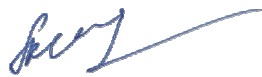


Національна академія наук України
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова

ШЕВЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ІВАНОВИЧ



УДК [622.794.3.002.68–752:531.66].001.5(043.5)

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПРОЦЕСУ ВІБРОУДАРНОГО
ЗНЕВОДНЕННЯ ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО
СКЛАДУ, ЯКИЙ ЗМІНЮЄТЬСЯ

05.15.09 – «Геотехнічна і гірничча механіка»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (м. Дніпро)

Науковий консультант доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Лапшин Євген Семенович,
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова
НАН України,
провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Полулях Олександр Данилович,
Відокремлений підрозділ «Укрдівуглезбагачення»
Державного підприємства «НТЦ «Вуглеінновація»
Міненерго України, головний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор
Засельський Володимир Йосипович,
Технологічний інститут Державного університету
економіки і технологій МОН України, завідувач кафедри
інженірингу з галузевого машинобудування

доктор технічних наук, професор
Дзюба Анастасій Петрович,
Дніпровський національний університет імені Олеся
Гончара МОН України, професор кафедри теоретичної та
комп'ютерної механіки

Захист відбудеться «5» травня 2021 р. о 13³⁰ години на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 у Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України за адресою: вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, 49005, факс (0562) 46-24-26.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України за адресою: вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, 49005.

Автореферат розісланий «2» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради Д 08.188.01
доктор технічних наук, професор



В.Г. Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В результаті діяльності промислових підприємств на території України накопичено величезну кількість обводнених тонкозернистих відходів, що складаються, в основному, з частинок розміром менше 1 мм, і які через значну кількість корисного компоненту ϵ , по суті, техногенними родовищами. Складність їх переробки посилюється наявністю корисного компоненту у різних класах крупності, збільшенням некондиційної частини у бік найбільш дрібних класів, підвищеною до 45% вологістю, відсутністю техніки і технології для переробки сировини зазначеної крупності, що зумовлює актуальність пошуку рішень в даній області.

Одним із способів вилучення корисного компоненту з техногенної сировини є розділення за крупністю на поверхні, що просіває, з використанням віброударної дії, яка інтенсифікує процеси сегрегації та розділення. Однак при наявності води і зі зменшенням крупності частинок переробка відходів ускладнюється. Незважаючи на велику кількість як теоретичних, так і емпіричних моделей ряд важливих особливостей кінетики процесу залишаються недослідженими. До таких в першу чергу слід віднести закономірності руху рідини між частинками в шарі сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи при віброударному збудженні, яке забезпечує інтенсивне переміщення рідини і частинок щодо один одного, їх комплексний облік і взаємний вплив. Недостатньо вивчено як впливають режими віброударної дії на сировину з урахуванням наявності в ній вологи. Усе це зменшує достовірність аналізу і прогнозу процесу зневоднення техногенної сировини.

Подальший розвиток і удосконалювання віброударного зневоднення і розділення за крупністю можливі лише при розумінні процесів, що відбуваються, встановленні впливу рідини і параметрів віброударної дії на переміщення часток щодо один одного та розділення за крупністю. Такі дослідження також необхідні для обґрунтованого підходу до вибору конструктивних і робочих параметрів віброударного устаткування, призначеного для переробки. Усе це дозволить підвищити ефективність і продуктивність переробки вологої техногенної сировини.

Таким чином, встановлення закономірностей переміщення рідини і частинок крізь шар сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи в залежності від гранулометричного складу сировини, який змінюється, щільності частинок і рідини, параметрів віброударного впливу, що дозволить для ефективного зневоднення та розділення створити нові способи, а також методики розрахунку і рекомендації по вибору раціональних режимів є **актуальною науковою проблемою**, яка має важливе значення для підвищення ефективності, розробки та створення техніки і технологій переробки техногенної сировини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках державних бюджетних тем Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України: № III-32-07 «Науково-технічні основи розрахунку параметрів процесів і машин, що забезпечують надійність, екологічну

безпеку і ресурсозбереження технологій видобутку, транспортування і переробки мінеральної сировини», державний реєстраційний номер 0107U001266, де автор був виконавцем; № III-55-10 «Розробка наукових основ нових ресурсозберігаючих технологій функціонування та моніторингу нестійких геотехнологічних систем», в розділі «Розвиток наукових основ нових ресурсозберігаючих технологій функціонування динамічно нестійких систем взаємодіючих середовищ в капілярно-пористій гірській масі в умовах дії зовнішніх силових полів», державний реєстраційний номер 0110U002634, де автор був виконавцем; № III-56-10 «Підвищення ефективності зневоднення і поділу сипучої гірської маси при різних силових впливах на основі виявлення закономірностей механізмів процесу», державний реєстраційний номер 0110U001540, де автор був виконавцем і відповідальним виконавцем; III-63-12 «Обґрунтування геотехнологічних систем розробки, схем розкриття горизонтів, технологічних процесів і їх параметрів при доопрацюванні глибоких кар'єрів», державний реєстраційний номер 0112U000493, де автор був виконавцем; III-68-16 «Розробка наукових основ формування промислово-господарських комплексів на порушених і техногенних геологічних середовищах, утворених при видобутку та переробці корисних копалин», державний реєстраційний номер 0116U004044, де автор був виконавцем; III-75-20 «Наукове обґрунтування розвитку безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом зі зменшенням їх шкідливого впливу на навколишнє середовище», державний реєстраційний номер 0120U101113, де автор був виконавцем.

Ідея роботи полягає у використанні закономірностей основних механізмів процесу зневоднення сировини гранулометричного складу, який змінюється, з урахуванням їх випадкової природи та властивостей сировини, в комплексному обліку їх при визначенні параметрів процесу і використанні додаткового за період віброзбудження на етапі польоту сировини ударного впливу на поверхню, що просіває.

Мета роботи – розвиток наукових основ віброударного зневоднення техногенної сировини гранулометричного складу, який змінюється, при її переробці на поверхні, що просіває, на основі обліку впливу рідини, закономірностей переміщення рідини і частинок крізь шар сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи і встановлення параметрів віброударної дії для підвищення ефективності, вдосконалення та створення техніки і технологій переробки техногенної сировини.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні **задачі**:

1. Обґрунтувати мінімальну граничну крупність розділення для максимального вилучення корисного компонента з техногенних відходів з необхідною якістю на прикладі вугільних шламів і гранітного відсіву.

2. Визначити умови проходження рідини через поверхню, що просіває; дослідити рівновагу рідини в чарунці поверхні, яка просіває, а також виявити умови, які дозволяють зменшити розмір чарунок; в області значень розмірів чарунок при яких рідина утримується в них в статистиці, встановити режими віброзбудження, які забезпечать проходження через них рідини.

3. Розробити математичну модель і встановити закономірності зневоднення техногенної сировини при віброударному впливі з урахуванням гранулометричного складу сировини, який змінюється, щільності частинок і рідини, параметрів віброударного впливу.

4. Розробити математичну модель і встановити закономірності кінетики зневоднення та розділення за крупністю при віброударному збудженні з урахуванням гранулометричного складу сировини, який змінюється, щільності частинок і рідини, параметрів віброударного впливу та взаємного впливу зневоднення й розділення за крупністю.

5. Розробити нові способи зневоднення і розділення за крупністю з урахуванням дії на частки сил поверхневого натягу.

6. Розробити та впровадити методики і рекомендації по вибору, обґрунтуванню і розрахунку раціональних режимів процесу видалення вологи і розділення техногенної сировини при віброударному впливі.

Об'єктом дослідження є процес зневоднення і розділення за крупністю техногенної сировини гранулометричного складу, який змінюється, на поверхні, що просіває, при віброударному впливі.

Предмет – закономірності переміщення рідини і частинок через шар сировини і шарунки поверхні, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи, параметри віброударної дії та їх вплив на кінетику зневоднення та розділення за крупністю.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використано комплексний підхід сучасних наукових методів досліджень: аналіз і узагальнення науково-технічних досягнень зневоднення і розділення за крупністю тонкозернистої мінеральної сировини; експериментальні та теоретичні дослідження процесів зневоднення та розділення техногенної сировини. При розробці математичних моделей зневоднення і розділення за крупністю використовувалася теорія марківських процесів і основні положення статистичної фізики. Методом Монте-Карло проводилися чисельні експерименти на математичній моделі віброударного грохоту. Перевірка адекватності модельних уявлень виконувалася методами математичної статистики. В експериментальних дослідженнях використовувалися стандартні методи тензо- і віброметрії. Статистична обробка результатів досліджень виконувалася з використанням засобів обчислювальної техніки. Генерація випадкових чисел і статистична обробка проводилася за допомогою програми Excel. Програмування виконувалося на мові C++ з підключенням математичних бібліотек.

В роботі захищаються наступні **наукові положення**:

1. При дії на частки сил поверхневого натягу залежність коефіцієнта збільшення питомої енергії, необхідної для розриву меніска, від кутового розміру меніска і крайового кута змінюється за експоненціальним законом (зі зменшенням кутового розміру меніска з 45° до 5° при крайових кутах від 0° до 40°).

2. Імовірність переходу рідини по висоті шару сировини дорівнює добутку ймовірностей виконання енергетичної і геометричної умов. Ймовірність переходу рідини вниз за геометричними умовами залежить від трьох компонентів:

ймовірності того, що три частки знаходяться в елементарному об'ємі; ймовірність орієнтації елементарного об'єму вниз, ймовірності того, що імпульс діє в цьому ж напрямку; ймовірність переходу рідини вниз з енергетичної умови: кінетична енергія, що повідомляється меніску рідини, повинна перевищувати енергію утворення нової міжфазної поверхні.

3. Вологість сипучої техногенної сировини під впливом віброударного навантаження в інтервалі частот коливань 18-60 Гц і амплітуд 1-9 мм для сировини вузького і широкого спектра крупності змінюється за степеневим законом, основа якого – стохастична матриця переходів рідини: з одного елементарного шару в інший, з дезінтегруючих елементів в елементарні шари, з елементарних шарів на дезінтегруючі елементи; через поверхню, що просіває, а показник ступеня – кількість взаємодій сировини з нею.

4. В результаті віброударного впливу в інтервалі частот коливань 25-40 Гц і амплітуд 1-6 мм для сировини крупністю +0-10 мм зменшення вологості описується поліномом четвертого ступеня від відношення ймовірностей проходження рідини і дрібних частинок через поверхню, яка просіває.

Наукова новизна одержаних результатів:

1 Вперше встановлено необхідний приріст енергії для розриву меніска рідини при дії на частки сил поверхневого натягу в залежності від кутового розміру меніска, що змінюється з 45° до 5°, при крайових кутах, які змінюються від 0° до 40°.

2. У розвиток теорії віброударного зневоднення вперше отримано закономірності переходу рідини крізь шар сировини від виконання геометричної і енергетичної умов. Ймовірність переходу рідини вниз за геометричними умовами залежить від трьох компонентів: ймовірності того, що три частки знаходяться в елементарному об'ємі; ймовірність орієнтації елементарного об'єму вниз, ймовірності того, що імпульс діє в цьому ж напрямку; ймовірність переходу рідини вниз з енергетичної умови: кінетична енергія, що повідомляється меніску рідини, повинна перевищувати енергію утворення нової міжфазної поверхні.

3. Вперше описано вплив дезінтегруючих елементів на переходи рідини через шар сировини і чарунки поверхні, яка просіває. За рахунок нанесення дезінтегруючими елементами у локальних областях нормальних і зсувних імпульсів підсилюються коливання поверхні і матеріалу на ній, що сприяє більш інтенсивному його розпушенню і руйнуванню капілярних містків між частками, інтенсифікуючи процес зневоднення й розділення до 50 %.

4. У розвиток теорії віброударного зневоднення вперше отримано залежності ймовірності проходження рідини через чарунки від ймовірності залишитися на поверхні, що просіває, і кількості взаємодій сировини з нею.

5. Розвинуто наукові основи віброударного зневоднення на основі вперше встановлених закономірностей переміщення рідини і частинок крізь шар сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи в залежності від гранулометричного складу сировини, який змінюється, щільності частинок і рідини, параметрів віброударного впливу, режимних та технологічних параметрів.

6. Вперше розроблено математичну модель кінетики зневоднення та розділення за крупністю при віброударному впливі, яка комплексно враховує початковий розподіл рідини і частинок по висоті шару сировини, сегрегацію, просіювання, особливості вібротранспортування (швидкість, кратність і кількість падінь за період вібротранспортування) і зміну висоти шару.

7. Вперше обґрунтовано ефективність ударного впливу на поверхню, що просіває, на етапі коли сировина не контактує з нею. Використання додаткового за період віброзбудження на етапі польоту сировини ударного впливу на поверхню, що просіває, в інтервалі частот коливань 30-35 Гц і амплітуд 1,5-2,5 мм для сировини крупністю +0-10 мм дозволяє знизити вологість з 30 до 8-10 % і збільшити вихід дрібних частинок з 15-25 до 75-80%.

Наукове значення результатів полягає у встановленні закономірностей переміщення рідини і частинок крізь шар сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи в залежності від гранулометричного складу, який змінюється, сировини, щільності рідини і частинок, параметрів віброударного впливу для інтенсивного зневоднення та розділення, і розвитку на цій базі наукових основ віброударного зневоднення і розділення за крупністю техногенної сировини при її переробці

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці:

1. «Методики розрахунку технологічних параметрів, що забезпечують очищення поверхні, яка просіває, при тонкому грохоченні техногенної сировини»,
2. «Методики розрахунку параметрів грохоту з ударним збудженням поверхні, яка просіває, для класифікації та зниження вологи в тонких класах»,
3. «Методики визначення ефективності зневоднення при віброударному грохоченні в технологіях збагачення техногенних родовищ»,
4. «Методики розрахунку технологічних показників грохочення і зневоднення при переробці вологої техногенної сировини»,
5. «Методики математичного моделювання зневоднення вологої техногенної сировини при віброударному грохоченні»,
6. «Методики математичного моделювання кінетики грохочення і зневоднення при переробці тонкозернистої вологої сировини»,
7. «Методики обґрунтування і розрахунку режимних та конструктивних параметрів віброударного грохоту і технологічних показників процесу поділу за крупністю і зневоднення при переробці техногенної сировини»,
8. «Рекомендацій по вибору раціональних режимів процесу класифікації і зневоднення для високоефективної переробки пісків».

Реалізація результатів роботи.

1. «Методику розрахунку технологічних параметрів, що забезпечують очищення поверхні, що просіває, при тонкому грохоченні техногенної сировини» впроваджено в ПАТ «Новопавлівський гранітний кар'єр», де використано при вдосконаленні режимів грохоту ГІЛ-52. В результаті використання розрахунків, наведених в методиці, було визначено залишки води на поверхнях, що просівають, в залежності від розміру їх чарунок, амплітуди і частоти віброзбудження, що

дозволило зменшити залипання чарунок поверхні і, як наслідок, підвищити ефективність грохочення зі зневодненням (акт впровадження від 07.06.2017 р.).

Також методику впроваджено в ТОВ «Любимовський кар'єр», де використано для розрахунку раціональних режимів збудження і підвищення ефективності зневоднення (акт впровадження від 12.06.2017 р.).

2. «Методику розрахунку параметрів грохоту з ударним збудженням поверхні, що просіває, для класифікації та зниження вологи в тонких класах» впроваджено в ТОВ «Об'єднання Новомиколаївський кар'єр», де використано для визначення амплітуди і частоти віброзбудження, жорсткості пружних зв'язків, амплітуди сили і часу грохочення, що дозволило забезпечити раціональні режими збудження і досягнення заданих технологічних показників (акт впровадження від 03.07.2017 р.).

Також методику впроваджено в ПрАТ «Об'єднана гірничо-хімічна компанія» філія «Вільногірський гірничо-металургійний комбінат», де використано для обґрунтування вибору режимних і конструктивних параметрів віброгрохотів з метою підвищення ефективності їх роботи (акт впровадження від 06.07.2017 р.).

Методику впроваджено в ТОВ «Любимовський кар'єр», де використано для визначення амплітуди і частоти віброзбудження грохоту ГЛ-52, що дозволило забезпечити раціональні режими віброзбудження і підвищення ефективності просівання на 10-12% (акт впровадження від 10.07.2017 р.).

