за рахунок переходу протиіонів у внутрішню обкладинку. Це, очевидно, полегшує закріплення і флокулюючу дію реагента. Подальше збільшення pH супроводжується перезарядкою поверхні частинки. При цьому умови закріплення реагенту погіршуються і ефект флокуляції дещо знижується.

Таким чином, координати оптимуму питомих витрат флокулянту, за яких досягається найвища швидкість осадження дисперсної фази, можуть змінюватися в залежності від іонного складу рідкої фази суспензії - дисперсійного середовища, - що має враховуватися при автоматизації режиму осадження в радіальному згущувачі.

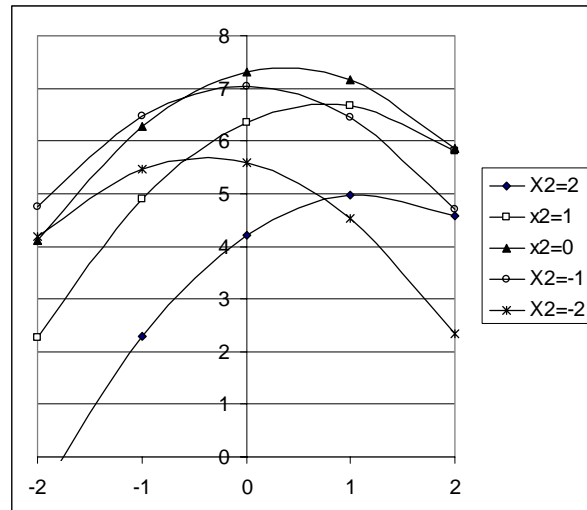


Рис. 3 Залежність швидкості осадження польвошпатового концентрату від питомих витрат флокулянту X_1 та величини pH суспензії X_2

Знаходження оптимальних щодо показників якості значень керуючих впливів і підтримку оптимального режиму при безперервній зміні зовнішніх збурень, що призводять до зміщення координат точки екстремуму, можна здійснити за допомогою системи екстремального управління. Вирішити екстремальну задачу управління можна, використовуючи принцип управління за збуренням, так як існує можливість безперервного контролю основного збурення (величини pH), яке змінює положення точки екстремуму, та встановлено характер впливу цього збурення на зміну режимів роботи системи. В цьому випадку можна створити розімкнений функціональний зв'язок за збуренням, за допомогою якого робота системи в оптимальних режимах буде забезпечуватися з відповідною точністю. Велика інерційність радіального згущувача та труднощі, пов'язані з контролем вихідних показників якості (абсолютної швидкості осадження), а також відносна простота вимірювання величини pH , дозволяють рекомендувати застосування екстремальної системи розімкненого типу з компаундним зв'язком за збуреннями [13].

Екстремальна задача управління режимом осадження дисперсної фази в радіальному згущувачі зводиться до підтримки максимуму швидкості осадження w (показник екстремуму) при існуючій концентрації іонів водню в дисперсійному середовищі pH

(збурення) за допомогою зміни питомих витрат флокулянта Q_ϕ (керуючий вплив). При такому способі управління показник екстремуму (w) не вимірюється і тому задача екстремального управління вирішується за допомогою жорсткого функціонального зв'язку між збуренням pH і керуючим впливом Q_ϕ : $Q_\phi^{opt} = f(pH)$.

Отримавши інформацію про збурення необхідно на основі апріорних даних про властивості об'єкту знайти оптимальні управління. Залежність оптимальних керуючих впливів від збурень $Q_\phi^{opt} = f(pH)$ при зміні останніх може визначатися різними способами, але найбільш економічний полягає в виконанні на моделі попередніх розрахунків, згортці результатів в функції чи таблиці, і використання останніх для управління [14].

При зміні величини pH суспензії необхідно коригувати питомі витрати флокулянту таким чином, щоб швидкість осадження залишалися максимальною. Для побудови алгоритму управління необхідно знати залежність оптимальних питомих витрат флокулянту від величини pH дисперсного середовища. Для цього з статичних характеристик, наведених на рис. 3, для різних значень концентрації іонів водню в робочому діапазоні її зміни визначали величину питомих витрат флокулянту (Q_ϕ^{opt}), за яких швидкість осадження дисперсної фази досягає максимального значення. Значення інших факторів (густина суспензії живлення, вміст класу – 0,063 мм в дисперсній фазі, температура) в цих розрахунках приймалися сталими і рівними середнім значенням.

