

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Богданов Олександр Олександрович



УДК 622.794.2

**ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ КАРБОНАТУ КАЛЬЦІЮ  
В ПРЕСОВІЙ УСТАНОВЦІ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі гірничих машин та інжинірингу Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Дніпропетровськ.

**Науковий керівник**

кандидат технічних наук, доцент  
**Анциферов Олександр Володимирович**,  
ДВНЗ «Національний гірничий університет»,  
м. Дніпропетровськ, доцент кафедри  
гірничих машин та інжинірингу

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Цейтлін Михайло Абрамович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
м. Харків, професор кафедри хімічної  
техніки та промислової екології

кандидат технічних наук, доцент  
**Федін Дмитро Олександрович**,  
ДВНЗ «Український державний хіміко-  
технологічний університет»,  
м. Дніпропетровськ, доцент кафедри  
теоретичної механіки та опору матеріалів

Захист відбудеться «11» квітня 2013 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті «ХПІ» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету «ХПІ» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розіслано «  » березня 2013 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради  
Д 64.050.05



В.К. Тимченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток галузей хімічної, лакофарбової, гумовотехнічної, будівельної, косметичної галузей промисловості вимагає збільшення випуску якісних наповнювачів, до яких, у першу чергу, належить карбонат кальцію. Щорічне споживання карбонату кальцію в кусковому, дробленому та здрібненому вигляді у розвинених країнах світу перевищує 150 млн. т. При цьому, за оцінками фахівців, близько 30 % запасів цього матеріалу зосереджено в Україні. Тому для промисловості нашої країни карбонат кальцію є важливою стратегічною сировиною.

Істотним фактором, що впливає на вибір устаткування щодо переробки карбонату кальцію, є його висока природна вологість (30-35 %). Зі збільшенням вологості карбонату кальцію більше 20 % підвищуються його пластичні властивості, що приводить до проблем використання стандартного устаткування для переробки, транспортування та класифікації. Тому обов'язковою первинною операцією є зниження вологовмісту карбонату кальцію. На практиці це здійснюється природним шляхом (повітряне сушіння) і штучним.

В теперішній час штучне видалення вологи із карбонату кальцію здійснюється термічним методом, який пов'язан з великими енерговитратами. Тому перспективним є пошук можливостей використання механічного способу зневоднення карбонату кальцію.

Коли вологість карбонату кальцію складає 30 % і вище можливе використання пресових установок з камерою зневоднення. Механічне зневоднення може забезпечити необхідну вологість матеріалу для наступної його переробки, збільшити продуктивність устаткування й зменшити собівартість продукції.

Таким чином, теоретичні й експериментальні дослідження процесу механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій установці й розробка на цій основі методики розрахунку раціональних технологічних параметрів роботи пресових установок є актуальним науковим завданням, яке вирішує дисертаційна робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі гірничих машин та інжинірингу Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» у рамках завдань фундаментальних держбюджетних НДР МОН України «Розробка й впровадження технологічної лінії виробництва крейди ММС-2» (№ ДР 0104U000789), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів робіт.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – удосконалення процесу механічного зневоднення карбонату кальцію шляхом обґрунтування раціональних технологічних параметрів роботи пресової установки.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

– провести експериментальні дослідження впливу фізико-механічних властивостей карбонату кальцію на кінетику механічного зневоднення в лабораторній пресовій установці;

- дослідити процес механічного зневоднення карбонату кальцію на основі рівняння дифузії з функцією поглиначів і різними граничними умовами;
- розробити методіку визначення раціональних технологічних параметрів процесу механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій установці.

*Об'єктом дослідження* є процес механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій установці.

*Предмет досліджень* – технологічні та геометричні параметри пресової установки з камерою зневоднення, які впливають на ефективність процесу механічного зневоднення карбонату кальцію.

**Методи дослідження.** Теоретичні положення дисертації базуються на основі теорії фільтрації рідини, теорії зневоднення та законів дифузії. Математичне моделювання процесу механічного зневоднення виконано на основі рівняння дифузії з урахуванням фізико-механічних властивостей карбонату кальцію. Експериментальні дослідження проведено на кафедрі гірничих машин та інжинірингу ДВНЗ “Національний гірничий університет” з використанням створеної лабораторної установки зі спеціальними камерами зневоднення. Обробку експериментальних даних проведено із застосуванням комп'ютерної техніки та методів математичної статистики. Дослідження проводилися шляхом визначення умов ефективного видалення вологи з матеріалу, аналізу й узагальнення результатів вимірів, проведених на лабораторній установці.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- обґрунтовано, що при механічному зневодненні карбонату кальцію, коли тиск зростає за лінійним законом у часі, зниження вологості матеріалу відбувається за експонентним законом, кінцеве значення якої становить  $\omega = 0,16-0,18$  при початковій вологості в діапазоні  $\omega = 0,25-0,35$ ;

- вперше на моделі пресової камери експериментально встановлено кінетику віджимання вологи з карбонату кальцію залежно від початкової вологості матеріалу й конструктивних особливостей пресової камери, що впливають на видалення вологи;

- стосовно до опису процесу механічного зневоднення карбонату кальцію комплексно проаналізовано неоднорідне рівняння дифузії з функцією джерел у правій частині для різних сполучень граничних умов, різних законів зміни функції джерел і залежністю коефіцієнта дифузії від часу.

**Практичне значення отриманих результатів** для галузі хімічного машинобудування полягає в розробці методик розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу механічного зневоднення карбонату кальцію. Розроблені методіки дозволяють визначити вологість матеріалу у будь-який момент часу з урахуванням коефіцієнта дифузії, що змінюється в часі; розрахувати раціональне значення тиску процесу механічного зневоднення для отримання продукту заданої вологості; зменшують час процесу механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій камері на 28-30 %.

Результати дисертаційної роботи впроваджено до використання в якості методик розрахунку на підприємствах “УкрНДІВуглезбагачення” (м. Луганськ), ДП “Діпромашзбагачення” (м. Дніпропетровськ), в “Українському державному геологорозвідувальному інституті” (м. Київ).

