

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**ІВАНОВ АНАТОЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.926, 666.94.052

**НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ  
ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ В ПОМОЛЬНОМУ АГРЕГАТІ З ТРУБНИМ  
МЛИНОМ НА ПРИНЦИПІ СЕЛЕКТИВНОСТІ**

**05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології**

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

**Харків – 2006**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі механізації будівельних процесів Харківського державного технічного університету будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор  
**Богданов Василь Степанович**,  
Белгородський державний технологічний університет  
ім. В.Г. Шухова, завідувач кафедри механічного  
обладнання підприємств промисловості будівельних  
матеріалів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
**Фокін Віталій Сергійович**,  
Національний технічний університет “Харківський  
політехнічний інститут”, професор кафедри теплотехніки;

доктор технічних наук, професор  
**Баранов Андрій Миколайович**,  
Українська інженерно-педагогічна академія, завідувач  
кафедри охорона праці та навколишнього середовища;

доктор технічних наук, професор  
**Младецький Ігор Костянтинівич**,  
Національний гірничий університет України, професор  
кафедри збагачення корисних копалин.

Провідна установа - Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут” (кафедра хімічного, полімерного та  
силікатного машинобудування) Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться: « 20 \_\_ » квітня 2006 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.050.05 у Харківському національному технічному університеті  
“Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного універ-  
ситету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “ 11 ”\_березня 2006 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.К. Тимченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Необхідність в якісних будівельних та інших матеріалах, підвищення ефективності виробництва яких тісно пов'язане з модернізацією існуючого обладнання та з розробкою енергозберігаючих технологій, збільшується з кожним роком. Властивості матеріалів в значній мірі залежать від їх дисперсності. Здрібнювання матеріалів є найбільш енергоємним і трудомістким процесом у різних галузях промисловості: виробництві будівельних матеріалів, гірничорудної та хімічної, де дробленню і помелу піддаються сотні мільйонів тонн різних матеріалів. Цей список можна продовжити і це пояснюється тим, що сучасні технологічні процеси можливо проводити тільки з матеріалами в здрібненому стані, причому тонкість їхнього здрібнювання визначає ефективність протікання цих процесів і якість продукції. Найбільш висока дисперсність потрібна при виробництві тонкої кераміки і цементу. Проте тонке здрібнювання матеріалів є дуже енергоємним. Наприклад, близько 85 % електроенергії при виробництві цементу витрачається на дроблення та помел, з якої 75 % приходиться тільки на помел. При одержанні цементу марки 400 на помел витрачається 35 - 40 кВт г/т, а для марки 700 – від 70 до 80 кВт г/т зі зниженням продуктивності млина в 1,5 - 2 рази. Незважаючи на низький коефіцієнт корисної дії, великі габарити й енергоємність, трубні млини (ТМ), як і раніше, залишаються найбільш розповсюдженими агрегатами для помелу різних матеріалів завдяки великій продуктивності, простоті та надійності конструкції. При такій високій енергоємності процесу здрібнювання в помольному агрегаті з ТМ потрібно інтенсифікувати їхню роботу.

Сучасні помольні агрегати складаються з попереднього подрібнювача, ТМ і сепаратора з транспортуючим і пилоочисним устаткуванням. Існуючі основні показники роботи ТМ (режими роботи тіл, що мелють, структура потоку матеріалу, що подрібнюється, рекомендації з вибору розмірів часток, що подають до млина, помел у замкнутому циклі) далекі від оптимальних своїх значень, що істотно впливає на енергоємність та економічність роботи млинів. Це пов'язано з тим, що, в основному, їх вибирають керуючись досвідом підприємств або за розрізненими недосконалими напівемпіричними методиками. Єдиний науково обґрунтований підхід до їх визначення відсутній, а реалізація пропонованих багатьма дослідниками різних конструктивних і технологічних рішень пов'язана зі значними переробками та додатковими капітальними вкладеннями. Тому в теперішній час ці питання залишаються актуальними. Очевидно, що для майбутнього України найбільш пріоритетними є два напрямки: енергозбереження й екологія, на що і спрямовано наукові розробки в даній дисертаційній роботі. В зв'язку з цим теоретичні та експериментальні дослідження нових високоефективних процесів у ТМ і створення на основі результатів цих досліджень нових видів обладнання та раціональних конструктивних елементів ТМ є актуальними та важливими для усіх галузей промисловості, де використовуються ТМ.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація є складовою частиною комплексної галузевої проблеми 2.01.02 Міністерства промисловості будівельних матеріалів СРСР "Розробити та впровадити в цементну промисловість процес здрібнювання клінкеру та добавок з використанням нового інтенси-

фікатора помелу”, а також завдання 03.05 комплексної програми МІНВУЗ(у) УРСР "Економія матеріальних і енергетичних ресурсів у будівництві" та відповідає основному напрямку розвитку промислового потенціалу України "Про енергозбереження" і постанові Кабінету Міністрів України №148 від 5.02.97 р. "Про комплексну державну програму енергозбереження України".

Госпдоговірні роботи за темою дисертації, керівником і відповідальним виконавцем яких був здобувач, проводилися за замовленням ряду підприємств Росії (Белгородського цемзаводу, Катав-Іванівського цемзаводу, ВО Михайловцемент, Главцемент(у), НДЦцемент(у), НВО "Алініт") та України (Криворізького цементного заводу та ЗАТ НКМЗ м. Краматорськ).

Крім госпдоговірних робіт за період з 1970 р. і по теперішній час науково-дослідні роботи (НДР) з теми дисертації проводились і ведуться також і за планом держбюджетних НДР ХІБІ та ХДТУБА.

**Мета і задачі досліджень.** Метою досліджень є підвищення ефективності роботи помольного агрегату з ТМ шляхом розробки науково-практичних основ інтенсифікації процесу подрібнення в ТМ, створення на базі одержаних наукових положень нових методів інтенсифікації процесів в помольному агрегаті з ТМ, визначення їх раціональних параметрів, створення нових конструктивних елементів ТМ і обладнання.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі .

1. Виконати дослідження процесу попереднього подрібнення у різних його видах, при цьому:

- визначити раціональний максимальний розмір часток матеріалу, який подається в млин, та розробити спосіб одержання різних марок цементу без зниження продуктивності млинів;

- обґрунтувати місце введення крупки після сепаратора та описати процес спільного помелу багатокomпонентних цементів;

- створити нові конструкції енергозберігаючих попередніх подрібнювачів на базі процесу здрібнювання "у шарі" матеріалу, що руйнується.

2. Обґрунтувати закономірності енергетичного режиму роботи завантаження, що меле, у поперечному і подовжньому перерізах млина, для чого необхідно :

- одержати математичні залежності для визначення кута відриву кульового завантаження (який визначає режим роботи ) з урахуванням ковзання його по футерівкам різного профілю;

- провести дослідження нового енергоадаптованого режиму роботи молотного завантаження у подовжньому і пульсуючого в поперечних перерізах млина, що розбиває "мертву" центральну зону завантаження;

- теоретично обґрунтувати використання конічних млинів і ТМ для реалізації нового енергоадаптованого режиму роботи кульового завантаження.

3. Розробити ізошвидкісну структуру потоку, яка реалізується для сталої швидкості руху матеріалу, що подрібнюється в млині. Для цього потрібно:

- теоретично довести раціональність ізошвидкісної структури потоку та обґрунтувати доцільність використання поверхнево-активних речовин (ПАР) для регулювання швидкості потоку матеріалу;

- розробити схему подачі неньютонівських розчинів ПАР до млинів, створити устаткування для подачі ПАР у млини.

4. Провести експериментальні дослідження і промислові випробування з метою підтвердження вірогідності результатів теоретичних досліджень.

*Об'єкт дослідження* – подрібнення матеріалів у помольному агрегаті з ТМ.

*Предмет дослідження* - закономірності процесів подрібнення в помольному агрегаті з ТМ та їх взаємодія з конструктивними елементами ТМ.

*Методи дослідження:* основою теоретичних досліджень є фундаментальні положення та закони механіки (метод Даламбера, теореми Лагранжа і Коріоліса для складання рівнянь рівноваги сил, що діють на мольне тіло); фізико – механічної механіки (теорія Ребіндера відносно ПАР); теорії руйнування матеріалів (Риттингера, Бонда для визначення режиму роботи куль); гідравліки (ламінальний рух неньютонівських ПАР) та аеродинаміки (рух аспіраційного повітря з пилом у млині з використанням теорії подібності). Застосовано також методи диференціальних та інтегральних обчислень.

Теоретичні положення перевірялись експериментально в лабораторних та промислових умовах. Було виготовлено цілий ряд млинів різного типорозміру, дослідження проводили по стандартним методикам провідних науково-дослідних установ (НДЩцемент, ПВДЕНДіпроЦемент), а також по оригінальним методикам з застосуванням швидкісної кіно-фотозйомки та мікроскопічного аналізу.

Вірогідність забезпечена прийнятими за основу досліджень об'єктивно існуючих закономірностей та підтверджується: результатами великого об'єму експериментальних та промислових досліджень (розбіжність яких не перевищує 10 %); теорією імовірності для оцінки вірогідності результатів дослідів; застосуванням сучасних статистичних методів обробки експериментальних даних.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у вирішенні науково-практичної проблеми підвищення ефективності роботи помольного агрегату з ТМ за рахунок теоретичного обґрунтування та створення високоефективних процесів на основі вивчення трьох головних комплексних факторів: раціонального попереднього подрібнення у різних його видах, енергоадаптованого і пульсуючого режимів роботи мольних тіл при ізошвидкісній структурі потоку матеріалу, що подрібнюється, з використанням принципу селективності.

Теоретично розроблені та експериментально підтверджені наступні основні наукові положення:

1. Розроблено рекомендації щодо вибору максимального розміру часток матеріалу, який подають у млин.

2. Удосконалена “теорія спадковості” стосовно одержання цементів різних марок, що підвищує продуктивність млина.

3. Науково обґрунтована доцільність подачі крупки після сепаратора на визначені ділянки усередині млина, що підвищує якість клінкеру.

4. Розроблено наукові основи процесу помелу багатокомпонентних цементів, що дозволяють визначити ступінь попереднього здрібнювання важкоподрібнюваного компонента.

5. Одержала подальший розвиток математична модель ковзання кульового завантаження по футерівкам різного профілю з урахуванням ступеня заповнення кор-

пуса млина кулями, швидкісного коефіцієнта, коефіцієнтів тертя матеріалу та куль, що дає можливість визначення фактичних кутів відриву куль і режимів їх роботи.

6. Вперше створено теоретичні основи енергоадаптованого в подовжньому та пульсуючого в поперечному перерізах млина режиму роботи молотного завантаження, що дозволяє вибирати раціональні схеми футерівок і форму корпусу млина.

7. Науково обґрунтовано ізошвидкісну структуру потоку матеріала, що подрібнюється, і застосування ПАР для її реалізації.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Запропоновано нові енергозберігаючі способи, які підвищують якість цементу та поліпшують екологію:

- здрибнювання матеріалів у енергоадаптованому режимі з різними інтервалами чергування водоспадного та каскадного режимів роботи завантаження, що меле;
- роздільного помелу просипу і надколосникової фракції в різних млинах з відповідним асортиментом завантаження, що меле, без змішування просипу в холодильнику з надколосниковою фракцією;
- одержання в одному млині різних марок цементу при 100% заповненні матеріалом порожнеч між кулями, тобто без зниження продуктивності млина.

Наведено рекомендації з питань подачі ПАР та крупки після сепаратора на визначені ділянки усередину млина, що підвищує ККД млина.

Розроблено технічну документацію на нові конструкції, які підвищують ефективність роботи ТМ:

- барабанно-валкові попередні подрібнювачі, що реалізують принцип здрибнювання в шарі матеріалу;
- футерівки, що створюють енергоадаптований і пульсуючий режими роботи молотного завантаження;
- міжкамерні перегородки та бронеплити;
- пристрою для введення ПАР на задані ділянки млина;
- схему подачі в'язких ПАР до трубних млинів.

Впровадження результатів досліджень було проведено на Уль'янівському, Михайлівському, Подільському, Харківському, Балаклійському та Белгородському цемзаводах.

Новизна і корисність усіх перерахованих способів і конструкцій захищені 23 авторськими свідоцтвами та 11 патентами України.

**Особистий внесок здобувача** полягає в: в аналізі стану проблеми, формулюванні наукової концепції та мети досліджень, постановці задач досліджень, складанні програм досліджень і керівництві їх реалізації; участь у проведенні патентного пошуку та наукових експериментів, обробці дослідних даних, узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків, підготовці матеріалів до публікації та складанні заявок на винаходи, розробці проектно-технічної документації і проведенні заходів із упровадження результатів досліджень у виробництво.

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення, наукові і практичні результати роботи доповідались, обговорювались і одержали позитивну оцінку на всіх технічних конференціях ХІСІ і ХДТУБА за період з 1972 по 2005 р. р.; на другій Всесоюзній науково-технічній нараді "Шляхи удосконалювання, інтенсифікації і підвищення надійності апаратів в

основній хімії."(Суми, 1982); на Всесоюзній конференції "Ускорение научно-технического прогресса в промышленности строительных материалов и строительной индустрии" (Белгород, БТІСМ, 1987); на Всесоюзній конференції "Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении" (Белгород, БТІСМ 1989); на Всесоюзній конференції "Физико-химические проблемы материаловедения и новые технологии" (Белгород, БТІСМ, 1991); на республіканській науково-технічній конференції "Економія і раціональне використання сировинних паливно-енергетичних і інших матеріальних ресурсів у будівництві.» (Харків, 1986 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції " Качество , безопасность, энерго- и ресурсосбережение в промышленности строительных материалов и строительстве на пороге XXI века" (БЕЛГТАБМ, Белгород, 2000 і 2002 р.р; на X міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, НТУ «ХПІ» 2002р.); на X, XI, XII і XIII міжнародних конференціях «Теорія і практика процесів здрібнювання, змішання, розподілу й ущільнення» (Одеса, відповідно 2002, 2003, 2004, 2005 р.р.); на XII міжнародній науковій школі «Вибротехнология-2002» (Одеса, 2002 р.); на міжнародному конгресі "Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии", присвяченому 150-річчю з дня народження академіка В.Г. Шухова (Белгород, БДТУ ім. В.Г. Шухова, 2003 р.); на 11 міжнародному конгресі "Экология: просвещение, наука, промышленность и здоровье.", присвяченому 50-річчю Белгородської області (Белгород, БГТУ ім. В.Г. Шухова, 2004 р.); на XI1 міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, НТУ «ХПІ» 2004 р.); на XI11 міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, НТУ «ХПІ» 2005 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації опублікований у 85 наукових працях, у тому числі: 39 публікаціях у фахових виданнях (18 без співавторів) , 23 авторських свідоцтвах, 11 патентах України (6 без співавторів) і 12 тезах доповідей.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури з 445 найменувань, 10 додатків і містить в цілому 352 сторінки, в тому числі 305 сторінок основного тексту, 47 таблиць, 87 ілюстрацій.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрита суть і стан наукової проблеми, її значимість, обґрунтована актуальність теми, викладені: зв'язок роботи з науковими програмами, мета й основні задачі досліджень, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

**Перший розділ** включає основні наукові і практичні результати з цієї проблеми , вихідні дані , основні фактори і поняття з відповідними посиланнями на апробовані наукові роботи. Бібліографія по ТМ досить численна, тому в розділі приведені результати досліджень і розробок тільки відповідно за трьома головними напрямками підвищення ефективності роботи ТМ:

1. Попереднє подрібнення до млина .
2. Режими роботи молоткових тіл в поперечному та поздовжньому перерізах.

### 3. Структура потоку матеріалу, що подрібнюється.

По першому фактору в зв'язку з його комплексністю розглянута низка таких питань.

1.1 Розмір часток матеріалу, що подається в млин, має великий вплив на ефективність роботи ТМ. Згідно з даними Карякіна С.Ф., Лур'є Ю.С., Крихтіна Г.С., Паніна О.Л. та інших зменшення розміру часток на вході до млина збільшує продуктивність і знижує енергоємність процесу подрібнення.

1.2 При помелі багатокomпонентних цементів головним є питання визначення ступеня попереднього подрібнення. Вердіян М.А., Піроцький В.З., Воробйов М.Д. та інші запропонували напівемпіричну та емпіричну методики, але вони дуже трудомісткі та базуються на експериментальних даних.

1.3 Дано детальний аналіз схем подачі крупки після сепаратора до ТМ, який наведено в роботах В.Дуди, Сапожнікова М.Я. та інших. Доведено, що сучасні схеми не забезпечують ефективну роботу ТМ і потрібна нова схема подачі. Взаємозв'язок розмірів часток матеріалу на вході та виході з ТМ проаналізували Сусський Є.П., Младецький І.К. і Пілов П.І.