3. «Методику визначення ефективності зневоднення при віброударному грохоченні в технологіях збагачення техногенних родовищ» впроваджено в ТОВ «Мотронівський гірничо-збагачувальний комбінат», де використано при виконанні проекту технологічного комплексу збагачення титано-цирконієвих руд в технологічній схемі тонкого грохочення з метою підвищення ефективності зневоднення продуктів збагачення (акт впровадження від 29.06.2017 р.).

Також методику впроваджено у Філії ЦЗФ «Павлоградська» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», де використано для розрахунку оптимальних технологічних показників зневоднення на високочастотних грохотах IDS 30 R 48 в процесі зневоднення продуктів гвинтових сепараторів, за рахунок чого вологість продукту була знижена на 2,5-3,5% (акт впровадження від 26.06.2017 р.).

Методику також впроваджено в ПАТ «Новопавлівський гранітний кар'єр», де використано для розрахунку режимів роботи двоярусних вібраційних грохотів СМД-121 і ГС-52, в результаті якого були визначені раціональні режими збудження поверхні, яка просіває, що дозволило підвищити ефективність грохочення на 7-10% (акт впровадження від 19.06.2017 р.).

Методику впроваджено в ТОВ «Любимовський кар'єр», де використано для розрахунків раціональних технологічних, конструктивних і режимних параметрів грохоту, які забезпечили підвищення ефективності зневоднення (акт впровадження від 22.06.2017 р.).

Методику впроваджено на кафедрі збагачення корисних копалин в ДВНЗ «Національний гірничий університет» у навчальному процесі при вивченні дисципліни «Зневоднення і пиловловлювання в технологіях збагачення корисних копалин» (акт впровадження від 14.11.2017 р.).

4. «Методику розрахунку технологічних показників грохочення і зневоднення при переробці вологої техногенної сировини» впроваджено в ТОВ «Об'єднання Новомиkolaївський кар'єр», де використано для аналізу процесу розділення за крупністю грохотів ГЛ-43, що дозволило виявити напрями модернізації та шляхи вибору раціональних параметрів. В результаті аналізу процесу грохочення з позиції забезпечення раціональної взаємодії його складових (сегрегації, просіювання і вібротранспортування) були визначені амплітуда і частота віброзбудження, довжина поверхні, яка просіває, та час грохочення, що забезпечило досягнення заданих технологічних показників (акт впровадження від 19.06.2017 р.).

Методику також впроваджено в ТОВ «Мотронівський гірничо-збагачувальний комбінат», де використано при виконанні проекту будівництва технологічного комплексу збагачення титано-цирконієвих руд з метою визначення продуктивності грохотів, ефективності розділення за крупністю і зневоднення при тонкому грохоченні продуктів збагачення (акт впровадження від 24.08.2017 р.).

Методику впроваджено в Філії ЦЗФ «Павлоградська» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», де використано при розрахунках раціональних параметрів класифікації та зневоднення на грохотах TARBOR, що дозволило підвищити ефективність класифікації з 96 до 97 %, а вологість знизити на 2,3-3,7% (акт впровадження від 14.07.2017 р.).

Також методику впроваджено в ПрАТ «Об'єднана гірничо-хімічна компанія», філія «Вільногірський гірничо-металургійний комбінат», де використано в технологічній схемі тонкого грохочення розсипних титано-цирконієвих руд з метою підвищення ефективності грохочення продуктів збагачення (акт впровадження від 03.07.2017 р.).

Методику впроваджено в ТОВ «Любимовський кар'єр», де використано для коригування режимних параметрів грохоту ГЛ-52, в результаті чого покращено якість продуктів за рахунок зменшення дрібного класу в продуктах 10-20 і 5-10 мм (акт впровадження від 11.07.2017 р.).

Методику впроваджено в ДВНЗ «Національний гірничий університет» на кафедрі збагачення корисних копалин при підготовці бакалаврів за напрямом «Переробка корисних копалин» 6.050303 з дисципліни «Математичні методи в збагаченні корисних копалин» (акт впровадження від 23.11.2017 р.), а також в ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», де використано на кафедрі процесів і апаратів хімічної технології при читанні курсу «Процеси і апарати хімічної технології» для студентів технологічних і механічних спеціальностей (акт впровадження від 25.12.2013 р.).

5. «Методику математичного моделювання зневоднення вологої техногенної сировини при віброударному грохоченні» впроваджено на кафедрі статистики та теорії ймовірностей в Дніпропетровському національному університеті імені О. Гончара при читанні курсу з теорії ймовірностей, математичної статистики та теорії марковських процесів (акт впровадження від 11.12.2017 р.).

6. «Методику математичного моделювання кінетики грохочення і зневоднення при переробці тонкозернистої вологої сировини» впроваджено в

Дніпропетровському національному університеті імені О. Гончара на кафедрі статистики та теорії ймовірностей в лекційному матеріалі та практичних заняттях зі студентами, як приклади застосування ймовірнісно-статистичних методів, зокрема при моделюванні фізичних процесів грохочення і зневоднення тонкозернистої вологої сировини (акт впровадження від 20.12.2017 р.).

7. «Рекомендації по вибору раціональних режимів процесу класифікації і зневоднення для високоефективної переробки пісків» впроваджено в ПрАТ «Об'єднана гірничо-хімічна компанія» філія «Вільногірський гірничо-металургійний комбінат», де використано при плануванні робіт з переробки відвалів (хвостосховищ) підприємства (акт впровадження від 17.08.2017 р.).

Рекомендації впроваджено в ПрАТ «Новопавлівський гранітний кар'єр» при розробці проекту розвитку сировинної бази кар'єра і вдосконаленні вузлів класифікації та зневоднення (акт впровадження від 08.08.2017 р.).

Рекомендації впроваджено в ТОВ «Любимовський кар'єр», де використано при плануванні робіт по переробці відходів Любимовського кар'єра (акт впровадження від 22.08.2017 р.).

8. «Методику обґрунтування і розрахунку режимних та конструктивних параметрів віброударного грохоту і технологічних показників процесу поділу за крупністю и зневоднення при переробці техногенної сировини» впроваджено в ТОВ «Любимовський гранітний кар'єр». На основі методики визначено раціональні конструктивні та режимні параметри грохота (акт впровадження від 17.07.2020 р.). Випробування модернізованого грохоту ГІЛ-42 з віброударним режимом в умовах Любимовського гранітного кар'єра показали, що в порівнянні з грохотом з базовими параметрами ефективність класифікації зі зневодненням зросла на 23,47% (Акт промислових випробувань від 27.05.2020 р.).

Очікуваний економічний ефект, отриманий за рахунок зменшення вмісту пиловидних і глинистих частинок і підвищення якості продукції, зниження вологості плюсового продукту в середньому до 11-12 %, а також зменшення часу знаходження сировини на поверхні, що просіває, в середньому на 10 %, тобто зниження витрат електроенергії на грохочення, становить 18 585 грн в розрахунку на одну машину (на кар'єрі три грохота ГІЛ-42) (розрахунок очікуваного економічного ефекту від 30.07.2020 р.).

9. Результати роботи також прийняті до використання в проектній практиці ТОВ «Южгіпроруда» (акт впровадження від 07.02.2019 р.).

Метод визначення ймовірності проходження рідини і частинок через чарунки поверхні, що просіває, може бути використано для розрахунку різних машин і апаратів, що мають прохідні отвори співмірні з розміром частинок.

Результати роботи доцільно використовувати підприємствам видобувної галузі промисловості, проектним та науково-дослідним інститутам, які займаються проблемами підвищення ефективності переробки техногенних відходів та зниженню їхньої кількості, а також рекомендується застосовувати при проектуванні устаткування для переробки, при аналізі роботи існуючого устаткування з метою виявлення резервів для його модернізації, при створенні

автоматизованих систем управління процесом зневоднення та розділення за крупністю, в навчальному процесі.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю постановки задач, використанням ефективних апробованих методів їх вирішення та статистично значущим обсягом експериментальних досліджень проведених в лабораторних і промислових умовах, задовільною збіжністю результатів теоретичних і експериментальних досліджень, застосуванням фундаментальних методів теорії ймовірностей, статистичної фізики, теоретичної механіки, адекватністю математичних моделей реальним процесам з розбіжністю теоретичних і експериментальних даних не більше 20% при довірчій ймовірності 0,95, позитивними результатами впровадження в практику наукових досліджень, проектно-конструкторських робіт, гірничопереробних підприємств та навчальний процес.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової проблеми, мети, ідеї, задач досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій, встановленні закономірностей переміщення рідини і частинок крізь шар сировини і через поверхню, що пресіває, з урахуванням їх випадкової природи в залежності від гранулометричного складу сировини, який змінюється, щільності частинок і рідини, параметрів віброударного впливу, у проведенні чисельних експериментів, обробці й аналізі отриманих результатів, розробці методик, рекомендацій, а також у впровадженні результатів роботи. Автор брав безпосередню участь у лабораторних та промислових випробуваннях за сприяння співробітників ІГТМ НАН України і технічного персоналу ООО «Любимовський гранітний кар'єр». Текст дисертації автором написано особисто.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на Міжнародних конференціях, зокрема на Науково-практичній конференції «Потуряєвські Читання» (Україна, м. Дніпропетровськ, 20.01.2011 р., 19.01.2012 р., 18.01.2013 р.; 20 січня 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції зі збагачення корисних копалин (Україна, Запорізька обл., м. Бердянськ, 25-28 травня 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні технології збагачення корисних копалин» (Україна, м. Дніпропетровськ, 21-24 березня 2012 р., 20-22 березня 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Україна, м. Львів, 11-13 жовтня 2011 р.; Україна, м. Полтава, 23-25 квітня 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Форум гірників» (Україна, Дніпропетровськ, НГУ, 3-6 жовтня 2012, 02-05 жовтня 2013, 30 вересня-03 жовтня 2015, 5-8 жовтня 2016, 4-7 жовтня 2017, 11-13 жовтня 2018 р.); Міжнародній конференції «Геотехнічні проблеми розробки родовищ» (м. Дніпро, 26 жовтня 2017 р., 25 жовтня 2018 р., 25 жовтня 2019 р., 29 жовтня 2020 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК» (Україна, м. Кривий Ріг, 24 листопада 2017 р., 24 листопада 2018 р.); International Conference «Essays of mining science and practice» (Ukraine, Dnipro, Conference Hall of the Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of

Sciences of Ukraine, 09 July 2019); Міжнародній науково-практичній конференції «Сатпаєвські читання» (Казахстан, м. Алмати, 2020).

Публікації. Основні наукові положення та результати дисертації опубліковані в 63 наукових працях, з них: 46 наукових статей у фахових виданнях, 6 з яких входять до наукометричних баз та надруковані у іноземних виданнях, 10 матеріалів конференцій і тез доповідей, 7 патентів, 25 робіт опубліковано без співавторів.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел з 259 найменувань на 32 стор., містить 554 сторінок машинописного тексту, включає 57 таблиць та 124 малюнка, з яких 45 на окремих сторінках (основна частина 300 сторінок), а також 12 додатків на 127 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі виконано аналіз запасів техногенних відходів і проблеми їх переробки, а також стану теорії і практики зневоднення і розділення за крупністю мінеральної сировини, сформульовано проблему, ідею, мету і задачі досліджень.

Одна з причин, по якій стримується підвищення ефективності процесу зневоднення та розділення за крупністю, велика різноманітність сировини, що переробляється, з різними фізико-механічними властивостями і гранулометричним складом, що вимагає індивідуального підходу у кожному конкретному випадку. Якісні характеристики сировини відсутні або носять розрізнений характер.

Вибір раціональної технології та обладнання для переробки техногенної сировини необхідно проводити з урахуванням її властивостей: гранулометричний склад, кількість корисного компоненту (наприклад, кількість вуглецю в класах) і відходів (кількість золи в класах), вологість, наявність домішок, що грудкуються, (наприклад, глини), крупність розділення та інші фактори. Дія вологості в основному визначається наявністю капілярної вологи.

Вплив зазначених чинників посилюється зі зменшенням крупності розділення і збільшенням вмісту дрібних (тонких) частинок, тому що сировина, сформована з них, утримує значну кількість води завдяки високорозвиненій поверхні частинок, що активно взаємодіють з водою, і чинним капілярним силам. Пористість і проникність цих середовищ зазвичай низька. Зі зменшенням крупності частинок збільшується енергія зв'язку рідини з поверхнею твердого, тобто опір протіканню води у поровому просторі. Чим більше ця енергія, тим важче рідину відокремити.

Всі ці фактори перешкоджають зневодненню та розділенню за крупністю, ускладнюють проходження рідини і дрібних частинок через чарунки поверхні, що просіває, в результаті чого не вдається знизити вологість кінцевого продукту до кондиційних норм.

Для вибору раціональної технології та обладнання для переробки і отримання більш високих технологічних показників необхідно у кожному

конкретному випадку досліджувати характеристики сировини, які на даний час вивчені недостатньо.

Ще одна з причин низької ефективності – недосконалість технологій, пов'язаних зі зневодненням та розділенням за крупністю тонких класів.

Серед факторів, що впливають на ефективність цього процесу, слід зазначити наступне:

- зневоднення сировини відбувається в результаті проходження рідини через її шар і чарунки поверхні, що просіває. При розділенні по класу, меншому, ніж капілярна постійна, цьому процесу перешкоджають сили поверхневого натягу (капілярні сили), що діють на кордоні фаз і які можна подолати за рахунок динамічного впливу;

- матеріал, який знаходиться на поверхні, що просіває, також знижує ефективність впливу на частинки і воду, які знаходяться в її чарунках.

Засоби підвищення ефективності зневоднення та розділення за крупністю:

- розширення спектру дії на поверхню, що просіває, і сировину, яка переробляється. Широкий спектр забезпечує збудження власних коливань частинок, рідини і поверхні. Для цих цілей, як правило, використовують удар безпосередньо по поверхні, що просіває, або через проміжний елемент;

- розширення спектру дії на поверхню, коли сировина не контактує з нею, тобто на етапі її польоту в результаті удару;

- при проектуванні або адаптації устаткування для конкретного виду сировини необхідно мати можливість вибору і розрахунку його раціональних конструктивних і режимних параметрів;

- розширення можливості оперативного управління, підвищення стабільності роботи, автоматичного управління і при цьому простота конструкції.

Аналіз технічних рішень по зневодненню продуктів збагачення на вібраційних грохотах і області їх використання показав, що для подальшого підвищення ефективності необхідно інтенсифікувати розпушення сировини і режим поверхні, що просіває, на етапі польоту сировини шляхом повідомлення їй додаткових прискорень без додаткового підведення потужності. Це призведе до руйнування водної плівки в чарунках поверхні, обумовленої поверхневим натягом та в'язкістю рідини, і капілярно-стиків між частинками, що буде сприяти вільному проходженню тонких твердих частинок крізь поверхню разом з рідиною і забезпечувати високу ефективність відділення тонких частинок і зневоднення.

Значний внесок у створення наукових основ розділення за крупністю та зневоднення при вібраційному впливі, а також в розробку і впровадження нових конструкцій грохотів зробили вчені та інженери таких інститутів і організацій, як Гіпромашзбагачення (м Дніпро), Гіпромашвуглезбагачення (м. Луганськ), ОП «Вуглезбагачення» ДП «НТЦ «Вуглеіновація» (м. Дніпро), ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України, НТУ «Дніпровська політехніка», Національна металургійна академія України (НМетАУ), Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара; зарубіжні інститути: Механобр, ВНІнеруд і МДІ (Росія); фірми: «Шенк» і «Уде» (Германія), «Репіфайн» і «Деррік» (США), «Фурукава» (Японія), «Круш» (Ізраїль) та ін.

Проведений аналіз в цій області показав, що для подолання сил поверхневого натягу і підвищення ефективності зневоднення і розділення за крупністю представляється перспективним віброударний вплив безпосередньо по поверхні, що просіває, або через проміжний елемент. При вивченні цього способу необхідно звернути увагу на наступні характеристики: очищення чарунок поверхні на етапі, коли сировина, яка переробляється, не контактує з нею, розширення спектра дії на матеріал і поверхню, що просіває, ресурсу її роботи, можливості оперативного управління, підвищення стабільності роботи, автоматичного управління і при цьому простоту конструкції устаткування.

