

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА ГІРНИЧА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

БЕРЕЗНЯК Олександр Олександрович

УДК 622.794:537.528

**ЗГУЩЕННЯ СУСПЕНЗІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ  
АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ СТИСКУ**

Спеціальність 05.15.08 "Збагачення корисних копалин"

**А в т о р е ф е р а т**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі збагачення корисних копалин Національної гірничої академії України (м. Дніпропетровськ), Міністерство освіти і науки України.

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор  
**ПІЛОВ Петро Іванович**,  
Національна гірничо академія України (м. Дніпропетровськ),  
Міністерство освіти і науки України, кафедра збагачення  
корисних копалин, завідувач.

**Офіційні опоненти** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**БІЛЕЦЬКИЙ Володимир Стефанович**,  
Донецький державний технічний університет, Міністерство  
освіти і науки України (м. Донецьк), кафедра збагачення  
корисних копалин, головний науковий співробітник;  
– кандидат технічних наук  
**МЕХАЛЬЧИШИН Володимир Степанович**,  
Придніпровська лабораторія удосконалення технології  
збагачення вугілля Західного Донбасу та Львівсько-  
Волинського басейну "УкрНДІвуглезбагачення",  
Міністерство палива та енергетики України (м. Луганськ),  
ведучий науковий співробітник.

**Провідна установа** – Криворізький технічний університет, Міністерство освіти і  
науки України, кафедра мінералогії та збагачення корисних  
копалин.

Захист дисертації відбудеться " \_\_\_\_ " листопада 2001р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої ради Д 08.080.02 по захисту дисертацій при Національній гірничій академії України Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ - 27, проспект К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної гірничої академії України Міністерства освіти і науки України (49027, м. Дніпропетровськ - 27, проспект К. Маркса, 19).

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " жовтня 2001 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 08.080.02, канд. техн. наук, доцент

**В.В. Панченко**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом до процесу збагачення залучаються все більш бідні руди та мілке високозольне вугілля. Внаслідок цього для розкриття корисних рудних мінералів застосовується більший ступінь подрібнення, що неминуче призводить до переподрібнення матеріалу. У вуглезбагаченні утворення тонких, шламистих фракцій зумовлене інтенсивним стиранням мілких класів вихідного вугілля. Оскільки більшість процесів збагачення здійснюється у водному середовищі, то утворюються тонкодисперсні суспензії.

Подальша переробка і складування продуктів збагачення потребує згущення суспензій та ущільнення осаду, бо сьогоднішні потреби вимагають зменшення витрат на водоспоживання, на подальше зневоднення продуктів збагачення, зменшення площ для складування відходів, підвищення вимог до захисту навколишнього середовища.

Існуючі способи інтенсифікації процесів згущення потребують застосування екологічно небезпечних та дорогих флокулянтів, що у разі "місткового" механізму флокуляції призводить до утворення пухких, вологонасичених осадів. Застосування обладнання з ущільненням осадів потребує заміни діючого, що не завжди технічно можливо або потребує великих витрат.

Таким чином, оскільки нагальною є потреба інтенсифікації процесів згущення суспензій без використання реагентів та ущільнення осаду з використанням діючого обладнання, то тема дисертації актуальна.

**Дисертаційна робота виконана відповідно до тематичного плану науково-дослідних робіт** Національної гірничої академії України згідно з пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки "Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології" (номер держреєстрації теми 0100U001808, з якої автор був виконавцем).

**Мета роботи** - обґрунтування технології згущення суспензій та ущільнення осаду з безреагентною інтенсифікацією цих процесів.

Для досягнення зазначеної мети в дисертації були **поставлені та вирішені наступні задачі:**

1. Визначення закономірностей розповсюдження акустичних хвиль стиску в суспензіях для розрахунку технологічних і конструктивних параметрів обладнання.
2. Дослідження процесу згущення тонкодисперсних суспензій та розробка його математичної моделі для визначення раціональних технологічних параметрів.
3. Дослідження впливу акустичних хвиль стиску на кінетичні параметри згущення суспензій.
4. Дослідження дисипативних властивостей суспензій.
5. Дослідження закономірностей ущільнення осадів під впливом акус-

тичних хвиль стиску.

- б. Розробка та апробація в лабораторних і дослідно-промислових умовах технології згущення суспензій та ущільнення осадів з безреагентною інтенсифікацією цих процесів.

**Ідея роботи** - використання акустичних хвиль стиску середовища великої шпаруватості, що збуджуються електрогідроімпульсним способом, для ущільнення осаду та інтенсифікації згущення суспензій.

**Об'єкт дослідження** – полімінеральні тонкодисперсні суспензії, які застосовуються у збагаченні корисних копалин.

**Предмет дослідження** – технологічні параметри процесів згущення суспензій та ущільнення осаду.

**Методи досліджень.** При виконанні дисертаційної роботи використовували аналітичний і експериментальний методи – для дослідження кінетики згущення суспензій та ущільнення осаду, дисипативних властивостей суспензій; методи математичного моделювання – для розробки моделей механізму згущення суспензій, розповсюдження в них акустичних хвиль стиску; методи математичної статистики – для апроксимації експериментальних результатів, оцінки достовірності отриманих математичних моделей; дослідно-промисловою апробацією – для перевірки розроблених технологічних рішень.

**Достовірність отриманих наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується достатньою узгодженістю теоретичних і експериментальних досліджень, яка оцінювалася методами математичної статистики; позитивними результатами дослідно-промислових випробувань ущільнення осаду вугільного шламу із застосуванням акустичних хвиль стиску.

**Наукові положення, які захищаються в дисертації:**

1. Механізм безреагентного згущення тонкодисперсної фази суспензій зумовлений послідовними процесами агрегування та седиментації, причому швидкість агрегування збільшується при зменшенні енергії активації утворення агрегатів.

2. Вплив акустичних хвиль стиску зменшує енергію активації процесу утворення агрегатів, чим сприяє більш швидкому встановленню термодинамічної рівноваги суспензії, не змінюючи величину характеризуючих її параметрів.

3. Дисипативні властивості суспензій, густина яких знаходиться у межах від 1080 до 1250 кг/м<sup>3</sup>, підпорядковуються законам нелінійної акустики.

**Наукове значення отриманих результатів, їх новизна.**

1. Уперше встановлений механізм згущення тонкодисперсної фази суспензій, що дозволило визначити умови інтенсифікації процесу згущення акустичними хвилями стиску шляхом збільшення швидкості агрегування частинок твердої фази.

2. Уперше встановлені дисипативні властивості суспензій, які підпорядковуються законам нелінійної акустики, що дозволило визначити закономірності

розповсюдження акустичних хвиль стиску в суспензіях.

3. Уперше встановлені закономірності ущільнення осаду акустичними хвилями стиску, що дозволило розрахувати технологічні параметри процесу.

**Практичне значення результатів роботи** полягає у розробці технології збагачення корисних копалин з безреагентною інтенсифікацією процесів згущення суспензій та ущільнення осадів шляхом застосування акустичних хвиль стиску.