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи, що складають її сутність, отримані особисто здобувачем. Серед них: аналіз джерел інформації, розробка математичної моделі процесу механічного зневоднення, проведення теоретичних та експериментальних досліджень процесу механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій установці, обробка експериментальних даних, розробка методики визначення раціональних технологічних параметрів процесу механічного зневоднення, участь у впровадженні розроблених методик. Постановка мети та задач дослідження, обговорення та аналіз одержаних результатів виконано разом з науковим керівником.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення дисертації доповідались на: Міжнародній науково-технічній конференції “Теорія й практика процесів дроблення, розподілу, змішування й ущільнення матеріалів” (м. Одеса, 2006 р., 2008 р.), Міжнародній науковій конференції “Математичні проблеми технічної механіки – 2008” (м. Дніпродзержинськ, 2008 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Стійкий розвиток гірничо-металургійної промисловості – 2008” (м. Кривий Ріг, 2008 р.), Міжнародній науково-практичній конференції “Форум гірників – 2008” (м. Дніпропетровськ, 2008 р.), науково-технічному семінарі “Потураєвські читання” (м. Дніпропетровськ, 2009 р.), на наукових семінарах кафедри гірничих машин та інжинірингу ДВНЗ “Національний гірничий університет” (м. Дніпропетровськ, 2006-2009 р.), на науковому семінарі кафедри хімічної техніки та промислової екології НТУ “ХП” (2012 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, з яких 8 у наукових фахових виданнях України, 3 – у матеріалах конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 147 сторінок; з них 49 рисунків по тексту; 2 рисунка на 2 окремих сторінках; 8 таблиць по тексту; списку використаних джерел з 110 найменувань на 9 сторінках; 4 додатків на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність і доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об’єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну і практичну значущість роботи.

**Перший розділ** “Сучасний стан досліджень механічного зневоднення матеріалів” присвячено аналізу основних напрямків у розвитку теоретичних і експериментальних досліджень процесу механічного зневоднення матеріалів. Наведено аналіз конструкцій устаткування, що використовується в

промисловості для зневоднення карбонату кальцію, і проблем виробництва щодо процесів видалення вологи й підвищення продуктивності обладнання.

В даний час штучне видалення вологи із карбонату кальцію здійснюється термічним методом. Але застосування теплових сушарок вимагає великих витрат на енергоносії, що спричиняє підвищення вартості готового продукту. Тому потрібні дослідження іншого обладнання, яке може бути використане при сушінні карбонату кальцію

Виявлено, що центрифуги, вакуум-фільтри непридатні для сушіння карбонату кальцію, що надходить безпосередньо з кар'єру, тому що матеріал для них повинен бути у вигляді суспензії. Ефективність процесу зневоднення визначається коефіцієнтом проникності матеріалу, що для карбонату кальцію на 2-3 порядки нижче матеріалів, зневоднення яких відбувається на даному встаткуванні.

У торф'яній, буровугільній промисловості для одержання брикетів використовують штемпельні, вальцьові й кільцеві преси. Пресове обладнання застосовується також при переробці сталевого брухту з отриманням брикетів для металургійних підприємств. Найбільш поширене брикетування на гідравлічних пресах. Це обумовлено їх високою продуктивністю, низькими енерговитратами, можливістю механізації і автоматизації процесу. Як устаткування для механічного зневоднення карбонату кальцію вони не застосовувалися. Тому для досліджуваного процесу створення або модернізація пресової установки зі спеціальною камерою зневоднення є перспективним. За основу такої установки може бути прийнятим гідравлічний прес для готування брикетів з металобрухту.

Дослідженнями процесів механічного зневоднення займалися такі відомі вчені, як Б.В. Дерягін, М.І. Бейлін, Ю.П. Бочков, В.С. Бутовецький, О.А. Клешнин, Г.Л. Майдуков, І.Д. Пейчев, П.І. Пілов, О.Д. Полулях, О.П. Скрипов, О.І. Назимко, Є.Є. Гарковенко та інші. Ці роботи є основою для визначення параметрів, які впливають на швидкість переміщення й видалення вологи з осадів; вони розвинули сучасну теорію фільтрації й показали, зокрема, вплив особливостей будови осаду і його пористості.

У роботах О.І. Назимко й Є.Є. Гарковенко розглянуто математичну модель процесу механічного зневоднення матеріалу на основі однорідного рівняння дифузії для процесів механічного зневоднення в центрифугах і фільтр-пресах. Для досліджуваного порового простору або одиначної пори використовувалися граничні умови, за якими задаються закони зміни вологості на межах ділянки.

До того ж, розрахунок раціональних технологічних параметрів процесу механічного зневоднення вимагає врахування змінюваності проникності, пористості й дифузійної здатності брикету.

На підставі проведеного аналізу теоретичних і експериментальних робіт з механічного зневоднення матеріалів, вивченню досвіду експлуатації встаткування й можливих напрямків удосконалення методів розрахунку параметрів процесу механічного зневоднення сформульовані задачі досліджень.

У другому розділі “Експериментальні дослідження процесу механічного зневоднення карбонату кальцію” описано лабораторні установки, а саме преси з камерами зневоднення різного діаметру, методики проведення експерименту, наведено результати експериментальних досліджень процесу механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій камері.

Метою експериментальних досліджень є визначення структурних характеристик карбонату кальцію, вивчення поведінки матеріалу і процесу видалення вологи при його стисненні в пресовій камері, побудова кінетичних кривих механічного зневоднення, визначення раціональних технологічних параметрів цього процесу. На підставі аналізу конструкцій пресового устаткування доведено, що для процесу механічного зневоднення найбільш підходять гідравлічні преси. Але для удосконалення конструкції необхідно передбачити пресову камеру, забезпечену отворами для відведення води. Кількість, форма і розташування отворів повинні визначатися на підставі експериментальних даних при проведенні досліджень.

Запропоновано методику експериментальних досліджень з 2-х етапів:

1. На першому етапі експериментально визначено структурні характеристики карбонату кальцію – пористість і проникність. З даних експерименту виходить, що карбонат кальцію є матеріалом з низькою проникністю ( $k = 6,8 \times 10^{-16} - 1,0 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ ), пористість якого змінюється в інтервалі  $n = 0,37-0,5$ .

2. На другому етапі досліджено вплив на кінцеву вологість карбонату кальцію прикладеного тиску й тривалості пресування. Визначено значення відносної усадки карбонату кальцію під дією тиску, отримані дані щодо виходу води й карбонату кальцію крізь перфорований корпус лабораторного зразку пресової камери.

Для експериментів з кінетики механічного зневоднення використано камери діаметром  $D = 0,03, 0,06$  і  $0,12$  м. Початкова вологість карбонату кальцію становила у відносних одиницях  $\omega = 0,25, 0,30$  і  $0,35$ . Тиск пресування змінювався в межах  $p = 0-45$  МПа.

Аналіз отриманих експериментальних даних у вигляді графіків показує кінетику зміни вологості карбонату кальцію  $\omega$  від тиску пресування  $p$ . Початкова вологість проби визначається при значенні  $p = 0$  (рис. 1а).

Результати свідчать, що при кінцевому тиску 10 МПа вологість карбонату кальцію перебуває в межах  $\omega = 0,16-0,18$ . Умовно залежності  $\omega = f(p)$  можна розділити на 2 ділянки: перша ділянка – збільшення тиску від 0 до 6 МПа характеризується інтенсивним видаленням вологи із карбонату кальцію, що відповідає зменшенню вологості до  $\omega = 0,18-0,20$ ; друга ділянка – наступне збільшення навантаження від 6 до 10 МПа й зниження вологості матеріалу на 2-3%. На графіку (рис. 1а) показано інтервал навантаження від 0 до 10 МПа. При наступному збільшенні тиску вологість карбонату кальцію не змінюється.