Для визначення раціональних параметрів процесу зневоднення необхідний облік впливу капілярних сил, щоб описати рух рідини через шар сировини і чарунки поверхні, що просіває. Нинішній стан теорії не враховує ряд важливих особливостей процесу зневоднення. Не визначено умови проходження рідини через поверхню. Недостатньо досліджено рівновагу рідини в чарунці поверхні, яка просіває, щоб визначити мінімальний розмір чарунки, при якому рідина не утримується в чарунці навіть при відсутності віброзбудження, а також виявити умови, які дозволяють зменшити розмір чарунок. В області значень розмірів чарунок, при яких рідина утримується в них в статиці, не встановлено режими віброзбудження, які забезпечать проходження через них рідини. Не вивчено закономірності зміни вологості сировини в процесі віброударної дії з урахуванням її властивостей. Це особливо важливо, коли одночасно зі зневодненням потрібно ефективно розділення за крупністю. Не встановлено які потрібні питомі енергетичні витрати на видалення рідини. Відсутній математичний опис, який комплексно описує кінетику зневоднення та розділення за крупністю і їх взаємний вплив. Це знижує точність аналізу і прогнозу процесу, стримує подальше вдосконалення процесу віброударного зневоднення і розділення за крупністю.

Математичні труднощі, пов'язані з аналізом сил, що діють на капілярно-стикувальні містки у вібраційному полі, можуть бути подолані на основі енергетичного підходу.

Для моделювання видалення капілярно-стикової вологи запропоновано застосування стохастичного підходу.

У другому розділі встановлено закономірності проходження рідини через чарунки поверхні, що просіває, під впливом різних видів навантаження, обґрунтовано вибір розміру чарунки поверхні з точки зору отримання необхідного товарного продукту і можливості проходження через неї води. Виконано експериментальні дослідження та математичний опис закономірностей зміни кількості води, що залишилася на поверхні від амплітуди і частоти віброзбудження.

Для цього вивчено властивості і обґрунтовано мінімальну граничну крупність розділення для максимального вилучення корисного компоненту з техногенних відходів з необхідною якістю.

На основі експериментів встановлено закономірності кількості і розподілу корисного компонента і відходів у класах крупності.

Для різних матеріалів існує мінімальна гранична крупність розділення. Різноманіття сировини і його характеристик не дозволяє провести вивчення його властивостей в межах однієї роботи, тому досліджувалися відходи видобутку граніту (відсів) і вугільні шлами, запаси яких оцінюються мільйонами тонн.

Для ряду гранітних кар'єрів виконано дослідження розподілу часток відсіву по класах крупності. За нормативними вимогами для отримання товарного продукту з відсіву необхідно відокремити пил і глину (частки розміром менше 0,16 мм), кількість яких в відсівах різних кар'єрів коливається в межах від 8 до 20%. Для цього використовують тонке розділення за граничною крупністю 0,16 мм з промиванням, після якого потрібно зневоднення, тому що присутність води в продуктах є баластом при їх перевезеннях. Надмірна кількість води сприяє змерзаємості сировини в зимових умовах, викликає великі труднощі при вивантаженні їх з транспорту. Тому вміст вологи в багатьох продуктах обмежений ДСТ або тимчасовими нормами.

Дослідження вугільних шламів ряду накопичувачів показали, що, в основному, у міру зменшення крупності вміст зольної частини зростає, а максимум знаходиться в класах розміром менше 0,2 мм. Тому для отримання з високозольних шламів продукту з високим вмістом вуглецю при нормативній зольності потрібно тонке розділення по класу 0,1-0,2 мм, при цьому необхідно знизити вологість продукту на поверхні, яка просіває, (плюсовий продукт) до кондиційних норм. Вугільні продукти при перевезенні транспортом повинні містити вологи не більше 5% в зимовий час і 8-10% у літній час. Оскільки у продукті який пройшов через чарунки поверхні, що просіває, (мінусовий продукт) все ж залишається значна кількість вуглецю, він також може мати споживчий попит, наприклад, в якості водовугільного палива для транспортування якого потрібна вода.

На основі досліджень і аналізу властивостей сировини створено спосіб переробки шламів з накопичувачів (отримано патент) і метод оцінки якості шламів для отримання низькозольного вугільного концентрату з високозольного шламу шляхом тонкого розділення з вибором і аналітичним розрахунком зони класів крупності, які мають високий вміст вугілля.

Залежно від властивостей як відсіву, так і шламів ефективне зневоднення і розділення за крупністю повинні забезпечуватися як для вузьких, так і широких класів крупності.

Для вибору раціональних параметрів при переробці техногенної сировини необхідно визначити і обґрунтувати не тільки мінімальну граничну крупність розділення, але і мінімальний діаметр чарунки поверхні через який буде проходити вода.

Тому для вивчення технічних можливостей зневоднення визначалися умови рівноважного стану рідини в чарунках різних поверхонь і режими, які забезпечують проходження через них рідини.

В результаті чисельного рішення рівнянь, що описують рівновагу стовпа рідини, який утримується капілярними силами в чарунці поверхні, що просіває, проаналізовано вплив геометрії чарунки і змочуваності матеріалу поверхні на кількість утримуваної рідини. Визначено граничні розміри круглої чарунки і

щілинної, при яких на поверхні утримується шар води заданої висоти. Встановлено, що поверхня з щілинними чарунками дозволяє розділяти сировину за меншим класу крупності.

Визначено критерії подібності. Для розглянутого випадку найбільш важливим є критерій Π , який характеризує відношення кінетичної енергії об'єму рідини з характерним розміром l_0 до енергії утворення нової міжфазної поверхні, який далі позначено $E^*(l)$ (критерій відношення енергій). Тут в дужках вказано значення характерного розміру, при якому обчислюється критерій.

$$\Pi = l_0 v^2 \rho / \sigma,$$

де l_0 – характерний розмір (м), $v = A\omega$ – амплітуда віброшвидкості, ρ – щільність рідини (кг/м³), σ – коефіцієнт поверхневого натягу (н/м).

З огляду на фізичний сенс критерію маємо, що рідина пройде через чарунку при $E^* > 1$.

З урахуванням подібності обґрунтовано параметри та створено лабораторну модель віброударного грохоту, загальний вигляд якої приведено на рис. 1.

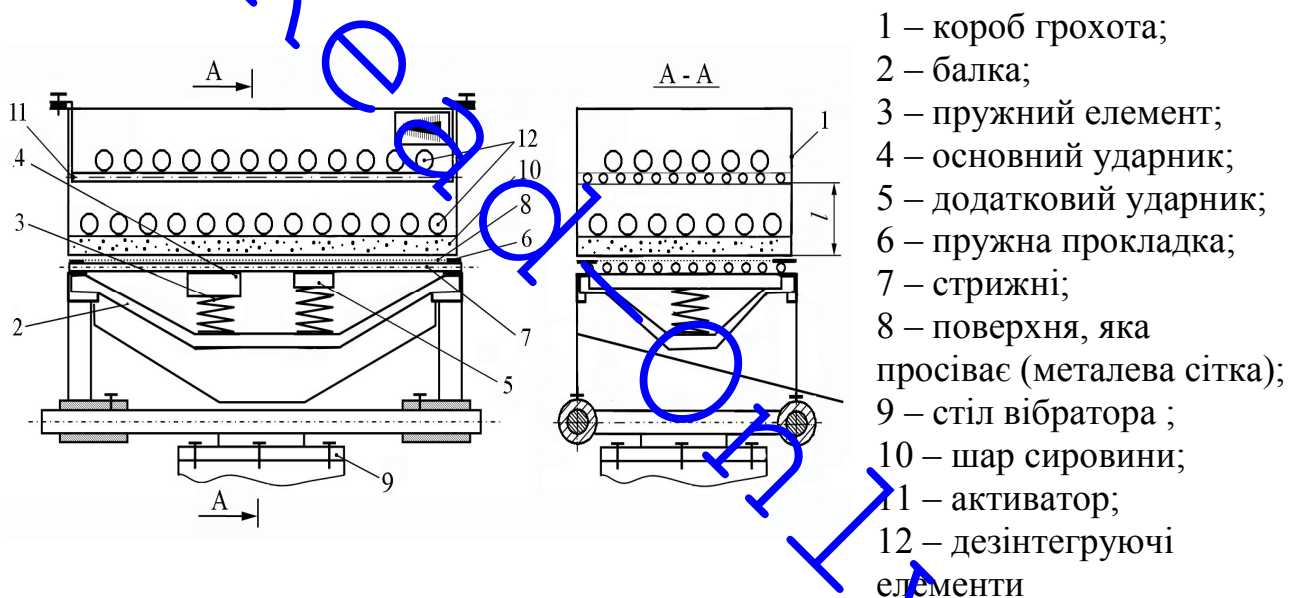


Рисунок 1 – Модель віброударного грохоту

Залежно від розв'язуваної задачі на моделі змінювалися різні елементи.

В лабораторних умовах на моделі грохоту при гармонійному і віброударному збудженні поверхні, що просіває, досліджено вплив конструкції та режимів віброзбудження на інтенсивність проходження рідини через чарунки поверхні, яка характеризувалася відносною масою води (%), що залишилася на поверхні за час досягнення стаціонарного значення. Використовувалися сталеві і поліамідні поверхні з квадратними чарунками розміром 0,63, 0,1 і 0,05 мм.

При дослідженнях гармонійного впливу на столі вібратора кріпилася модель вібраційного грохоту, яка складалася з підстави, до якої приварено дві паралельні направляючі, двох кронштейнів, ємності з прозорими вікнами для початкового продукту і лотка для транспортування мінусового продукту. В утримувачах кронштейнів встановлені стрічки-струни, необхідний натяг яких забезпечується за

рахунок переміщення кронштейнів по направляючих. Над стрічками-струнами змонтовано поверхню, що просіває, у вигляді підтримуючої і калібрувальної сітки. Амплітуда і частота віброзбудження замірялися за допомогою оптичного клина і частотоміра. Переміщення струн і сіток визначалися за допомогою шкали і стробоскопа.

Для створення віброударного впливу на моделі грохоту замість стрічок-струн була встановлена балка з пружним елементом і ударником, а під поверхнею, що просіває, на пружних прокладках змонтовані стрижні. При гармонійному збудженні підстави на ударник діє змінна сила інерції, що призводить до періодичних розривів контакту ударника зі стрижнями. В результаті цього генеруються ударні імпульси, які через стрижні б передаються поверхні, що просіває.

Поліамідна поверхня в порівнянні зі сталеву менш ефективно забезпечує проходження води, хоча у неї така перевага, як дешевизна.

Віброударний вплив в порівнянні з гармонійним інтенсифікує проходження води до 55 %.

На основі аналізу експериментальних результатів отримано регресійні рівняння (1-7), які описують зміну кількості води, що залишилася на різних поверхнях, які просівають, від амплітуди і частоти при гармонійному і віброударному збудженні.

$$W_c(C-0,05-Об)=183,0312 - 3,0499v - 8,4766A - 50,6683tip + 0,0235v^2 + 14,3207tip^2. \quad (1)$$

$$W_c(C-0,63-Об) = 131,7240 - 2,1456v - 8,8807A \quad (2)$$

$$W_c(C-0,63) = 231,5299 + 2,2678v - 7,9030A - 43,7670\sqrt{v} \quad (3)$$

$$W_c(C-0,63-C) = 230,44 - 0,8571v - 7,5899A - 42,8183 \ln v \quad (4)$$

$$W_c(П-0,05-П-C) = 119,6722 - 0,8817v - 0,4131vA \quad (5)$$

$$W_c(Об-0,05-Ст-Уд) = 63,12977 - 2,91871v + 54,73479tip - 0,70727v \cdot tip - 6,25279A \cdot tip + 0,0360v^2 \quad (6)$$

$$W_c(Об-0,1-Ст-Уд) = 183,9420 - 12,3469A - 18,8372\sqrt{v}, \quad (7)$$

де v – циклічна частота (Гц), A – амплітуда, мм, tip – цілочисельна категоризована змінна, яка відповідно приймає значення 1, 2 і 3.

В дужках – позначення конструкції поверхні, яка просіває: С – сталева сітка, П – поліамідна сітка, 0,63; 0,1; 0,05 – розмір l_0 в міліметрах квадратного боку чарунки, Об – узагальнена для кількох поверхонь, С (після розміру чарунки) – річки-струни, П (після розміру чарунки) – підтримуюча сітка, Ст і Уд – скорочення від слів стрижні і ударник.

Для рівнянь 1-7 коефіцієнт детермінації R^2 складав від 0,85 до 0,98.

Ці результати – одна зі складових у механізмі зневоднення техногенної сировини, з урахуванням якої створено методику визначення динамічних параметрів, які забезпечують очистку чарунок поверхні, що просіває.

Віброударний вплив забезпечує більш високі результати очищення чарунок від рідини, яка утримується в них силами поверхневого натягу. Для підвищення ефективності зневоднення очищення чарунок необхідно проводити, коли сировина

не контактує з поверхнею, тобто на етапі її польоту в результаті удару. Тому перспективним представляється віброударний вплив з «подвійними ударами».

У третьому розділі встановлено закономірності переміщення рідини крізь шар сировини і через поверхню, що просіває, виконано математичний опис проходження рідини крізь шар техногенної сировини при віброударному впливі для різних матеріалів і експериментальну перевірку математичної моделі зневоднення при віброударному впливі, встановлено адекватність теорії і експериментів.

Для визначення параметрів віброударного впливу з «подвійними ударами» розроблено і обґрунтовано математичну модель віброударного грохоту, яка описує рух поверхні, що просіває, при збудженні її двома ударниками. Методом Монте-Карло на математичній моделі віброударного грохоту виконано чисельні експерименти і встановлено область стійких режимів, при яких здійснюються «подвійні удари», та конструктивні і режимні параметри грохоту: маси короба, поверхні, що просіває, і ударників, вертикального переміщення, жорсткості пружних елементів, амплітуди сили, частоти, часу, швидкості після і до удару, кількості ударів. Це дозволило розрахувати і створити модель віброударного грохоту з «подвійними ударами».

При використанні «подвійних ударів» на моделі грохоту (рис. 1) встановлювався додатковий ударник з жорсткістю пружного елемента відмінною від жорсткості пружного елемента основного ударника. Додатково для інтенсифікації розпушення сировини використовувалися різні дезінтегруючі елементи.

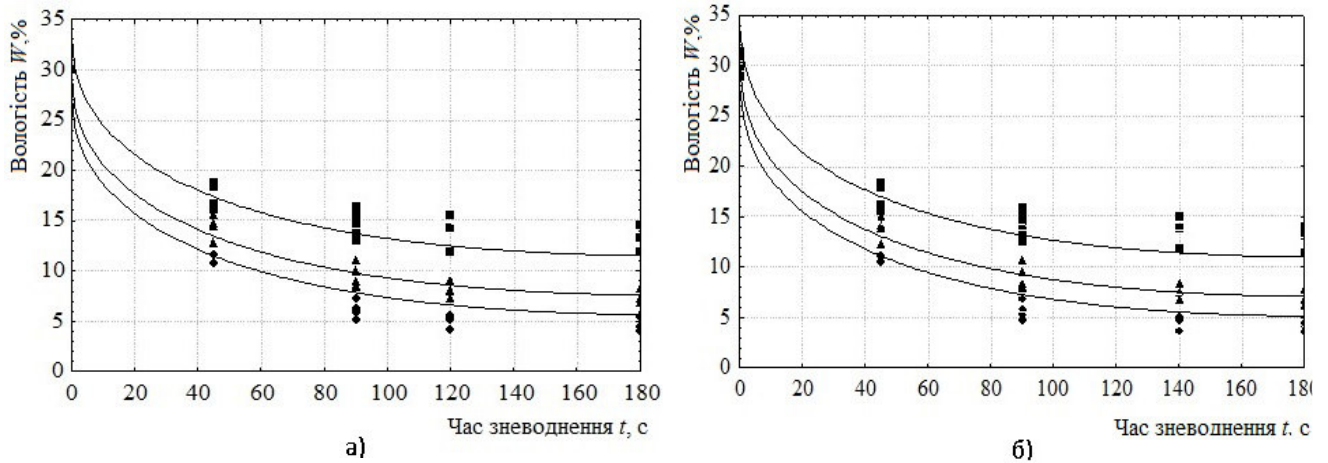
При гармонійному збудженні підстави на ударники діє змінна сила інерції, що призводить до періодичних розривів контакту ударників зі стрижнями. В результаті цього генеруються ударні імпульси, які через стрижні передаються поверхні, що просіває, матеріалу, що переробляється, і дезінтегруючим елементам.