**Впровадження результатів роботи.** Технологія із застосуванням акустичних хвиль стиску для ущільнення осаду вугільної суспензії пройшла дослідно-промислові випробування на ДВАТ ЦЗФ "Селідовська" ДХК "Селідоввугілля" (акт дослідно-промислових випробувань від 23.05.2000 р.), дала позитивні результати та рекомендована до впровадження у вуглезбагаченні.

**Особистий внесок автора** полягає у формулюванні наукової задачі, мети і наукових положень досліджень; проведенні теоретичних і експериментальних досліджень; розробці технологічних рішень щодо реалізації результатів роботи.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати дисертації доповідались й одержали схвалення на науково-практичній конференції "Проблеми й особливості збагачення вугілля Західного Донбасу і Львівсько-Волинського басейну" (м. Дніпропетровськ, 2000); міжнародній науково-практичній конференції "Техніка й технологія тонкодисперсного просіювання і ресурсозаощаджуючі технології збагачення корисних копалин на порозі третього тисячоліття" (сел. Білосарайська коса, Донецька обл., 2000); наукових семінарах та засіданнях кафедри збагачення корисних копалин Національної гірничої академії України.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано у 5 наукових працях, в тому числі 4 статті у провідних фахових виданнях і 1 - матеріали конференції.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури з 129 найменувань, 2 додатків. Дисертація викладена на 121 сторінці тексту, містить 20 рисунків, 9 таблиць і додатків на 8 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, об'єкт, предмет та ідея роботи, відображена наукова новизна і основні результати, наведені наукові положення, що виносяться на захист, а також дані щодо апробації й публікації результатів досліджень.

У **першому розділі** розглянуті відомі механізми агрегування частинок твердої фази тонкодисперсних суспензій, шляхи інтенсифікації процесу згущення суспензій та ущільнення осаду.

Інтенсифікація процесу згущення мінеральних суспензій може здійснюватися шляхом додавання флокулянтів, але цей спосіб пов'язаний з низкою недо-

ліків, таких як: додаткові витрати на реагенти; завдання шкоди навколишньому середовищу; при "містковому" механізмі флокуляції отримуваний осад надмірно вологонасичений. Відоме явище коагуляції колоїдних частинок при дії ультразвукових коливань, але цей спосіб має велику собівартість і, крім того, технічно неможливо створити пристрій необхідної великої потужності.

За результатами аналізу сформульовані задачі дослідження, вирішення яких дозволяє досягти мети дисертації.

**У другому розділі** відповідно першій та другій поставленим задачам розроблені математичні моделі розповсюдження акустичних хвиль стиску в суспензіях та механізму безреагентного агрегування тонкодисперсних частинок твердої фази.

Акустичні імпульси, у які перетворюються ударні хвилі при зменшенні швидкості їх розповсюдження до швидкості звуку, у фізиці вибуху носять назву акустичних хвиль стиску середовища. Такі імпульси можуть утворюватися різноманітними засобами, але найпростіше їх отримувати електрогідроімпульсним способом, який полягає у створенні електричного розряду у воді. За короткий проміжок часу, який визначається параметрами розрядного контуру, в каналі розряду виділяється енергія накопичувальної ємності, температура підвищується до декількох тисяч градусів, виникає парогазова порожнина, тиск у ній може перевищувати 100 МПа. За рахунок розширення порожнини у навколишньому середовищі утворюється ударна хвиля, яка завдяки дисипації енергії швидко переходить в акустичну хвилю стиску.

Використавши відоме рішення задачі гідродинаміки розширення порожнини у нестискаємому середовищі у сферичному наближенні, залежність її радіусу від часу - з фізики підводних вибухів та рівняння виділення енергії у розрядному контурі - відповідно законам електротехніки, отримаємо у явному вигляді функціональну залежність тиску на поверхні порожнини від часу:

$$P(t) = \frac{3(\gamma - 1)}{4\pi \cdot R^3} \left\{ \frac{U^2 C \exp\left(-\frac{\Omega_k t}{L}\right)}{4L + \Omega_k^2} \left[ 2L + \frac{\Omega_k C}{2} \left( L \sqrt{\frac{4}{LC} - \frac{\Omega_k^2}{L^2}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{4}{LC} - \frac{\Omega_k^2}{L^2}} \cdot t\right) - \Omega_k \cos\left(\sqrt{\frac{4}{LC} - \frac{\Omega_k^2}{L^2}} \cdot t\right) \right) \right] - 2\pi\rho R \frac{\partial R}{\partial t} \right\}$$

де  $\gamma$  - показник адіабати, який у нашому випадку дорівнює 1,26;  $R$  - залежність радіусу порожнини від часу, м;  $L$  - індуктивність контуру, Гн;  $C$  - ємність контуру, Ф;  $\Omega_k$  - активний опір розрядного контуру, Ом;  $U$  - початкова напруга на ємності, В.

Аналіз рівняння показує, що амплітуда тиску зростає при зменшенні ємності і індуктивності розрядного контуру, а також при збільшенні напруги, до якої попередньо заряджена ємність. У загальному випадку амплітуда тиску значно зростає при зменшенні часу, за який виділяється енергія у каналі розряду. Найбільш швидко виділення енергії відбувається, коли розряд має критичний хара-

ктер. Коли ємність та напруга на ній незмінні, критичного характеру розряду можна досягнути, змінюючи або індуктивність, або активний опір контуру. Із наведеного рівняння випливає нетривіальний результат: з точки зору отримання максимального тиску необхідно збільшувати саме активний опір при мінімально можливому значенні індуктивності. Незважаючи на підвищення втрат електричної енергії, в цілому маємо максимальний акустичний к.к.д. завдяки тому, що час розряду ємності мінімальний.

Розповсюдження акустичних хвиль стиску в суспензії, як і інших акустичних коливань, пов'язане з втратами енергії, які зумовлені дисипативними властивостями середовища. Тому залежність величини акустичного тиску для плоскої гармонічної хвилі, який пропорційний амплітуді акустичного коливання, від пройденої хвилею відстані, визначається рівнянням:

$$P(x) = P_0 \exp(-\gamma x),$$

де  $P_0$  - початкова амплітуда тиску, Па;  $\gamma$  - коефіцієнт поглинання акустичних хвиль середовищем,  $\text{м}^{-1}$ ;  $x$  - відстань від джерела коливань, м.

Залежність тиску на поверхні порожнини від часу була розкладена у ряд Фур'є. Коефіцієнти ряду Фур'є у цьому випадку представляють собою акустичні тиски, які створюються окремими гармонічними складовими. Функція тиску від двох змінних - часу та відстані у сферичному наближенні, з урахуванням залежності коефіцієнта поглинання від частоти, була представлена виразом:

$$P(t, x) = \frac{R_{\max}}{x} \left\{ \frac{a_0}{2} \exp(-\gamma(0)(x - R_{\max})) + \sum_{k=1}^n [(a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)) \exp(-\gamma(\omega)(x - R_{\max}))] \right\}, \quad (1)$$

де  $\gamma(\omega)$  - залежність коефіцієнта поглинання від частоти.