Доведено, що для механічного зневоднення карбонату кальцію раціональним є кінцевий тиск пресування в інтервалі  $p_k = 5-6$  МПа. Наступне підвищення його приведе до збільшення енергоємності й тривалості процесу, зменшуючи кінцеву вологість матеріалу на 2-3 %.

На рис. 1б наведено результати експериментальних досліджень з механічного зневоднення карбонату кальцію з початковою вологістю  $\omega = 0,3$  для різної тривалості процесу ( $\tau_k = 150, 300$  і  $1200$  с). Аналогічні залежності отримано для вологості карбонату кальцію  $\omega = 0,25$  і  $0,35$ .

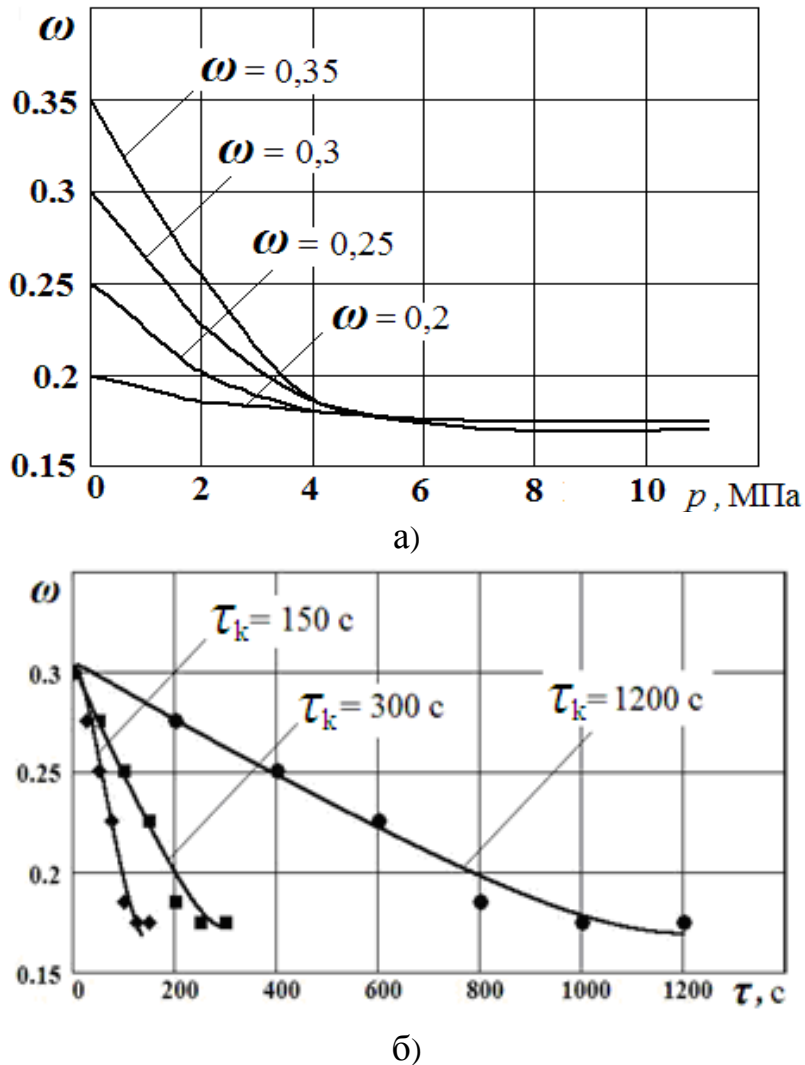


Рис. 1. Залежність вологості карбонату кальцію від тиску пресування (а) і тривалості процесу зневоднення (б)

Встановлено, що тривалість механічного зневоднення істотно не впливає на кінцеву вологість матеріалу. При тривалості процесу 150 с і 300 с кінцева вологість становить  $\omega = 0,16-0,18$ . Збільшення тривалості навантаження до 1200 с не змінює кінцеву вологість продукту.

Для визначення впливу на процес механічного зневоднення конструктивних параметрів застосовувалися пресові камери з отворами у корпусі. Кількість отворів в камері змінювалась від 1 до 12, діаметр отворів  $d = 2-5$  мм (рис. 2).

У ході досліджень встановлено, що комбінація розташування отворів в нижній частині камери й в корпусі не впливає на кінцеву вологість карбонату



кальцію. Вихід карбонату кальцію через отвори становить 5-16 % від загальної маси проби в камері при його початковій вологості  $\omega = 0,25-0,35$ .

Вміст води у віджатій масі карбонату кальцію становить до 50-60 %. Вихід віджатої маси карбонату кальцію й води однаковий для всіх експериментів.

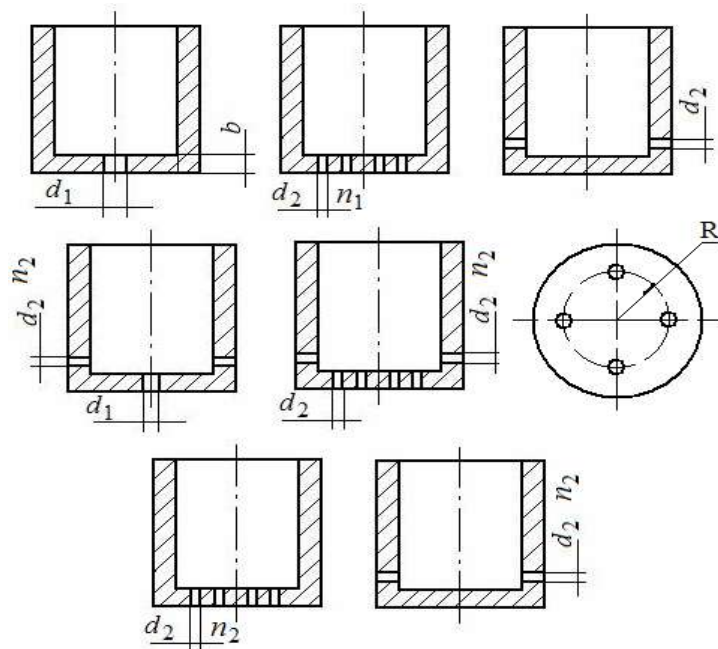


Рис. 2. Конструкції камер

У **третьому розділі** “Теоретичне дослідження процесу механічного зневоднення карбонату кальцію” представлено фізичну та розроблену на її основі математичну модель, що описує процес механічного зневоднення карбонату кальцію.

Прийнято, що порожній циліндр довжиною  $l$ , заповнений пористим середовищем, і у всякий момент часу концентрація води по його перетину однакова. Дифузія крізь бокову поверхню циліндра відсутня, вихід води можливий крізь торцевий перетин  $x = l$ . Довжина зразка вважається незмінною.