Експериментальна перевірка ефективності зневоднення при розрахованих параметрах проводилась в лабораторних умовах на моделі віброударного грохоту, де було досліджено режими і технологічні показники зневоднення техногенної сировини вузьких і широких класів крупності. Використовувалися різні поверхні з чарунками 0,63; 0,2, 0,1 та 0,05 мм.

Досліджено кінетику зневоднення при віброударному впливі. Для узагальнення експериментальних результатів на основі методу найменших квадратів отримано регресійні рівняння, які описують зміни в часі вологості продукту, який знаходиться на поверхні, що просіває, в залежності від питомого навантаження. Результати в графічному вигляді представлено на рис. 2.

Розрахунок параметрів віброударного впливу на поверхню, що просіває, (режими з «подвійними ударами») на математичній моделі дозволив при зневодненні матеріалу, який містить дрібні класи крупності, знизити вологу до 12-14 %.

Експериментальним методом для різних класів крупності визначено умови, при яких забезпечується максимальне зниження вологості. Вивчено вплив питомого навантаження, конструктивних і режимних параметрів на інтенсивність зневоднення.



- а) амплітуда 6 мм, частота 18 Гц; б) амплітуда 9 мм, частота 20 Гц;
 ●, ▲ і ■ – експеримент (питома навантаження 6,25 кг/м², 12,5 кг/м² і 25 кг/м²);
 — – рівняння регресії

Рисунок 2 – Залежність вологості продукту, що знаходиться на поверхні, яка просіває, від часу і навантаження при різних режимах збудження

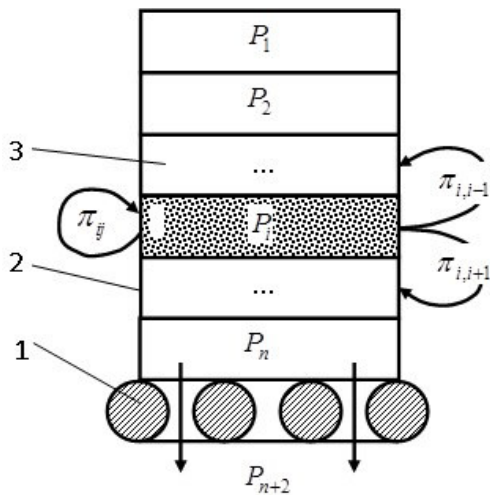
Для подальшого підвищення ефективності зневоднення використовувалися різні дезінтегруючі елементи. Встановлено, що використання «подвійних ударів» і дезінтегруючих елементів у вигляді еліпсоїдів обертання дозволяє зневоднювати матеріал, що містить дрібні класи крупності, з 30% до 10-12%. Ці дані можна порівняти з показниками вологості, які отримують при зневодненні матеріалів на центрифугах.

На основі отриманих результатів розроблено і запатентовано нові способи розділення за крупністю та зневоднення з «подвійними ударами» і дезінтегруючими елементами (отримано патенти).

Для вибору раціональних параметрів процесу видалення рідини, що знаходиться в капілярно-стикувальних містках між частинками, необхідно мати можливість їх обчислення.

На подолання частинками сил, що діють з боку рідини, впливають такі чинники: геометричні параметри частки, її щільність, поверхневий натяг, щільність і в'язкість рідини; кут змочування; амплітуда і частота віброзбудження. Тому при зневодненні техногенної сировини необхідно враховувати ці властивості.

З урахуванням вищеписаних властивостей виконано математичне моделювання. Кінетика зневоднення моделювалася дискретним марковским процесом з дискретними станами. У сировині, що переробляється, і яка знаходиться на поверхні, що просіває, 1, виділявся контрольний об'єм 2. Для цього проводять дві площини, перпендикулярні до поверхні 1, причому одну площину проводять через її початок, а другу – на відстані l від неї. Частина об'єму сировини обмежену цими площинами, називають контрольним об'ємом, який по висоті поділявся на n елементарних шарів 3 (рис. 3).



- 1 – поверхня, що просіває;
 2 – контрольний об'єм;
 3 – елементарний шар

Рисунок 3 – Розрахункова схема процесу зневоднення

Умовно дезінтегруючі елементи (кулі) і простір під поверхнею, що просіває, також названі елементарними шарами, пронумерованими зверху вниз (дезінтегруючі елементи – шар номер 1, а простір під поверхнею, що просіває, – $n + 2$).

Розподіл рідини по елементарним шарам описувався вектором ймовірностей станів \bar{P} , елементи якого – ймовірності знаходження рідини у i -му шарі. Під дією вібрації рідина з ймовірністю π_{ij} переходить з i -го елементарного шару в j -й.

Еволюція вектора станів описується виразом

$$\bar{P}(k) = \bar{P}(0) \|\pi_{ij}\|^k \quad (8)$$

де $\bar{P}(0)$ і $\bar{P}(k)$ – вектор станів на початку процесу зневоднення і після k взаємодій сировини з поверхнею, що просіває,

$\|\pi_{ij}\|$ – стохастична матриця.

Стосовно до зневоднення техногенної сировини шаром, висота якого не більше десяти діаметрів великих частинок, стохастична матриця має вигляд

$$\left\| \begin{array}{cccccccc} 1-p_h & p_h & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ q_h & 1-p-q_h & p & 0 & \dots & \dots & 0 \\ q_h & q & 1-p-q-q_h & p & 0 & \dots & 0 \\ \dots & 0 & q & 1-p-q-q_h & p & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_h & \dots & \dots & \dots & \dots & 1-P_s-q_h & P_s & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 \end{array} \right\| \quad (9)$$

де p і q – ймовірність переходу рідини вниз і верх по висоті шару сировини, що переробляється;

p_h – ймовірності переходу рідини з дезінтегруючих елементів (ДЕ) в елементарні шари;

q_h – ймовірності переходу рідини з елементарних шарів на дезінтегруючі елементи;

P_s – ймовірність проходження рідини через чарунки поверхні, що просіває.

Розмір матриці $R_m = (n + 2) \cdot (n + 2)$.

Елементи вектора стану і матриці повинні задовольняти умовам нормування

$$\sum_{i=1}^{n+2} P_i = 1, \quad \sum_{j=1}^{n+2} \pi_{ij} = 1. \quad (10)$$

Для визначення питомої енергії, що витрачається на видалення рідини, обчислювалися площа і об'єм меніску рідини, що знаходиться між частинками.

Енергоємність видалення вологи характеризувалася енергією, що припадає на одиницю маси меніска

$$E_u = E_s / (\rho V_m), \quad (11)$$

де $E_s = 2\sigma (S_1 + S_2)$, S_1 і S_2 – площа контактів рідини з малою і великою частинками (м^2), ρ – щільність води ($\text{кг}/\text{м}^3$), σ – коефіцієнт поверхневого натягу води на кордоні з повітрям ($\text{н}/\text{м}$), V_m – об'єм меніска (м^3).

Зі зменшенням кутового розміру меніска питома енергія на утворення нової міжфазної поверхні збільшується. Це явище характеризувалось коефіцієнтом збільшення питомої енергії

$$k_E = E_s / E_s(45), \quad (12)$$

де $E_s(45)$ – питома енергія при кутовому розмірі меніска 45° .

Чим менше кутовий розмір меніска (іншими словами, чим менше вологість), тим більша питома енергія необхідна для видалення рідини.

Залежність (11) дозволяє проаналізувати вплив різних чинників на витрати питомої енергії. Так, для меніска з кутовим розміром 5° в порівнянні з 45° питома енергія при крайових кутах 0° , 20° і 40° відповідно зростає більш ніж в 37, 50 і 60 разів.

Виконана оцінка витрат енергії, необхідної для видалення рідини з техногенної сировини, дозволяє визначити параметри віброзбудження, які забезпечують цю енергію.

Для того, щоб рідина рухалася вниз необхідно дотримання геометричних і енергетичних умов. Ймовірність переходу рідини вниз за геометричними умовами

$$P_g = P_{nn} P_v P_f \quad (13)$$

де P_{nn} – ймовірність того, що три частки знаходяться в елементарному об'ємі;

P_v – ймовірність орієнтації елементарного об'єму вниз; P_f – ймовірність того, що імпульс діє в цьому ж напрямку.

Для переходу рідини вниз крім виконання геометричних умов необхідно, щоб виконувалася і енергетична умова: кінетична енергія, що повідомляється меніску рідини, повинна перевищувати енергію утворення нової між фазної поверхні

$$E_s = \xi_3 M_m v_m / 2, \quad (14)$$

де ξ_3 – емпіричний коефіцієнт, що враховує перевищення кінетичної енергії;

M_m – маса меніска (кг); v_m – швидкість ($\text{м}/\text{с}$).

Імовірність виконання енергетичної умови

$$P_E = 1 - \int_0^{v_m} f(v) dv. \quad (15)$$

Імовірність переходу рідини вниз

$$p = P_g P_E \quad (16)$$

Імовірність переходу рідини вгору

$$q = \xi_4 p, \quad (17)$$

де ξ_4 – емпіричний коефіцієнт.

Імовірність залишитися рідині на поверхні, що просіває

$$P_n = (1 - P_s)^k \quad (18)$$

де P_s – ймовірність проходження рідини через чарунки поверхні.

Імовірність P_n визначалася експериментально. Кількість кроків визначалася за формулою

$$k = j_T f t,$$

де f – частота (Гц); j_T – кратність падінь сировини за період вібротранспортування; t – час зневоднення (с).

Вирішуючи рівняння (17) щодо невідомої ймовірності, отримано

$$P_n = 1 - \exp(\ln P_n / k) \quad (19)$$

Вперше математично описано процес видалення рідини, що знаходиться в капілярно-стикувальних містках між частинками. Це досягнуто завдяки моделюванню переходу рідини по висоті шару дискретним марковським процесом з дискретними станами. Математично описано геометричні та енергетичні умови, при яких рідина переміщається між частинками. Визначено питому енергію, що витрачається на видалення рідини.

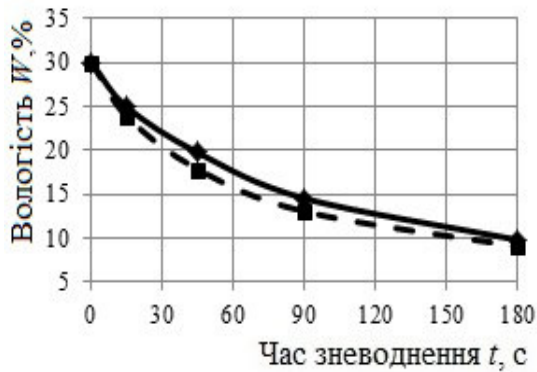
Чисельне моделювання дозволило визначити раціональні конструктивні і динамічні параметри, при яких досягаються необхідні технологічні показники зневоднення.

Експериментальна перевірка ефективності зневоднення за допомогою віброударного впливу проводилася на моделі віброударного грохоту (рис. 1). В якості поверхні, що просіває, використовувалися сталеві сітки з квадратними отворами 0,63, 0,2 і 0,1 мм. Дослідження виконано на гранітному відсіві крупністю + 0,4-1 мм; + 0-0,4 мм і + 0-10 мм з вмістом 11,8% класу 0,05 мм і вугільних шламах з розміром часток + 0-10 мм і вмістом класу 0-0,05 до 15%.

Для інтенсифікації процесу зневоднення, за рахунок руйнування грудок злиплої сировини, використовувалися режими з «поодинокими» і «подвійними ударами», а також великі частки матеріалу і дезінтегруючі елементи різної форми і розмірів.

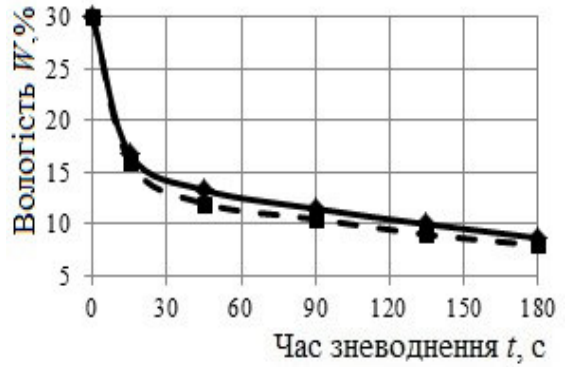
Експериментально досліджено кінетику видалення капілярно-стикової води при віброударному зневодненні матеріалів вузьких і широких спектрів крупності (вологість початкового продукту 30%) на поверхні, що просіває, з чарунками 0,1 мм при різних режимах і питомих навантаженнях по живленню.

Результати розрахунків і експериментів представлено на рис. 4.



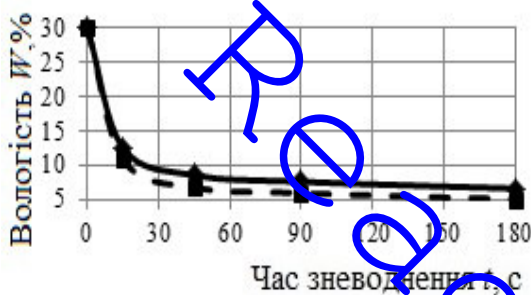
—◆— експеримент —■— розрахунок

а) «подвійні удари», ДЕ – кулі, руда,
2 шару, $f = 20$ Гц, $A = 9$ мм;
 $q = 12,5$ кг/м²; $d = +0-0.4$ мм



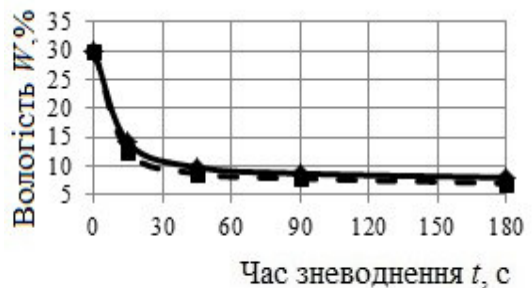
—◆— експеримент —■— розрахунок

б) «подвійні удари», ДЕ – еліпсоїд
обертання, галька, 2 шару, $f = 20$ Гц,
 $A = 9$ мм; $q = 12,5$ кг/м²; $d = +0-0.4$ мм



—◆— експеримент —■— розрахунок

в) «подвійні удари», ДЕ – металеві кулі,
 $f = 32,5$ Гц, $A = 2,5$ мм; $q = 12,5$ кг/м²;
 $d = +0-10$ мм



—◆— експеримент —■— розрахунок

г) «подвійні удари», ДЕ – металеві кулі;
 $f = 32,5$ Гц, $A = 2,5$ мм; $q = 12,5$ кг/м²;
 $d = +0-10$ мм

Рисунок 4 – Залежність вологості W продукту на поверхні, що просіває, від часу t , частоти f і амплітуди A віброзбудження, питомих навантажень по живленню q при зневодненні матеріалу крупністю d за допомогою «подвійних ударів» і різних дезінтегруючих елементів

З графіків видно, що розраховані параметри режимів дозволили при зневодненні матеріалів вузького і широкого класу крупності знизити вологість продукту на поверхні, що просіває, з 30 до 7-10%, а результати чисельного моделювання та експериментів наведені на графіках відрізняються не більше, ніж на 20%, тобто математична модель з довірчою ймовірністю 0,95 адекватно описує експериментальні результати.

Таким чином, математичне моделювання переходу рідини по висоті шару дискретним марковским процесом з дискретними станами дозволило визначити раціональні параметри процесу зневоднення для сировини, яка містить дрібні класи крупності, і знизити вологу до 7-10%.

На основі цих результатів для сировини різної крупності розроблено різні схеми зневоднення.