Розроблена програма дозволила згідно вищенаведеним формулам розрахувати на ЕОМ профіль імпульсу акустичного тиску у довільній точці суспензії в залежності від параметрів розрядного контуру електрогідроімпульсного генератора та властивостей суспензії.

Тверді складові частинки суспензії розміром менше 1 мкм за рахунок броунівського руху за звичайних умов знаходяться в термодинамічній рівновазі і можуть осаджуватись, тільки утворивши між собою асоціати, або флокули. Для цього їм потрібно при зіткненні мати певну енергію, що перевищує енергію активації, яка зумовлена наявністю на поверхні частинок  $\zeta$  - потенціалу та сольватної оболонки. Швидкість утворення асоціатів визначається коефіцієнтом, величина якого згідно теорії Арреніуса обернено експоненційно залежить від енергії активації. В свою чергу швидкість розшарування суспензії визначається коефіцієнтом седиментації.

В початковий момент часу  $t = 0$  в шарі суспензії, що знаходиться в зоні освітлення, міститься деяка кількість незфлокульованих частинок, яка дорівнює  $a$ . До часу  $t$  кількість зфлокульованих частинок становитиме  $b$ , а кількість ча-

стинок, які залишили шар за рахунок седиментації, позначимо буквою  $c$ . Тоді швидкість утворення зфлокульованих частинок визначиться виразом:

$$\frac{db}{dt} = k_1(a - b), \quad (2)$$

де  $k_1$  - константа швидкості флокуляції.

Швидкість зменшення кількості зфлокульованих частинок в шарі визначається швидкістю седиментації, яка характеризується константою  $k_2$ :

$$\frac{d(b - c)}{dt} = k_1(a - b) - k_2(b - c). \quad (3)$$

Вирішавши систему диференціальних рівнянь (2) і (3), та зважаючи, що кількості частинок, які перейшли у згущену зону суспензії, пропорційна висота освітленого шару при умові осадження в циліндричній ємності, кінетичне рівняння для висоти освітленого шару після перетворень було представлено виразом:

$$H = A \left[ 1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} \exp(-k_1 t) + \frac{k_1}{k_2 - k_1} \exp(-k_2 t) \right], \quad (5)$$

де  $A$  - постійна, м.

**Третій розділ** присвячений експериментальному вирішенню третьої, четвертої та п'ятої задач дисертаційної роботи, а саме: дослідженню кінетики згущення тонкодисперсних суспензій; визначенню закономірності ущільнення осадів акустичними хвилями стиску; встановленню дисипативних властивостей досліджуваних суспензій.

На рис. 1 наведені експериментальні дані стосовно згущення суспензії каоліну у воді різної густини при різних значеннях рН. Результати апроксимовані кривими згідно рівняння (5) з похибкою меншою, ніж 0,2%. Значення коефіцієнтів наведені у таблиці 1.

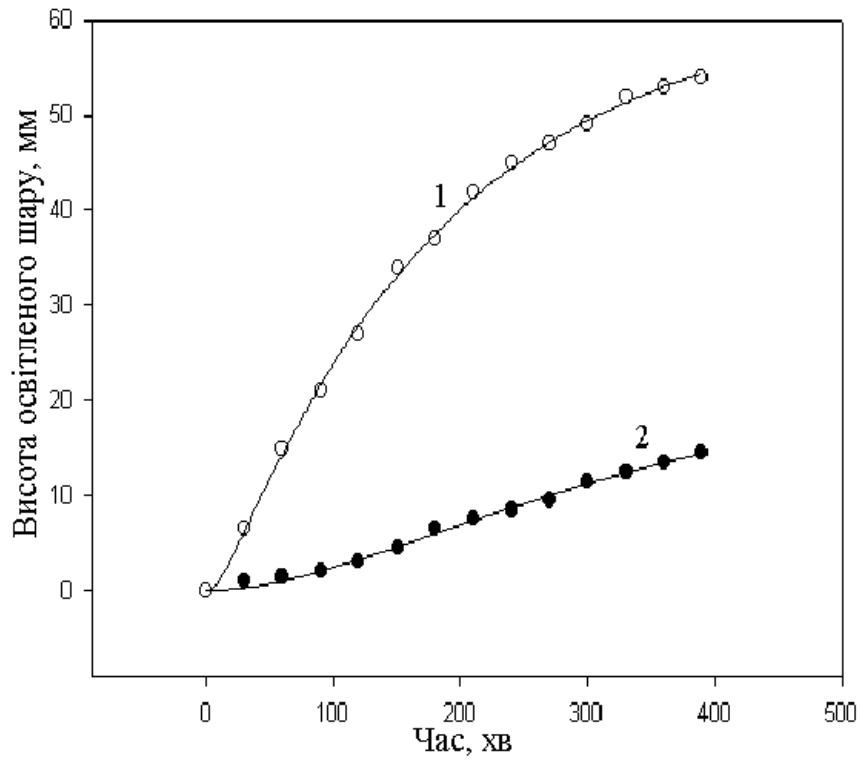
Таблиця 1

Результати апроксимації експериментальних даних згущення каолінових суспензій під впливом акустичних хвиль стиску

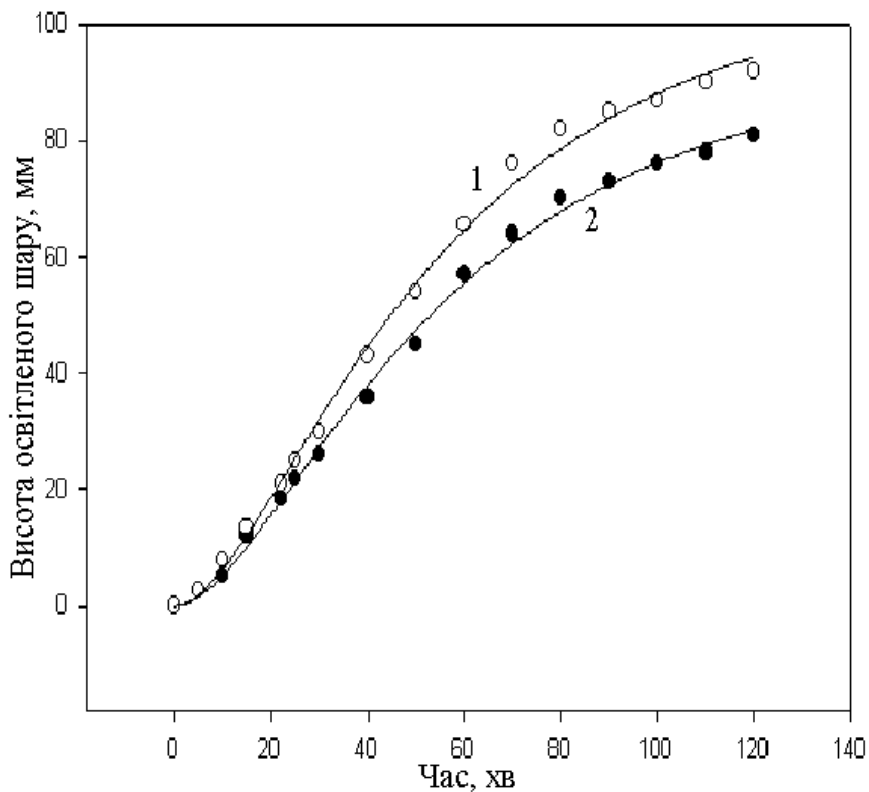
Коефіцієнти рівняння	Густина 1080 кг/м <sup>3</sup> , рН=6,5		Густина 1015 кг/м <sup>3</sup> , рН=8	
	під впливом	без впливу	під впливом	без впливу
A	62,16	22,69	107,43	93,44
K <sub>1</sub>	0,087	0,0057	0,0804	0,075
K <sub>2</sub>	0,0055	0,0055	0,02	0,02