Вільна вода, що видаляється самопливом відсутня. Матеріал приймає форму камери й представляє суцільне середовище. З початком руху поршня починається рух води та її видалення через торцевий отвір. При цьому у діапазоні тиску до 5-6 Мпа довжина брикету змінюється незначно (до 10 %). Тому процес руху води вважаємо дифузійним в незмінному об’ємі, але з урахуванням прикладеного тиску.

Процес руху води описується функцією  $\omega(x, \tau)$ , що представляє вологість матеріалу в перетині  $x$  у момент часу  $\tau$ . Витіснення води з брикету під тиском розглядається як дифузійний рух рідини в поровому просторі. Але для врахування зростаючого тиску введемо в рівняння дифузії функцію поглиначів води усередині циліндра  $I(x, \tau)$ .

Таким чином, математична модель процесу механічного зневоднення карбонату кальцію, що базується на рівнянні дифузії, матиме вигляд

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = a^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + I(x, \tau), \quad (1)$$

де  $a^2 = D/n$ ;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $n$  – коефіцієнт пористості;  $I(x, \tau)$  – функція поглиначів.

Процес механічного зневоднення пов'язаний зі зміною структури брикету за рахунок зменшення порового простору й можливості фільтрації крізь нього води. Виходить, у процесі стиснення брикету коефіцієнт дифузії буде зменшуватися, що в математичній постановці завдання можна задати відповідною функцією, мінімум або нульове значення якої наступить наприкінці досліджуваного процесу при  $\tau = \tau_k$ , де  $\tau_k$  – кінцеве значення часу.

Експерименти з виміром пористості брикету в процесі віджиму вологи показали діапазон її зміни 0,37-0,5. Попередні розрахунки виявили, що її зміна в даному діапазоні мало впливає на поведження досліджуваних залежностей. Вплив же коефіцієнта дифузії, навпаки, великий. Тому прийнято  $n = \text{const}$ ,  $D = D(\tau)$ .

Закон зміни коефіцієнта дифузії в (1) має вигляд

$$D = D(\tau) = q^2 n (\tau_k - \tau)^\beta, \quad (2)$$

де  $q$  – коефіцієнт пропорційності.

У початковий момент часу концентрація вологи усередині циліндра довжиною  $l$  однакова в будь-якому перетині, тобто початкова умова має вигляд

$$\omega(x, 0) = \omega_0. \quad (3)$$

В якості першої граничної умови прийнято, що в перетині  $x = 0$  концентрація вологи змінюється за законом

$$\omega(0, \tau) = \omega_0 \exp(-\mu \tau). \quad (4)$$

Гранична умова (4) для лівого краю характеризується як перша крайова задача. Це рівняння відповідає початку й закінченню розглянутого нами процесу зневоднення. При  $\tau = 0$  маємо початкову вологість  $\omega_0$ , що відповідає (3). Якщо процес зневоднення триватиме час  $\tau_k$ , то кінцева вологість у перетині  $x = 0$  визначиться зі співвідношення

$$\omega_{k0} = \omega_0 \exp(-\mu \tau_k), \quad (5)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт, що характеризує швидкість процесу зневоднення.

Коефіцієнт  $\mu$  визначається з (5) за відомим значенням величин  $\omega_0$  і  $\tau_k$ . Великою  $\omega_{k0}$  задаємося. Для різного часу тривалості процесу  $\tau_{ki}$  можна визначити відповідні значення  $\mu_i$ .

Гранична умова для правого краю вибирається відповідно другій крайовій задачі. На правому краї  $x = l$  задається значення похідної

$$\frac{\partial \omega}{\partial x}(l, \tau) = -K \omega_0 \{1 - \exp[-\mu(\tau_k - \tau)]\}. \quad (6)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності.

Права частина (6) може бути записана інакше. Наприклад, у запропонованій формі запису похідній для моменту часу  $\tau = 0$  одержується конкретне значення витрати рідини, що не відповідає фізичній сутності процесу – адже значення зусилля пресування в цей час дорівнює нулю. Щоб урахувати цей момент, вводиться гранична умова для правого краю у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial x}(l, \tau) = -K_2 \omega_0 \left\{ 1 - \exp \left[ -\mu (\tau_k - \tau) \frac{\tau}{\tau_k} \right] \right\}. \quad (7)$$

Граничні умови (6) і (7), що відповідають другій крайовій задачі, не є єдиними. Розглянемо третю крайову задачу – у перетині  $x = l$  задане лінійне співвідношення між похідною й функцією

$$\frac{\partial \omega}{\partial x}(l, \tau) = -K^* [\omega(l, \tau) - \omega_{\text{нар}}(\tau)], \quad (8)$$

де  $K^*$  – коефіцієнт пропорційності;  $\omega_{\text{нар}}(\tau)$  – вологість навколишнього середовища.

За аналогією з вираженнями (6) і (7) граничні умови за третьою крайовою задачею матимуть вигляд

$$\frac{\partial \omega}{\partial x}(l, \tau) = -K^* \omega_0 [\exp(-\mu \tau) - \exp(-\mu \tau_k)], \quad (9)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial x}(l, \tau) = -K_2^* \omega_0 \frac{\tau}{\tau_k} [\exp(-\mu \tau) - \exp(-\mu \tau_k)]. \quad (10)$$

У виразі (1) функція  $I(x, \tau)$  відіграє роль поглинача вологи, але не повинна порушувати задані початкову й граничну умови. З урахуванням розмірності, початкової умови (3) і граничної на лівому краї (4) задається функція  $I(x, \tau)$  у вигляді

$$I(x, \tau) = I_0 \frac{\omega_0}{\tau_k} \frac{x}{l} [1 - \exp(-\mu \tau)], \quad (11)$$

де  $I_0$  – коефіцієнт пропорційності.

Таким чином, при  $x = 0$  і  $\tau = 0$  рівняння (1) перетворюється в однорідне при відповідних граничних умовах. Вираз (11) не єдино можливий вид функції поглиначів. Запропоновано також наступні залежності:

$$I(x, t) = I_0 \frac{\omega_0}{\tau_k} \frac{x}{l} [1 - \exp[-\mu (\tau_k - \tau)]], \quad (12)$$

$$I(x, t) = I_0 \frac{\omega_0}{\tau_k} \frac{x}{l} [1 - \exp(-\mu \tau)] [1 - \exp[-\mu (\tau_k - \tau)]]. \quad (13)$$

На рис. 3 представлено залежності зміни функції поглиначів за довжиною та часом. Функція  $I(x, \tau)$ , що змінюється за законом (11) у початковий момент часу дорівнює нулю й зростає із часом. Функція  $I(x, \tau)$ , що змінюється за законом (12), у початковий момент часу має деяке значення й убиває із часом.