Для реалізації попереднього подрібнення Піроцький В.З. та інші пропонують різні схеми. Важливе значення має вірний вибір типу дробарки для попереднього подрібнення. Так, вібраційне (Lukawski J., Kus W., Sidor J) та струйне подрібнення (Акунов В.И. Дуда В.) не знайшли розповсюдження. Частіше застосовують валкові та ролико-маятникові млини (Ромадин В.П., Сиденко П.М. Ackle W.). Деякі дослідники пропонують дробарки ударної дії (Абушкевич А.А. Товаров В.В. Motek H., Nuwald E.) та пресвалкові (Піроцький В.З., Севост'янов В.С.). Піроцький В.З. виконав аналіз різних систем і довів що краще застосовувати системи: пресвалковий подрібнювач (ПВП) + трубний млин або конусно-інерційна дробарка (КІД) конструкції Механобр(а) + трубний млин. В ПВП та КІД реалізується найбільш ефективний вид руйнування – подрібнення в шарі матеріалу.

За другим фактором, стосовно режимів роботи молоткових тіл (МТ), дано аналіз існуючих режимів (Андрєєв С.Г., Товаров В.В. та інші), диференційного, розробленого Піроцьким В.З., з поперечно-поздовжнім рухом МТ (Богданов В.С.) та пульсуючого (Ейгнер Е.). Досліди, виконані Піроцьким В.З., Щенніковим А.М. та Воробйовим М.Д., дають можливість проектувати схеми з прокатних елементів, для кожної стадії подрібнення з метою одержання цементів заданого зернового складу. На жаль, відсутні теоретичні основи з вибору схем футерівок і це робиться на експериментальній основі.

Крюков Д.К. показав, що зношення футерівки зменшує продуктивність та ефективність роботи МТ пропорційно ковзанню МТ, яке можна розрахувати для гладенької футерівки по методиці Сланевського А.В. і Под'ячевої І.Б.. Андрєєвим С.Г., Роже Гийо, Ромадиним І.П., Крюковим Д.К., Воробйовим М.Д. та іншими розглядалось питання визначення необхідного коефіцієнта тертя, який забезпечує рух МТ по футерівці без ковзання.

Нетрадиційний поперечно-поздовжній рух МТ, розроблений Богдановим В.С. та його школою, суттєво інтенсифікує роботу МТ, але він є більш ефективним для закритого циклу роботи МТ.



Розробкою пульсуючого режим роботи куль шляхом виконання футерівки у формі багатокутника займалися Ейгнер Е., Змарада А.О., Ширяєв А.А. і Коняхин А.П. Коливальний режим роботи завантаження для вугільних млинів запропонували Полфьоров К.Я. і Кузнецов Ю.Л. Недолік цих пульсуючих режимів в тому, що вони здійснювались на раціональному конструкторському рівні, постійні по довжині млина і не мають теоретичної основи для їх проектування.

Третій фактор – структура потоку матеріалу - має великий вплив на ефективність помелу в ТМ. Розглянуто результати досліджень Кафарова В.В., Вердіяна М.А. та їх учнів, які перенесли методи математичного моделювання хімічних апаратів на трубні млини. Вердіяном М.А. за останні роки створені імпульсна та дискретно – безперервна технології помелу та ексергетичний метод розрахунку млинів.

Після відкритого Ребіндером П.А. ефекту зниження міцності часток матеріалу від дії ПАР, цим питанням відносно помелу в ТМ займалися Піроцький В.З., Карибаєв К.К., Пашенко А.А., Богданов В.С. та інші.

Товаровим В.В., Шевченком В.Ф. досліджено вплив ПАР на рухомість часток клінкеру, але системних досліджень по впливу ПАР на структуру потоку немає, не розроблена також математична модель подачі ПАР в млин.

Аналіз літератури показав, що недостатня вивченість теоретичних основ робочих процесів в помольному агрегаті з трубним млином є науково-практичною проблемою, вирішення якої дозволить істотно знизити енерговитрати, зменшити забруднення атмосфери та підвищити продуктивність роботи агрегату при високій якості продукту. На основі аналізу визначені головні питання, які мають бути розроблені здобувачем, і проведено обґрунтування суті науково-практичної проблеми, можливих шляхів її вирішення, що складає зміст наступних розділів дисертації.

**У другому розділі** викладені теоретичні основи головних робочих процесів, що відбуваються в помольному агрегаті з ТМ, в послідовності огляду літератури.

Відомо, що зі зменшенням розміру часток навантаження для їх руйнування зростають. З рис. 1 видно, що найбільш міцною є фракція  $(0,5 - 1) \cdot 10^{-3}$  м і що напруги руйнування практично не змінюються, починаючи з часток розміром  $7 \cdot 10^{-3}$  м. Цей розмір і є шуканим, тобто максимальний розмір клінкера даної міцності, що подається у кульові чи трубні млини, не повинен перевищувати  $7 \cdot 10^{-3}$  м. Отже, для визначення шуканого розміру будують експериментальний графік залежності міцності часток ( $\sigma$ ) від їх розміру ( $d$ ), наприклад, рис.1. За шуканий максимальний розмір часток приймаємо той розмір, починаючи з якого міцність часток практично не зменшується. Це пояснюється тим, що поки  $\sigma$  зменшується у міру збільшення  $d$ , руйнуюча сила  $P$  зростає не так різко (не пропорційно  $d^2$ ), а коли  $\sigma$  стає постійною, то сила  $P$  зростає пропорційно тільки  $d^2$ , тобто з цього моменту недоцільно збільшувати силу, що руйнує, для умов роботи куль у ТМ. Питання одержання високих марок цементів в наш час вирішується за рахунок зменшення продуктивності млинів відкритого циклу здрібнювання. З метою ліквідації цього недоліку здобувач пропонує наступне. Прийнято, що основною фракцією, яка визначає в'язучі властивості цементу, є фракція  $(+5 - 30) \cdot 10^{-6}$  м. Відомо, що кожній марці цементу відповідає свій зміст фракції  $(+5 - 30) \cdot 10^{-6}$  м. Відомо також, що клінкер при русі його в колосниковому холодильнику розділяється на дві фракції – дрібну у вигляді просипу і велику - надколосниковий продукт.

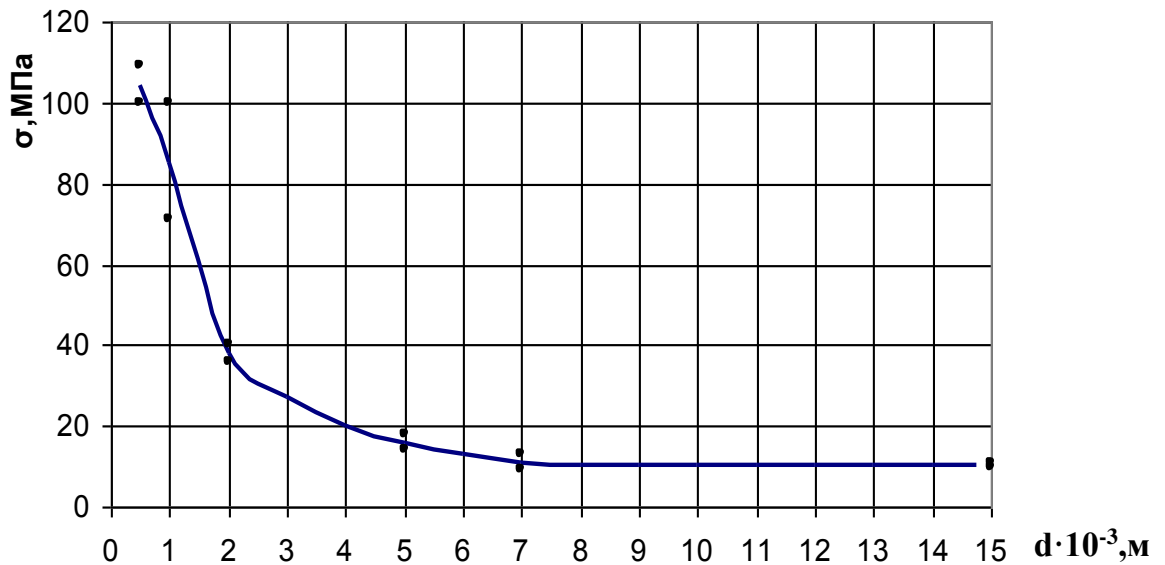


Рис. 1. Залежність міцності часток ( $\sigma$ ) від їхніх розмірів ( $d \cdot 10^{-3}, \text{м}$ )

У зв'язку з цим можна записати

$$K = \frac{Q_M \cdot a + Q_K \cdot b}{Q_M + Q_K} = \frac{Q_M \cdot a + (Q - Q_M) \cdot b}{Q}, \quad (1)$$

де:  $Q_M$  і  $Q_K$  - кількість дрібної і великої фракцій, т/годину;  
 $a$  і  $b$  – кількість фракції (+5-30)  $10^{-6}$  м (%) у готовому продукті при завантаженні млина тільки дрібною фракцією і тільки великою;

$K$  - задана відповідно до марки цементу кількість фракції (+5-30)  $10^{-6}$  м (%) у готовому продукті.

$Q$  - паспортне значення продуктивності млина.

Для визначення  $a$  і  $b$  у млин при 100 % - му заповненні порожнеч між кулями подають відповідно тільки дрібну фракцію, а потім тільки велику і вимірюють відповідну кількість фракції (+5 – 30)  $10^{-6}$  м у готовому продукті. З цією метою просип і надколосникову фракцію не змішують в кінці холодильника, як це роблять зараз, а направляють одним існуючим пластинчастим конвеєром на роздільне зберігання.

Таким чином, визначають можливий діапазон випуску цементу різних марок між знайденими значеннями  $a$  і  $b$ , але все це робиться без зменшення продуктивності, при 100% заповненні матеріалом порожнеч між кулями.

Задаючи необхідні значення  $K$ , знаючи  $a$  і  $b$ , а також номінальну  $q$  паспортну продуктивність млина  $Q$  при 100 % заповненні порожнеч, по рівнянню (1) визначають необхідну кількість дрібної фракції  $Q_M$ , а потім і кількість великої фракції як  $Q_K = Q - Q_M$ .

Можна помел просипу та крупної фракції вести не в одному млині, а в різних млинах. Для одержання граничних марок цементів – низькою марки, зі змістом фракції (+5 – 30)  $10^{-6}$  м –  $b$ , і високої (зі змістом  $a$ ) – доцільно спеціалізувати млини. Тоді просип подають в окремий млин з відповідним дрібним асортиментом кульово-

го завантаження, а надколюсниковий продукт – в інший млин з великим розміром куль.

Відомо, що замкнутий цикл є більш ефективним, ніж відкритий, але не має обґрунтування місця подавання крупної фракції матеріалу в ТМ після сепаратора, що знижує ККД млина. Зараз усі млини в замкнутому циклі працюють з подачею крупки після сепаратора на живильник перед млином. Недолік такої схеми полягає в тому, що крупка після сепаратора надходить у першу камеру млина разом з первинним матеріалом, крупність якого в 10-20 разів вища за розмір крупки, що виділена в сепараторі. Це приводить до перездрібнювання крупки і недоздрібнювання матеріалу і, як наслідок, до перевитрати енергії на здрібнювання. З метою ліквідації цього недоліку запропоновано крупку після сепаратора подавати усередину млина на те місце, де відповідно до діаграми помелу, знаходиться максимальна кількість часток матеріалу такого ж середнього розміру, як і крупка із сепаратора. Зазначена мета досягається тим, що частки крупки подають стисненим повітрям у зону тонкого здрібнювання через зону грубого.

Основною продукцією цементної промисловості зараз є цементи з різними добавками ( жужіль і т.д.), тобто багатоконпонентні цементи. Відомо, що здрібнювання порошку, який складається з важко- і легкоподрібнюваного компонентів ефективно, коли важкоподрібнюваний компонент попередньо здрібнений до проміжної дисперсності, що є оптимальною для наступного спільного здрібнювання.

Запропонована Вердіяном М.А. методика розрахунку цієї оптимальної проміжної дисперсності базується на трудомісткому експериментальному визначенні діаграм помелу суміші заданого складу при різному ступені попереднього здрібнювання важкоподрібнюваного компонента і виборі режиму з мінімальними енерговитратами на помел до однакової тонкості.

Запропонована здобувачем методика розрахунку базується на врахуванні впливу абразивних властивостей часток важкоподрібнюваного компонента і використання їх як додаткових до основного завантаження молоткових тіл, виявлення фракцій, що мають максимальні абразивні властивості для нанесення мікропошкоджень часткам легкоподрібнюваного компонента, що дає інтенсифікацію їхнього руйнування.

Виміри міцності та кількості гострих кутів часток клінкеру показали, що найбільш міцною та гострою є дисперсність  $(0,28 - 1,0)10^{-3}$  м для легкоподрібнюваного і  $(0,2 - 0,8)10^{-3}$  м для важкоподрібнюваного клінкеру.

Тому, з огляду на вищевикладене, діаграми помелу будують за дисперсностями  $(0,2 - 0,8)10^{-3}$  м (крайні значення округлені до найближчих стандартних сіток) для важкоподрібнюваної жужелі і  $(0,28 - 1,0) 10^{-3}$  м для клінкеру для того, щоб у готовому продукті дисперсність жужелі (з урахуванням кінетики її здрібнювання) не перевищувала дисперсності клінкеру. З цих міркувань при легко подрібнюваній жужелі дисперсність її прийнята однаковою з клінкером і рівною  $(0,2 - 0,8)10^{-3}$  м. На рис. 2 наведені діаграми роздільного помелу важкоподрібнюваного компонента фракції  $(0,2 - 0,8)10^{-3}$  м і легкоподрібнюваної фракції  $(0,2 - 0,8)10^{-3}$  м, що раніше досягає максимуму.

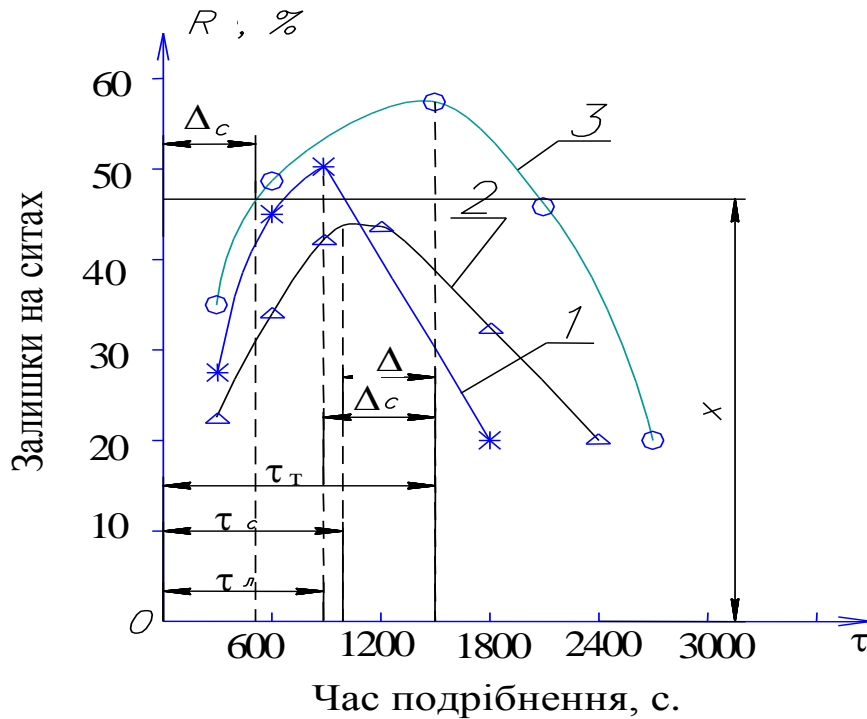


Рис. 2. Діаграма визначення тонкості попереднього здрібнювання:  
1 – діаграма помелу легкоподрібнюваного компоненту, 2 – діаграма сумісного помелу, 3 – діаграма помелу важкоподрібнюваного компоненту.

Таким чином, спільний помел необхідно вести так, щоб найбільша кількість жужелі та клінкеру досягала зазначених дисперсностей одночасно. Для виконання цієї умови потрібно знайти тонкість попереднього здрібнювання важкоподрібнюваного матеріалу. З цією метою треба максимум ординати діаграми роздільного здрібнювання важкоподрібнюваного компоненту (з абсцисою, рівною часу досягнення цього максимуму  $\tau_T$ ) сумістити з ординатою, що проходить через максимум діаграми роздільного помелу легкоподрібнюваного компоненту (з абсцисою  $\tau_L$ ), тобто змістити на

$$\Delta_c = \tau_T (1 - m) - n \tau_L, \quad (2)$$

де:  $\tau_T$  і  $\tau_L$  - абсциси максимумів діаграм здрібнювання відповідно важко і легкоподрібнюваного компонентів;

$m$  і  $n$  - частка в суміші відповідно важко- і легкоподрібнюваного компонентів при максимальних ординатах.