В усіх випадках мала місце своєрідна затримка процесу згущення, час якої можна назвати періодом індукції, який, наприклад, для кривої 2 (рис. 1, а) складає близько 100 хв. На цьому етапі швидкість процесу визначається коефіцієнтом утворення асоціатів, а в подальшому більш впливовим стає коефіцієнт





а)



б)

Рис. 1. Залежність висоти освітленого шару суспензії каоліну від часу для умов: а) - густина суспензії 1080 кг/м<sup>3</sup>, рН=6,5; б) - густина суспензії 1015 кг/м<sup>3</sup>, рН=8. 1 - при дії акустичних хвиль стиску, 2 - без акустичних хвиль стиску.

швидкості осадження утворених флокул. На основі встановлення цього наукового факту сформульоване перше наукове положення дисертаційної роботи.

Дані таблиці свідчать, що під впливом акустичних хвиль стиску збільшується саме коефіцієнт швидкості утворення асоціатів, в той час як коефіцієнт седиментації залишається незмінним, причому для кислої суспензії перший коефіцієнт збільшувався більше, ніж у 15 разів.

Таким чином, процес згущення суспензії інтенсифікується тільки в тому випадку, коли її швидкість лімітується коефіцієнтом утворення асоціатів, або флокул. Розмір утворених флокул, від якого залежить величина коефіцієнта седиментації, визначається умовами термодинамічної рівноваги системи, зокрема, значенням показника рН. З того факту, що акустичні хвилі стиску не впливають на величину коефіцієнта седиментації, можна зробити висновок, що дія хвиль стиску не змінює характерних параметрів термодинамічної рівноваги системи, а лише прискорює її досягнення. На цьому ґрунтується друге наукове положення дисертаційної роботи.

Частинки твердого, які утворюють осад в результаті седиментації, розташовані здебільшого випадковим чином, тобто їх положення у просторі не відповідає мінімальній потенційній енергії у гравітаційному полі тяжіння. Звичайно вугільний шлам крупністю менше 100 мкм займає об'єм, на 10 – 15% більше свого мінімального значення при найщільнішій упаковці частинок. Ця різниця об'ємів може перевищувати 40%, якщо осад утворився після додавання на етапі згущення флокулянту в кількості, достатній для дії "місткового" механізму утворення асоціатів. Це дозволило зробити висновок, що осад теж є неврівноваженою термодинамічною системою і може бути ущільнений в результаті дії акустичних хвиль стиску.

На рис. 2 наведені результати ущільнення осаду вугільного шламу акустичними хвилями стиску (крива 1), при енергії імпульсу 1,5 Дж і періоді надходження - 10 с. Осад утворювався в результаті "місткової" дії флокулянту КАТФЛОС. Пряма 2 відповідає контрольному зразку без впливу акустичних хвиль. Результати свідчать, що в цьому випадку осад може бути ущільнений більше, ніж на 25%, причому його густина відповідно зростає.

Також досліджувалось ущільнення осаду акустичними хвилями стиску з різними періодами надходження імпульсів, утвореного за "плівковим" механізмом дії флокулянту АС-3, результати якого показані на рис. 3. Енергія імпульсів в усіх випадках дорівнювала 1,5 Дж. Наведені дані показують, що у першому наближенні швидкість ущільнення обернено пропорційна періоду надходження імпульсів.

В усіх випадках під дією хвиль стиску об'єм осаду з часом експоненційно зменшується, асимптотично наближаючись до свого найменшого значення. Це явище пояснюється розривом зв'язків між частинками та їх зміщенням під впливом хвиль з положення нестабільної рівноваги. Надалі вони займають нові,

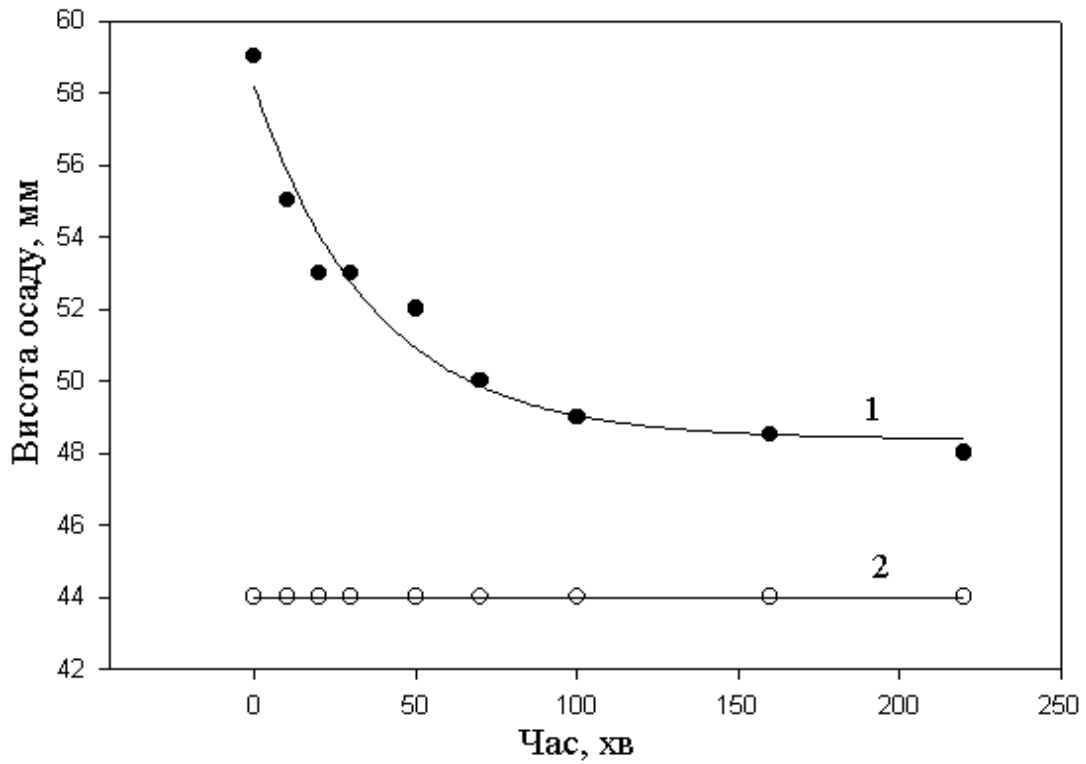


Рис. 2. Залежність висоти осадів вугільного шламу від часу: 1 - з флокулянтю під впливом акустичних хвиль стиску; 2 - без флокулянту і без впливу акустичних хвиль.