У четвертому розділі приведені результати розробки математичної моделі і встановлені закономірності кінетики зневоднення та розділення за крупністю

техногенної сировини при віброударному впливі. Виконано експериментальні дослідження зневоднення і розділення за крупністю різних матеріалів. Встановлено адекватність теорії і експериментів.

Кінетика зневоднення та розділення за крупністю моделювалася дискретним марковским процесом з дискретними станами. Розрахункова схема процесу розділення за крупністю зі зневодненням для часток має такий же вигляд, як і для рідини (див. рис. 3). Тільки в ній ймовірності переходів для рідини позначено значком *.

Початкова висота контрольного об'єму дорівнює

$$H_1 = Q / (3600 \rho V_1 b_c), \quad (20)$$

де Q – масова продуктивність по живленню (кг/с); ρ – насипна щільність (кг/м³); V_1 – швидкість вібротранспортування при висоті H_1 (м/с); b_c – ширина поверхні, що просіває (м).

Контрольний об'єм по висоті поділяють на n елементарних шарів з висотою $h = H_1/n$. Умовно кулі (дезінтегруючі елементи) і простір під поверхнею називають елементарними шарами. Кожному елементарному шару привласнюють індекс i . Відлік ведуть зверху вниз (простір під поверхнею, що просіває, шар $n+1$, а кулі – $n+2$).

Розподіл часток класу крупності d (дрібні частинки) по висоті контрольного об'єму характеризують $n+2$ -мірним вектором ймовірностей станів $\bar{P}(t)$, компонентами якого є ймовірності $P_i = M_i/M$, де M_i і M – відповідно маси (кг) дрібних частинок у i -ому шарі і в контрольному об'ємі.

Під дією вібрації частки з ймовірністю π_{ij} переходять з i -го елементарного шару в j -тий.

Еволюція вектора станів для частинок описується виразом

$$\bar{P}(k) = \bar{P}(0) \|\pi_{ij}\|^k \quad (21)$$

де $\bar{P}(0)$ і $\bar{P}(k)$ – вектор станів на початку процесу розділення за крупністю і після k взаємодій сировини з поверхнею, що просіває;

$\|\pi_{ij}\|$ – стохастична матриця.

Стосовно до розділення за крупністю сировини шаром, висота якого не більше десяти діаметрів великих часток стохастична матриця має вигляд:

$$\left\| \begin{array}{cccccccc} 1-p-p_h & p & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & p_h \\ q & 1-q-p-p_h & p & 0 & \dots & \dots & \dots & p_h \\ 0 & q & 1-q-p-p_h & p & 0 & \dots & \dots & p_h \\ 0 & 0 & q & 1-q-p-p_h & p & 0 & \dots & p_h \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 1-P_s-p_h & P_s & p_h \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & P_s & 1 \\ q_h & q_h & q_h & \dots & \dots & 0 & 0 & (1-(n-2)q_h) \end{array} \right\| \quad (22)$$

де p і q – ймовірність переходу часток вниз і верх по висоті шару сировини, що переробляється;

p_h – ймовірності переходу часток з дезінтегруючих елементів в елементарні шари;

q_h – ймовірності переходу часток з елементарних шарів на дезінтегруючі елементи;

P_s – ймовірність проходження часток через чарунки поверхні, що просіває.

Також під дією вібрації рідина з ймовірністю π_{ij}^* переходить з i -го елементарного шару в j -тий.

Еволюція вектора станів для рідини описується виразом

$$\bar{P}^*(k) = \bar{P}^*(0) \left\| \pi_{ij}^* \right\|^k, \quad (23)$$

де $\bar{P}^*(0)$ і $\bar{P}^*(k)$ – вектор станів для рідини на початку процесу розділення і після k взаємодій сировини, що переробляється, з поверхнею;

$\left\| \pi_{ij}^* \right\|$ – стохастична матриця для рідини.

Стохастична матриця для рідини має такий же вигляд, як і матриця (22), тільки в ній ймовірності переходів для частинок необхідно замінити на ймовірності переходів рідини, які позначено значком *. Також необхідно дотримання умови нормування (10)

Елементи стохастичних матриць визначаються відомими методами.

Відомо, що перехід частинок і рідини можливий тільки за умов:

$$E_k \geq E_s, \quad E_k^* \geq E_s^*, \quad (24)$$

де E_k і E_k^* – кінетична енергія частинки і рідини;

E_s і E_s^* – енергія, необхідна для утворення нової міжфазної поверхні.

В процесі розділення змінюється гранулометричний склад, кількість рідини і висота шару сировини.

Формула (20) дозволяє визначити зміну розподілу дрібних частинок по товщині сировини, що переробляється, а також ймовірність $P_{n+1}(k)$ їх переходу під поверхню, що просіває, яку позначають $P_-(k)$. Знаючи $P_-(k)$, обчислюють масу матеріалу, який пройшов під поверхню, що просіває

$$M_- = P_-(k)M \quad (25)$$

При цьому висота контрольного об'єму зменшиться на таку величину

$$\Delta = \chi_k P_-(k)M / (b_c l_k \rho), \quad (26)$$

де χ_k – емпіричний коефіцієнт, що залежить від гранулометричного складу сировини, що переробляється

Безперервну зміну висоти контрольного об'єму моделюють дискретною зміною з кроком рівним товщині елементарного шару h . Нумерацію наступних елементарних шарів зберігають, а вважають, що по черзі усуваються шари 1, 2 і т. д. При цьому висоту контрольного об'єму H , швидкість вібротранспортування V , кількість кроків k і час t_h , через який відбувається наступний крок, записують з

індексом m , рівним номеру верхнього елементарного шару, тобто H_m, V_m, k_m , і $t_{h,m}$. Вектор ймовірностей станів і ймовірності переходів для H_m позначають так: $\bar{P}(k,m)$ і $\pi_{ij}(m)$.

На початку процесу розділення висота контрольного об'єму дорівнює H_1 , і йому відповідає матриця $\|\pi_{ij}(1)\|$. За формулою (21) при послідовній зміні $k=1,2$ і т. д. обчислимо $\bar{P}(k,1)$ і Δ . При якомусь кроці k буде справедливим умова $\Delta \geq h$, що з'явиться сигналом до зміни висоти.

Висота контрольного об'єму зменшиться на $H_2 = H_1 - h$. Оскільки першого елементарного шару вже немає, то перехід частинок з нього і в нього неможливий. Тому повинна бути змінена структура вектора стану і матриці ймовірностей переходів: $\bar{P}_1(0,2)$, $\pi_{ij}(2)$ і π_{i1} необхідно прийняти рівними нулю.

В результаті цих операцій моделюється таке явище як зменшення області, в межах якої частинки здійснюють випадкові переходи. Причому зменшення висоти шару (25) залежить від імовірності $P_-(k)$, тобто мають систему з рухомою границею, положення якої визначається ходом самого процесу (див. рис. 3). Для здійснення k_1 кроків треба часу

$$t_1 = k_1 t_{h,1} \quad (27)$$

Шлях, пройдений контрольним об'ємом, дорівнює

$$L_{k,1} = V_1 t_1. \quad (28)$$

З урахуванням залежності (21) вектор ймовірності кінцевого стану при H_2 обчислюється так:

$$\bar{P}(k_2, 2) = \bar{P}(0, 1) \|\pi_{ij}(2)\|^{k_2} \quad (29)$$

де k_2 – крок, при якому виконується умова $\Delta = h$.

Час, що минув з початку процесу розділення, так само

$$t = t_{h,1} k_1 + t_{h,2} k_2 \quad (30)$$

Оскільки зі зменшенням висоти змінилася і швидкість вібротранспортування, то шлях, пройдений контрольним об'ємом, обчислюється за формулою

$$L_k = V_1 t_{h,1} + V_2 t_{h,2} \quad (31)$$

Аналогічно визначаються вектори кінцевого стану при наступних змінах висоти контрольного об'єму.

Обчислення закінчують при $t = T_s$ або $L_k = L_c$, де T_s – час розділення; L_c – довжина поверхні, що просіває.

Залежності (20) – (31) моделюють кінетику розділення за крупністю. Вони дозволяють розрахувати ймовірність переходу під поверхню, що просіває, частинок крупності d . Виконуючи аналогічні обчислення для частинок різної крупності, визначають сепараційну характеристику – закон зміни ймовірності переходу під поверхню, що просіває, частинок в залежності від їх крупності.

Оскільки стохастична матриця для рідини має такий же вигляд, як і матриця (22), то для переходу рідини отримано наступні залежності:

$$\overline{P^*}(k_m, m) = \overline{P^*}(0, m) \left\| \pi_{ij}^*(m) \right\|^{k_m} \quad (32)$$

Перехід частинок крупності d під поверхню, що просіває, дорівнює $P_-(k_m, m)$ при $t = T_s$, тобто

$$E = P_-(k_m, m). \quad (33)$$

Тоді продуктивність по продукту під поверхнею, що просіває

$$Q_- = \alpha Q P_-(k_m, m) \quad (34)$$

де α – вміст класу d в живленні.

Маса продукту на поверхні, що просіває, в контрольному об'ємі

$$M_+ = M / \alpha - M_h - M_-, \quad (35)$$

де α – вміст дрібних частинок у початковому; M_h – маса частинок на ДЕ (кг); M_- – маса частинок під поверхнею, що просіває (кг).

Маса рідини на поверхні, що просіває

$$M_+^* = M^* - M_h^* - M_-^*, \quad (36)$$

де M_h^* – маса рідини на ДЕ (кг); M_-^* – маса рідини в продукті під поверхнею, що просіває (кг).

Висловлюючи маси M_h , M_- , M_h^* і M_-^* через ймовірності, отримана формула для визначення вологості продукту на поверхні, що просіває

$$W_+ = W(1 - P_h^* - P_-^*) / (1 / \alpha - P_h - P_-), \quad (37)$$

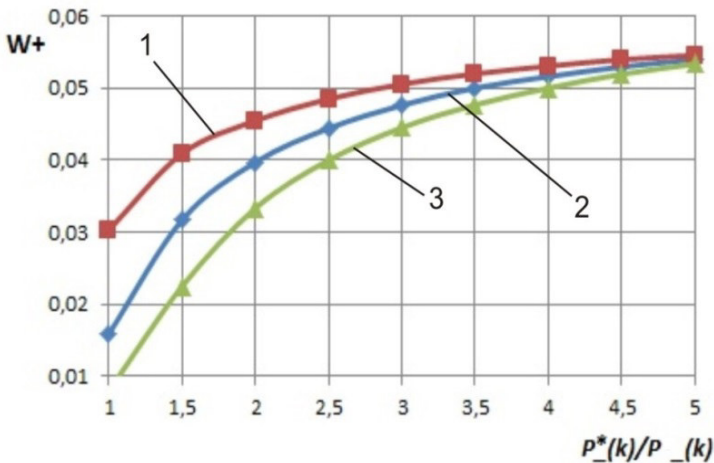
$$\text{де } W_0 = M^* / M. \quad (38)$$

У разі, коли не використовуються дезінтегруючі елементи, в отриманих виразах ймовірності станів P_i і переходів π_{ij} з індексами $i = j = n + 2$ слід прийняти рівними нулю.

Таким чином, математична модель (29) – (38) кінетики зневоднення та розділення за крупністю при віброударному впливі комплексно враховує початкові розподіли часток і рідини по висоті шару сировини, сегрегацію, просіювання, особливості вібротранспортування (швидкість, кратність і кількість падінь за період вібротранспортування) і зміну висоти шару. Новизна моделі полягає в обліку взаємного впливу зневоднення та розділення за крупністю.

За результатами чисельних експериментів побудовано залежність вологості W_+ від відношення ймовірностей переходу в мінусовий продукт (під поверхнею, що просіває) рідини $P_-^*(k)$ і дрібних частинок $P_-(k)$ при $P_h^* = 0,2$ і $P_h = 0,2$ (де P_h^* і P_h – ймовірності переходу рідини і часток відповідно на дезінтегруючі елементи), що демонструє взаємний вплив зневоднення і розділення за крупністю (рис. 5).

Шляхом чисельних експериментів визначено технологічні і режимні параметри процесу зневоднення і розділення за крупністю. На моделі грохоту експериментальним шляхом вивчено особливості зневоднення і розділення техногенної сировини вузьких і широких спектрів крупності з використанням віброударного впливу. Для інтенсифікації процесів зневоднення і розділення за крупністю за рахунок руйнування грудок злиплої сировини на поверхні, що просіває, використовувалися «поодинокі удари», «подвійні удари», великі частки



- 1) $P_-(k) = 0,4$; 2) $P_-(k) = 0,6$;
3) $P_-(k) = 0,8$

Рисунок 5 – Залежність вологості $W+$ від відносин ймовірностей переходу в мінусовий продукт рідини $P^*(k)$ і дрібних частинок $P_-(k)$ при $P_h = 0,2$ и $P_h^* = 0,2$

відсіву, ДЕ різної форми і розмірів, і активатор, який встановлювався над поверхнею, що просіває.

Експерименти проводились на моделі віброударного грохота з активатором (рис.1), яка складалася з короба, під яким встановлено балку з пружним елементом і ударниками (основний) і (додатковий). На пружних прокладках змонтовано сталеві стрижні, на яких розташовувалася поверхня, що просіває, у вигляді металевої сітки. При гармонічному збудженні підстави на ударник діє змінна сила інерції, що призводить до періодичних розривів контакту ударника зі стрижнями. В результаті цього генеруються ударні імпульси, які передаються через стрижні поверхні і сировині, що переробляється. Режим з «подвійними ударами» здійснювався за допомогою додаткового ударника з жорсткістю пружного елемента відмінною від жорсткості пружного елемента ударника. Над поверхнею на відстані l монтувався активатор. Дезінтегруючі елементи розташовувалися на поверхні, що просіває, і на активаторі.

При віброударному впливі експериментально досліджено кінетику зневоднення і розділення за крупністю сировини (розмір часток +0-10 мм, вологість початкового продукту 30%) на поверхні, що просіває, з чарунками розміром 0,1 мм при різних питомих навантаженнях по живленню (частота $f = 32,5$ Гц, амплітуда $A = 2,5$ мм). Досліджено вплив режимних та конструктивних параметрів на зневоднення і розділення за крупністю матеріалів з різними властивостями: будівельних пісків і вугільних шлаків. Результати розрахунків і експериментів представлено на рис. 6.

Встановлено, що використання віброударного впливу на поверхню, що просіває, дозволяє збільшити видалення класу -0,1 мм в мінусовий продукт до 75-80%, а вологість матеріалу плюсового продукту знижувати до 6-8%.

З порівняння результатів експериментальних і розрахункових даних встановлено, що вони відрізняються не більше, ніж на 20%, тобто математична модель з довірчою ймовірністю 0,95 адекватно описує експериментальні результати.