Зміщення діаграми вліво зручніше замінити на зміщення початкової ординати вправо на величину  $\Delta_c$ . Тоді відповідна ордината діаграми роздільного помелу важкоподрібнюваного компоненту  $X$  (рис.2) і буде шуканою величиною дисперсності попереднього помелу.

Правильність запропонованої методики побічно підтверджують результати досліджень, проведених Піроцьким В.З., які підтверджують доцільність попереднього здрібнювання жужелі до  $50 - 100 \text{ м}^2/\text{кг}$  чи клінкеру до  $150 - 200 \text{ м}^2/\text{кг}$  (у залежності від того, який з цих компонентів є важкоподрібнюваним), що відповідає запропонованим розрахункам.

Ковзання завантаження по футерівці зменшує кут підйому завантаження і викликає зношення футерівки. При урахуванні ступеня заповнення  $\phi$  завантаженням

корпусу млина з метою спрощення розрахунків можливі два методи вирішення задачі: уся маса завантаження замінюється однією матеріальною точкою центра ваги (для каскадного режиму) чи еквівалентним фіктивним шаром (для водоспадного режиму, тому що для нього центр ваги завантаження виходить за контур перерізу завантаження). Залишається знайти радіус цієї точки  $R_{ц}$  чи фіктивного шару  $R_{ф}$ .

Відповідно маємо:

$$R_{ц} = \frac{R(1 - K^3) \cdot \sin 2\delta_{\delta}}{3(1 - K^2)\delta_{\delta}}, \quad (3)$$

$$R_{ф} = \frac{R}{\psi^2} \sin \delta_{\delta} = R\sqrt{0.5(1 + K^2)}, \quad (4)$$

де:  $K = \frac{R_B}{R}$  --відношення радіуса внутрішнього шару завантаження  $R_B$  до зовнішнього  $R$ ;

$$\delta_{\delta} = \frac{180 - \arccos \psi^2 - \arccos K\psi^2}{2}, \quad (5)$$

де:  $\psi$  — швидкісний коефіцієнт, рівний відношенню робочої до критичної частоти обертання барабану млина.

Серед дослідників немає однозначних рекомендацій з вибору першої чи другої методики. Одні віддають перевагу другій, інші ж у межах однієї роботи використовують обидві методики для визначення різних параметрів без обґрунтування такого рішення.

У зв'язку з цим, здобувач пропонує для водоспадного режиму, якщо розглядаються питання кінематики, навантаження на корпус млина, оборотність завантаження, то треба користуватися поняттям фіктивного шару з радіусом  $R_{ф}$ . Коли ж розглядаються питання визначення потужності привода, то краще скористатися радіусом центра ваги  $R_{ц}$ . Це стосується і каскадного режиму роботи, коли на корпус діє вся маса сегмента завантаження і  $R_{ц}$  визначають по (3),

Оскільки фіктивний шар обертається з тією ж кутовою швидкістю що і зовнішній, то для розрахунків кутову швидкість можна залишити колишньою, прийнятою для зовнішнього шару.

Введемо наступні позначення:  $R$  - розрахунковий радіус барабана млина;  $L$  - довжина млина;  $\omega$  - кутова швидкість барабану млина;  $I_{ц}$  - відцентрова сила інерції;  $I_{к}$  - сила інерції Коріоліса;  $N$  - нормальна сила реакції футерівки;  $F_{тр}$  - сила тертя при ковзанні молоткового тіла;  $OXY$  - нерухома система координат;  $OX'/Y'$  - рухома система координат, яка пов'язана з барабаном;  $\delta$  - кут між нерухомою та рухомою системами координат;  $\theta$  - кут між  $OY'$  і вектор-радіусом точки, де знаходиться куля, тобто кут ковзання;  $\varphi_{м}$  і  $\gamma_{м}$  - кут тертя та питома вага матеріалу;  $t$  - час ковзання.

Так для гладенької футерівки, підставляючи значення  $R_{ф}$ , знаходимо кут початку ковзання при водоспадному режимі

$$\alpha_c \geq \varphi_M + \arcsin \left( \frac{\omega^2 R \sqrt{0.5(1+K^2)}}{g} \cdot \sin \varphi_M \right), \quad (6)$$

кут відриву

$$\gamma_0 = \arccos \frac{R}{g} \sqrt{0.5(1+K^2)} \left( \omega - \dot{\theta} \right)^2 \quad (7)$$

і відповідно рівняння для визначення  $\dot{\theta}$

$$\ddot{\theta} + f \cdot \left( \omega - \dot{\theta} \right)^2 - \frac{g \sin \left[ \omega \cdot t + \arcsin \left( \frac{\omega^2}{g} R \sqrt{0.5(1+K^2)} \sin \varphi_M \right) - \theta \right]}{R \sqrt{0.5(1+K^2)} \cos \varphi_M} = 0. \quad (8)$$

Сила тиску завантаження  $N$  на гладку футерівку при водоспадному режимі:

$$N = 2\delta_\delta \gamma_M L R^3 (1-K^2) \cdot \sqrt{0.5(1+K^2)} \left( \omega - \dot{\theta} \right)^2 - 2\delta_\delta \gamma_M L R^2 (1-K^2) g \cos \gamma. \quad (9)$$

Для каскадного режиму, підставляючи значення  $R_\psi$  для гладенької футерівки, маємо:

$$\alpha_c \geq \varphi_M + \arcsin \left( \frac{\omega^2}{g} \frac{2}{3} \frac{R \sin^3 \frac{\Omega}{2}}{\varphi \pi^2} \right), \quad (10)$$

$$\gamma_0 = \arccos \frac{2}{3} \cdot \frac{R \sin^3 \frac{\Omega}{2}}{\varphi \pi \cdot g} \left( \omega - \dot{\theta} \right)^2, \quad (11)$$

$$\ddot{\theta} + f \cdot \left( \omega - \dot{\theta} \right)^2 - \frac{3}{2} \cdot \frac{\varphi \pi g \cdot \sin \left[ \omega \cdot t + \arcsin \left( \frac{\omega^2 2R \sin^3 \frac{\Omega}{2} \cdot \sin \varphi_M}{3\varphi \pi g} \right) - \theta \right]}{R \sin^3 \frac{\Omega}{2} \cos \varphi_M} = 0, \quad (12)$$

$$N = \frac{2}{3} R^3 \gamma_M L \cdot \left( \omega - \dot{\theta} \right)^2 \sin^3 \frac{\Omega}{2} - \pi R^2 \gamma_M L \varphi g \cos \gamma, \quad (13)$$

де:  $\gamma = \delta + \theta$  і  $\delta = \pi - \alpha_c - \omega t$ ,  $\gamma$  знаходять по (18) при  $\beta = 0$ .

Відповідно виконаємо аналогічні заміни для східчастої футерівки при водоспадному режимі роботи (рис. 3). Оскільки вона застосовується для створення водоспадного режиму, то замість  $R$  у рівняння для окремої кулі треба підставляти значення  $R_\phi$ .

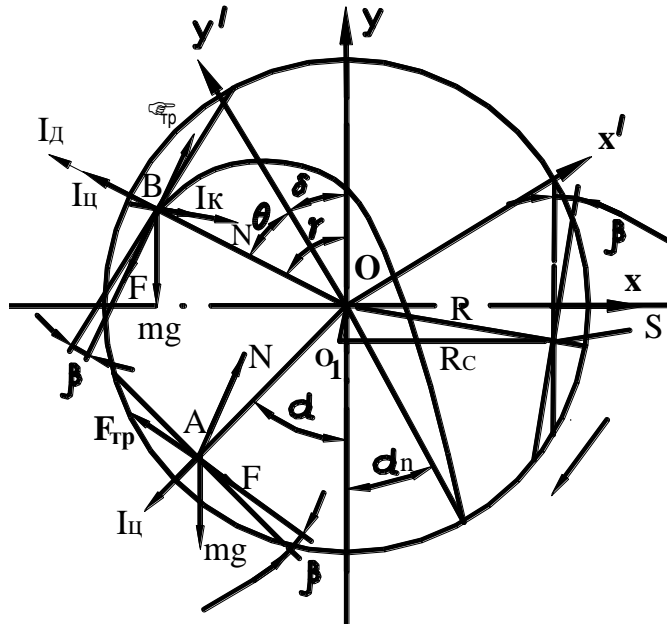


Рис. 3. Схема ковзання молотного тіла по східчастій футерівці

Для футерівки з кутом нахилу  $\beta$  зв'язок  $R = \text{const}$  порушується і приймає такий вигляд кривої логарифмічної спіралі

$$\rho = R e^{-\theta \cdot \text{tg} \beta}. \quad (14)$$

З огляду на це, кут, з якого починається ковзання завантаження, дорівнює

$$\alpha_c = \varphi_M + \beta + \arcsin \left[ \frac{\omega^2}{g} R e^{-\theta \cdot \text{tg} \beta} \sqrt{0.5(1 + K^2)} \sin(\varphi_M + \beta) \right]. \quad (15)$$

Відповідно кут відриву складає

$$\gamma_o = \arccos \frac{R}{g} e^{-\theta \cdot \text{tg} \beta} \left[ \omega^2 - 2\omega \dot{\theta} \cos \beta + \dot{\theta}^2 (1 - \text{tg}^2 \beta) + \ddot{\theta} \text{tg} \beta \right] \sqrt{0.5(1 + K^2)}. \quad (16)$$

Величина нормальної реакції футерівки  $N$ , підставляючи масу завантаження без врахування маси падаючих молотних тіл, дорівнює

$$N = \left\{ 2\delta_o \gamma_m L R^3 e^{-\theta \cdot \text{tg} \beta} (1 - K^3) \sqrt{0.5(1 + K^2)} \times \left[ \omega^2 - 2\omega \dot{\theta} \cos \beta + \dot{\theta}^2 (1 - \text{tg}^2 \beta) + \ddot{\theta} \text{tg} \beta \right] - 2\delta_o \gamma_m L R^2 (1 - K^2) g \cos \gamma \right\} \times \frac{\cos \varphi_M}{\cos(\varphi_M + \beta)} \quad (17),$$

$$\text{де } \gamma = \pi - \left\{ \varphi_M + \beta + \arcsin \left[ \frac{\omega^2 \rho}{g} \sin(\varphi_M + \beta) \right] + \omega t - \theta \right\}. \quad (18)$$

Рівняння ковзання завантаження по футерівці:

$$R\sqrt{0.5(1+K^2)}e^{-\theta g\beta} \left\{ \ddot{\theta}[1+tg\beta tg(\varphi_M + \beta)] + \dot{\theta}^2 [tg(\varphi_M + \beta)(1-tg^2\beta) - 2tg\beta] + \dot{\theta} 2\omega [\sin \beta - \cos \beta tg(\varphi_M + \beta)] + tg(\varphi_M + \beta)(\omega^2 - g \cos \gamma) \right\} - g \sin \gamma = 0. \quad (19)$$

Здобувач виконав перевірку можливості застосування понять  $R_{\text{ц}}$  і  $R_{\text{ф}}$  для вирішення питань ковзання молоткового завантаження по футерівці. Отримані на ЕОМ результати розрахунків показали високу точність визначення величини нормальних навантажень завантаження на футерівку та низьку точність для визначення параметрів ковзання. З метою підвищення точності визначення інших параметрів ковзання з урахуванням впливу ступеня заповнення завантаження здобувач використав поправочні коефіцієнти  $A$  та  $x$ , отримані А.В. Сланевським і І.Б. Под'ячевою експериментально для гладенької футерівки. Обґрунтованість такого рішення полягає в тому, що при одному ступені заповнення його вплив буде однаковим для футерівки будь-якого профілю, тому що конструктивні особливості профілю відбиваються в залежностях, що його описують.

Визначимо параметри ковзання завантаження по східчастій футерівці з урахуванням впливу ступеня заповнення завантаження шляхом уведення додаткової відцентрової сили  $I_{\text{д}} = m\omega^2\rho A \varphi^x$ . Тоді для водоспадного режиму:

$$\alpha_c = \varphi_M + \beta + \arcsin \left[ \frac{\omega^2 \rho}{g} (1 + A\varphi^x) \sin(\varphi_M + \beta) \right]. \quad (20)$$

$$N = \frac{\left\{ m \operatorname{Re}^{-\theta tg\beta} \left[ \omega^2 (1 + A\varphi^x) - 2\omega \dot{\theta} \cos \beta + \dot{\theta}^2 (1 - tg^2 \beta) + \ddot{\theta} tg\beta \right] - mg \cos \gamma \right\} \cos \varphi_M}{\cos(\varphi_M + \beta)}, \quad (21)$$

$$\text{де: } \gamma = \pi - \left\{ \varphi_M + \beta + \arcsin \left[ \frac{\omega^2 \operatorname{Re}^{-\theta tg\beta}}{g} (1 + A\varphi^x) \sin(\varphi_M + \beta) \right] + \omega l - \theta \right\}. \quad (22)$$

З умови  $N=0$  і скорочуючи на  $m$ , знаходимо кут відриву завантаження від східчастої футерівки

$$\gamma_0 = \arccos e^{-\theta g\beta} \left[ \omega^2 (1 + A\varphi^x \cos \beta) - 2\omega \dot{\theta} \cos \beta + \dot{\theta}^2 (1 - tg^2 \beta) + \ddot{\theta} tg\beta \right] \cdot \frac{R}{g}. \quad (23)$$

Рівняння ковзання завантаження по футерівці

$$\operatorname{Re}^{-\theta tg\beta} \left\{ \ddot{\theta}[1+tg\beta tg(\varphi_M + \beta)] + \dot{\theta}^2 [tg(\varphi_M + \beta)(1-tg^2\beta) - 2tg\beta] + \dot{\theta} 2\omega [\sin \beta - \cos \beta tg(\varphi_M + \beta)] \right\} + tg(\varphi_M + \beta) \left( \operatorname{Re}^{-\theta tg\beta} \omega^2 (1 + A\varphi^x) - g \cos \gamma \right) - g \sin \gamma = 0. \quad (24)$$

Рівняння були вирішені чисельним методом Рунге - Кутта. На рис.4 і в табл.1 наведені фрагменти результатів розрахунків.



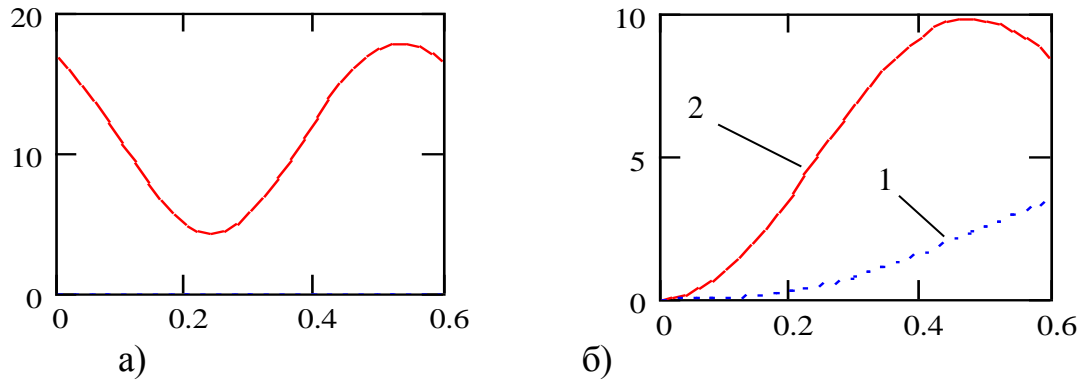


Рис.4 Параметри ковзання завантаження по гладенькій футерівці при  $R=0,24$  м,  $\varphi=0,3$  і швидкісному коефіцієнті  $0,8$  :

а) залежність  $N / m$  від часу ковзання, с.

б) залежність кута (1) і швидкості (2) ковзання від часу ковзання, с.

Як видно з табл. 1, зі збільшенням ступеня заповнення  $\varphi$  кут початку ковзання  $\alpha_c$ , кут ковзання  $\theta$  і кут підйому  $\alpha_n$  ( тобто  $180 - \gamma_0$ ) збільшуються. Для східчастої футерівки кути  $\alpha_c$  і  $\alpha_n$ , більше, ніж для гладенької в зв'язку з наявністю навіть невеликого кута в  $12^\circ$  і відповідного збільшення коефіцієнта зчеплення. Відхилення від параметрів, отриманих фотозйомкою, складає менше 10 %.

Таблиця 1

Параметри ковзання завантаження при швидкісному коефіцієнті  $0,8$  і  $R=0,24$  м

$\varphi$	$\alpha_c^\circ$	t,с	$\theta^\circ$	$\gamma^\circ$	$\alpha_n^\circ$
0,25	$\frac{44,8}{66,8}$	$\frac{0,22}{0,22}$	$\frac{20,4}{19,4}$	$\frac{73}{63}$	$\frac{107}{117}$
	$\frac{49,3}{74}$	$\frac{0,24}{0,24}$	$\frac{24,7}{22,0}$	$\frac{62}{53}$	$\frac{118}{127}$
0,35	$\frac{55,0}{85,0}$	$\frac{0,24}{0,24}$	$\frac{22,7}{27,7}$	$\frac{45}{39}$	$\frac{135}{141}$

Примітка у чисельнику - гладенька футерівка, у знаменнику – східчаста з кутом  $12^\circ$ .