Обробка результатів розрахунків методом найменших квадратів за допомогою пакету Statgraphics 3.0 Plus дозволила побудувати залежність оптимальних питомих витрат флокулянту від концентрації іонів водню (в кодованому вигляді), яку можна виразити лінійним рівнянням виду:

$$Q_\phi^{opt} = 0,42 pH + 0,4 \quad (2)$$

Рівняння (2) є оптимальною характеристикою компаундування, якій притаманна та властивість, що всім точкам, що лежать на ній, відповідає максимальна швидкість осадження при фіксованих значеннях концентрації іонів водню.

При суттєвій зміні коефіцієнтів моделі, наприклад внаслідок зміни мінералогічного складу руди, розрахунок і згортка результатів повторюються. В цьому випадку при управлінні проводяться лише прості розрахунки за залежностями $Q_\phi^{opt} = f(pH)$. Завдяки цьому контролер може бути звільнений від постійного пошуку оптимальних значень управляючих впливів за моделлю. Він може бути зайнятий роботою по корекції моделі, перевірці її адекватності, знаходженню рівнянь виду $Q_\phi^{opt} = f(pH)$ при зміні коефіцієнтів моделі, та рішенням цих рівнянь.

Вимірюючи збурення і визначаючи за формулою (2) керуючі впливи, з врахуванням обмежень $0 \leq Q_\phi^{opt} \leq Q_\phi^{max}$ можна управляти процесом осадження дисперсної фази оптимально з точки зору вибраного критерію ефективності, та з точністю, що відповідає частці контрольованого збурення в формуванні критерію ефективності.

Висновки. Дослідження процесу осадження, як об'єкту автоматичного управління показало, що існує екстремальна залежність швидкості осадження дисперсної фази суспензії польвошпатового концентрату від питомих витрат флокулянту і концентрації іонів водню в дисперсійному середовищі. Застосування екстремального управління є необхідною умовою підвищення ефективності роботи промислових згущувачів на збагачувальних фабриках. Таке управління можна реалізувати екстремальною системою розімкненого типу. Розроблена регресійна математична модель адекватно описує процес осадження польвошпатових хвостів збагачення рідкіснометалічних руд Маріупольського цирконового родовища. Модель застосована для визначення оптимальних режимів та розробки алгоритму оптимального управління процесом осадження суспензії у радіальному згущувачі.

In work it is developed and analysed regression model of process of sedimentation of a dispersive phase of tails of enrichment cyanide ores of the Mariupol deposit, and it is offered algorithm of extreme management of batching flowculants in a densifier.

1. Стальский В. В. Автоматизация управления процессами обезвоживания на обогатительных фабриках. - М.: Недра, 1977. – 200 с.
2. Автоматизация производства на углеобогатительных фабриках / Л. Г. Мелькумов, В. А. Ульшин, М. А. Бастунский и др. - М.: Недра, 1983. - 295 с.
3. Головков Б. Ю., Колпиков Г. Г., Рейбман Л. А. Автоматизация калийных обогатительных фабрик. - М.: Недра, 1983. - 200 с.
4. Папушин Ю.Л., Самойлов А.И. К вопросу автоматического управления процессом сгущения отходов флотации / Наукові праці Дон. держ.техн. універ. Вип. 42, серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: Дон ДТУ, 2002. – С.187 - 191.
4. Небера В.П. Флокуляция минеральных суспензий. - М.: Недра, 1983. - 288 с.
5. Білецький В.С., Шпильовий Л.В. Оптимізація режиму осадження твердої фази у згущувачі // Складні системи і процеси. – 2002, №2. – с. 78 – 82.
6. Шпильовий Л.В., Білецький В.С., Сергеев П.В. Математичне моделювання процесу осадження твердої фази хвостів флотації рідкісно-металічних руд // Вісник Криворізького технічного університету. Вип. 3.: Зб. наук. пр. - Кривий Ріг: КТУ, 2004.
7. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. – М.: Недра, 1979. – 295 с.
8. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы / Под ред. Богданова О.С., Ненарокова Ю.Ф., 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1984. - 358 с.
9. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов химической технологии. /Под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1990. – 272 с.
10. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 327с.
12. Барбин М.Б. О влиянии ПАВ и рН среды на отстаивание и фильтрование // Изв. ВУЗ. - Цветные металлы. - 1993, № 3-4. – с. 2 - 4
13. Пат. №65879 А Україна, МКВ³ В 01D 21/00. Спосіб автоматичного керування процесом осадження твердої фази / Шпильовий Л.В., Білецький В.С.; Заяв. 01.09.03; Опубл. 15.04.04, Бюл. № 4. – 2 с.
14. Барский Л. А., Козин В. С. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1977. – 486 с.