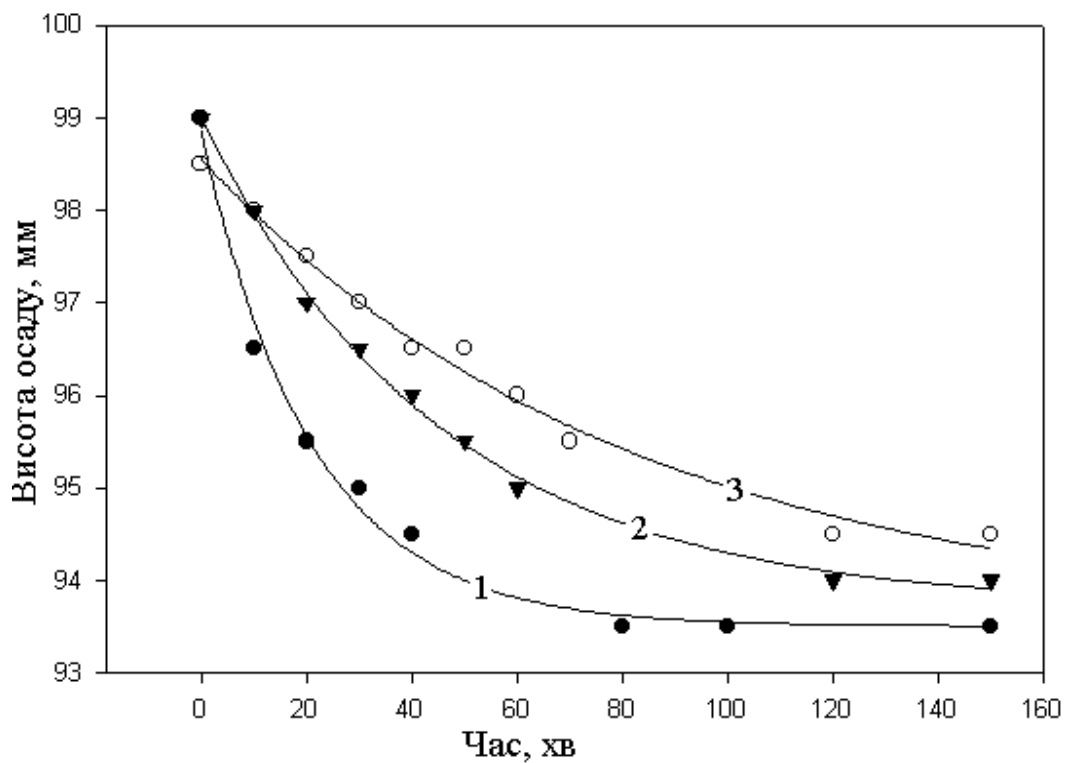


Рис. 3. Залежність висоти осадів вугільного шламу від часу під впливом акустичних хвиль стиску з періодом: 1 - 2.5с; 2 - 5с; 3 - 10 с.

більш вигідні з енергетичної точки зору положення. Слід зауважити, що осад з незфлокульованого шламу після ущільнення втрачає текучість, а це сприяє його подальшому транспортуванню.

У наближенні лінійної акустики коефіцієнт поглинання пропорційний частоті коливань у квадраті. Експериментально встановлені значення цих коефіцієнтів для каолінової та деяких вугільних суспензій, густина яких знаходиться у межах від 1080 до 1250 кг/м<sup>3</sup>, в діапазоні частот від 150 до 620 кГц. Встановлено, що найбільш точно експериментальні дані апроксимуються поліномом не другого, а більш високого ступеня. З цього випливає, що дисипативні властивості суспензій підпорядковуються законам нелінійної акустики. На основі встановлення цього наукового факту сформульоване третє наукове положення дисертаційної роботи.

**Четвертий розділ** присвячений вирішенню шостої задачі дисертаційної роботи, а саме розробці та апробації в лабораторних і дослідно-промислових умовах технології згущення суспензій та ущільнення осадів з безреагентною інтенсифікацією цих процесів.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблена технологічна схема збагачення каоліну із застосуванням акустичних хвиль стиску, що підвищує продуктивність прес-фільтрів на 8,6% завдяки живленню суспензією більшої густини. При цьому не застосовуються флокулянти, які неодмінно підвищують в'язкість кінцевого продукту і цим знижують його товарні властивості.

Для технологічного впровадження згущення суспензій із застосуванням акустичних хвиль стиску розроблена нова конструкція радіального згущувача з розташуванням акустичних випромінювачів на поворотній фермі. Встановлено, що з енергетичної точки зору недоцільно застосовувати на згущувачі діаметром більше 10 м один випромінювач великої потужності. Більш вигідно встановлення на поворотній фермі декількох випромінювачів меншої потужності. Розрахунок необхідних технологічних параметрів електрогідроімпульсного генератора потребує визначення часу, впродовж якого елементарний об'єм пульпи знаходиться під впливом акустичних хвиль стиску.

Розрахункова схема радіального згущувача П-30 з двома акустичними випромінювачами представлена на рис. 4. Згідно розрахункам за формулою (1), розряд контуру, який складається з ємності величиною 100 мкФ, зарядженої до напруги 5000 В, індуктивності 2 мкГн та активного опору 1,5 ом, дозволяє створити у зфлокульованому вугільному шламі густиною 1240 кг/м<sup>3</sup> акустичний тиск, величина якого буде перевищувати 0,56 МПа на відстані від розрядника не більшій, ніж  $R_b = 4,65$  м. Енергія одного імпульсу при цьому становить 1250 Дж. Саме таке найменше значення тиску мали акустичні хвилі, під дією яких досліджувалось ущільнення осадів вугільного шламу. Відповідно відстань між двома випромінювачами не повинна перевищувати 9,24 м.