За розробленими залежностями можна визначити взаємний вплив різних факторів на параметри ковзання та умови переходу від каскадного режиму роботи куль до водоспадного. Останнє робиться з умови рівності нулю величини нормального навантаження  $N$  за рахунок варіювання ступеня заповнення і частоти обертання корпусу для млинів з регульованим приводом, а також шляхом зміни кута нахилу східчастої футерівки з прокатних елементів. Якщо  $N$  не досягає нуля, то завантаження піднімається на визначену висоту але не відривається від футерівки, а ковзає вниз і робить коливальні періодичні переміщення (рис.4 а).

Виконані за різними методикам розрахунки параметрів ковзання завантаження й аналіз отриманих результатів показують, що кожна з них призначена для визначеного діапазону умов роботи трубних млинів, а результати іноді суперечливі. Усе це підкреслює необхідність подальших досліджень по створенню універсальної математичної моделі руху завантаження з урахуванням ковзання його по футерівкам.

Відомо, що між режимом роботи молотильного завантаження і розміром часток матеріалу є певний взаємозв'язок. Зараз застосовують спосіб помелу в трубних млинах, коли на різних ділянках їх довжини створюють різні режими роботи молотильного завантаження: на початку млина - водоспадний режим для подрібнення великих часток ударом, в середині - змішаний водоспадно - каскадний режим і в кінці - каскадний режим для подрібнення дрібних часток стиранням.

Недолік тут в тому, що режим роботи молотильних тіл змінюють уздовж корпусу млина, а в кожному поперечному перерізі режим залишається постійним, незмінним за кожний оберт млина. Це знижує ефективність його роботи, бо в кожному поперечному перерізі млина завжди знаходяться різні за розмірами фракції часток (і великих і дрібних), що вимагають відповідно і своїх режимів подрібнення.

Розроблено спосіб подрібнення матеріалів в трубному млині, по якому водоспадний і каскадний режими роботи молотильних тіл змінюють за один оберт з однаковими інтервалами часу, рівними  $1/4$  -  $1/6$  часу одного оберту млина. Такий пульсуючий режим роботи зменшує розміри "мертвої зони" від поперечної сегрегації куль та матеріалу та підвищує ефективність помелу.

Недолік цього способу полягає в тому, що він, в основному, направлений на руйнування "мертвої зони" молотильного завантаження і не створює оптимальної відповідності між розміром часток і способом (режимом) їх подрібнення в кожному поперечному перерізі уздовж корпусу млина, немає рекомендацій про порядок зміни режимів в кожному поперечному перерізі уздовж млина.

Відомо, що найбільш раціональним є виборче (селективне) подрібнення матеріалів. В цьому випадку частки різних розмірів повинні подрібнюватися молотильними тілами, що мають енергію, достатню для руйнування часток до певного розміру. Якщо енергія молотильних тіл буде більшою, то спостерігається її перевитрата і переподрібнення матеріалу, якщо ж енергія буде меншою, то матеріал буде непідготовлений під подальше стирання його цильпесом. Є граничний розмір часток матеріалу, подрібнення яких ударом не ефективне.

У зв'язку з тим, що в кожному поперечному перерізі уздовж млина є водночас і великі і дрібні частки, то необхідно, щоб і молотильні тіла працювали за період кожного оберту то в водоспадному, то в каскадному режимах пропорційно кількості часток, що вимагають подрібнення ударом і стиранням. Співвідношення кількості цих часток можна визначити з діаграми помелу, що побудована за залишками на ситі, розмір якого відповідає граничному розміру часток, що вимагає подрібнення стиранням. Тоді ординати під і над діаграмою помелу покажуть кількість відповідно великих і дрібних часток.

Залишається тільки визначити цей граничний розмір часток, що недоцільно подрібнювати ударом (тобто в водоспадному режимі), а необхідно подрібнювати стиранням в каскадному режимі. Цей розмір можна визначити експериментально. Таким чином, водоспадний і каскадний режими роботи треба змінювати між собою з інтервалами часу за період одного оберту в будь-якому поперечному перерізі уздовж млина як

$$\frac{T_B}{T_K} = \frac{R}{R_0 - R} \quad (25)$$

де:  $T_B$  і  $T_K$  - час роботи молотильних тіл в межах одного оберту корпусу млина відповідно у водоспадному та каскадному режимах в будь-якому  $i$  - му шуканому поперечному перерізі уздовж корпусу млина;

$R_0$  та  $R$  – вагові залишки матеріалу відповідно до початку подрібнення та в будь-якому  $i$  - му шуканому поперечному перерізі уздовж корпусу млина на ситі, розмір отворів якого відповідає розміру часток, які потребують подрібнення стиранням, що відповідає 50 % проходу часток подрібнюваного матеріалу через сито 008. Так, для клінкеру цей граничний розмір дорівнює  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Значення  $R$  згідно Розина- Раммлера можна знайти як

$$R = R_0 e^{-kL^m}, \quad (26)$$

де:  $L$  - поточна довжина млина;

$k$  і  $m$  – постійні для даного матеріалу та млина коефіцієнти.

Така зміна режимів створює новий пульсуючий режим, реалізація якого вирішується за рахунок зміни футерувальних плит з високим і низьким коефіцієнтами зчеплення по відношенню до молотильного завантаження. Відомо, що для створення водоспадного режиму роботи з метою подрібнення великих часток ударом в перших камерах трубних млинів встановлюють футерувальні плити з високими коефіцієнтами зчеплення, тобто профіль робочої поверхні яких має виступи різноманітної форми (хвилясті, східчасті, гребінчасті, кулачкові і т. д.). В других камерах для створення каскадного режиму з метою тонкого подрібнення матеріалу застосовують плити з низьким (мінімальним) коефіцієнтом зчеплення, що дадуть максимальне ковзання завантаження: це гладкі циліндричні плити. Таким чином, якщо уздовж кола барабана встановити з певною зміною розрахункову кількість плит з високим і низьким коефіцієнтом зчеплення, то за один оберт барабана молотильні тіла будуть працювати частину оберту у водоспадному (при контакті з ділянкою плит з високим коефіцієнтом зчеплення) і частину оберту в каскадному режимі (при контакті з ділянкою плит з низьким коефіцієнтом зчеплення). Використовуючи колишні значення, маємо

$$T_B / T_K = \ell_B / \ell_H = \gamma / \theta = H_i / h_i = \frac{e^{-kL^m}}{1 - e^{-kL^m}}, \quad (27)$$

де:  $\ell_B, \gamma, \ell_H, \theta$  - відповідно довжини і кути секторів ділянок плит з високим і низьким коефіцієнтом зчеплення;

$H_i$  та  $h_i$  - ординати відповідно під і над діаграмою помелу, тобто відповідно відсотковий ваговий залишок і прохід на контрольному ситі в місцях відбору контрольних проб.

З діаграми помелу будь-якого трубного млина, побудованої за залишками на ситі граничного розміру, видно, як кількість великих часток уздовж млина, що вимагають водоспадного режиму подрібнення, зменшується. Таким же чином повинен зменшуватися і водоспадний режим. Режим роботи, в основному, залежить від кута відриву молотильних тіл від футерівки, що практично в діапазоні від  $35^\circ$  до  $65^\circ$  (при відліку кута від верхньої точки вертикалі - діаметра) відповідає діапазону коефіцієн-

та зчеплення футерівки з завантаженням 0,6 - 0,3. Тому поточний кут підйому молольного завантаження  $\beta$  при відліку його від нижньої точки вертикалі-діаметра корпусу млина треба змінювати як

$$\beta = 145^\circ \cdot e^{-kL^m} \quad (28)$$

до його мінімального значення  $\beta_{\min} = 115^\circ$  в кінці млина за рахунок зміни уздовж млина коефіцієнту зчеплення молольного завантаження  $k_c$  з футерівкою як

$$k_c = 0,6 \cdot e^{-kL^m} \quad (29)$$

до його мінімального значення  $k_{c \min} = 0,3$  в кінці млина.

Звичайно на цемзаводах тонкість помелу контролюють по залишкам на ситі 088. Для перерахунку на сито 05 запропонована така залежність

$$R_{0,5} = 100 \left( \frac{R_{0,088}}{100} \right)^{\left( \frac{0,5}{0,088} \right)^{0,86}} = 100 \left( \frac{R_{0,088}}{100} \right)^{4,455} \% \quad (30)$$

На рис. 5 схематично показана діаграма помелу клінкеру, яка побудована за залишками  $R$  на ситі  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м, де по абсцисі відкладена довжина млина  $L$ , а по ординаті - такі параметри:  $R$  - вагові залишки в % в пробі матеріалу на ситі 05,  $\alpha$  - кут підйому в градусах молольного завантаження при відліку його від нижньої точки вертикалі-діаметра корпусу млина,  $k_c$  - коефіцієнт зчеплення молольного завантаження з футерівкою.

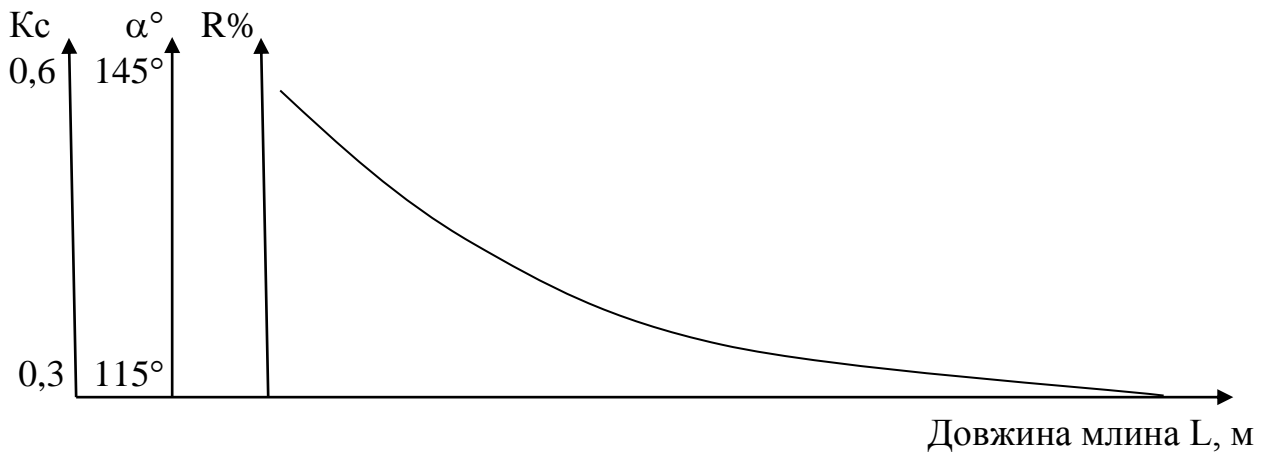


Рис. 5. Комплексна розрахункова діаграма помелу

Для конкретного використання цієї діаграми замінимо ординату  $R$  % на ординату кута відриву  $\alpha^\circ$  молольних тіл від футерівки. Кут відриву  $\alpha$  залежить від коефіцієнта частоти обертання  $\psi$ , міри заповнення корпусу завантаженням  $\phi$  і профілю футерівки, що визначається коефіцієнтом зчеплення  $K_c$ . При прийнятих на заводах середніх значеннях  $\psi = 0,67 - 0,75$ ,  $\phi = 0,25 - 0,35$  робітничий діапазон кута відриву складає від  $35^\circ$  (водоспадний режим) до  $65^\circ$  (каскадний). Величина  $K_c$  змінюється від 0,6 (чисто водоспадний режим) до 0,3 (чисто каскадний). При  $K_c = 0,5$  спостері-

гається змішаний водоспадно-каскадний режим. Відома методика Воробйова М.Д. розрахунку  $K_c$  для будь-яких профілів футерівок. Так,  $K_c = 0,463$  забезпечує кут відриву  $\alpha = 49^\circ$ , при  $K_c = 0,386$  кут відриву  $\alpha = 52^\circ$  при  $K_c = 0,311$  відповідно  $\alpha = 56^\circ$  і т.д. Тому на діаграмі помелу ординату  $\alpha^\circ$  ( $35^\circ - 65^\circ$ ) зручніше замінити на ординату  $K_c$  (0,6 - 0,3).

Отже, для реалізації принципу виборчого подрібнення необхідно по мірі зменшення часток від подрібнення при просуванні їх уздовж млина відповідно діаграмі помелу або по вищенаведеним формулам зменшувати водоспадний режим і пропорційно збільшувати каскадний. Добитися такого енергоадаптованого режиму можна різними засобами, наприклад, конічною формою корпусу млина, а в трубних млинах це можна зробити за рахунок зміни профілю футерівки, від якого залежить  $K_c$ , але це ступінчастий варіант на відміну від безступінчастого в разі конічного корпусу.

Енергоадаптований режим роботи можна реалізувати і в млинах періодичної дії, в яких зміна кута підйому змінюється в залежності від часу роботи  $t$ , а не уздовж млина  $L$ . Для цього робочу частоту обертання млина треба змінювати відносно критичної як

$$n_p = \sqrt{-\cos 145^\circ \cdot e^{-k \cdot t^m}} \cdot n_{кр}. \quad (31)$$

Швидкість матеріалу у млині має велике значення і характеризує структуру потоку. Відомо, що в останні роки для розрахунку трубних млинів успішно застосовують "кібернетичну" методику, по якій млин розглядається як апарат з визначеною структурою потоку матеріалу. Найбільш продуктивною вважається модель "ідеального витиснення", коли час перебування всіх часток в апараті однаковий. Але ця умова ще не гарантує рівності швидкостей часток по довжині, що підтверджує і теорія і практика. За один і той же час матеріал може пройти більший чи менший шлях з відповідним збільшенням або зменшенням швидкості, що негативно відіб'ється на якості продукту або на продуктивності млина.

Для досягнення моделі "ідеального витиснення" запропоновано просування матеріалу уздовж корпусу млина здійснювати з однаковою швидкістю. Рухомість шихти, що подрібнюється, залежить від багатьох факторів, обумовлених не тільки режимами роботи і конструктивними особливостями млинів, але і властивостями шихти (розміром часток, вологістю, коефіцієнтом тертя і т.д.). Сумарний вплив усіх цих факторів відбиває фактична крива швидкості шихти, зміну якої описує залежність, отримана Вердіяном М.А.

$$\Delta V = 0,355 L_i^{0.38}, \quad (32)$$

де:  $L_i$  - поточна довжина уздовж барабана млина.

Таким чином, для реалізації умови сталості швидкості її треба збільшувати на величину  $\Delta V_D$  як

$$\Delta V_D = \Delta V_{\max} - \Delta V, \quad (33)$$

де  $\Delta V_{\max}$  - максимальне значення збільшення швидкості.

Реалізувати умову (33) можна різними способами: спіральною футерівкою з кутом нахилу, що змінюється, подачею на визначені ділянки (ПАР), що впливають на швидкість руху матеріалу, установкою нахилених сегментів.

Найбільш простим і ефективним способом для реалізації умови  $v = \text{const}$  є використання ПАР. Відомо, що ПАР є не тільки інтенсифікаторами помелу, знижуючи міцність часток, але і впливають на рухливість матеріалу, збільшуючи або зменшуючи її. За технологічними умовами допускається невелика кількість ПАР (0,02 - 0,5 % від кількості матеріалу, що подрібнюється, у залежності від виду ПАР). Пропонується вирішити проблему шляхом подачі різних ПАР на визначені ділянки по довжині млина. Для цього треба визначити коефіцієнт рухливості  $K_n$ , на який треба збільшити фактичну швидкість, щоб підвищити її на  $\Delta V$ . Після підстановки значень  $\Delta V$  з (32) маємо

$$K_n = \frac{H_{\max}}{H_i} = \frac{V_H + \Delta V_{\max}}{V_H + \Delta V_i} = \frac{V_H + 0,355L_i^{0,38}}{V_H + 0,355L_i^{0,38}}. \quad (34)$$

Оскільки величина поточної довжини  $L_i$  змінюється по довжині кульової камери, то з метою спрощення рішення питання будемо змінювати  $K_n$  не безупинно, а східчасто. З достатньою точністю можна прийняти 2-3 ділянки уздовж кульової камери, де спостерігаються найбільші відхилення розрахункової швидкості від фактичної. Наприклад, для цементних млинів 3,2x15 м і 4x13,5 м значення  $L$  довжини кульової камери коливається близько 5 м, тоді, приймаючи 2 ділянки на відстані 0,75 від довжини камери, де різниця швидкостей суттєва (середина першої ділянки 0,187 м і другої - 0,562 м) та при  $V_H = 0,7$  м/хв., одержуємо

$$K_{n1} = \frac{0,7 + 0,355 \cdot 5^{0,38}}{0,7 + 0,355(0,187 \cdot 5)^{0,38}} = 1,3, \quad (35)$$

$$K_{n2} = \frac{0,7 + 0,355 \cdot 5^{0,38}}{0,7 + 0,355(0,562 \cdot 5)^{0,38}} = 1,1. \quad (36)$$

Таким чином, на 1-й ділянці треба подавати ПАР, що збільшують рухомість у 1,3 рази, а на 2-й – у 1,1 рази. Для цього підходить для 1-ої ділянки триетаноламін (ТЭА), для 2-ої – вугілля, при цьому треба вибирати ПАР, які максимально знижують міцність часток. Так ТЭА в кількості 0,03 % від ваги суміші збільшує рухомість її в 1,5 рази, соапсток у кількості 0,2 % збільшує рухомість у 1,7 рази, а милонафт у кількості 0,1 % - у 2,2 рази. Олеїнова кислота при дозуванні 0,2 % знижує рухомість у 1,2 - 1,3 рази, а мазут у кількості 0,5 % - у 1,1 рази.