Таким чином, математичне моделювання кінетики переходу рідини і частинок по висоті шару дискретним марковским процесом з дискретними станами дозволило розрахувати раціональні параметри процесу зневоднення й розділення

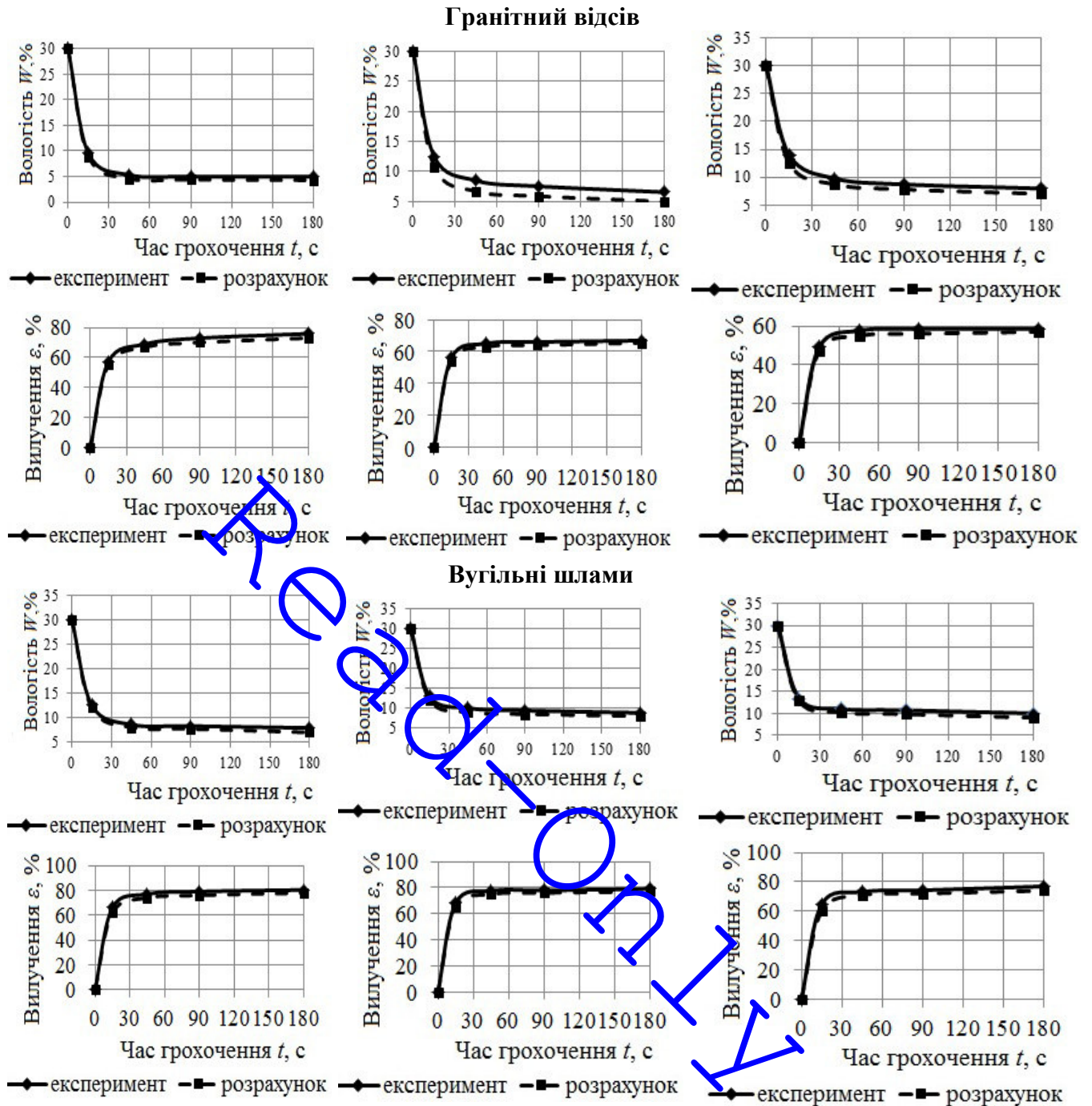


Рисунок 6 – Залежності вологості W продукту на поверхні, що просіває, і вилучення ε класу -0,1 мм у продукт під просіваючою поверхнею від часу розділення і зневоднення t і питомих навантажень по живленню q

за крупністю для сировини, яка містить дрібні класи крупності, і за рахунок цього знизити її вологу плюсового продукту до 8-10%, а видалення класу -0,1 мм у мінусовий продукт підвищити до 75-80%.

Для того, щоб порівняти результати зневоднення і розділення при вібраційному і віброударному впливі були виконані експериментальні

дослідження. Як відомо при вібраційному впливі вологість матеріалу широкого спектру крупності +0-10 мм вдається знижувати тільки до 18-22 %, а вихід дрібних частинок складає не більше 15-25 %.

На рис. 7 наведено порівняння результатів зневоднення та розділення за крупністю сировини крупністю +0-10 мм при вібраційному впливі, віброударному та віброударному з ДЕ.

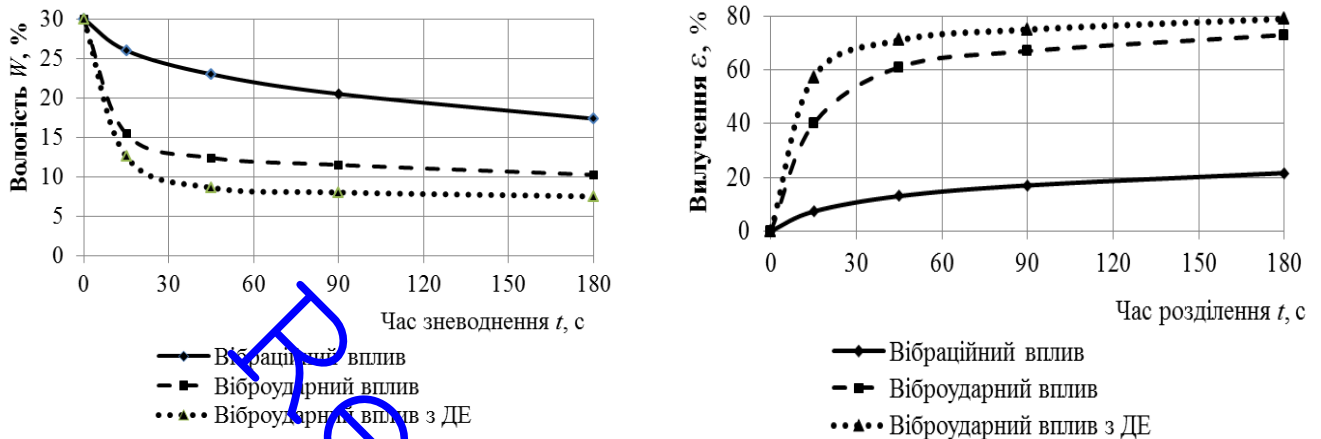


Рисунок 7 – Залежності вологості W плюсового продукту і вилучення ε класу -0, мм у мінусовий продукт від часу зневоднення і розділення t (частота коливань $f = 32,5$ Гц і амплітуда $A = 2$ мм)

Встановлено, що в порівнянні з вібраційним використанням віброударного впливу з «подвійними ударами» на поверхню, яка просіває, дозволяє знизити вологість з 18-22 до 8-10 % і збільшити вихід дрібних частинок з 15-25 до 75-80%, тобто використання додаткового за період віброудара удару на етапі польоту сировини значно підвищило ефективність процесу зневоднення та розділення за крупністю.

На основі отриманих результатів для сировини різної крупності розроблено схеми тонкого зневоднення і розділення за крупністю, а також створено і запатентовано новий спосіб зневоднення і розділення за крупністю з використанням активатора.

Математична модель дозволяє шляхом чисельних експериментів визначати раціональні конструктивні і режимні параметри при яких досягаються необхідні технологічні показники зневоднення й розділення за крупністю та забезпечується енерго- і ресурсозбереження.

П'ятий розділ присвячено розробці та впровадженню методик і рекомендацій по вибору, обґрунтуванню і розрахунку раціональних режимів процесу видалення вологи і розділення техногенної сировини при віброударному впливі.

На основі створених математичних моделей розроблено алгоритми розрахунку, приклади та методики розрахунків процесів проходження рідини через поверхню, що просіває, зневоднення крізь шар сировини, методика кінетики

зневоднення і розділення за крупністю при віброударному впливі та загальна методика обґрунтування і розрахунку режимних та конструктивних параметрів віброударного грохоту і технологічних показників процесу зневоднення і розділення за крупністю при переробці техногенної сировини.

Створено «Методику розрахунку технологічних параметрів, які забезпечують очищення поверхні, що просіває, при тонкому грохоченні техногенної сировини», яка дозволяє аналітично визначати кількість води, що залишилася на поверхні від амплітуди і частоти віброзбудження при гармонійному і імпульсному віброзбудженні. Методику впроваджено в ПАТ «Новопавлівський гранітний кар'єр» і ТОВ «Любимовський кар'єр». З її допомогою обґрунтовано розміри чарунок поверхні, яка просіває, грохоту, амплітуда і частота віброзбудження, що дозволило зменшити залипання чарунок і, як наслідок, підвищити ефективність грохочення зі зневодненням.

Розроблено «Методику розрахунку параметрів грохоту з ударним збудженням поверхні, що просіває, для класифікації та зниження вологи в тонких класах», яка дозволяє визначити конструктивні і динамічні параметри, що забезпечують віброударний режим роботи грохоту, проаналізувати вплив будь-якого з визначальних параметрів грохоту, а також роботу існуючих грохотів з метою виявлення шляхів для їх модернізації. Методику впроваджено в ТОВ «Об'єднання Новомиkolaївський кар'єр», ПрАТ «Об'єднана гірничо-хімічна компанія», філія «Вільногірський гірничо-металургійний комбінат», ТОВ «Любимовський кар'єр». Використання методики дозволило на цих підприємствах забезпечити раціональні режими збудження поверхні, яка просіває, і досягнення заданих технологічних показників.

На основі моделювання зневоднення техногенної сировини, першого, другого і третього наукових положень розроблено «Методику визначення ефективності зневоднення при віброударному грохоченні в технологіях збагачення техногенних родовищ» (впроваджено в ТОВ «Мотронівський гірничо-збагачувальний комбінат», у Філії ЦЗФ «Павлоградська» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», ТОВ «Любимовський кар'єр»). Її основні положення використано при розробці технічних пропозицій щодо вдосконалення технології механічного зневоднення продуктів збагачення вуглезбагачувальних фабрик, зокрема для обґрунтування витрат енергії необхідної для видалення з них рідини, вибору розміру чарунок і площі поверхонь, що просівають, для розрахунку оптимальних технологічних показників з метою підвищення ефективності роботи грохотів та зниження вологості плюсових продуктів. Методику впроваджено на кафедрі збагачення корисних копалин в ДВНЗ «Національний гірничий університет» в навчальному процесі при вивченні дисципліни «Зневоднення і пиловловлювання в технологіях збагачення корисних копалин».

На основі моделювання кінетики зневоднення і розділення за крупністю техногенної сировини та четвертого наукового положення створено «Методику розрахунку технологічних показників грохочення і зневоднення при переробці вологої техногенної сировини» (впроваджено в ТОВ «Об'єднання Новомиkolaївський кар'єр», ТОВ «Мотронівський гірничо-збагачувальний

комбінат», Філії ЦЗФ «Павлоградська» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», ПАТ «Об'єднана гірничо-хімічна компанія» філія «Вільногірський гірничо-металургійний комбінат», ТОВ «Любимовський кар'єр»). Методика використовувалася при розрахунках раціональних параметрів розділення за крупністю й зневоднення з метою визначення продуктивності грохотів, ефективності розділення за крупністю і зневоднення при тонкому грохоченні продуктів, а також при розрахунках якісно-кількісних водно-шламових схем вуглезбагачувальних фабрик, при їх реконструкції, яка містить модернізацію ділянок грохочення і зневоднення. Методику впроваджено в ДВНЗ «Національний гірничий університет» на кафедрі збагачення корисних копалин при підготовці бакалаврів за напрямом «Переробка корисних копалин» 6.050303 з дисципліни «Математичні методи в збагаченні корисних копалин».

Розроблено «Методику математичного моделювання зневоднення вологої техногенної сировини при віброударному грохоченні» і «Методику математичного моделювання кінетики грохочення і зневоднення при переробці тонкозернистої вологої сировини», які впроваджені в Дніпропетровському національному університеті імені О. Гончара на кафедрі статистики та теорії ймовірностей в лекційному матеріалі та практичних заняттях зі студентами, як приклади застосування ймовірнісно-статистичних методів, зокрема при моделюванні фізичних процесів грохочення і зневоднення тонкозернистої вологої сировини.

На основі отриманих результатів створено «Рекомендації по вибору раціональних режимів процесу класифікації і зневоднення для високоефективної переробки пісків», які впроваджені в ПАТ «Об'єднана гірничо-хімічна компанія» філія «Вільногірський гірничо-металургійний комбінат», ПАТ «Новопавлівський гранітний кар'єр», в ТОВ «Любимовський кар'єр», де використано при розробці проектів розвитку сировинної бази підприємств і удосконаленні вузлів класифікації та зневоднення.

На основі моделювання процесів та всіх чотирьох наукових положень створено «Методику обґрунтування и розрахунку режимних та конструктивних параметрів віброударного грохоту і технологічних показників процесу поділу за крупністю и зневоднення при переробці техногенної сировини», яку впроваджено в ТОВ «Любимовський гранітний кар'єр». З її допомогою для модернізованого за рекомендованою схемою грохота ГЛ-42 (з позиції раціонального узгодження сегрегації, просіювання тонких частинок і видалення вологи за рахунок зміни параметрів грохоту) визначено раціональні конструктивні (параметри ударників, кут нахилу) та режимні (амплітуда і частота) параметри. Результати випробування модернізованого грохоту ГЛ-42 з віброударним режимом в умовах Любимовського гранітного кар'єра наведено в таблиці, де γ_b , γ_n і γ_n – вихід вузького класу крупності у початковому, плюсовому і мінусовому продуктах.

Порівняно з грохотом з базовими параметрами ефективність розділення зросла на 23,47% (Акт промислових випробувань модернізованого грохоту ГЛ-42 при виборі раціонального віброударного режиму для підвищення ефективності грохочення і зневоднення сировини).

Порівняльні технологічні іспити грохота ГІЛ-42 з базовими настройками режимів грохочення і рекомендованими ІТМ НАН України (по класу -0,2 мм, продуктивність 92 т/год.)

Класи крупності, мм	Базові			Рекомендовані		
	$\gamma_{в}, \%$	$\gamma_{н}, \%$	$\gamma_{п}, \%$	$\gamma_{в}, \%$	$\gamma_{н}, \%$	$\gamma_{п}, \%$
+2,5-5	5,7	10,3	0	1,9	4,1	0
+1,0-2,5	21,4	27,3	0	18,3	40,4	0
+0,63-1,0	21,8	20,4	0	14,5	32,1	0
+0,315-0,63	16,2	30,6	0	9,6	19	1,8
+0,2-0,315	9,8	3,6	22,4	25,7	3,8	43,9
+0,1-0,2	9,6	4,9	24,8	11,9	0,6	21,2
+0-0,1	15,5	2,7	45	18,1	0	33,1
Вміст, %	37,1	15,9	85,8	39,9	3,71	97,9
Вилучення, %			75,5			94,27
Ефективність, %			70,14			93,61

Очікуваний економічний ефект, отриманий за рахунок зменшення вмісту пиловидних і глинистих частинок і підвищення якості продукції, зниження вологості плюсового продукту в середньому до 11-12 %, а також зменшення часу знаходження сировини на поверхні, що просіває, в середньому на 10 %, тобто зниження витрат електроенергії на грохочення, становить 918 585 грн в розрахунок на одну машину (на кар'єрі три грохота ГІЛ-42).

Методики включають програми для ПЕОМ «Шлами», «Відсів», «Поверхня, що просіває», «Грохот», «Зневоднення», «Кінетика», «Технологічні показники».

Висновки

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою в області геотехнічної і гірничої механіки, в якій дано рішення актуальної наукової проблеми розвитку наукових основ процесу віброударного зневоднення техногенної сировини, який полягає у встановленні закономірностей переміщення рідини і частинок крізь шар сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи в залежності від гранулометричного складу сировини, який змінюється, щільності частинок і рідини, параметрів віброударного впливу, що дозволило створити методики розрахунку і рекомендації по вибору раціональних режимів для ефективного зневоднення та розділення, впровадження яких забезпечило отримання очікуваного економічного ефекту від використання розробок 969544 грн, що має істотне значення для підвищення ефективності роботи гірничодобувних підприємств.

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. Аналіз проблеми підвищення ефективності віброударного зневоднення показав, що вплив зміни вологості на розділення за крупністю вивчено недостатньо. Незважаючи на велику кількість як теоретичних, так і емпіричних моделей ряд важливих особливостей кінетики процесу залишаються недослідженими. До таких в першу чергу слід віднести закономірності руху рідини між частинками в шарі сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх

випадкової природи при віброударному збудженні, яке забезпечує інтенсивне переміщення рідини і частинок щодо один одного, їх комплексний облік і взаємний вплив. Недостатньо вивчено як впливають режими віброударної дії на сировину з урахуванням наявності в ній вологи. Усе це зменшує достовірність аналізу і прогнозу процесу зневоднення техногенної сировини.