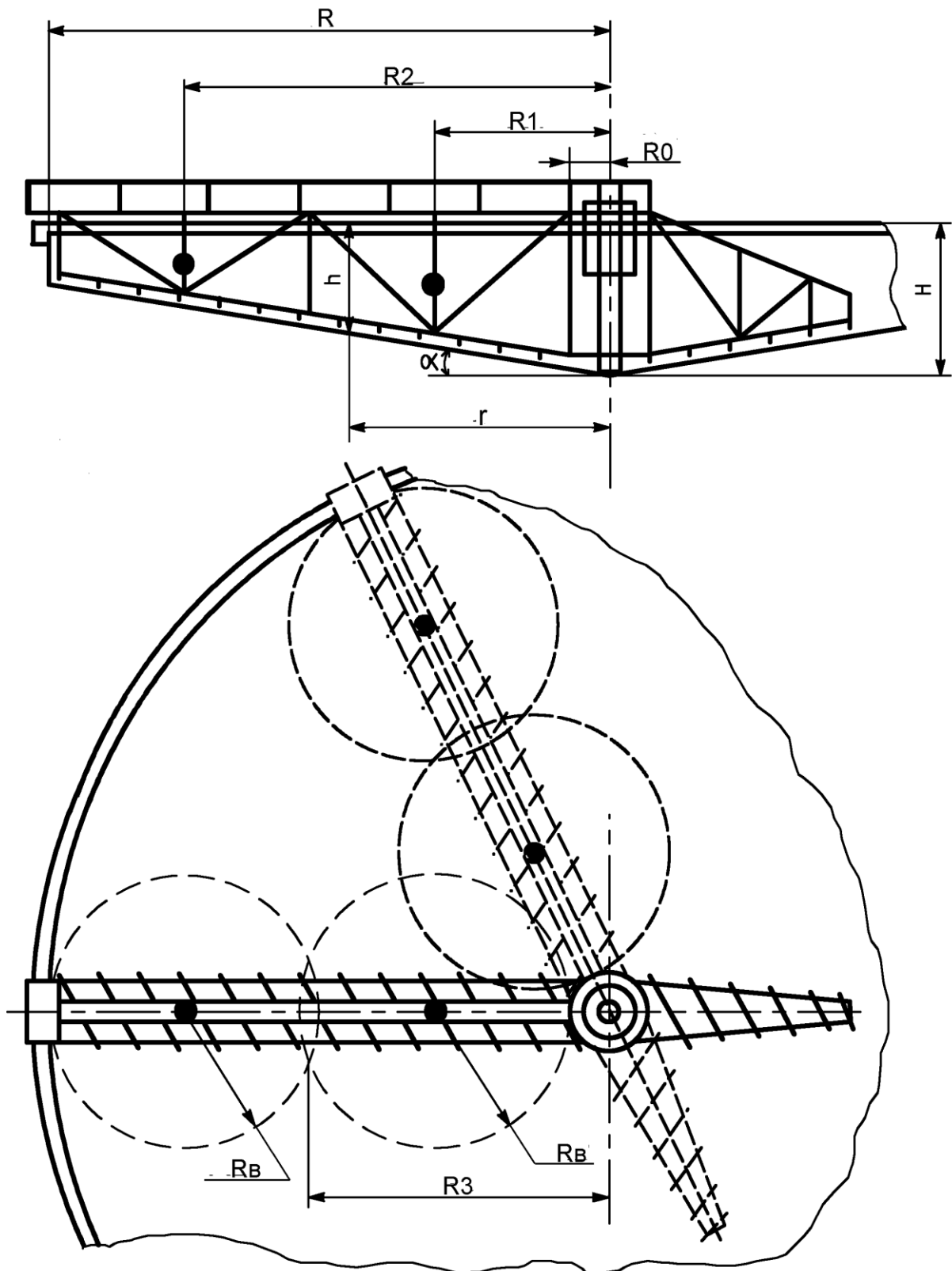


Рис. 5. Розрахункова схема радіального згущувача Ц-30 з двома акустичними випромінювачами, встановленими на поворотній фермі.

Стандартна довжина поворотної ферми гребкового пристрою радіального згущувача  $R=15$  м. Радіус стакану, в який надходить пульпа (заспокоювач),  $R_0=2$  м. Якщо розташувати на цій фермі два випромінювача на відстані  $R_1=4,5$  та  $R_2=11,5$  м від центру, то весь об'єм пульпи буде оброблений акустичними хвилями стиску за час одного оберту гребкового пристрою. При цьому амплітуда тиску в довільній точці пульпи буде перевищувати необхідну величину, визначену експериментально.

Час, впродовж якого елементарний об'єм пульпи буде знаходитись під впливом акустичних хвиль необхідної для ущільнення амплітуди, визначався за формулою:

$$t_b = \frac{2}{Q_v} \left( \int_{R_0}^{R_3} \sqrt{R_b^2 - (R_1 - r)^2} \cdot (H - r \cdot \operatorname{tg}(\alpha)) \cdot dr + \int_{R_3}^R \sqrt{R_b^2 - (R_2 - r)^2} \cdot (H - r \cdot \operatorname{tg}(\alpha)) \cdot dr \right),$$

де  $Q_v=1278$  м<sup>3</sup>/год - об'ємна продуктивність;  $H=3,6$  м - висота згущувача;  $\alpha=12^0$  - кут нахилу утворюючої конусного днища до горизонталі.

Згідно розрахунку, цей час становить 624 с, або 10,4 хв. Вибравши відповідно рис. 3 період надходження імпульсів рівним 5 с, була отримана ступінь ущільнення вугільного шламу не менший, ніж визначений в лабораторних умовах. Середня споживана потужність з урахуванням к.к.д. при вищенаведених параметрах розрядного контуру при цьому не перевищувала 357 Вт.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблена технологічна схема збагачення вугілля Західного Донбасу для умов ЦЗФ "Павлоградська", яка наведена на рис. 5. Особливість сировини полягає в тому, що вміщуючі породи представлені тонкими, глинистими фракціями, внаслідок чого утруднюється їх згущення та підвищується вологість продуктів фільтрування мілких класів вугілля, що в свою чергу призводить до додаткових витрат палива на його подальше сушіння.

Шламний продукт з багер-зумпфа та зневоднюючого грохота ГІСЛ-72 надходить до циліндричного згущувача з периферійним приводом П-30, на поворотній фермі гребкового пристрою якого встановлені два випромінювача акустичних хвиль стиску. Густина згущеного продукту під впливом акустичних хвиль зростає на 10%, який надалі зневоднюється після додаткового згущення в гідроциклоні ГЦ-630 на стрічковому вакуум-фільтрі ЛСХ-30. Підвищення густини живлення стрічкового вакуум-фільтра при сталій продуктивності по твердому дозволяє зменшити вологість отриманого концентрату мілкового вугілля з 38 до 37,19%, або на 0,81%. Такому зменшенню вологості відповідає видалення 12,9 кг води з кожної тони твердого.

Надалі концентрат мілкового вугілля разом із зневодненими продуктами відсадки та грохота ВП-2 надходить на термосушіння до барабанної обертової сушарки. Сушіння забезпечується пічними газами, які утворюються внаслідок спалювання вугілля марки Г зольності 7,5%.