Велике значення має діаметр часток водневих розчинів ПАР, що розпилюють на визначені ділянки кульової камери млина. Це пов'язано з тим, що через млин проходить аспіраційне повітря, тому мінімальний діаметр крапель повинний перевищувати діаметр крапель витання, щоб уникнути їх транспортування до міжкамерної перегородки. Стосовно до умов роботи трубного млина маємо горизонтально-потоківу гравітаційну зону розподілу крапель, для якої границя поділу залежить від числа  $Re$ .

Визначимо число  $Re$  для умов роботи млина з аспірацією

$$\text{Re} = \frac{Vd_{\text{э}}}{\nu}, \quad (37)$$

де  $\nu$  - кінематична в'язкість,  $d_{\text{э}}$  - еквівалентний діаметр.

Приймаємо

$$d_{\text{э}} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (38)$$

де:  $S$  - площа поперечного перерізу, по якому проходить повітря,  
 $\Pi$  - змочений периметр.

Для визначення  $S$  і  $\Pi$  скористаємося рис.6, на якому завантаження, що меле, з матеріалом займає заштриховану частину. Таким чином, по вільному просторі, що залишився, може розпоршуватися ПАР чи крупка після сепаратора.

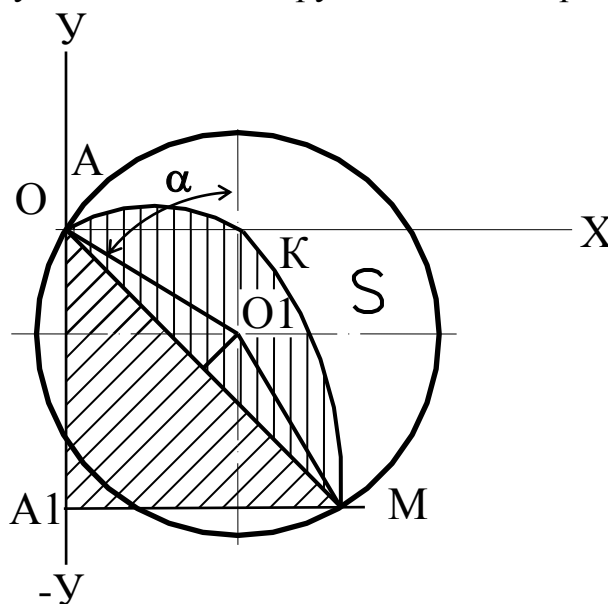


Рис. 6. Схема для розрахунку вільного простору млина

Остаточно, після виконання відповідних математичних розрахунків, одержуємо

$$S = R^2 \left( 2\alpha - \frac{1}{2} \sin 4\alpha - \frac{2}{3} \sin 2\alpha \right), \quad (39)$$

де:  $R$  - радіус барабана млина,  $\alpha^\circ$  - кут відриву завантаження при відліку від верхньої точки вертикалі - діаметра.

Відповідно знаходимо значення периметра  $\Pi$ , а потім і  $d_{\text{э}}$

$$\Pi = R(2\pi - 4\alpha) + 0.5 \cos^3 \alpha \left( 3tg\alpha \sqrt{1+9tg^2\alpha} + tg\alpha \sqrt{1+tg^2\alpha} + \ln \frac{3tg\alpha + \sqrt{1+9tg^2\alpha}}{\sqrt{1+tg^2\alpha} - tg\alpha} \right). \quad (40)$$

Наведені моделі дозволяють проектувати енергозберігаючі процеси транспортування крупки та ПАР на різні ділянки млина.

**В розділі 3** запропоновано нові устрої для інтенсифікації процесу помелу, розглянуто їх конструктивні особливості з теоретичним обґрунтуванням. Для попереднього подрібнення запропоновані нові конструкції молоткового та барабанно-валкового млинів (БВМ), які є більш ефективними ніж пресвалкові. Стосовно до процесу здрібнювання в БВМ портландцементний клінкер з різною мікротвердістю клінкерних мінералів є ідеальною системою для реалізації принципу «внутрішнього самоздрібнювання» і виникнення ефекту селективного здрібнювання, що знижує питомі енерговитрати.

Обґрунтована доцільність застосування конічного корпусу трубного млина з метою реалізації енергоадаптованого режиму роботи. Конічні млини, в порівнянні з барабанними, мають наступні переваги: плавна зміна енергії тіл, що мелють, вдовж млина в залежності від розмірів часток матеріалу, що подрібнюється, і чітку класифікацію молольних тіл.

Для розрахунку основних параметрів будь-якого кульового млина треба знати ступінь його заповнення завантаженням  $\varphi$ . Для конічного млина цей параметр не постійний, а змінюється уздовж млина як

$$\varphi_i = \frac{\alpha_i}{360} - \frac{\sin \alpha_i}{2\pi}. \quad (41)$$

Зважаючи на те, що форму сегмента завантаження має тільки при каскадному режимі млина, то поточний кут сегмента  $\alpha_i$  для конуса з кутом  $\beta$  треба визначати при відліку  $l_i$  від мінімального радіуса конуса  $R_{\min}$  з кінцевим кутом сегмента  $\alpha_k$  у днища за формулою

$$\alpha_i = 2 \cdot \arccos \left[ \frac{R_{\min} \left( 1 + \cos \frac{\alpha_k}{2} \right) + l_i \cdot \operatorname{tg} \beta}{R_{\min} + l_i \cdot \operatorname{tg} \beta} - 1 \right]. \quad (42)$$

Піроцьким В.З., на основі досвіду експлуатації трубних млинів, складена таблиця з оптимальними значеннями для млинів різних діаметрів основних параметрів режимів роботи МТ- ступеня заповнення і частоти обертання корпусу. Усе це можна реалізувати в одному конічному млині.

Конічний млин дозволяє плавно змінювати швидкісний режим і ступінь заповнення в будь-якому перерізі уздовж млина пропорційно убутним розмірам часток матеріалу, що подрібнюється. Завдання полягає у визначенні такого кута конусності, що забезпечує оптимальні параметри відповідно до таблиці Піроцького В.З. для циліндричних млинів. Для цього конічний млин розбивається уздовж млина на ряд перерізів, відповідних типорозмірам таблиці, де дані типові барабанні млини 4x13,5 м; 3,2x15 м; 3x14 м; 2,6x13 м. Необхідно вибрати такий кут нахилу, щоб у перерізах діаметрів 3,2 м; 3 м; 2,6 м на відповідних ділянках уздовж млина значення ступеня заповнення і швидкісних режимів відповідали оптимальним значенням таблиці.

За раніше отриманими залежностями для обчислення ступеня заповнення (38) можна визначити кут конусності  $\beta$ , як



$$\operatorname{tg} \beta = \frac{R_{\max} \left(1 + \frac{\cos \alpha_H}{2}\right) - 1 - \cos \frac{\alpha_i}{2} R_{\max}}{li}, \quad (43)$$

де:  $R_{\max}$  – максимальний радіус конуса корпусу млина;

$\alpha_H$  і  $\alpha_i$  – відповідно кут сегмента завантаження в початковому і розглянутому перерізах уздовж млина;

$li$  – довжина млина в розглянутому перерізі.

Значення  $\alpha_H$  і  $\alpha_i$  визначаємо за графіком через оптимальні  $\varphi$ , які беремо з таблиці Піроцького В.З. Отже, задаючись початковим і кінцевим ступенем заповнення можна визначити кут конуса.

У зв'язку з тим, що в конічному корпусі реалізуються різні швидкісні режими, але робоча частота обертання  $n_p$  залишається постійною для всього корпусу як у початковому перерізі (індекс  $n$ ), так і в іншому будь-якому розглянутому перерізі (індекс  $i$ ), то швидкісний коефіцієнт буде зменшуватися уздовж млина відповідно  $\sqrt{D_i}$ . Таким чином, правильним вибором кута конуса корпусу млина ( $\approx 3^\circ$ ) можна плавно здійснювати оптимальні параметри роботи завантаження, що меле, (ступінь заповнення, швидкісний і, відповідно, енергетичний режими), що підвищує ефективність процесу здрібнювання.

Так як режим роботи молоткових тіл визначається коефіцієнтом  $\psi$ , рівним  $\psi = \sqrt{\cos \alpha}$ , то, підставляючи граничні значення  $\alpha_i = 35^\circ$  та  $65^\circ$ , одержуємо граничні значення робочого режиму:

$$\psi_H = \sqrt{\cos 35} = 0,765; \quad \psi_K = \sqrt{\cos 65} = 0,65.$$

Маючи граничні значення  $\psi$ , можна визначити і зв'язок між граничними діаметрами конуса: початкового  $D_H$  і кінцевого  $D_K$ . Після перетворень

$$D_K = \left(\frac{\psi_K}{\psi_H}\right)^2 D_H = \left(\frac{0,65}{0,765}\right)^2 D_H = 0,69 \cdot D_H.$$

У конічних млинах можна безступінчасто реалізувати і запропонований енергоадаптований режим роботи молоткових тіл. Для реалізації енергоадаптованого режиму необхідно знайти залежність кута підйому куль від кута конусності корпусу млина. Її знаходимо із наступної умови: корпус млина є жорстким, тому робоча частота обертання його у всіх перерізах уздовж корпусу буде постійною й однаковою, але критична частота обертання  $n_{кр}$  конічного корпусу з початковим радіусом  $R$  буде змінюватися зі зміною радіуса  $R_i$  уздовж корпусу. Робоча частота обертання корпусу  $n_p = \psi n_{кр} = \text{const}$ , тому зі зміною  $n_{кр}$  повинен відповідно змінюватися і швидкісний коефіцієнт  $\psi$ . Підставляючи  $n_{кр}$ , одержуємо зв'язок цих величин для початкового перерізу корпусу ( $\psi_H, n_{крH}$ ) і будь-якого розглянутого уздовж конуса ( $\psi_i, n_{крi}$ )/

$$\psi_i = \psi_H \frac{\sqrt{R_i}}{\sqrt{R_H}}. \quad (44)$$

Оскільки  $\psi = \sqrt{\cos \gamma_0}$ , то рівняння (44) приймає такий вигляд

$$\cos \gamma_{0i} = \cos \gamma_{0H} \frac{R_i}{R_H}, \quad (45)$$

$$\text{звідки } R_H - l_i \operatorname{tg} \alpha_k = \frac{R_H \cos \gamma_{0i}}{\cos \gamma_{0H}}, \quad (46)$$

де:  $\alpha_k$  – кут конусу корпусу.

Вище було показано, що енергоадаптований режим роботи здійснюється при зменшенні кута підйому куль  $\beta_i$  уздовж корпусу від  $145^\circ$  ( $180^\circ - 35^\circ$ ) до  $115^\circ$  ( $180^\circ - 65^\circ$ ) як

$$\beta_i = 145^\circ e^{-kl^m}. \quad (47)$$

$$\text{Кут відриву } \gamma_{0i} = 180^\circ - \beta_i. \text{ Відповідно } \cos \gamma_{0i} = \cos (180^\circ - \beta_i) = -\cos 145^\circ e^{-kl^m}. \quad (48)$$

Величина  $\cos \gamma_{0H}$  буде постійною для заданих початкових умов і в нашому випадку дорівнюватиме

$$\cos \gamma_{0H} = \cos (180^\circ - 145^\circ) = \cos 35^\circ = 0,819. \quad (49)$$

Після перетворень (46) одержуємо

$$\alpha_k = \operatorname{arcctg} \frac{R_H \cos \gamma_{0H} - R_H \cos \beta_i}{l_i \cos \gamma_{0H}},$$

а з урахуванням (49) маємо

$$\alpha_k = \operatorname{arcctg} \frac{0,819 R_H - R_H \cos \beta_i}{0,819 \cdot l_i}. \quad (50)$$

Величина  $l_i$  змінюється з будь-яким зручним для дослідника кроком від 0 до розміру довжини першої кульової камери, значення кута підйому куль  $\beta_i$  зручніше брати з графіка, ніж знаходити за формулою (48). Графік кута підйому  $\beta_i$  будують в залежності від довжини ділянки  $l_i$  і з нього за прийнятим  $l_i$  знаходять шукані значення  $\beta_i$ . Для цього використовують діаграму помела клінкеру. Звичайно в цементній промисловості діаграму помелу будують по залишках на ситі 008. Оскільки енергоадаптований режим роботи розраховується на основі діаграми помелу, що побудована по залишках на ситі 05, то необхідно виконувати відповідний перерахунок за запропонованим рівнянням (30).

З рис. 7 через  $\beta_i$  по (48) знаходимо кути відриву  $\gamma_{0i}$  на різних ділянках по довжині млина і по (50) визначаємо кут конусності для цих ділянок. При розрахунку конічний корпус 1-ої камери млина може складатися з ділянок з різними кутами конусності. З метою підвищення технологічності виготовлення корпусу приймаємо один кут конусності, рівний середньому арифметичному значенню кутів. Розрахунки показують, що в залежності від характеру діаграми помелу кут конусності лежить у діапазоні від  $7^\circ$  до  $14^\circ$ .

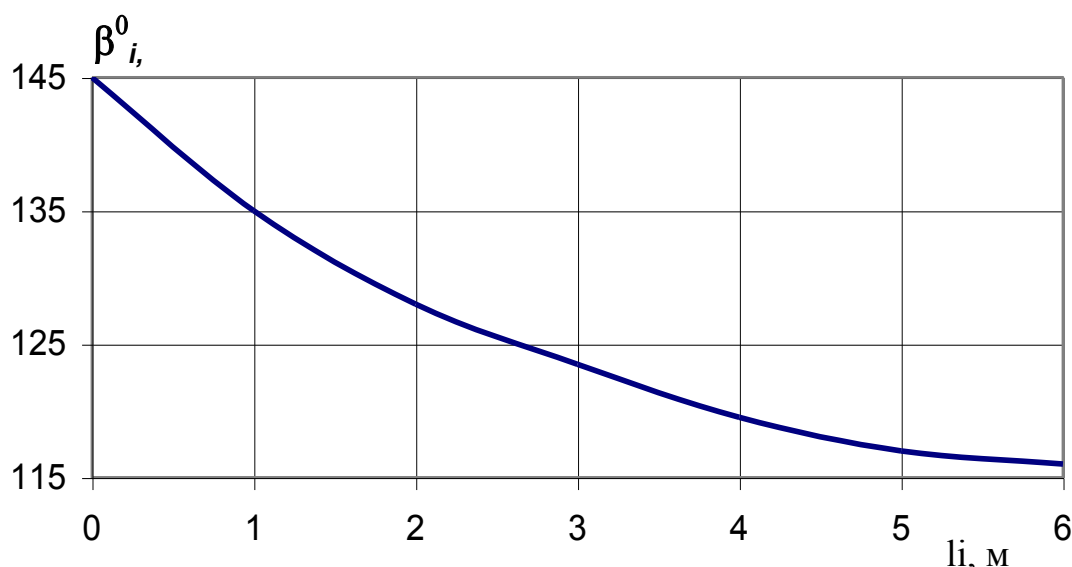


Рис. 7. Залежність кута підйому куль  $\beta_i^0$  уздовж першої камери

Одним з недоліків конічних млинів є питання футерівки конічного корпусу. З метою ліквідації цього недоліку розроблена спеціальна конструкція бронеплит. Суть пропозиції полягає в тому, що кількість бронеплит у сусідніх кільцях уздовж млина повинна відрізнятися на ціле число плит.

Аналітично це запишемо як  $\pi D - \pi d = l \cdot n$ .

Після перетворень, з урахуванням взаємозв'язку діаметрів, одержуємо

$$l = \frac{\pi \cdot 2L \cdot \operatorname{tg} \beta}{K \cdot n}, \quad (51)$$

де:  $l$  – довжина дуги більшого торця плити,  $\beta$  – кут конусності корпусу;  
 $K$  – кількість кілець;  $n$  – різниця в кількості плит в сусідніх кільцях;  
 $L$  – довжина корпусу.