Третя функція  $I(x, \tau)$  формула (13) – у початковий і кінцевий момент часу дорівнює нулю, зростає до моменту  $\tau = \tau_k/2$  і потім поступово убуває.

У рівняннях (11-13) є присутнім коефіцієнт  $I_0$ , порядок якого можна оцінити після проведення розрахунків. Вирішуємо рівняння (1) з використанням методу Фур'є. Граничні умови – перша, друга й третя крайові задачі,  $I(x, \tau) = 0$  і відповідає виразам (11-13).

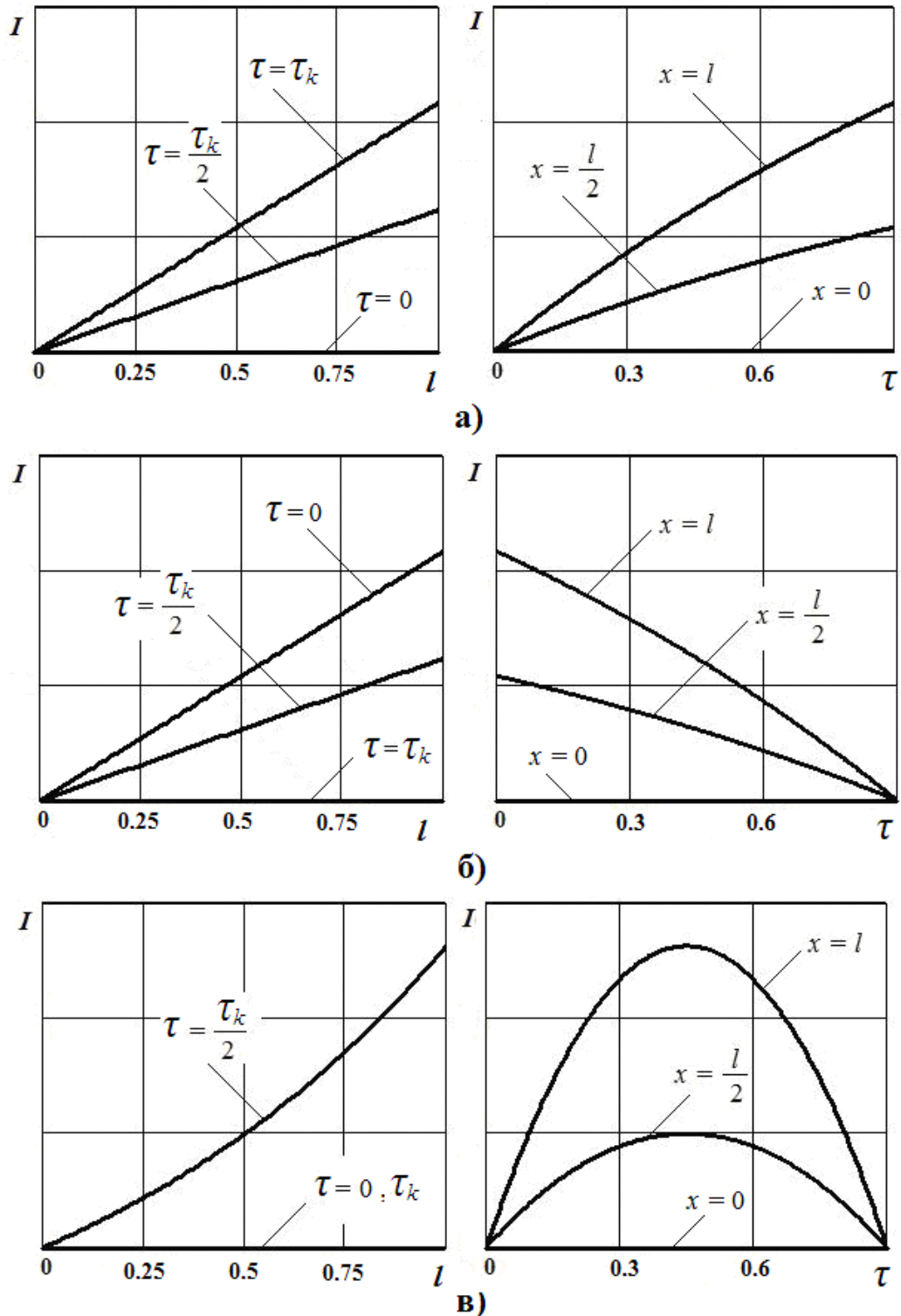


Рис. 3. Зміна функції  $I(x, \tau)$  за довжиною та часом  
а) рівняння (11), б) рівняння (12), в) рівняння (13)

На рис. 4-5 наведено рішення неоднорідного рівняння дифузії при  $D = \text{const}$  і  $D = D(\tau)$ .

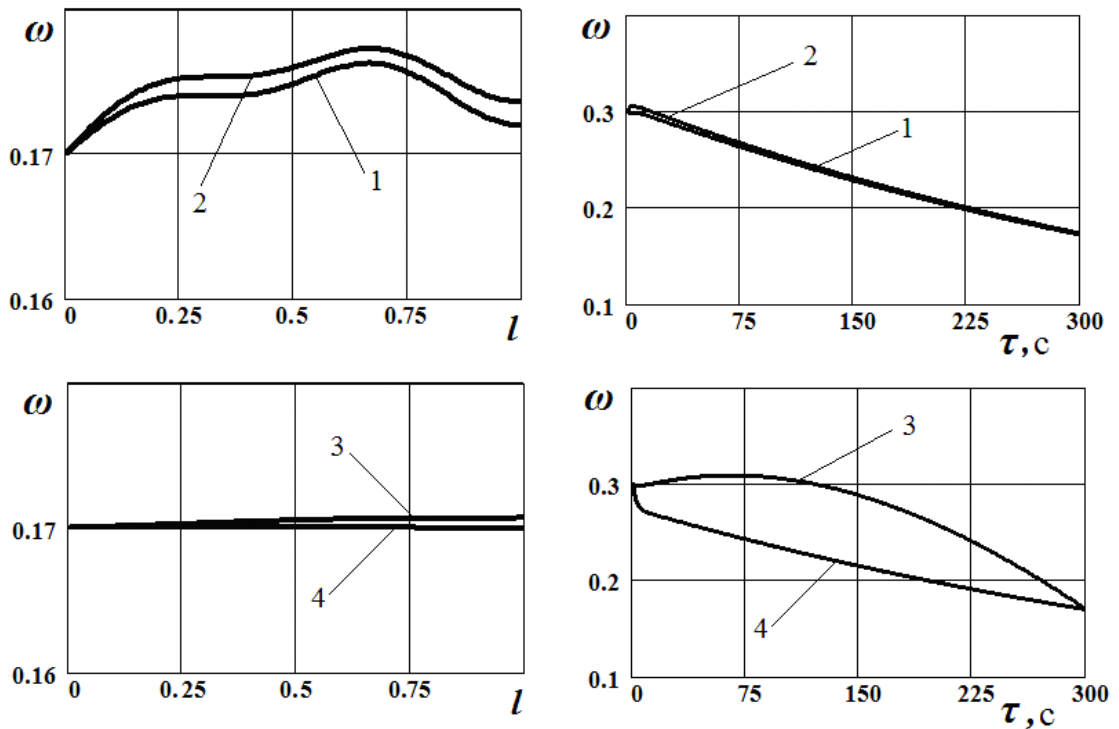


Рис. 4. Рішення неоднорідного рівняння дифузії при  $D = \text{const}$   
 граничні умови для правого краю:  
 1 - формула (6), 2 - формула (7), 3 - формула (9), 4 - формула (10)