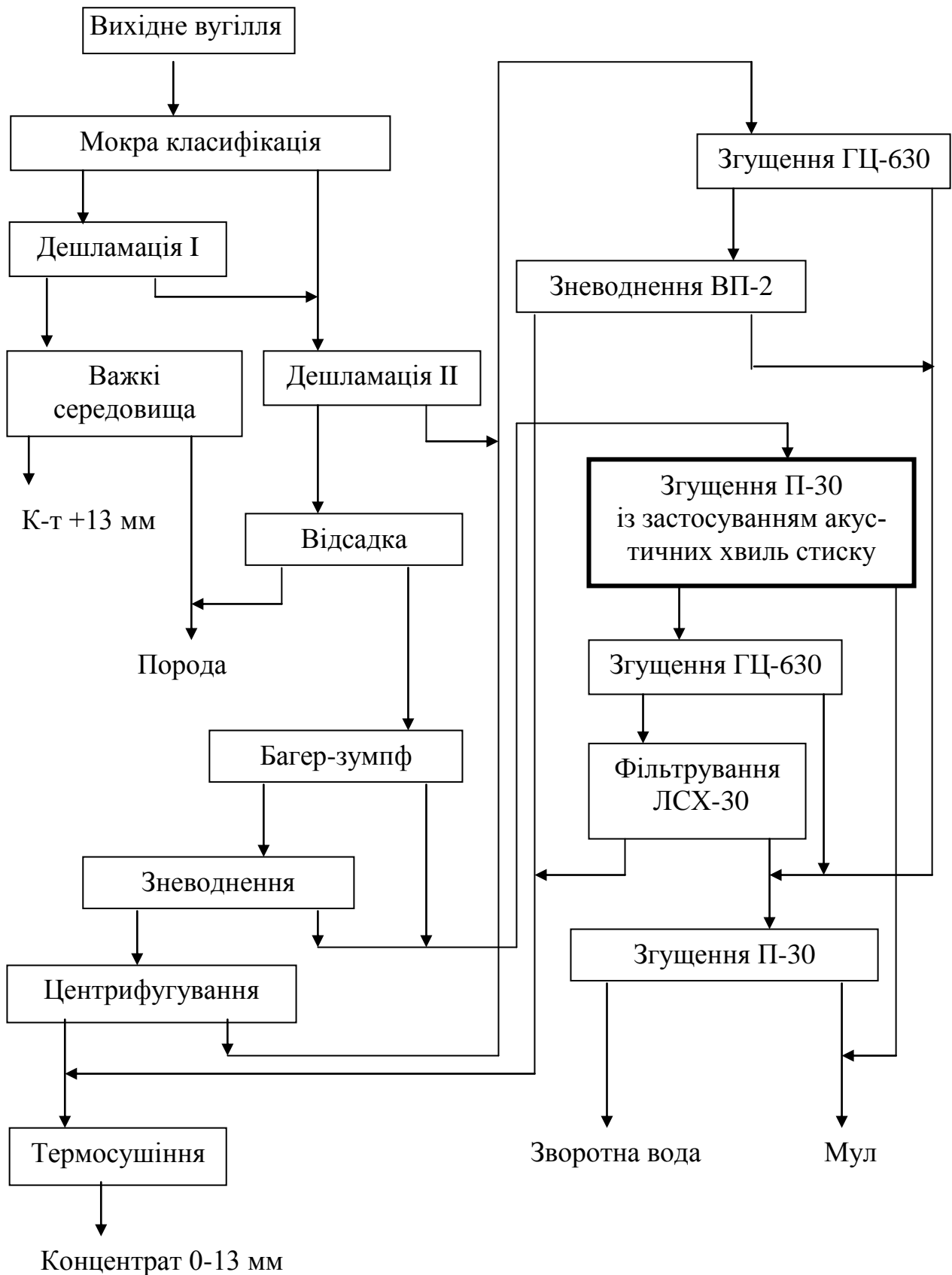


Рис. 5. Технологічна схема збагачення вугілля Західного Донбасу на Павлоградській ЦЗФ.

Таким чином, при загальній продуктивності вакуум-фільтрів 46,2 т/год кількість вологи, яку необхідно видалити в процесі сушіння, зменшується на 550 кг/год. Середня теплота згоряння вугілля марки Г дорівнює 25 МДж/т, тому його витрати зменшуються на 0,883 т/год, що за рік становить близько 7000 т.

## ВИСНОВКИ

В дисертації, що є завершеною науково-дослідною роботою, поставлена і розв'язана актуальна **науково-практична** задача, яка полягає в обґрунтуванні технології згущення суспензій і ущільнення осаду з безреагентною інтенсифікацією цих процесів.

**Найбільш важливі наукові та практичні результати, висновки і рекомендації** містяться в наступному:

1. Існуючі технології з інтенсифікацією процесів згущення суспензій та ущільнення осадів потребують застосування дорогих та екологічно небезпечних флокулянтів, встановлення нового обладнання, що не завжди доцільно.

2. Наявність періоду початкової стадії згущення високодисперсних суспензій, впродовж якого тверді частинки переважно утворюють флокули, свідчить, що кінетика згущення зумовлена двома процесами – агрегуванням та седиментацією твердої фази. Сумарний процес визначається кінетичним рівнянням згущення, яке містить обидві константи швидкості цих процесів, що підтверджується експериментальними даними.

3. Акустичні хвилі стиску впливають виключно на процес агрегування частинок, залишаючись індиферентними до процесу осадження утворених агрегатів. Звідси випливає, що вплив акустичних хвиль стиску середовища зменшує енергію активації процесу утворення агрегатів, чим сприяє більш швидкому встановленню термодинамічної рівноваги суспензії, не змінюючи величину характеристикуючих її параметрів.

4. Дисипативні функції суспензій, густина яких відповідає умовам збагачення корисних копалин, апроксимуються поліномом не другого, а більш високого ступеня, що свідчить про їх підпорядкованість законам нелінійної акустики.

5. Енергетично більш доцільно на згущувачах діаметром більше 10 м встановлювати не один випромінювач акустичних хвиль стиску, а декілька меншої потужності.

6. Технологічні дослідження та позитивні дослідно-промислові випробування показали, що застосування акустичних хвиль стиску для інтенсифікації процесів згущення суспензій та ущільнення осадів дозволяє розробляти більш ефективні технологічні схеми збагачення корисних копалин.

**Основні положення та результати дисертації опубліковано в роботах:**



1. Березняк О.О. Осаджування каоліну із застосуванням хвиль стискання середовища // Науково-технічний збірник: Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ: НГА України – 1999. – №4(45). – С. 100–105.

2. Пилов П.И., Березняк А.А. Сгущение суспензий при воздействии акустических волн сжатия // Науково-технічний збірник: Збагачення корисних копалин // за мат. конф. "Проблеми й особливості збагачення вугілля Західного Донбасу і Львівсько-Волинського басейну". – Дніпропетровськ. – 2000. – №8(49). – С. 52–55.

3. Березняк А.А., Марголин И.Г. Промышленные испытания уплотнения угольного шлама акустическими волнами сжатия среды // Науково-технічний збірник: Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ: НГА України – 2000. – №9(50). – С. 121–123.

4. Пилов П.И., Березняк А.А. Влияние акустических волн сжатия на кинетику седиментации тонкодисперсной суспензии // Науковий вісник НГА України. – Дніпропетровськ: НГА України – 2000. – №2. – С. 86–89.

5. Березняк А.А. Уплотнение сфлюкулированного угольного шлама волнами сжатия среды // Науково-технічний збірник: Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ: НГА України – 1999. – №6(47). – С. 74–80.