Для досягнення сталої швидкості матеріалу можна застосовувати також спіральну футерівку зі змінним кутом нахилу спіралі, причому зміна кута нахилу спіралі  $\beta_i$  повинна відповідати необхідній зміні швидкості  $\Delta V = 0.355 L_i^{0.38}$ . Прирівнюючи приріст швидкості осьовій складовій колової швидкості, маємо

$$0,355(L^{0,38} - L_i^{0,38}) = \frac{V_K}{2} \sin 2\beta. \quad (52)$$

Знаючи, що  $V_K = \pi D \cdot n$  і враховуючи коефіцієнт опору завантаження  $\lambda$  руху матеріалу, знаходимо

$$\beta_i = 0.5 \arcsin \left[ \frac{0,71(L^{0,38} - L_i^{0,38})}{\pi D n \lambda} \right]. \quad (53)$$

Оскільки футерівка набирається у вигляді рядів кілець плит, то з метою спрощення виготовлення плит кут нахилу спіралі в межах одного ряду виконується постійним, тобто його визначають із залежності (53) для середніх точок габариту дов-

жини плити. Якщо  $L$  представити як  $L = l(K + 0,5)$  (де  $l$  – довжина однієї плити,  $K$  – порядковий номер кільця футерівки при відліку від нуля з боку завантаження млина), то

$$\beta_i = 0.5 \arcsin \left[ \frac{0,71(L^{0,38} - (l(K + 0,5))^{0,38})}{\pi D n \lambda} \right].$$

Для регулювання швидкості матеріалу розроблена також конструкція нахилної міжкамерної перегородки, а для пневмоподачі краплин ПАР на задані ділянки розроблена конструкція пневмофорсунки з раціональною схемою подачі неньютонівських ПАР в середину млина.

Усі розглянуті в цьому розділі конструкції захищені авторськими свідоцтвами та патентами.

**В четвертому розділі** наведені результати експериментальних досліджень, що підтверджують ефективність раціонального попереднього подрібнення, нового пульсуючого режиму роботи трубних млинів, а також основні положення теорії зміни енергії молольних тіл уздовж корпусу млина в залежності від співвідношення великих і дрібних часток у кожному поперечному перерізі, а також дослідження нової ізошвидкісної структури потоку.

Раніше ПАР застосовували тільки для зменшення міцності часток матеріалу. Результати проведених випробувань показують, що ПАР знижує міцність клінкеру селективно в залежності від розміру часток, особливо це позначається на великих фракціях (більш  $7 \cdot 10^{-3}$  м) і на дрібних (менш  $1 \cdot 10^{-3}$  м). У цьому зв'язку рекомендується подавати ПАР на ті ділянки трубного цементного млина, де знаходяться саме ці фракції. Результати дослідів показують доцільність обробки не тільки найбільш міцної фракції  $(0,5 - 1) \cdot 10^{-3}$  м, але і часток, крупніших  $7 \cdot 10^{-3}$  м, тобто ПАР треба подавати не тільки на ділянку від 0,75 до 1,75 діаметра млина, але і на ділянку до 0,75 діаметра, де знаходяться ці фракції. Однак при цьому необхідно враховувати вплив на рухливість не тільки розміри фракцій, але і вплив властивостей самих ПАР на рухливість, оскільки є ПАР, що збільшують або зменшують рухливість. Регулюючи ці фактори, необхідно домогтися оптимальної структури потоку, коли швидкість часток усіх фракцій по довжині млина однакова і постійна.

В приведених дослідах частки роздавлювалися, а в реальних умовах помелу частки піддаються більш складним комплексним навантаженням, тому з метою одержання реальних умов досліди проводили при помелі клінкеру в періодичному лабораторному кульовому млині діаметром 0,5 м. Отримані результати показали (табл. 2), що найбільш ефективним є введення ПАР через 600 с після початку помелу. До цього часу питома поверхня клінкера досягає  $100 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а залишок на ситі 008 близько 48 %. Цим умовам відповідає максимальна кількість найбільш міцної фракції з розміром часток близько  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м. Таким чином, отримані дані, в основному, підтверджують результати досліджень часток клінкеру на роздавлювання.

Серед ПАР завжди є і будуть різні в'язкі речовини, що відносяться до неньютонівських рідин і мають специфіку розрахунків їхнього транспортування. Одним з ефективних таких ПАР є, наприклад, лігносульфонати технічні модифіковані (ЛС-ТМ). За розробленою методикою для них знайдені всі необхідні параметри, які до-

зволюють виконувати розрахунки по їх транспортуванню.

Таблиця 2

## Вплив ПАР на тонкість помелу

Параметри	Час помелу, с.				
	600	1200	1800	2400	3600
Залишок на ситі 008, % без ПАР	70	64	43	28	15
з ПАР	48	42	38	24	12
Питома. поверхня, м <sup>2</sup> /кг без ПАР	60	90	160	200	220
з ПАР	100	130	180	220	250

Досліди по визначенню оптимальної зони подачі ПАР в кульову камеру млина проводились в умовах Харківського дослідного цемзаводу на млині 0,9x2.7 м. В формулу визначення продуктивності млина  $Q = C \times K$  входить коефіцієнт тонкості помелу  $K$ . Значення коефіцієнта  $K$  наводиться в ряді джерел, але при цьому тонкість помелу вказується в межах 2 – 20 % залишку на ситі № 008. Для визначення коефіцієнта  $K$  у межах 20 - 40 % залишку на ситі № 008 були проведені помели клінкеру без добавок при різних продуктивностях (рис.8). Так можна порівнювати ефективність помелу без стабілізації подачі на живильник. Для цього приймемо за базовий залишок на ситі № 008, наприклад, 30 % ( $K_6$ ). Якщо  $i$ -тій пробі відповідає  $K = K_i$  і продуктивність  $Q_i$ , то приведена продуктивність складе  $Q = Q_i K_6 / K_i$ .

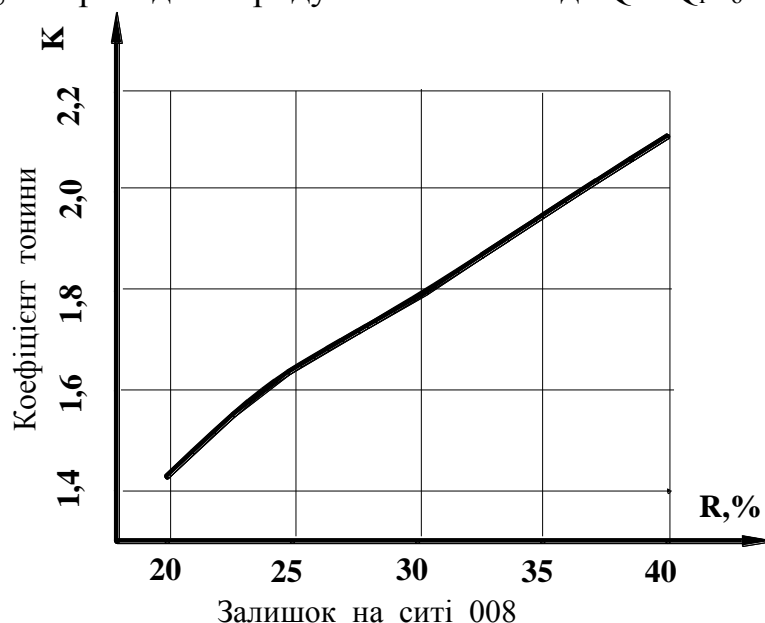


Рис. 8. Залежність коефіцієнта тонини помелу від залишку на ситі 008

Тому що ПАР чинять різну дію на міцність часток різного розміру, то необхідно знайти оптимальну зону контакту ПАР з матеріалом, що подрібнюється, по довжині барабана цементного млина. Результати експериментальних досліджень дані в табл. 3.

Залежність продуктивності від місця введення ПАР

Умови помелу	Q, кг/годину
Без добавок	280
З подачею ПАР на ділянку 0, м	286
З подачею ПАР на ділянку (0,7-1,1)D <sub>6</sub> , м	296
З подачею ПАР на ділянку (0,15-0,4)D <sub>6</sub> , м	311
З подачею ПАР на дві ділянки (0,15-0,4)D <sub>6</sub> і (0,7-1,1)D <sub>6</sub> , м	332

Як бачимо, подача ПАР в зону малої швидкості, тобто на ділянку 0,15 - 0,4 від діаметра барабана млина D<sub>6</sub> та в зону важкоподрібнюваної фракції (на ділянку 0,7 - 1,1 D<sub>6</sub>) позитивно позначається на роботі млина і дає приріст продуктивності відповідно в 31 кг/годину ( 11,4 %) і 16 кг/годину (5,7 %), а при подачі ПАР на дві ділянки – на 52 кг/годину ( 18,5 %). Кількість ПАР при подачі на зазначені зони можна скоротити на 15 – 20 % без істотного зниження ефективності помелу. Введення ПАР в оптимальну зону істотно знижує залишки на ситі і підвищує питому поверхню (табл. 2), тобто зростає тонкість помелу.

При дослідженні енергоадаптованого режиму чергування водоспадного і каскадного режимів роботи за рахунок зміни відповідно бронеплит з високим і низьким коефіцієнтами зчеплення виконували пропорційно співвідношенню ординат під і над діаграмою помелу, у різних перерізах уздовж першої камери млина (рис.9), тобто як

$$\frac{l_v}{l_n} = \frac{H_i}{h_i} = \frac{\alpha_v}{\alpha_n}, \quad (54)$$

де:  $l_v$  і  $l_n$ ,  $\alpha_v$  і  $\alpha_n$  - довжини ділянок бронеплит і кути уздовж кола корпусу млина, відповідно, з бронеплитами високого і низького коефіцієнтів зчеплення.

$H_i$  і  $h_i$  – ординати, відповідно, під і над діаграмою помелу, побудованої на ситі 05, їх беруть у середині бронеплит.

За футерівку з високим коефіцієнтом зчеплення використовували східчасті бронеплити, а футерівкою з низьким коефіцієнтом зчеплення були гладенькі циліндричні ділянки самого корпусу млина. Довжина кожної бронеплити відповідала дузі в 45°, тобто в кільці укладалося 8 бронеплит.

Після обробки діаграми помелу по залишках на ситі граничного розміру, тобто на ситі 05 (рис. 9), одержуємо відповідну схему розкладки бронеплит для створення нового пульсуючого та енергоадаптованого режиму роботи молоткового завантаження.

За цією схемою розкладки для створення нового енергоадаптованого режиму були встановлені бронеплити і результати дослідів наведені на рис. 10. Як бачимо, залишок на ситі 008 при новому режимі істотно менший, ніж при звичайному.

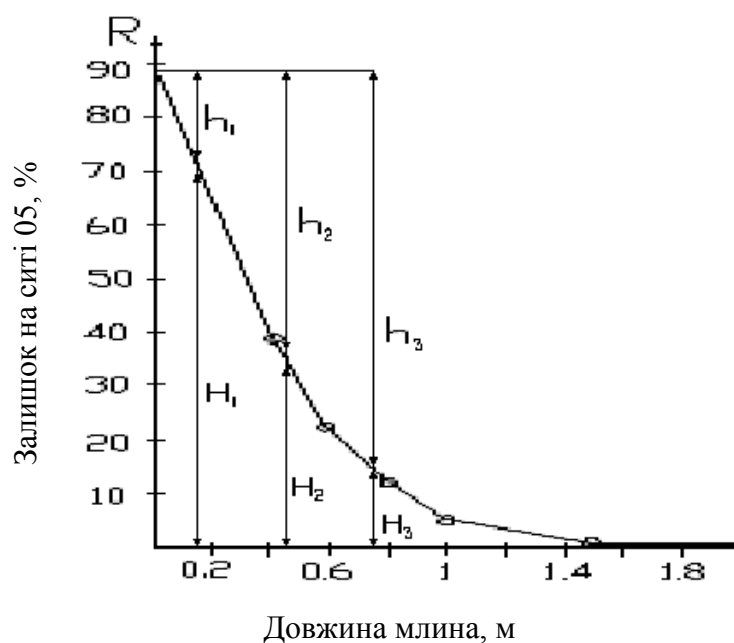


Рис. 9. Діаграма помелу на ситі 05

Вплив ПАР на тонкість помелу досліджували не тільки при звичайному режимі роботи, але й при новому енергоадаптованому режимі. ПАР вводили на початковій ділянці уздовж млина і на ділянку, де знаходиться максимальна кількість найбільш міцної фракції розміром  $(0,25 - 0,8) \cdot 10^{-3}$  м. Наведені на рис. 10 результати підтверджують положення про те, що ПАР треба подавати усередину млина на ті ділянки, де необхідно збільшити швидкість проходження матеріалу, тобто на перших ділянках млина, а також на найбільш міцну фракцію  $(0,2 - 0,8) \cdot 10^{-3}$  з урахуванням впливу ПАР на рухливість фракції.

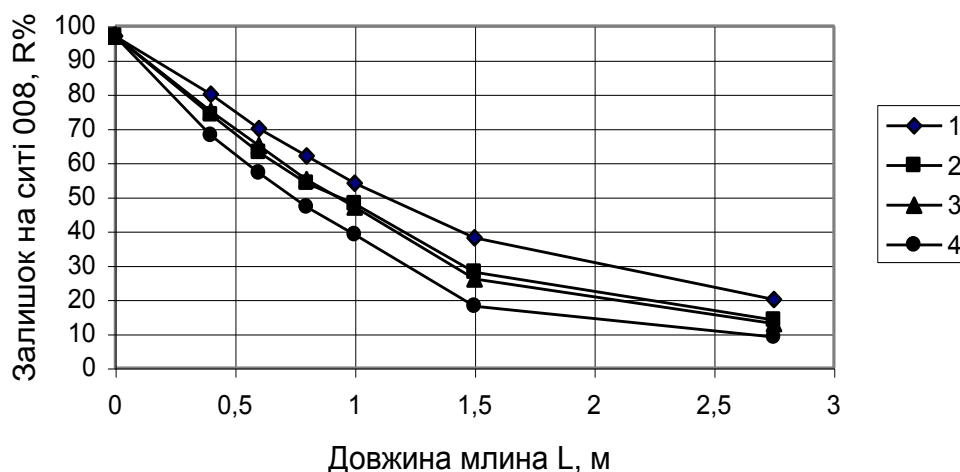


Рис.10. Залежність тонкості помелу від ПАР і режиму роботи  
 1, 2 – звичайний режим без ПАР та з ПАР,  
 3, 4 - енергоадаптований режим без ПАР та з ПАР.

Енергоадаптований і пульсуючий режими роботи підвищують ефективність помелу за рахунок руйнування «мертвої» зони не тільки молочною завантаження, але і часток матеріалу, що подрібнюється. Великі частки викидаються назовні з центра цієї зони і піддаються не тільки здрібнюванню, але і впливу ПАР, що підвищує ефективність помелу. Чергування енергоадаптованого і пульсуючого режимів,

виконане за запропонованими залежностями, експериментально підтвердило їх вірогідність.

**В розділі 5** наведені результати промислових випробувань. Були проведені промислові дослідження з виявлення оптимальної зони розпил ПАР у першу камеру млина 1x7 м. ПАР розпорошувалася на ділянку, довжина якої від початку барабана млина знаходилась в межах від 0,75 до 1,75 діаметра млина, де дисперсність матеріалу, що подрібнюється, складала 75 - 50 % класу +  $80 \cdot 10^{-6}$  м і відповідала найбільшій кількості міцної фракції  $(1 - 2) \cdot 10^{-3}$  м (табл.4).

Таблиця 4

Вплив зони розпилу ПАР на тонкість помелу цементу.

Характеристика режиму помелу	Залишок на ситі 008, %	Пит. поверхня, м <sup>2</sup> /кг	фракція 0,2-30 мкм, %	Активність, 28 діб, МПа	Питома витрата енергії, кВт/т
Помел без уведення ТЭА	11,1	302	50	47,4	35,4
З уведенням 0,025 – 0,3% ТЭА на весь матеріал першої камери	8,3	311	54	51,4	33,6
Уведення 0,01- 0,15%ТЭА в зону міцної фракції	5,7	342	60	57,5	32,3

З табл.4 видно, що питома поверхня цементу збільшилась на 10-15% та знизилась питома витрати електроенергії.

НДЦцемент(ом) розроблений ефективний і дешевий вид ПАР, отриманий на основі технічних лігносульфонатів (модифікований ТЭА) – ЛСТМ-1. Дослідження впливу місця контакту і кількості нового інтенсифікатора помелу ЛСТМ-1 на процес здрибнювання проводилися на Белгородському цементному заводі. Досліди проводилися на цементних млинах розміром 3×14 м, що працюють у відкритому циклі помелу, при здрибнюванні бездодаткового портландцементу марки 500 і марки 400 з добавкою 15 – 17 % основної жужелі. Результати випробувань наведені в табл.5.