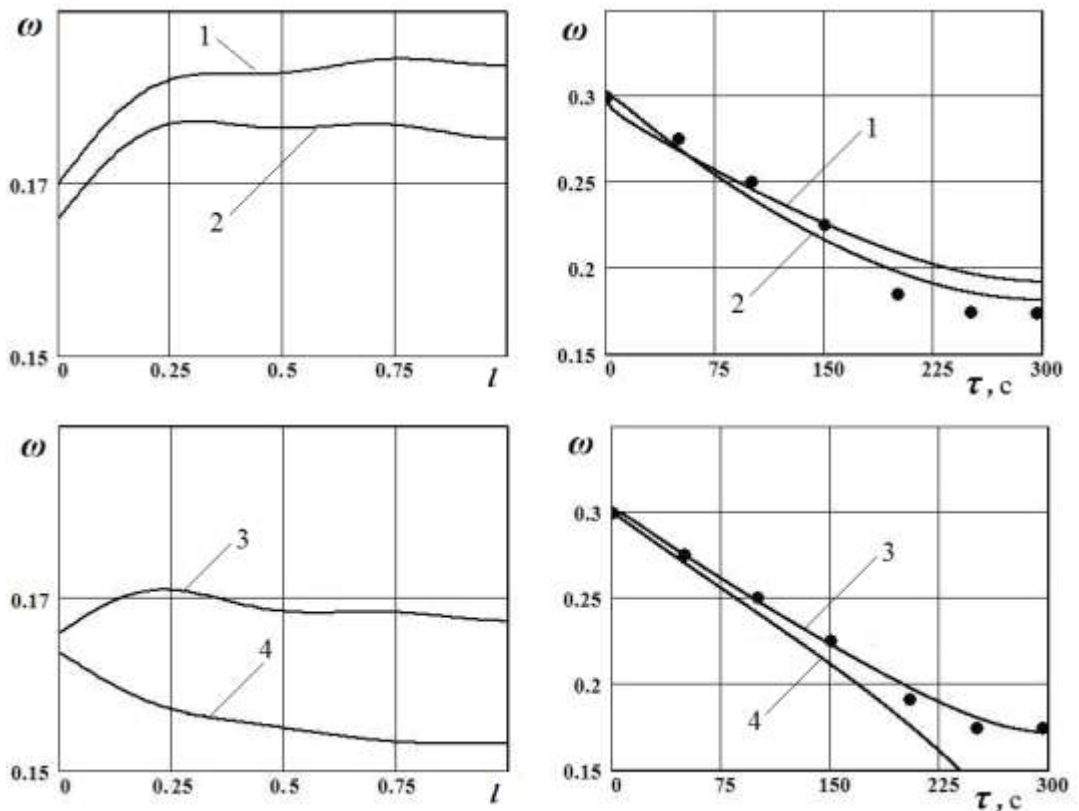


Рис. 5. Рішення неоднорідного рівняння дифузії при  $D=D(\tau)$   
 граничні умови для правого краю:  
 1 - формула (6), 2 - формула (7), 3 - формула (9), 4 - формула (10)

Результати рішення рівняння дифузії для тривалості процесу зневоднення  $\tau_k = 300$  с і вологості матеріалу  $\omega = 0,3$  наведено у вигляді графіків зміни вологості зразка за довжиною та часом (рис. 4). Аналогічні криві отримано при  $\tau_k = 150$  і  $1200$  с.

Розглянувши рішення неоднорідного рівняння дифузії з початковою умовою (3), граничною умовою для лівого краю (4) і комбінаціями граничних умов для правого краю (6, 7, 9 і 10) зроблено висновок, що для опису процесу механічного зневоднення карбонату кальцію відповідають наступні умови: початкове – (3); граничне для лівого краю – (4); граничне для правого краю – (9); вид функції поглиначів  $I(x, \tau)$  – (13).

Результати рішення рівняння дифузії для тривалості процесу зневоднення  $\tau_k = 300$  с наведено у вигляді графіків зміни вологості зразка по довжині й за часом (рис. 5). Аналогічні криві отримано для вологості матеріалу  $\omega = 0,25$  і  $0,35$  та тривалості процесу  $\tau_k = 150$  і  $1200$  с.

У **четвертому розділі** “Методика розрахунку технологічних параметрів пресової установки для зневоднення карбонату кальцію” наведено оцінку раціонального часу та тиску процесу механічного зневоднення карбонату кальцію, визначено продуктивність установки.

В основу покладено побудову кінетичної кривої видалення вологи з матеріалу. Отримана крива досліджується на наявність точок умовного екстремуму, які вказують раціональний час закінчення процесу.

Раціональний час процесу механічного зневоднення карбонату кальцію на пресовій установці визначається в наступному порядку:

- розрахунок процесу зневоднення відповідно до початкових даних (програму наведено в додатку);
- побудова залежностей розподілу вологості за довжиною  $\omega = f(x)$  та часом  $\omega = f(\tau)$ ;
- дослідження функції  $\omega = f(\tau)$  на екстремум;
- визначення раціонального часу процесу, що відповідає точці екстремуму.