2. Вперше обґрунтовано ефективність ударного впливу на поверхню, яка просіває, на етапі, коли сировина не контактує з нею. Віброударний вплив в порівнянні з гармонійним забезпечує підвищення інтенсивності проходження води через різні поверхні, що просівають, до 55%. Отримано регресійні рівняння, які встановлюють залежність кількості води, що залишилася на поверхні, яка просіває, від амплітуди і частоти віброзбудження. Ці результати дозволяють розрахувати параметри віброзбудження для очищення чарунок різних поверхонь.

3. Вперше з урахуванням геометричних параметрів частинок, їх щільності, поверхневого натягу, щільності і в'язкості рідини, кута змочування, амплітуди і частоти віброзбудження математично описано процес видалення рідини при віброударному впливі. Це досягнуто завдяки моделюванню переходу рідини по висоті шару дискретним марковским процесом з дискретними станами. При цьому елементами стохастичної матриці є ймовірності переходів рідини з одного елементарного шару в інший, з дезінтегруючих елементів – в елементарні шари, з елементарних шарів – на дезінтегруючі елементи, через чарунки поверхні, що просіває. Структура матриці змінюється в міру зменшення висоти шару. Показник ступеня, в який зводиться матриця, залежить від кількості взаємодій сировини з поверхнею, що просіває. Проведено дослідження зневоднення при віброударному збудженні техногенної сировини вузьких і широких класів крупності. Використання зазначених умов дозволило знизити вологість матеріалів вузьких класів крупності + 0,4-1 мм і + 0-0,2 мм з 30 до 4-6%, а широкого класу крупності + 0-10,0 мм з 30 до 8-10 %.

4. У розвиток теорії віброударного зневоднення отримано закономірності ймовірності переходу рідини по висоті шару сировини яка дорівнює добутку ймовірностей виконання енергетичної і геометричної умов. Ймовірність переходу рідини вниз за геометричними умовами залежить від трьох компонентів: ймовірності того, що три частки знаходяться в елементарному об'ємі; ймовірності орієнтації елементарного об'єму вниз, ймовірності того, що імпульс діє в цьому ж напрямку; ймовірність переходу рідини вниз з енергетичної умови: кінетична енергія, що повідомляється меніску рідини, повинна перевищувати енергію утворення нової міжфазної поверхні. Виконано оцінку витрат енергії, необхідної для видалення рідини з сировини.

5. Вперше при математичному моделюванні описано вплив дезінтегруючих елементів на ймовірності переходів рідини крізь шар сировини і чарунки поверхні, що просіває. Проведено дослідження зневоднення з дезінтегруючими елементами при віброударному збудженні техногенної сировини вузьких і широких класів крупності. За рахунок нанесення дезінтегруючими елементами у локальних областях нормальних і зсувних імпульсів підсилюються коливання поверхні і матеріалу на ній, що сприяє більш інтенсивному його розпушенню і руйнуванню

капілярних містків між частками, інтенсифікуючи процес зневоднення й розділення до 50 %.

6. У розвиток теорії віброударного зневоднення отримано залежності ймовірності проходження рідини через чарунки від ймовірності залишитися на поверхні, що просіває, і кількості взаємодій сировини з неї.

7. Вперше отримано закономірності, які описують вплив вологи на ймовірності переміщення рідини і частинок крізь шар сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи в залежності від гранулометричного складу сировини, який змінюється, щільності частинок і рідини, параметрів віброударного впливу, режимних та технологічних параметрів.

8. Подальший розвиток отримала теорія віброударного зневоднення та розділення за крупністю з урахуванням зміни вологості. Вперше математично описано кінетику зневоднення з розділенням при віброударному впливі, що комплексно враховує початкові розподіли рідини і часток по висоті шару сировини, сегрегацію, просіювання, особливості вібротранспортування (швидкість, кратність і кількість ударів за період вібротранспортування) і зміну висоти шару. Це досягнуто завдяки моделюванню переходу рідини і частинок по висоті шару дискретним марковським процесом з дискретними станами. Виконано перевірку адекватності модельних уявлень шляхом експериментальних досліджень зневоднення з розділенням при віброударному збудженні техногенної сировини вузьких і широких класів крупності. Встановлено що при цих умовах витяг дрібних класів підвищено з 15-25% до 75-80%, а вологість знижено з 30 до 7-8%.

9. Достовірність отриманих результатів підтверджується тим, що розбіжність експериментальних і розрахункових значень вологості та витягу не більше 20% при довірчій ймовірності 0,95.

11. Розроблено математичну модель віброударного грохота, дослідження якої дозволили визначити його динамічні параметри, що забезпечують режими з «подвійними ударами». Достовірність результатів аналітичних досліджень процесів зневоднення та розділення за крупністю підтверджується ефективним зневодненням та розділенням у лабораторних та промислових умовах.

12. На основі результатів досліджень і для їх практичного використання розроблено і створено нові способи зневоднення та розділення за крупністю різної сировини за рахунок використання: додаткового за період віброзбудження на етапі польоту сировини ударного впливу на поверхню, що просіває; дезінтегруючих елементів, активатора. Ці рішення дозволили інтенсифікувати розпушення сировини, видалення вологи і підвищити вихід мінусового продукту. Результати досліджень віброударного зневоднення і розділення за крупністю послужили основою для розробки рішень щодо вдосконалення цих процесів, а також методик розрахунку і рекомендацій по вибору їх раціональних режимів.

13. Створено: «Методику розрахунку технологічних параметрів, що забезпечують очищення поверхні, що просіває, при тонкому грохоченні техногенної сировини», «Методику розрахунку параметрів грохоту з ударним збудженням поверхні, що просіває, для класифікації та зниження вологи в тонких класах», «Методику визначення ефективності зневоднення при віброударному

грохоченні в технологіях збагачення техногенних родовищ», «Методику розрахунку технологічних показників грохочення і зневоднення при переробці вологої техногенної сировини», «Методику математичного моделювання зневоднення вологої техногенної сировини при віброударному грохоченні», «Методику математичного моделювання кінетики грохочення і зневоднення при переробці тонкозернистої вологої сировини», «Рекомендації по вибору раціональних режимів процесу класифікації і зневоднення для високоефективної переробки пісків», «Методику обґрунтування и розрахунку режимних та конструктивних параметрів віброударного грохоту і технологічних показників процесу поділу за крупністю и зневоднення при переробці техногенної сировини» які впроваджено на збагачувальних підприємствах і кар'єрах, а також в навчальних процесах Дніпропетровського національного університету імені О. Гончара, Національного гірничого університету та ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет».

14. Очікуваний економічний ефект, отриманий за рахунок зменшення вмісту пиловидних і глинистих частинок і підвищення якості продукції, зниження вологості плюсового продукту в середньому до 11-12 %, а також зменшення часу знаходження сировини на поверхні, що просіває, в середньому на 10 %, тобто зниження витрат електроенергії на грохочення, становить 918 585 грн в розрахунку на одну машину.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО В ТАКИХ РОБОТАХ:

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав або України, які включені в міжнародні наукометричні бази

1. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Пути совершенствования вибрационного разделения по крупности и обезвоживания минерального сырья. *Науковий вісник Дніпропетровськ*, 2013. Вип. 3(135). С. 45–51 (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

2. Chetveryk M., Bubnova O., Babii K., Shevchenko O., Moldabaev S. Review of geomechanical problems of accumulation and reduction of mining industry wastes, and ways of their solution. *Mining of Mineral Deposits Journal*. Volume 12 (2018). Issue 4. P. 63-72. (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази «Web of Science»).

3. Шевченко А.И. Численные эксперименты по изучению обезвоживания минерального сырья при виброударном грохочении. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*. Кременчук, 2018. Вип. 6 (113). С. 70 – 78 (Входить до переліку міжнародних наукометричних баз «Ulrichs Web Global Serils Directory», «Library», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography»).

4. Шевченко А.И. Влияние свойств минеральных частиц на технологию и параметры оборудования при извлечении полезных компонентов из хвостохранилищ. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Кременчук, 2019. Вип. /2019 (23). С. 58-74. (Входить до переліку

міжнародних наукометричних баз «Ulrichs Web Global Serils Directory», «Library», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography»).

5. Шевченко А.И. Численные эксперименты по изучению кинетики грохочения с обезвоживанием минерального сырья при виброударном грохочении. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*. Кременчук, 2019. Вип. 1(114). С. 62 – 73 (Входить до переліку міжнародних наукометричних баз «Ulrichs Web Global Serils Directory», «Library», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography»).

6. Shevchenko O. The influence of periodic pulse action on the efficiency of vibrating screening with dehydration. *In book Sustainable development of resource-saving technologies in mineral mining and processing: Multi-authored monograph. Universitas publishing. Petroșani, 2019. P. 384–399.*

Статті в наукових фахових виданнях

7. Шевченко А.И. Выброс твердых частиц из тонкого слоя жидкости через ее открытую поверхность *Науковий вісник: наук.-техн. зб. Дніпропетровськ: НГУ* 2004. Вип.12. С. 54-59

8. Шевченко А.И. Исследование пленочного течения жидкости по вогнутой конусообразной рифленой поверхности с переменным радиусом кривизны. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2005. № 57. С. 129-135.

9. Надутый В.П., Нагорский А.Ф., Шевченко А.И. Тонкое вибрационное грохочение при переработке угольных шламов. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2005. № 58. С. 185-190.

10. Надутый В.П., Шевченко А.И. Испытание грохота для тонкой классификации угольных шламов. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2005. №59. С. 164-169.

11. Надутый В.П., Эрперт А.М., Шевченко А.И. Метод оценки качества шламов из илонакопителя. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2005. № 61. С. 284-292.

12. Надутый В.П., Шевченко А.И., Хмеленко И.П. Переработка золы-уноса теплоэлектростанций. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2007. № 68. С. 82 – 87.

13. Шевченко А.И. Переработка угольных шламов с помощью гидравлического конусного классификатора с вогнутой рифленой рабочей поверхностью. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2008. Вып.74. С. 14-21.

14. Шевченко А.И. Влияние режимных параметров на эффективность гидроклассификации при импульсном воздействии на разделяемые частицы. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2010. Вып. 91. С. 206-210.

15. Надутый В.П., Лапшин Е.С., Шевченко А.И., Буров А.В. Повышение эффективности удаления влаги при тонком грохочении горной массы за счет импульсного воздействия. *Науковий вісник: наук.-техн. зб. Дніпропетровськ: НГУ*, 2011. Вип. 2(122). С. 95-99.

16. Надутый В.П., Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Определение условий прохождения жидкости через просеивающую поверхность вибрационного грохота.

Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2011. № 44(85). С. 54-61.

17. Лапшин Е.С., Шевченко А.И., Прокопишин Л.Н., Буров А.В. Экспериментальные исследования вибрационного воздействия на отделение жидкости при грохочении материала. *Металлургическая и горнорудная промышленность*: научно-технический и производственный журнал. Днепропетровск, 2011. №3. С. 71-74.

18. Шевченко А.И. Влияние конструктивных и гидродинамических параметров тонкослойного гидравлического классификатора на эффективность разделения минеральных частиц. *Науковий вісник*: наук.-техн. зб. Дніпропетровськ: НГУ 2011. Вип. 3(123). С. 53-57.

19. Шевченко А.И. Определение возможности обогащения угольных шламов для получения концентрата. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2011. № 92. С. 111-117.

20. Надутый В.П., Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Математическое моделирование прохождения жидкости через просеивающую поверхность при вибрационном грохочении. *Вібрації в техніці та технологіях*: всеукраїнський науково-техн. журнал. Вінниця, 2011. №3 (63). С. 27-32.

21. Надутый В.П., Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Математическое моделирование грохота с ударным возбуждением просеивающей поверхности. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*: український міжвідомчий науково-технічний збірник. Видавництво Львівської політехніки. Львів, 2011. Випуск 45. С. 320-324.

22. Шевченко А.И. Исследование обезвоживания минерального сырья с помощью низкочастотных акустических колебаний на неподвижной просеивающей поверхности. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2012. № 98. С. 225-232.

23. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Пути интенсификации обезвоживания минерального сырья на вибрационных грохотах. *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2011. № 47(88). С. 144–151.

24. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Математическое моделирование кинетики обезвоживания при вибрационном грохочении. *Вібрації в техніці та технологіях*: всеукраїнський науково-техн. журнал. Вінниця, 2012. Вип. 4(64). С. 20–24.

25. Надутый В.П., Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Исследование кинетики обезвоживания при вибрационном грохочении *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2012. Вип. 49(90). С. 112–119.

26. Надутый В.П., Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Математическое моделирование виброударного движения просеивающей поверхности с учетом диссипации для повышения эффективности грохочения. *Вібрації в техніці та технологіях*: всеукраїнський науково-техн. журнал. Вінниця, 2012. Вип. 1(65) С. 106-109.

27. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Определение удельной энергии, необходимой для обезвоживания минерального сырья при вибрационном

грохочении *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2012. Вип. 50(91). С. 179–186.

28. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Энергоемкость процесса обезвоживания минерального сырья при вибрационном грохочении. *Металлургическая и горнорудная промышленность*: научно-технический и производственный журнал. Днепропетровск, 2012. №4. С. 91-93.

29. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Пути повышения эффективности грохочения и обезвоживания минерального сырья на вибрационных грохотах. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2012. №97. С. 240–252.

30. Шевченко А.И. Влияние удельной нагрузки, конструктивных и режимных параметров на интенсивность обезвоживания минерального сырья при вибрационном грохочении. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2012. № 99. С. 162-168.

31. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Математическое моделирование кинетики грохочения и обезвоживания минерального сырья *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2012. Вип. 51(92). С. 55–64.

32. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Анализ состояния развития вибрационного грохочения при обезвоживании минерального сырья. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2012. №101. С. 84–104.

33. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Влияние импульсного воздействия на эффективность разделения по крупности и обезвоживания минерального сырья. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2012. №104. С. 195–208.

34. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Перспективы использования импульсного воздействия при разделении по крупности и обезвоживании минерального сырья. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2012. №105. С. 205-216.

35. Шевченко А.И. Влияние импульсного воздействия акустических колебаний на эффективность обезвоживания минерального сырья *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2013. Вип. 52(93). С. 106-115.

36. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Изучение кинетики разделения по крупности и обезвоживания минерального сырья при виброударном грохочении *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2013. Вип. 53(94). С. 179-188.

37. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Результаты разделения по крупности и обезвоживания строительных песков новым способом. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2013. Вып. 109. С. 63-73.

38. Шевченко А.И. Интенсификация разделения по крупности и обезвоживания минерального сырья при новом способе виброударного грохочения *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2013. Вип. 54(95). С. 157-166.

39. Шевченко А.И. Анализ кинетики разделения по крупности и обезвоживания угольных шламов при новом способе виброударного грохочения *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2013. Вип. 55(96). С. 96-103.

40. Шевченко А.И. Исследование сопутствующего разрушения минерального сырья при его разделении по крупности и обезвоживании новым способом виброударного грохочения *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2014. Вип. 58(99)-59(100). С. 46-54.

41. Шевченко А.И., Бубнова Е.А. Перспективы и проблемы перевода шламонакопителей Украины в категорию техногенных месторождений. *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2015. №60(101). С. 162-169.

42. Шевченко А.И. Интенсификация разделения по крупности и обезвоживания угольных шламов при виброударном грохочении. *Металлургическая и горнорудная промышленность*: научно-технический и производственный журнал. Днепропетровск, 2016. № 2. С.100-105.

43. Шевченко А.И. Совершенствование технологии и технологическая схема обогащения угольных шламов *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ, 2016. Вип.63(104). С.101-111.

44. Шевченко А.И. Совершенствование технологии и технологическая схема обогащения отходов добычи и переработки строительных материалов / Наукowo-технічний збірник (ДВУ) НГУ. *Збагачення корисних копалин*. Дніпро, 2017. Вип.65(106). – С. 39-47.

45. Шевченко А.И. Совершенствование технологической схемы переработки угольных шламов для извлечения из них тонкозернистого угля *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпро: НГУ, 2017. Вип.65(106). С. 53-59.

46. Шевченко А.И. Определение условий повышения эффективности классификации и обезвоживания угольных шламов при новом способе виброударного грохочения *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпро: НГУ, 2017. Вип. 67(108). С. 150-155.