Досліди проводили на п'ятих режимах, що відрізнялися кількістю ЛСТМ-1 і способом його подачі. У режимі 1 млини працювали без використання ЛСТМ-1. У режимах 2 і 7 розчин ЛСТМ-1 подавався безпосередньо на тарільчастий живильник, у режимах 3, 8, 4, 9, 5 і 10 розчин вводився в тонкодисперсному стані в першу камеру млина за допомогою спеціальної форсунки на визначену ділянку млина, яка, відповідно до рекомендацій здобувача, визначалася на основі аналізу діаграми помелу як місце перебування найбільш міцної фракції. У нашому випадку ця ділянка складала 1,5 - 2,5 м від кришки корпусу млина. В усіх випадках ЛСТМ -1 подавався в 10% водяному розчині.

Як видно з табл.5, при порівняно однакової дисперсності цементу на режимах 2 і 7 продуктивність млинів збільшилася на 2,2 – 2,3 т/г і відповідно знизилася питома витрата електроенергії. У режимах 4, 5 і 9, 10 продуктивність агрегатів збіль-



шилася на 5 - 7 т/годину, а питомі енерговитрати знизилися на 4,6 кВт·г/т. При цьому міцнісні характеристики не знизилися.

Таблиця 5

## Результати випробувань ЛСТМ –1

Номер режиму	Дисперсність цементу		Продуктивність Q, т/годину	Питома витрата електроенергії Э, кВт·г/т.	Межа міцності при стиску R <sub>сж28</sub> , МПа	Э/R <sub>сж28</sub> , 10 <sup>-2</sup> , кВтг/тМПа
	ΣR <sub>008</sub> , %	S <sub>м</sub> <sup>2</sup> /кг				
Портландцемент марки 500						
1	10,0	304	46,2	42,8	50,5	84,7
2	9,2	281	48,4	40,6	50,4	80,6
3	9,0	283	51,1	38,1	50,9	74,9
4	10,1	282	51,9	37,4	50,0	74,9
5	9,3	280	52,8	37,0	51,4	72,0
Портландцемент марки 400						
6	12,4	283	44,6	44,0	42,7	103,0
7	11,9	290	46,8	41,7	42,1	99,0
8	12,0	284	48,9	40,1	42,0	95,5
9	10,3	295	50,2	38,7	43,4	89,2
10	10,2	308	51,8	37,8	45,4	83,3

Результати промислових випробувань добре збігаються з результатами лабораторних досліджень і доводять перспективність розроблених процесів і конструктивних елементів ТМ.

Впровадження пульсуючого режиму роботи на цементному млині 3x14 м (ВО “Михайловцемент” РФ) підвищило продуктивність на 3,08 т/г.

На ВАТ “БАЛЦЕМ” на млині 4x13,5 м. був упроваджений енергоадаптований пульсуючий режим роботи молоткового завантаження з річним економічним ефектом 818697 грн.

## ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена рішенням науково - практичної проблеми встановлення на принципі селективності закономірностей основних робочих процесів, що визначають ефективність здрібнювання в ПА з ТМ: раціональне попереднє подрібнення у різних його видах, високоефективні режими роботи молоткових тіл у подовжньому і поперечному перерізах млина й оптимальна швидкість руху матеріалу. Створені і впроваджені в промисловість раціональні способи здрібнювання і пристрої, що є вирішенням важливої наукової і господарської проблеми, яка визначає прогрес у техніці і технології здрібнювання сотень мільйонів тонн різних матеріалів у багатьох

галузях промисловості і забезпечує значну економію енергетичних і трудових ресурсів, поліпшує екологію.

1. По раціональному попередньому подрібненню у різних його видах і стадіях отримані такі результати.

Науково обґрунтовано максимальний розмір часток матеріалу, які подаються в ТМ, з умови встановлення постійної величини напружень, що руйнують матеріал. Так, для клінкеру середньої міцності цей розмір складає  $7 \cdot 10^{-3}$  м., при міцності часток 10 МПа. Максимальну міцність 100 МПа має фракція  $(0,5 - 1,0) \cdot 10^{-3}$  м, при цьому її абразивність є також максимальною.

Удосконалено теорію спадковості стосовно до одержання різних марок цементу без зменшення продуктивності цементних млинів при наявності в схемі холодильників перештовхуючого типу.

Науково обґрунтовано доцільність подачі крупки після циркуляційних сепараторів на визначені по діаграмі помелу ділянки першої камери ТМ з використанням нової конструкції пневмо - форсунки і нових конструкцій нахилених перегородок.

Розроблено і підтверджено експериментально наукові основи помелу багатокомпонентних цементів з урахуванням абразивності і розміру часток компонентів. Установлено, що дисперсність важкоподрібнюваного компонента складає  $(0,2 - 0,8) \cdot 10^{-3}$  м, а легкоподрібнюваного  $(0,2 - 1) \cdot 10^{-3}$  м., максимальна кількість компонентів цих фракцій при сумісному помелі повинна досягатися одночасно.

Використання способу здрібнювання в шарі матеріалу, який подрібнюється, дозволило створити нове помольне устаткування - барабанно - валковий подрібнювач.

2. Удосконалено математичну модель, що дозволяє визначити параметри ковзання молоткових тіл з урахуванням ступеня заповнення та профілю футерівки при рівних інших умовах. При призначенні режиму роботи молоткових тіл необхідно враховувати зниження кута підйому їх від ковзання завантаження по футерівці. Так, різниця в кутах відриву, які обчислені з урахуванням і без урахування ковзання, складає для водоспадного режиму з завантаженням на гладкій футерівці  $54,96^\circ$  і  $41,7^\circ$  на східчастій з кутом нахилу  $12^\circ$ . При водоспадному режимі роботи ковзання по східчастій футерівці починається на  $20,2^\circ$  пізніше, ніж по гладкій, що пов'язано з більшим коефіцієнтом зчеплення східчастої футерівки.

3. Вперше теоретично встановлено закономірність зміни кута підйому молоткових тіл уздовж барабана млина на основі енергоадаптованого режиму їх роботи за рахунок відповідності зміни кута підйому зміні діаграми помелу для критичного розміру часток, що вимагають здрібнювання стиранням. Так, для клінкеру цей критичний розмір складає в середньому  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м. Запропоновано залежність для перерахунку залишків на ситі 008 на залишки на ситі 05 і розроблені варіанти реалізації енергоадаптованого режиму, один із яких – використання конічного корпусу млина. Для такого млина розроблена технологічна футерівка, обґрунтовані оптимальний кут конусності ( $7^\circ - 14^\circ$ ) і поточний ступінь заповнення молотковим завантаженням корпусу уздовж млина.

4. Науково обґрунтовано і розроблено високоефективні пульсуючий і енергоадаптований режими роботи МТ у будь-якому поперечному перерізі уздовж млина на базі відповідності змін водоспадного і каскадного режимів кількості великих і

дрібних часток пропорційно ординатам під і над діаграмою помелу, що побудована по залишках на ситі, розмір отворів якого дорівнює критичному розміру часток, які вимагають здрібнювання стиранням. Так, енергоадаптований режим роботи при постійній продуктивності дає зниження залишку на ситі 008 з 20 % до 13 %.

5. Науково обґрунтовано модель найбільш продуктивної ізошвидкісної структури потоку, критерієм оптимальності якої є сталість швидкості просування матеріалу, що подрібнюється, уздовж барабана. Для реалізації ізошвидкісної структури розроблена спіральна футерівка з кутом нахилу, що змінюється, а також технологія подачі ПАР на різні ділянки млина з метою вирівнювання рухомості потоку матеріалу уздовж млина.

6. ПАР знижують міцність часток усіх фракцій у різному ступені. Дія ПАР найбільше ефективна на частки фракцій  $(5 - 10) \cdot 10^{-3}$  м і частки менше  $(1 - 2) \cdot 10^{-3}$  м, що дає можливість зробити висновок про доцільність подачі ПАР в млин у зону з максимальною кількістю часток зазначених фракцій. При помелі клінкеру в звичайному режимі і розпилу ПАР усередину млина на задану ділянку залишок на ситі 008 знизився з 20 % до 14 % без зменшення продуктивності.

7. Розроблено методику і визначено величини транспортних характеристик ЛСТМ-1 (коефіцієнт  $\alpha$  і коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda$ ), що відноситься до в'язких неньютонівських ПАР. В усіх випадках коефіцієнт  $\alpha$  більше 1 і в середньому дорівнює 1,18. Отримані дані дозволяють розрахувати енергозберігаючу транспортну систему подачі ЛСТМ-1 до млинів.

8. Доведено доцільність подачі ПАР на визначені ділянки уздовж млина. Подача ПАР на ділянку 0,15 - 0,4 від діаметра барабана млина  $D_6$  позитивно позначається на роботі млина і дає приріст продуктивності на 11,4 %, а при подачі ПАР на дві ділянки, тобто ще і на ділянку важкоподрібнюваної фракції  $(0,7 - 1,1)D_6$ , – на 18,5 %. Кількість ПАР при подачі на зазначені зони можна скоротити на 15 – 20 % без істотного зниження ефективності помелу. Розроблена залежність для визначення еквівалентного діаметра поперечного перерізу млина, вільного від завантаження, необхідного для аеродинамічного розрахунку аспірації і польоту часток ПАР. Визначено значення границі поділу і параметри подачі ПАР на різні ділянки уздовж млина.

Найбільш ефективним є спільний вплив на матеріал, що подрібнюється, нового пульсуючого і енергоадаптованого режимів і подачі ПАР на визначені ділянки млина для досягнення ізошвидкісної структури потоку матеріалу. Подача ПАР одночасно з пульсуючим режимом знижує залишок на ситі 008 з 14 % до 9 %.

9. Результати досліджень реалізовані на цементних заводах Росії (Белгородському, Михайловському, Подольському, Ульяновському, Себряковському) та України (Амвросієвському, Балаклійському, Харківському), у галузевих науково-дослідних і проектних інститутах (НДЦцемент, ПВДЕНДіпроцемент), використовуються в навчальному процесі при читанні лекцій, виконанні курсових і дипломних проектів (ХДТУБА, БГТУ ім.В.Г. Шухова, УПА).

Упровадження пульсуючого енергоадаптованого режиму та подача ПАР усередину на задані ділянки цементного млина розміром 4x13,5 м дає річний економічний ефект не менше 2 млн. грн.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Рижов О. В, Иванов А.М.* Міжкамерні перегородки трубних млинів. Будівельні матеріали і конструкції - К.: - 1971.- №2,- С.20-22 (здобувачем виконаний аналіз конструкцій).
2. *Иванов А. М.* Класифікуюча футерівка кульових млинів // Будівельні матеріали і конструкції –К.: - 1972.- №1.- С.16-17.
3. *Иванов А.Н. Соболев Г.П.* О ступенчатой футеровке //Химическое машиностроение. – К.: Техника. 1974. – Вып. 20. – С. 3-8 (здобувачем виконано розрахунок сил на ступінчасту футерівку та аналіз її переваг).
4. *Иванов А.М., Змарада А.О.* Про величину проби подрібнюваного матеріалу. // Вісник ХПІ №97 Хімічне машинобудування. – Харків: ХГУ.- Вып 5,1974 .- С.69-71 (здобувач розрахував величину пробу ).
5. *Змарада А.А., Иванов А.Н.* Дифференциально-волнистая футеровка для цельпесных камер шаровых мельниц. // Вестник ХПИ №108 Химическое машиностроение .- Харків: ХГУ, 1974. Вып 6.- С. 9-12 ( здобувач розробив конструкцію футерівки ).
6. *Иванов А.Н, Соколов В.А., Обод А.П, Трондин А.Н.* О конструировании волнистой классифицирующей бронефутеровки, Сб.трудов МИСИ и БТИСМ.-М.- 1975,Т.4, Т.2.- С.13-17 (здобувач запропонував нову конструкцію футерівки).
7. *Иванов А.Н. Боровик А,А,* Регулирующая футеровка трубных мельниц, Сборник трудов МИСИ и БТИСМ, Механизация технологических процессов в промышленности строительных материалов.- М.:1980,- С. 181--184. (здобувач запропонував цю футерівку для структури потоку).
8. *Иванов А.Н, Боровик А.А.* О комплексном режиме работе мелющей загрузки. Труды ВНИИЦЕММАША.- Тольятти: -1981. Вып.ХХIV.- С. 27-32 (здобувачем запропонована ідея комплексного режиму роботи та приклад його реалізації).
9. *Иванов А.Н.* Технология изготовления машин для производства строительных материалов. Учеб. пособие. - К.: Вища шк.,1981.- С. 145-152.
- 10.*Иванов А.Н. Пироцкий В.З .* Исследование транспортной способности вязких интенсификаторов помола . Труды НИИЦЕМЕНТа).- М.: 1983,вып.73.- С. 122-127 (здобувач розробив стенд і виконав досліді).
- 11.*Обод А.П., Иванов А,Н.* Определение максимального размера материала, подаваемого в шаровые или трубные мельницы .// Сб. научн. тр. МИСИ и БТИСМ. Моделирование, автоматизация и механизация процессов производства строительных материалов.- М.: 1984.- С.109--114 (здобува обгрунтував методіку визначення максимального розміру).
- 12.*Иванов А,Н, Кобзев И,В.* Скорость движения материала в барабанных мельницах .// Сб. научн. тр. МИСИ и БТИСМ. Моделирование, автоматизация и механизация процессов производства строительных материалов.- М.: 1984. - С. 114-119(здобувач обгрунтував ідею постійної швидкості потоку).
13. *Иванов А.Н. ,Иванова И.Б., Несмеянов Н.П.* К вопросу распыла интенсификаторов помола в трубные мельницы. // Сб. научн. тр. Совершенствование

- техники и технологии измельчения материалов. – Белгород: МИСИ. БТИСМ, 1989, - С.214--219. (здобувач розробив технологію подачі та стенд ).
14. *Иванов А.Н.* Проектирование энергосберегающих конических мельниц. // Интегровані технології та енергозбереження.-Харків: ХДПУ.-1999.- №4, - С.27-31
  15. *Иванов А.Н.* Расчет процесса измельчения многокомпонентных цементов. // Науковий вісник будівництва.- Харків: ХДТУБА, 1999. - №6, - С.204--208.
  16. *Иванов А.Н.* Определение степени заполнения конических мельниц. // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХДТУБА, 1999. - №8,- С.246--250.
  17. *Иванов А.Н.* Закономерности энергетического режима работы мелющей загрузки трубных мельниц. // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: ХДПУ, 2000.- №1,- С.8-12 .
  18. *Иванов А.Н., Педан С.А.* Предизмельчение и помол материалов.// Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА. –2001.-№13.- С.65-71.
  19. *Иванов А.Н.* Исследование энергосберегающего пульсирующего режима работы мелющей загрузки трубных мельниц, // Интегровані технології та енергозбереження. Харків. ХДПУ, 2000.- №1, - С.14-18.
  20. *Иванов А.Н., Балера Н.Д., Александрова Е.Б.* Энергетический режим работы трубных мельниц .Труды Международной научно -практической конференции „Безопасность ,энерго-и ресурсосбережение в промышленности строительных материалов и строительстве на пороге XXI века”. Часть 4, Бел ГТАСМ. – Белгород: 2000.- С. 76-80(здобувач розробив залежності режимів роботи).
  21. *Иванов А.Н.* Экспериментальные исследования нового режима работы трубных мельниц. // Интегровані технології та енергозбереження,--Харків: ХДПУ, 2000.-№4, - С.78-88 .
  22. *Иванов А.Н.* Исследование влияния поверхностно -активных веществ на работу трубных мельниц. // Интегровані технології та енергозбереження,--Харків: -- 2001,-№1, –С. 88-101.
  23. *Иванов А.Н.* Определение режимов работы трубных мельниц с учетом скольжения загрузки. // Интегровані технології та енергозбереження.-Харків: НТУ “ХПИ” ,2001. - № 4 .- С. 22-41.
  24. *Иванов А.Н.* Интенсификация рабочих процессов в трубных мельницах. Зб. наук.пр. «Теорія і практика процесів подрібнення, розділення, змушування і ущільнення. –Одеса: ОНМА.-2003. Вып.10.- С.77-81.
  25. *Иванов А.Н.* Перспективные измельчители и режимы измельчения. //XII международная научная школа «Вибротехнология-2002» по механической обработке дисперсных материалов и сред.- Одесса: НПО «ВОТУМ»,2002. Вып. 12 .-С.25-28.
  26. *Иванов А.Н., Богданов Д.В.* Пути интенсификации работы шаровых и трубных мельниц. // Энергосберегающие технологии в дорожной и строительной технике. Межвузовский сборник статей.- Белгород: 2002.- С. 78 – 83. (здобувач дав напрямки інтенсифікації роботи млинів).
  27. *Иванова И.Б., Иванов А.Н.* Перспективные схемы измельчения. // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научн. тр. Тематический выпуск «Химия, химическая технология и экология», -Харьков: 2002.- №9 т.1 – С. 32 – 36. (здобувач дав перспе-