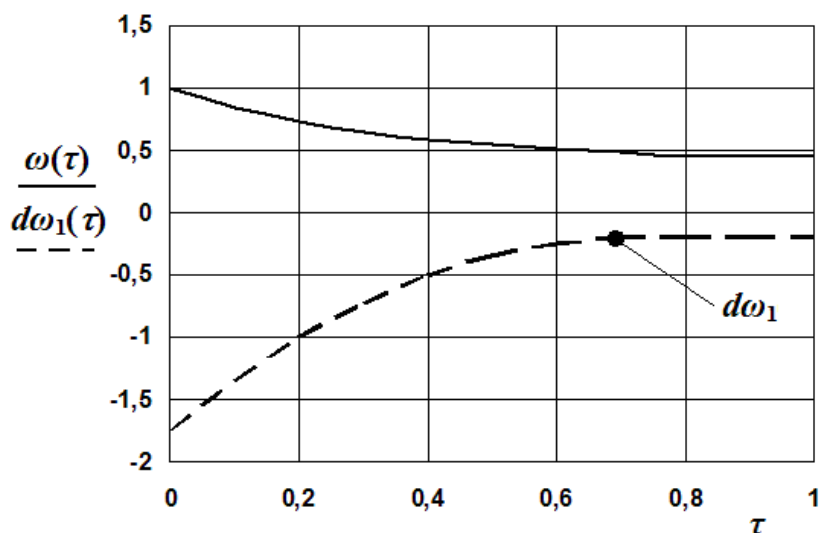


Рис. 6. Залежності функції  $\omega = f(\tau)$  і похідної  $d\omega_1(\tau)$  від часу

З графіку (рис. б) встановлено, що швидкість процесу зневоднення (крива  $\omega_1(\tau)$ ) зростає, досягає максимуму (точка  $d\omega_1$ ) і стає постійною. До точки максимуму видалення вологи відбувається інтенсивно, за цією точкою процес уповільнюється. Отже, продовжувати процес зневоднення за точкою екстремуму недоцільно.

Раціональний тиск процесу механічного зневоднення карбонату кальцію на пресовій установці визначається на основі аналізу експериментальної залежності  $\omega = f(p)$

$$w = \ln \frac{\omega}{\omega_0} = a \cdot \lg p + b, \quad (14)$$

де  $\omega$  і  $\omega_0$  – значення поточної і початкової вологості матеріалу;  $a$ ,  $b$  – параметри.

При досить великих величинах тиску  $p$  величина  $w$  пов'язана лінійно з логарифмом  $p$ . При наближенні до значення  $\omega_k$  (рис. 1а) вологість практично не змінюється навіть при дуже великих значеннях тиску. Тут можна говорити про умовний екстремум, якому відповідає мінімальний тиск при заданій малій величині похідної  $d\omega/dp$ . Проводимо диференціювання виразу (14) по  $p$ :

$$\frac{dw}{dp} = \frac{0,434 \cdot a}{p} = \Delta \quad \left( \lim_{p \rightarrow \infty} \Delta = 0 \right).$$

Експериментальні дані показують, що  $\Delta$  може бути досить малою величиною. Таким чином, при як завгодно малих значеннях  $\Delta$ , похідна майже не відрізняється від нуля. Умовний екстремум знаходимо з умови

$$\frac{0,434 \cdot a}{p} = \Delta.$$

Звідси отримаємо вираз для визначення раціонального тиску процесу механічного зневоднення

$$P_{рац} = \frac{0,434 \cdot a}{\Delta}.$$

Результати показали, що при механічному зневодненні карбонату кальцію з технологічними параметрами, розрахованими за запропонованою методикою, час процесу зневоднення зменшується на 28-30 %. Вологість зневодненого продукту становить  $\omega = 0,16-0,18$  при початковій –  $\omega = 0,3-0,35$ .

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу дослідження процесу механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій установці та розробці методики розрахунку раціональних технологічних параметрів пресових установок.

Основні наукові результати й висновки:

1. Проведені дослідження на експериментальній пресовій установці з камерою зневоднення дозволили встановити вплив фізико-механічних властивостей карбонату кальцію на кінетику механічного зневоднення.

2. Отримано експериментальні залежності кінетики віджимання вологи з карбонату кальцію за різними значеннями початкової вологості матеріалу та конструктивними особливостями пресової камери.

3. Встановлено, що при механічному зневодненні карбонату кальцію, коли тиск зростає за лінійним законом у часі, зниження вологості матеріалу відбувається за експонентним законом, що дозволяє зменшити вологість до  $\omega = 0,16-0,18$  при початковій вологості в інтервалі  $\omega = 0,25-0,35$ .

4. Обґрунтовано, що при механічному зневодненні карбонату кальцію в експериментальній пресовій установці з камерою зневоднення, раціональне значення тиску пресування знаходиться в інтервалі  $p = 5-6$  МПа, тривалість процесу знаходиться в інтервалі  $\tau_k = 150-300$  с, що дозволяє зменшити вологість матеріалу до  $\omega = 0,16-0,18$ .

5. Встановлено, що розташування отворів в камері не впливає на кінетику зміни вологості, а вихід карбонату кальцію через отвори становить 5-16 % від загальної маси вихідного продукту.

6. Розроблена математична модель процесу механічного зневоднення карбонату кальцію на основі неоднорідного рівняння дифузії дозволяє визначити зміну вологості за довжиною зразка у будь-який момент часу з урахуванням коефіцієнта дифузії, що змінюється в часі.

7. Розроблена методика розрахунку раціонального часу та тиску процесу механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій установці, що дозволяє зменшити час зневоднення в пресовій камері на 28-30 %.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджено до використання в якості методик розрахунку на підприємствах “УкрНДІВуглезбагачення” (м. Луганськ), ДП “Діпромашзбагачення” (м. Дніпропетровськ), в “Українському державному геологорозвідувальному інституті” (м. Київ).

## СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Богданов А.А. К выбору перспективного направления модернизации оборудования для обезвоживания мелового сырья / Богданов А.А. // Научный вестник Национального горничого университета. – Дніпропетровськ: НГУ, 2005. – № 12. – С. 68 – 71.

2. Богданов А.А. Экспериментальные исследования по обезвоживанию мела в прессовой камере / Богданов А.А., Федоскин В.А. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ: ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України, 2006. – Вип. 62. – С. 4 – 9.

*Здобувач розробив методіку проведення експерименту в пресовій камері, провів експеримент зі зневоднення карбонату кальцію.*

3. Богданов А.А. К математическому моделированию обезвоживания мела в прессовой камере / Богданов А.А. // Научный вестник Национального горничого университета. – Дніпропетровськ, НГУ. – 2006. – № 2. – С. 32 – 33.

4. Богданов А.А. Результаты экспериментальных исследований по механическому обезвоживанию мела / Анциферов А.В., Богданов А.А. //



Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ: НГУ, 2007. – № 29 (70) – 30 (71). С. 190 – 194.

*Здобувач провів експериментальні дослідження процесу механічного зневоднення карбонату кальцію, виконав обробку результатів.*

5. Анциферов А.В. Использование уравнения диффузии при решении задачи механического обезвоживания / Анциферов А.В., Богданов А.А. // Вісник Национального технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – № 13. – С. 15 – 24.

*Здобувач розробив математичну модель процесу механічного зневоднення карбонату кальцію, виконав чисельний експеримент.*

6. Анциферов О.В. Рівняння дифузії та аналіз різних граничних умов на опис процесу зневоднення / Анциферов О.В., Богданов О.О. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ: НГУ, 2008. – № 34(75). – С. 148 – 153.

*Здобувач провів чисельний експеримент.*

7. Богданов О.О. Методика оцінки технологічних параметрів процесу механічного зневоднення шлаків / Анциферов О.В., Богданов О.О. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – № 36(77) – 37(78). – С. 150 – 154.