47. Шевченко А.И. Результаты испытаний гидродинамического классификатора при разделении тонкозернистого угля *Збагачення корисних копалин*: наук.-техн. зб. наук. пр. Дніпро: НГУ, 2018. Вип. 1(112). С. 63-68.

Статті та тези в виданнях конференцій

48. Шевченко А.И. Технологии разработки обводненных техногенных месторождений угля. *Потурайвські читання*: матеріали всеукраїнської наук.-практ. конф. (м. Дніпропетровськ, 20-21 січня 2017 р.). Дніпропетровськ: НТУ Дніпровська політехніка. С. 19.

49. Шевченко А.И. Обоснование выбора рациональных режимов процесса классификации с обезвоживанием для высокоэффективной переработки песков. *Геотехнические проблемы разработки месторождений*: материалы XV международной научно-практической конференции (г. Днепр, 26 октября 2017 г.) ИГТМ НАН України.

50. Шевченко А.И. Обоснование технологии и оборудования для выемки обводненных полезных ископаемых. *Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК*: матеріали IV

міжнародної науково-практичної конференції (м. Кривий Ріг, 24 листопада 2017). С. 59-60.

51. Шевченко А.И. Развитие научных основ процесса обезвоживания и разделения по крупности на вибрационных грохотах на основе энергетического похода. *Геотехнические проблемы разработки месторождений*: материалы XVI международной научно-практической конференции (г. Днепр, 25 октября 2018 г.) ИГТМ НАН України.

52. Шевченко А.И. Повышение эффективности обезвоживания и разделения по крупности минерального сырья при различных силовых влияниях на основе выявления закономерностей механизмов процесса. *Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК*: матеріали V міжнародної науково-практичної конференції (м. Кривий Ріг, 24 листопада 2018). – С. 32-33.

53. Bubnova O., Shevchenko O. Reduction of techno genic load from sludge collectors due to separation and dehydration of the stored material. Issue E3S Web Conf. Volume 109, 2019 International Conference Essays of Mining Science and Practice. Article Number 00010. Number of page(s) 10. DOI. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900010>. Published online 09 July 2019. E3S Web of Conferences 109, 00010 (2019).

54. Шевченко А.И. Развитие теории обезвоживания на вибрационных грохотах на основе выявления закономерностей процесса. *Геотехнические проблемы разработки месторождений*: материалы XVII международной научно-практической конференции (г. Днепр, 24 октября 2019 г.) ИГТМ НАН України.

55. Шевченко А.И. Развитие научных основ процесса обезвоживания и разделения по крупности на вибрационных грохотах тонкозернистого техногенного сырья. *Сатпаевские чтения – 2020*: материалы международной научно-практической конференции (г. Алматы, 10 апреля 2020 г.). КазНИТУ им. К.Сатпаева (Satbayev University). Том 1.С. 461-464.

56. Шевченко А.И. Обоснование и расчет режимных и конструктивных параметров виброударного грохота и технологических показателей процесса разделения по крупности и обезвоживания при переработке влажного техногенного сырья. *Геотехнические проблемы разработки месторождений*: материалы XVIII международной научно-практической конференции (г. Днепр, 29 октября 2020 г.) ИГТМ НАН України.

Патенти України

57. Патент 88246 Україна, МПК . Спосіб переробки шламів із накопичувачів / В.П. Надутий, О.І. Шевченко. А 200811471; заявлено 23.09.2008; опубл. 25.09.2009. Бюл. №18. 4 с.

58. Патент 58794 Україна, МПК . Спосіб класифікації та зневоднювання мінеральної сировини / В.П. Надутий, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко. U 201011698; заявлено 01.10.2010; опубл. 26.04.2011. Бюл. №8. 4 с.

59. Патент 65469 Україна, МПК . Спосіб грохочення та зневоднювання мінеральної сировини, що важко класифікується. Надутий В.П., Лапшин Є.С., Шевченко О.І. U 201105325; заявлено 26.04.2011; опубл. 12.12.2011. Бюл. №23. 4 с.

60. Патент 65597 Україна, МПК . Спосіб класифікації та зневоднювання / В.П. Надутий, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко. У 201106182 заявлено 17.05.2011; опубл. 12.12.2011. Бюл. №23. 4 с.

61. Патент 67194 Україна, МПК . Спосіб грохочення та зневоднювання матеріалів, що важко класифікуються / В.П. Надутий, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко. У 201107943; заявлено 23.06.2011; опубл. 10.02.2012. Бюл. №3. 4 с.

62. Патент 69225 Україна, МПК . Грохот вібраційний / В.П. Надутий, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко. У 201111345 заявлено 26.09.2011; опубл. 25.04.2012. Бюл. №8. 4 с.

63. Патент 77362 Україна, МПК . Спосіб розділення за крупністю та зневоднювання сипучого матеріалу, який важко класифікується / В.П. Надутий, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко. У 201209458; заявлено 02.08.2012; опубл. 11.02.2013. Бюл. №3. 4 с.

Особистий внесок здобувача. Ідеї по розробці науково-технічної проблеми в цілому, що належать здобувачеві, реалізовані в науково-дослідних роботах і опубліковані ним особисто [3-8, 13, 14, 18, 19, 22, 30, 35, 38-40, 42-52, 54-56] . У роботах, опублікованих у співавторстві: [1, 2, 34, 53] – розкрито обраний напрям досліджень, як перспектива розвитку віброударного зневоднення і розділення за крупністю техногенної сировини; [9, 10, 11, 12] – фізичні експерименти, аналіз і узагальнення фізичних експериментів, [16] – виконано порівняння можливостей поверхонь, що просівають, з круглими і щілинними чарунками; ; [20, 21, 24, 26, 28, 31] – особистий внесок здобувача полягає в розвитку науково-технічних основ процесів віброударного зневоднення і розділення за крупністю техногенної сировини, фізичні експерименти для уточнення емпіричних коефіцієнтів моделей, чисельні експерименти, порівняння та аналіз чисельних і фізичних експериментів, розробка алгоритмів і методик розрахунку; [23] – огляд, запропоновані методи і конструкції по підвищенню ефективності зневоднення сировини; [24, 25, 27, 28, 31] – фізичні експерименти для уточнення емпіричних коефіцієнтів моделей, чисельні експерименти, порівняння та аналіз чисельних і фізичних експериментів, розробка методик; [25, 36] – огляд, постановка задачі, фізичні експерименти, аналіз і узагальнення фізичних експериментів; [29, 33, 37] – запропоновано технічні рішення по підвищенню ефективності розділення та зневоднення техногенної сировини і обґрунтовано раціональні параметри процесу; [32] – аналіз існуючих технічних рішень щодо розділення за крупністю та зневоднення сировини і перспективи використання віброударного впливу; [41] – фізичні експерименти з дослідження властивостей вугільних шламів різних збагачувальних фабрик, аналіз і узагальнення результатів, [57] – запропоновано і обґрунтовано спосіб переробки шламів вузькими класами крупності, [58-63] – обґрунтовано способи, запропоновані варіанти конструкцій для класифікації та зневоднення різної сировини.

АНОТАЦІЯ

Шевченко О.І. Розвиток наукових основ процесу віброударного зневоднення техногенної сировини гранулометричного складу, який змінюється. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірничча механіка». – Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми – розвитку наукових основ процесу віброударного зневоднення техногенної сировини, який полягає у встановленні закономірностей переміщення рідини і частинок крізь шар сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи в залежності від гранулометричного складу сировини, який змінюється, щільності частинок і рідини, параметрів віброударного впливу, що дозволило для ефективного зневоднення та розділення створити нові способи, а також методики розрахунку і рекомендації по вибору раціональних режимів, впровадження яких забезпечило отримання очікуваного економічного ефекту від використання розробок 969544 грн, що має істотне значення для підвищення ефективності роботи гірничодобувних підприємств.

На основі встановлених закономірностей переміщення рідини і частинок крізь шар сировини і через поверхню, що просіває, з урахуванням їх випадкової природи в залежності від гранулометричного складу сировини, який змінюється, щільності частинок і рідини, параметрів віброударного впливу розвинуто наукові основи віброударного зневоднення і розділення за крупністю. Вперше обґрунтовано ефективність ударного впливу на поверхню, яка просіває, на етапі, коли сировина, що переробляється, не контактує з нею. У розвиток теорії віброударного зневоднення отримано закономірності ймовірності переходу рідини крізь шар сировини від ймовірностей виконання геометричної і енергетичної умов. Вперше описано вплив дезінтегруючих елементів на ймовірності переходів рідини через шар сировини і чарунки поверхні, яка просіває. У розвиток теорії вібраційного зневоднення отримано залежності ймовірності проходження рідини через чарунки від ймовірності залишитися на поверхні, що просіває, і кількості взаємодій сировини з неї. Вперше отримано залежності, що описують вплив вологи на ймовірності переміщення частинок через шар сировини. Вперше розроблено математичну модель кінетики зневоднення з розділенням за крупністю техногенної сировини гранулометричного складу, що змінюється, яка комплексно враховує початкові розподіли рідини і часток по висоті шару сировини, сегрегацію, просіювання, особливості вібротранспортування (швидкість, кратність і кількість падінь за період вібротранспортування) і зміну висоти шару.

Розроблено і впроваджено в практику наукових досліджень, проектно-конструкторських робіт, гірничопереробних підприємств і навчального процесу комплект методик по розрахунку параметрів процесу зневоднення й розділення за крупністю техногенної сировини гранулометричного складу, який змінюється, створено нові способи зневоднення та розділення за крупністю різної сировини.

Очікуваний економічний ефект, отриманий за рахунок підвищення якості товарної продукції, зниження її вологості, зменшення витрат електроенергії на

розділення за крупністю та зневоднення, становить 918 585 грн в розрахунку на одну машину.

Ключові слова: процеси віброударного зневоднення і розділення за крупністю, техногенна сировина, гранулометричний склад, який змінюється, віброударний вплив, поверхня, що просіває, період збудження, закономірності, кінетика, ймовірність, марковський процес, техніка і технології переробки.

АННОТАЦІЯ

Шевченко А.И. Развитие научных основ процесса виброударного обезвоживания техногенного сырья, изменяющегося гранулометрического состава. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика». – Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр, 2021.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы – развитие научных основ процесса виброударного обезвоживания техногенного сырья, которое заключается в установлении закономерностей перемещения жидкости и частиц сквозь слой сырья и через просеивающую поверхность с учетом их случайной природы в зависимости от изменяющегося гранулометрического состава сырья, плотности частиц и жидкости, параметров виброударного воздействия, что позволило для эффективного обезвоживания и разделения создать новые способы, а также методики расчета и рекомендации по выбору рациональных режимов, внедрение которых обеспечило получение ожидаемого экономического эффекта от использования разработок 969544 грн, что имеет существенное значение для повышения эффективности работы горнодобывающих предприятий.

На основе установленных закономерностей перемещения жидкости и частиц сквозь слой сырья и через просеивающую поверхность с учетом их случайной природы, в зависимости от изменяющегося гранулометрического состава сырья, плотности частиц и жидкости, параметров виброударного воздействия развиты научные основы виброударного обезвоживания и разделения по крупности. Впервые обоснована эффективность ударного воздействия на просеивающую поверхность на этапе, когда перерабатываемое сырье не контактирует с ней. В развитие теории виброударного обезвоживания получены закономерности вероятностей перехода жидкости через слой сырья от вероятностей выполнения энергетического и геометрического условий. Впервые описано влияние дезинтегрирующих элементов на вероятности переходов жидкости через слой сырья и ячейки просеивающей поверхности. В развитие теории вибрационного обезвоживания получены зависимости вероятностей прохождения жидкости через ячейки от вероятности остаться на просеивающей поверхности и количества взаимодействий сырья с ней. Впервые получены зависимости, описывающие влияние влаги на вероятности перемещения частиц через слой сырья. Впервые разработана математическая модель кинетики обезвоживания с разделением по крупности техногенного сырья изменяющегося гранулометрического состава,

которая комплексно учитывает начальные распределения жидкости и частиц по высоте слоя сырья, сегрегацию, просеивания, особенности вибротранспортирования (скорость, кратность и количество падений за период вибротранспортирования) и изменение высоты слоя.

Разработаны и внедрены в практику научных исследований, проектно-конструкторских работ, горноперерабатывающих предприятий и учебного процесса комплект методик по расчету параметров процесса обезвоживания техногенного сырья изменяющегося гранулометрического состава, созданы новые способы обезвоживания и разделения по крупности различного сырья.

Ожидаемый экономический эффект, полученный за счет повышения качества товарной продукции, снижения ее влажности, уменьшения затрат электроэнергии на разделение по крупности и обезвоживание, составляет 969 544 грн.

Ключевые слова: процессы виброударного обезвоживания и разделения по крупности, техногенное сырье, изменяющийся гранулометрический состав, виброударное воздействие, просеивающая поверхность, период возбуждения, закономерности, кинетика, вероятность, марковский процесс, техника и технологии переработки.

ANNOTATION

Shevchenko O.I. Development of the scientific foundations of the process of vibro-impact dehydration of techno genic raw materials of varying granulometric composition. - Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.15.09 - "Geotechnical and Mining Mechanics". - Institute of Geotechnical Mechanics named after N.S. Polyakov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and technical problem - the development of scientific foundations of the process of vibro-shock dehydration of techno genic raw materials, which consists in establishing the regularities of the movement of liquid and particles through a layer of raw materials and through a sieving surface, taking into account their random nature, depending on the changing granulometric composition of raw materials, particle density and liquid, vibration impact parameters, which made it possible to create new methods for effective dehydration and separation, as well as calculation methods and recommendations for the choice of rational modes, the introduction of which ensured the expected economic effect from the use of developments UAH 969544, which is essential for increasing the efficiency of work mining enterprises.

On the basis of the established regularities of the movement of liquid and particles through the layer of raw materials and through the sieving surface, taking into account their random nature, depending on the changing granulometric composition of the raw materials, the density of particles and liquid, the parameters of vibro-impact action, the scientific foundations of vibro-impact dehydration and separation by size have been developed. For the first time, the effectiveness of the impact on the screening surface at the stage when the processed raw material is not in contact with it has been substantiated.

In the development of the theory of vibro-impact dehydration, the regularities of the probabilities of the transition of a liquid through a layer of raw materials from the probabilities of fulfilling the energy and geometric conditions were obtained. For the first time, the influence of disintegrating elements on the probabilities of liquid transitions through a layer of raw materials and cells of a sieving surface is described. In the development of the theory of vibration dehydration, the dependences of the probabilities of the passage of liquid through the cells on the probability of remaining on the sieving surface and the number of interactions of the raw material with it were obtained. For the first time, dependences were obtained that describe the effect of moisture on the probability of particle movement through a layer of raw materials. For the first time, a mathematical model of the kinetics of dehydration with the separation of technogenic raw materials of varying granulometric composition was developed, which comprehensively takes into account the initial distribution of liquid and particles along the height of the raw material layer, segregation, screening, vibration transport features (speed, frequency and number of falls during the period of vibration transportation) and the change in layer height.

A set of methods for calculating the parameters of the dehydration process of technogenic raw materials of varying particle size distribution has been developed and introduced into the practice of scientific research, design and design work, mining enterprises and the educational process, new methods of dehydration and size separation of various raw materials have been created.

The expected economic effect obtained by improving the quality of marketable products, reducing its moisture content, reducing electricity costs for separation by size and dehydration, is UAH 969,544.

Key words: processes of vibro-impact dehydration and separation by size, technogenic raw materials, changing granulometric composition, vibro-impact action, sieving surface, excitation period, patterns, kinetics, probability, Markov process, processing techniques and technologies.

ШЕВЧЕНКО Олександр Іванович

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПРОЦЕСУ ВІБРОУДАРНОГО
ЗНЕВОДНЕННЯ ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО
СКЛАДУ, ЯКИЙ ЗМІНЮЄТЬСЯ

(Автореферат)

Здано на складання 31.03.2021. Підписано до друку 31.01.2021.

Формат 210x148. Папір офсетний. Друк цифровий.

Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 2,1.

Обл.-вид. арк. 2,0 Тираж 100 прим. Зам. № 3103

Видавництво

Адреса видавництва та друкарні: 49000

Дніпро, вул. Писаржевського, буд.18.