**Особистий внесок автора** у роботи, написані у співавторстві: [2] – виконання теоретичних досліджень; [3] – розробка методики проведення експерименту, розрахунок та аналіз отриманих результатів; [4] – виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів.

## АНОТАЦІЯ

Березняк О.О. Згущення суспензій із застосуванням акустичних хвиль стиску. - Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.08 - "Збагачення корисних копалин". Національна гірнича академія України, Дніпропетровськ, 2001.

Проведений порівняльний аналіз способів інтенсифікації згущення суспензій і ущільнення осаду та встановлена можливість застосування для цього акустичних хвиль стиску.

З'ясований механізм згущення тонкодисперсних суспензій та встановлено, що акустичні хвилі стиску збільшують швидкість агрегування твердої фази, залишаючись індиферентними до процесу осадження утворених агрегатів.

Створена математична модель розповсюдження акустичних хвиль стиску в суспензіях, для застосування якої встановлені їх дисипативні властивості. Використання моделі дозволило розрахувати конструктивні та технологічні параметри обладнання.

Розроблена технологія збагачення каоліну із застосуванням акустичних хвиль стиску для інтенсифікації процесу згущення кислої суспензії, що підвищує продуктивність прес-фільтрів на 8,6% завдяки підвищенню густини живлення. Запропонована конструкція циліндричного згущувача з акустичними випромінювачами для ущільнення осаду. Впровадження такого згущувача дозволило розробити технологічну схему збагачення вугілля Західного Донбасу, яка дозволяє знизити вологість мілкового вугільного концентрату на 0,81%, що зменшує витрати вугілля на його сушіння на 0,883 т/год.

Ключеві слова: суспензія, згущення, електрогідроімпульс, акустична хвиля, інтенсифікація, технологія.

## АННОТАЦІЯ

Березняк А.А. Сгущение суспензий с использованием акустических волн сжатия. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.08 - "Обогащение полезных ископаемых". Национальная горная академия Украины, Днепропетровск, 2001.

Проведен сравнительный анализ способов интенсификации сгущения суспензий и уплотнения осадка, установлена возможность использования для этого акустических волн сжатия.

Выявлен механизм сгущения тонкодисперсных суспензий, который обусловлен последовательными процессами – агрегатирования и седиментации, причем скорость агрегатирования обратно зависит от энергии активации образования агрегатов. Получена математическая модель процесса сгущения, в которую одновременно входят коэффициенты скоростей агрегатирования и седиментации. Экспериментально установлено, что акустические волны сжатия увеличивают скорость агрегатирования частиц путем уменьшения энергии активации, оставаясь индифферентными к процессу седиментации. Таким образом, акустические волны не изменяют термодинамическое равновесие суспензии, а только способствуют более быстрому его установлению.

Осадок, образованный в результате сгущения суспензии, является термодинамически неустойчивым вследствие того, что расположение частиц твердой фазы хаотично и не соответствует наиболее плотной их упаковке. Следовательно, воздействие акустических волн сжатия приводит к уплотнению осадков, что подтверждается проведенными исследованиями. Наибольшая степень уплотнения наблюдалась в случае рыхлых, обводненных осадков, полученных в результате "мостикового" механизма флокуляции, и составила более 25%. Экспериментально получены кинетические зависимости степени уплотнения осадков от параметров волн сжатия.

В явном виде получено решение уравнения зависимости давления от времени на поверхности парогазовой полости, образующейся при подводном элек-

трическом разряде, что позволило рассчитать конструктивные параметры электрогидроимпульсного генератора. Разработана математическая модель распространения акустических волн сжатия в суспензиях с учетом их диссипативных свойств. Из законов линейной акустики следует, что величина коэффициента поглощения акустических волн пропорциональна квадрату частоты. Измерения диссипативных свойств суспензий показали, что зависимость коэффициента поглощения акустических волн от частоты аппроксимируется полиномом более высокой степени. Следовательно, диссипативные свойства суспензий подчиняются законам нелинейной акустики. Применение модели распространения акустических волн позволило рассчитать конструктивные и технологические параметры сгустительного оборудования.

Разработана технология обогащения каолина с применением акустических волн сжатия для безреагентной интенсификации сгущения кислой суспензии. Использование флокулянтов и коагулянтов в данном случае нецелесообразно из-за увеличения вязкости каолина, что снижает потребительские качества готовой продукции. Применение схемы позволяет увеличить производительность пресс-фильтров на 8,6% благодаря увеличению плотности пульпы, поступающей на фильтрование.

Энергетически и конструктивно нерационально применение одного излучателя большой мощности для сгустителя диаметром более 10 м. Более целесообразно использование нескольких излучателей меньшей мощности. Предложена конструкция цилиндрического сгустителя с периферийным приводом П-30, на поворотной ферме которого установлены два акустических излучателя волн сжатия, работающие в противофазе. При энергии импульса 1250 Дж и периоде следования 5 с потребляемая электрогидроимпульсной установкой мощность с учетом к.п.д. не превышает 357 Вт.

Применение предложенного сгустителя в разработанной технологической схеме обогащения коксующихся углей Западного Донбасса позволяет увеличить плотность суспензии мелкого угольного концентрата на 10%, которая в дальнейшем подвергается фильтрованию на ленточных вакуум-фильтрах. Увеличение плотности питания фильтров обеспечивает снижение влажности концентрата на 0,81%, что приводит к снижению затрат угля на его последующую термосушку в количестве 0,883 т/час.

Технология уплотнения угольного шлама прошла опытно-промышленные испытания на ГОАО ЦОФ "Селидовская" ГХК "Селидовуголь", дала положительные результаты и рекомендована для внедрения в углеобогащении.

Ключевые слова: суспензия, сгущение, электрогидроимпульс, акустическая волна, интенсификация, технология.

## ABSTRACTS

Bereznjak A.A. Suspension thickening with use of acoustic pressure waves. - Manuscript.

Thesis for a candidate degree by speciality 05.15.08 - "Mineral processing". National Mining Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, 2001.

It was performed the comparative analysis of intensification methods under suspension thickening and sediment densification and possibility of acoustic pressure waves using for this purpose it has been installed.

It was formulated the mechanism of fine disperse suspension thickening and it was discovered that acoustic pressure waves enhance velocity of solid phase aggregating remaining indifferent to process of formed aggregates sedimentation.

The mathematical model of acoustic pressure waves preparation within suspension and dissipative properties for its application have been developed. Use the model allowed to calculate constructive and technological parameters of equipment.

Developed kaolin dressing technology with using of acoustic pressure waves for acidic suspension thickening allows to arise productivity of press-filters by 8.6% due to increasing of feed solid content. It proposed cylinder thickener construction with acoustic radiators for sediment densification. Introduction of such thickener allowed to develop the coal preparation technological scheme for conditions of Western Donbass which decreases the moisture of fine coal concentrate by 0.81% and coal consumption for its drying by 0.883 t/h.

Key words: suspension, thickening, electrohydroimpulse, acoustic wave, intensification, technology.