*Здобувач прийняв участь у розробці методики механічного зневоднення й проведенні чисельного експерименту.*

8. Богданов А.А. Методы решения уравнения диффузии при моделировании процесса механического обезвоживания / Богданов А.А. // Вопросы химии и химической технологии. – Днепропетровск: УДХТУ, 2010. – № 4. – С. 171 – 173.

9. Богданов А.А. Динамика механического обезвоживания / Богданов А.А. // Міжнародна науково-практична конференція “Форум гірників – 2008” – Дніпропетровськ, 2008. – С. 232 – 237.

10. Богданов О.О. Математична модель зневоднення матеріалу у пресовій камері / Богданов О.О. // Міжнародна наукова конференція “Математичні проблеми технічної механіки - 2008” – Дніпродзержинськ, 2008. – С. 164 – 165.

11. Богданов О.О. Рішення задачі зневоднення при проникності середовища, залежного від часу / Богданов О.О. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХПІ», 2010. – С. 99.

## АНОТАЦІЇ

**Богданов О.О. Теоретичні й експериментальні дослідження процесу механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій установці. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. –

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, 2013 р.

Дисертаційну роботу присвячено інтенсифікації процесу механічного зневоднення карбонату кальцію в пресовій установці. В роботі розвинуто модель процесу механічного зневоднення карбонату кальцію на основі рівняння дифузії шляхом введення функції поглиначів і за рахунок постановки й комбінації різних граничних умов. Проведено теоретичні й експериментальні дослідження закономірностей процесу видалення вологи з матеріалу з аналізом впливу на кінетику зневоднення законів розподілу функції поглиначів при різному сполученні граничних умов. Розроблена математична модель процесу механічного зневоднення карбонату кальцію на основі рівняння дифузії дозволяє визначити зміну вологості за довжиною зразка й у будь-який момент часу з урахуванням коефіцієнта дифузії, що змінюється в часі.

Експериментально визначено фізико-механічних властивості карбонату кальцію, що впливають на кінетику механічного зневоднення, виготовлено лабораторний зразок пресової камери, на якому проведено дослідження процесу видалення вологи зі зразків. На моделі пресової камери експериментально встановлено кінетику віджимання вологи з карбонату кальцію залежно від початкової вологості матеріалу й конструктивних особливостей пресової камери, що впливають на видалення вологи.

Розроблено методики розрахунку технологічних параметрів процесу механічного зневоднення на основі дифузійного руху рідини в матеріалі з урахуванням зміни проникності матеріалу з часом, які прийнято до впровадження на підприємствах України.

*Ключові слова:* механічне зневоднення, кінетика, дифузія, функція поглиначів, пресова установка, камера зневоднення, карбонат кальцію.

**Богданов А.А. Теоретические и экспериментальные исследования процесса механического обезвоживания карбоната кальция в прессовой установке. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, 2013 г.

Диссертационная работа посвящена интенсификации процесса механического обезвоживания карбоната кальция в прессовой установке. В работе развита модель процесса механического обезвоживания карбоната кальция на основе уравнения диффузии путем введения функции поглотителей и за счет постановки и комбинации разных граничных условий. Проведены теоретические и экспериментальные исследования закономірностей процесса удаления влаги из материала с анализом влияния на кинетику обезвоживания законов распределения функции поглотителей при разном сочетании граничных условий. Разработана математическая модель процесса механического обезвоживания карбоната кальция на основе

уравнения диффузии. Данная модель позволяет определить изменение влажности по длине образца и в любой момент времени с учетом коэффициента диффузии, изменяющегося со временем.

Экспериментально определены физико-механические свойства карбоната кальция, влияющие на кинетику механического обезвоживания. Установлено, что карбонат кальция является материалом с низкой проницаемостью. Для удаления из него влаги необходимо приложить достаточно большое усилие. Обосновано применение прессовых установок для механического обезвоживания карбоната кальция. Прессовая установка должна быть оборудована специальной камерой обезвоживания. Изготовлен лабораторный образец прессовой камеры, на котором проведено исследование процесса удаления влаги из образцов. На модели прессовой камеры экспериментально установлена кинетика удаления влаги из карбоната кальция в зависимости от начальной влажности материала и конструктивных особенностей прессовой камеры, влияющих на удаление влаги. Установлено, что при механическом обезвоживании карбоната кальция в прессовой установке с камерой обезвоживания рациональное значение давления прессования находится в интервале  $p = 5-6$  МПа, продолжительность процесса обезвоживания находится в интервале  $\tau_k = 150-300$  с. Конечная влажность материала при этом составит  $\omega = 0,16-0,18$  при начальной –  $\omega = 0,25-0,35$ .

Разработаны методики расчета технологических параметров процесса механического обезвоживания на основе диффузионного движения жидкости в материале с учетом изменения проницаемости материала во времени, которые приняты к внедрению на предприятиях Украины.

*Ключевые слова:* механическое обезвоживание, кинетика, диффузия, функция поглотителей, прессовая установка, камера обезвоживания, карбонат кальция.

**Bogdanov O.O. Theoretical and experimental studies of the mechanical dewatering process of calcium carbonate in the press installation. – Manuscript.**

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences on specialty 05.17.08 – process and equipments of chemical technology. – National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, 2013.

The thesis is devoted to the intensification of the process of mechanical dehydration of calcium carbonate in the pressing plant. The work developed model of mechanical dehydration of calcium carbonate from the diffusion equation by introducing features sinks and through setting and combination of different boundary conditions. A theoretical and experimental study of patterns process of removing moisture from the material to the analysis of the impact on the kinetics of dehydration of probability distributions functions sinks with various combinations of boundary conditions. A mathematical model of the mechanical dewatering of calcium carbonate from the diffusion equation to determine the humidity change in length of the specimen at any time based on the diffusion coefficient, which varies over time.

Experimentally determined physical and mechanical properties of calcium carbonate that affect the kinetics of mechanical dewatering, made laboratory sample of press cameras, which studied the process of removing moisture from the samples. In the model of press cameras experimentally determined kinetics of extraction of water from the calcium carbonate depending on the initial moisture content and design features of press cameras, affecting moisture removal.

The methods of calculating the technological process parameters of mechanical dewatering based on the diffusion of the fluid in the story of the changing permeability of the material over time, which made for implementation in the Ukraine.

*Keywords:* mechanical dewatering, kinetics, diffusion, the function of absorbers, compactors, camera dehydration, calcium carbonate.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "A. Morgunov".

**Богданов Олександр Олександрович**

**ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ КАРБОНАТУ КАЛЬЦІЮ  
В ПРЕСОВІЙ УСТАНОВЦІ**

Автореферат

Підп. до друку 26.02.2013. Формат 60x90/16.  
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.  
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №

Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»  
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.