- ктивні схеми подрібнення).
28. *Иванов А.Н., Кулаенко О.А.* Расчет скольжения мелющей загрузки в барабанных мельницах. // Интегровані технології та енергозбереження.- Харків: НТУ “ХПІ”, 2003.- №1.- С.90-107. (здобувачем запропоновані розрахункові залежності )
  29. *Иванов А.Н.* К расчету аэродинамики барабанных мельниц. // Науковий вісник будівництва, ХДТУБА.-Харків:– 2002.– №19. - С.136 – 140.
  30. *Иванов А.Н.* Основные принципы усовершенствования шаровых барабанных мельниц. Межвузовский сборник Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород:-БГТУ им В.Г. Шухова,2003. - С.96-102.
  31. *Иванов А.Н.* Энергосберегающая технология и техника помола цемента.//Сборник докладов на Международном конгрессе, посвящённом 150-летию академика В.Г. Шухова.- Белгород. БГТУ им. В.Г. Шухова.2003.- С.310-312.
  32. *Иванов А.Н.* Энергоадаптированный режим работы ШБМ и его реализация. // Вісник НТУ “ХПІ” . Хімія, хімічна технологія та екологія . –Харків: НТУ “ХПІ”, 2003, - Вип.17.–С.123-128.
  33. *Иванов А.Н.*Использование футеровки БРОПЭКС для реализации энергоадаптированного режима работы ШБМ. // Интегровані технології та енергозбереження.- Харків: НТУ “ХПІ”, 2004,- №1.- С.14-18.
  34. *Иванов А.Н., Чудный А.Ю.* Использование отходов производств в качестве интенсификаторов помола.// Вестник БГТУ.Часть V1. –Белгород:-БГТУ им В.Г. Шухова.2004,-№ 8. - С.153-159. (здобувач запропонував використання відходів при роботі млинів ).
  35. *Иванов А.Н., Чудный А.Ю.* Интенсификация работы трубных мельниц замкнутого цикла. // Вестник НТУ “ХПІ”. Химия, химическая технология и экология .-Харьков: НТУ “ХПІ”, 2004. - № 29.- С.104-112. (здобувач дав ідею і способи ліквідації викидів пилу в атмосферу ).
  36. *Иванов А.Н., Чудный А.Ю.* Расчёт пневмотранспорта крупки сепаратора в трубные мельницы. Вісник НТУ “ХПІ”.Хімія,хімічна технологія і екологія.- Харків: НТУ “ХПІ”, 2004.- Вип.40. - С.72-76. (здобувач дав методику розрахунку).
  37. *Иванов А.Н.* О скольжении загрузки в трубных мельницах // Интегровані технології та енергозбереження.- Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.- №3. - С.75-82 .
  38. *Иванов А.Н., Чудный А.Ю.* Оптимизация возврата крупки после сепаратора в трубные мельницы. // .Вісник НТУ “ХПІ”. Хімія,хімічна технологія і екологія.-Харків: НТУ “ХПІ”,2005.Вип.51.- С.94-99.(здобувач дав метод рішення проблеми).
  39. *Иванов А.Н., Чудный А.Ю.* Резервы повышения эффективности замкнутого цикла измельчения .. Вісник НТУ “ХПІ”.Хімія,хімічна технологія та екологія. -Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.Вип.26. – С.44-53. (здобувач дав перелік резервів).
  40. *Межкамерная перегородка шаровой мельницы.* А.с. 325989 СССР М. Кл. ВО2С 17/24./ А.В. Рыжов, А.Н. Иванов ( СССР).--№1402633/29-33; Заявл. 09.11.1970; Опубл.19.01.1972,Бюл.№4. -2 с.

41. *Способ* помола портландцементного клинкера и добавок. А.с.607589 СССР, М.Кл2 В 02с23/06./ В.З. Пироцкий, А.Н. Иванов, Н.С. Мацуев и А.А. Боровик (СССР). -№2445550/29-33; Заявл. 24.01.77. Оpubл. 25.05.78, Бюл.№19.-3 с.
42. *Футеровка* шаровой трубной мельницы. А.с.795561.СССР, М.Кл.3В02с 17/22. / А.Н. Иванов, А.Г. Кисель, А.А. Боровик (СССР).-№2749903/29-33; Заявл. 28.03.79; Оpubл. 15.01.81, Бюл.№2.-3 с.
43. *Способ* измельчения материала в шаровой мельнице периодического действия .А.с 833312.СССР, М. Кл3. В02С 23/06. / А.А Боровик, А.Н.Иванов, А.Г.Кисель (СССР). - №2777573; Заявл. 06.06.79; Оpubл.02.02.81, Бюл. №3.-4 с.
44. *Мелющее* тело. А.с 837406.СССР, м.Кл3. В02С17/20. / А.Н.Иванов, А.Г. Кисель, Б.В. Алексеев ( СССР).-№2828536/29-33; Заявл. 07.08.79; Оpubл.15.06.81, Бюл.№22.-2 с.
45. *Межкамерная* перегородка трубной мельницы. А.с 995870 СССР, М.Кл3.В02С 17/18. / А.Н.Иванов, Б.В.Алексеев, В.И.Жарко, А.Г.Кисель ( СССР).--№3322265/ 29-33; Заявл. 19.05.81; Оpubл. 15.02.83, Бюл.№6.-3 с.
46. *Способ* измельчения материалов в трубной мельнице. А.с.1005904 В02С 23/06. / А.Н.Иванов, А.Г.Кисель, А.А.Боровик ( СССР).-№3306761 /29-33; Заявл. 22.06.81; Оpubл. 23.03.83, Бюл. №11.- 3 с.
47. *Устройство* для ввода интенсификаторов помола в барабанную мельницу. А.с 1011259 SU, В02С 23/02. / А.Н.Иванов, А.Г. Кисель, А.А.Соловьев (СССР).- №3342812 /29-33; Заявл. 14.07.81; Оpubл.15.04.83, Бюл. №14.-3 с.
48. *Межкамерная* перегородка трубной мельницы. А.с 1034773 SU, В02С 17/18. / А.Н.Иванов, А.Г. Кисель (СССР).-№3395591; Заявл. 10.02.82; Оpubл.15.04.83, Бюл. №14.-4 с.
49. *Футеровка* барабанной мельницы. А.с. 1074594 SU .В02С 17/22. / А.Н.Иванов, А.Г.Кисель, А.А. Боровик (СССР).-№3242276 /29-33; Заявл. 18.01.81; Оpubл.23.02.84, Бюл. №7.-3 с.
50. *Способ* помола цемента. А.с.1079288 SU, В02С 19/00. / А.А.Молодцов, В.А. Чурюмов, К.Ф. Матвиенко, А.Б. Бреслер, В.З. Пироцкий, А.Н. Иванов (СССР).--№3556489/29-33; Заявл. 22.02.83; Оpubл.15.03.84, Бюл.№10.-4 с.
51. *Устройство* для разгрузки емкостей, периодически заполняемых жидкостей. А.с. 1118610 SU, В67Д 5/00. / А.Н.Приходько, А.Н.Иванов, А.Г.Кисель, В.А.Клищенко (СССР),--№ 3570155 /28-13; Заявл. 28.03.83; Оpubл.15.10.84, Бюл.№38.-4 с.
52. *Способ* регулирования процесса измельчения материалов в трубной мельнице. А.с.1151305 SU, В02С 25/00. /А.Н.Иванов, А.Г.Кисель, Б.В.Алексеев (СССР).- №3594763/29-33; Заявл.25.05.83. Оpubл.23.04.85. Бюл.№15.-3 с.
53. *Способ* помола клинкера. А.с.1230683 SU, В02С 23/06./ В.Е. Ведь, А.Н.Иванов, А.А.Новосельцев, А.А.Шамаева, К.Т.Подорван (СССР).- №3816708; Заявл. 27.11.84.; Оpubл.15.01.86, Бюл.№1.-3 с.
54. *Устройство* для регулирования дальности и дисперсности распыла интенсификаторов помола в трубные мельницы. А.с.1299625 SU, В02С 23/06. / А.Н.Иванов, И.Б.Иванова, А.Г.Кисель (СССР) -№3941291/29-33; Заявл. 08.07.85; Оpubл.30.03.87, Бюл.№12.-3 с.

55. *Способ* помола портландцементного клинкера и добавок. А.с.1301490 SU.В02С 23/06. / А.Н.Иванов, А.Г.Кисель, И.Б.Иванова (СССР) -3957487 /29-33; Заявл. 19.07.85. Оpubл. 07.04.87. Бюл. №13.-2 с.
56. *Способ* помола клинкера. А.с.1457999 SU, В02С 23/06. / А.Н.Иванов, А.Г.Кисель (СССР) --№4143731 /29-33; Заявл. 04.11.86; Оpubл. 15.02.89, Бюл.№6.-2 с.
57. *Барабанная* мельница. А.с.1512655 SU В02С 17/10,15/16. / Е.Д.Верич. А.Н.Иванов, В.Н.Лямин, Г.Д.Федоров, Ю.В.Шульгин (СССР).--№4375439 /31-33; Заявл. 05.01.88; Оpubл.07.10.89, Бюл. №37.- 6 с.
58. *Дробилка* ударного действия. А.с.1609483 SU,В02С 13/13,17/10. / А.В.Рыжов, Е.Д.Верич, А.Н.Иванов (СССР).-№4347796 /31-33; Заявл. 19.11.87; Оpubл. 30.11.90, Бюл. № 44.-3 с.
59. *Способ* помола портландцементного клинкера и добавок. А.с.1724370 SU, В02С 23/06. / А.Н.Иванов, И.Б.Иванова (СССР)-№4816772 /33; Заявл. 20.04.90; Оpubл.07.04.92, Бюл. № 13.-3 с.
60. *Футеровка* конического корпуса шаровой мельницы. А.с.1731277 SU, В02С 17/22. / В.Р.Ковалюх, А.Н.Иванов, И.И.Боднарук (СССР). №4754783 /33; Заявл. 29.08.89; Оpubл.07.05.92, Бюл. №17.- 4 с.
61. *Способ* помола материала. А.с 1733097 SU В02С 19/06. / А.Н.Иванов, И.Б.Иванова (СССР).-№4816770 /33; Заявл. 20.04.90; Оpubл. 15.05.92. Бюл. №18.-2 с.
62. *Футеровка* конического корпуса шаровых мельниц. А.с.1748866 SU В02С 17/02. / В.Р.Ковалюх, А.Н.Иванов, И.И.Боднарук, И.Б.Иванова (СССР).- №4843765 /33; Заявл. 27.06.90; Оpubл. 23.07.92, Бюл. №27.- 4 с.
63. Пат.№1655 Україна, В02С17/10, В02С15/16. Барабанний млин./ Веріч Є.Д., Іванов А.М., Лямін В.Н. та інші.(Україна).-№4375439/SU; Заявл. 15.10.93; Оpubл. 25.10.94. Бюл.№3.-2 с.
64. Пат.,25179 Україна, В02С 17/10, 15/16. Млин –сушарка./ Іванов А.М., Сапелін С.О., Ковтун О.П., Білан В.Д. (Україна). -№95104446; Заявл. 10.10.95; Оpubл.25.12.98. Бюл.№6.-7 с.
65. Пат. 50843 Україна, В02С23 /Спосіб помелу матеріалів в трубних млинах. / Іванов А.М.(Україна). -№2000020953; Заявл. 21.02.2000; Оpubл. 15.11.2002. Бюл. №11.- 4 с.
66. Пат. 70927 Україна, В02С23/06, Спосіб подрібнення матеріалів в трубних або кульових млинах / Іванов А.М.(Україна).-№ 2000020951; Заявл. 21.02.2000, МПК 7В02С23/06 Оpubл. 15.11.2004. Бюл. №11.-7 с.
67. Декл. пат. 29653 Україна, В02С 21/00, 17/10, 15/16. Помольно-сушильний агрегат./ Іванов А.М., Сапелін С.О., Ковтун О.П., Білан В.Д.(Україна).-№ 96051923; Заявл. 16.05.1996; Оpubл. 30.04.1999. Бюл.№ 2.- 6 с.
68. Декл. пат. 34780, Україна, В02С 19/00. Спосіб отримання багатокомпонентного цементу./ Іванов А.М.,(Україна). - № 99073829; Заявл. 06.07.1999; Оpubл. 15.03.2001. Бюл.№ 2.- 5 с .
69. Декл. пат. 34781 Україна, В02С 17/10, 15/16. 06.07.1999 Подрібнювач матеріалів. / Іванов А.М.(Україна)-№ 99073830; Заявл. 06.07.1999; Оpubл. 15.03.2001. Бюл. № 2. –4 с.



70. Декл. пат. 34782 Україна, ВО2С 17/10, 15/16. 06.07.1999 Млин-сушарка. / Іванов А.М.(Україна).-№ 99073831; Заявл. 06.07.1999; Опубл. 15.03.2001. Бюл. № 2. –6 с.
71. Декл. пат. 39311 Україна, ВО2С 17/10, 15/16. Котково-барабанний млин./ Іванов А.М.(Україна).-№ 200020952; Заявл. 21.02.2000; Опубл. 15.06.2001. Бюл. № 5. -4 с.
72. Декл. пат. 44087 Україна, ВО2С 17/10, 15/16. Універсальний млин-сушарка. / Іванов А.М., Педан С.О.(Україна).-№20011042743; Заявл. 23.04.2001; Опубл. 15.01.2002. Бюл.№1. – 7 с.
73. Декл. пат.46246 Україна В02С . Спосіб помелу та млин для його здійснення./ Іванов А.М., Педан С.О.(Україна).-№ 20011042744; Заявл. 23.04.2001; Опубл. 15.05.02. Бюл. №5.-5 с.

В опублікованих авторських свідоцтвах та патентах зі співавторами здобувачу належить написання формул винаходів і опис заявок.

### АНОТАЦІЯ

Іванов А.М. Наукове обґрунтування та створення високоефективних процесів подрібнення в помольному агрегаті з трубним млином на принципі селективності. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. Харків, 2006.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-практичної проблеми підвищення ефективності роботи помольного агрегату з ТМ за рахунок теоретичного обґрунтування і створення високоефективних процесів на основі вивчення трьох головних комплексних факторів: раціонального попереднього подрібнення у різних його видах, енергоадаптованого і пульсуючого режимів роботи молоткових тіл та ізошвидкісної структури потоку матеріалу, що подрібнюється, з використанням принципу селективності. Обґрунтовано максимальний розмір часток матеріалу, що подається в млин. Науково обґрунтована доцільність подачі крупки після сепаратора на визначені ділянки усередині першої камери млина. Удосконалена “теорія спадковості” стосовно до одержання цементів різних марок без зниження продуктивності млина. Розроблено наукові основи процесу помелу багатокомпонентних цементів, які дозволяють визначити ступінь попереднього здрібнювання важкоподрібнюваного компонента. Вперше створені теоретичні основи енергоадаптованого в подовжньому та пульсуючого в поперечному перерізах млина режиму роботи молоткового завантаження, що дозволяє вибирати раціональні схеми футерівок і форму корпусу млинів. Одержала подальший розвиток математична модель ковзання кульового завантаження по футерівкам різного профілю з урахуванням ступеня заповнення корпусу млина кулями, Науково обґрунтовані ізошвидкісна структура потоку матеріалу, що подрібнюється, і застосування ПАР для її реалізації.

Ключові слова: процес подрібнення, дробарка, параметри трубного млина, класифікація, інтенсифікація, структура потоку.

## АННОТАЦИЯ

Иванов А.Н. Научное обоснование и создание высокоэффективных процессов измельчения в помольном агрегате с трубной мельницей на принципе селективности.- Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2006.

Диссертация посвящена решению важной комплексной научно-прикладной проблемы повышения эффективности работы помольного агрегата с ТМ за счёт теоретического обоснования и создания высокоэффективных процессов на основе изучения трёх главных факторов : рационального предизмельчения в разных его видах , энергоадаптированного и пульсирующего режимов работы мелющих тел при изоскоростной структуре потока измельчаемого материала с использованием принципа селективности.

Научно обоснован максимальный размер частиц материала, подаваемого в ТМ, из условия установления постоянной величины напряжений, разрушающих материал, с учётом зависимости прочности частиц от их размера. Предложен способ получения любых марок цемента без уменьшения производительности цементных мельниц при наличии в схеме холодильников переталкивающего типа. Обосновано место ввода крупной фракции во внутрь ТМ после сепаратора и разработана схема подачи крупки на заданные участки мельницы с использованием новой конструкции пневмо- форсунки и новых конструкций наклонных перегородок.

Разработаны и подтверждены экспериментально научные основы помола многокомпонентных цементов с учётом абразивности и крупности частиц компонентов. Создана методика определения степени предварительного измельчения трудноразмалываемого компонента. Использование способа измельчения в слое измельчаемого материала позволило создать новое помольное оборудование - барабанно – валковый измельчитель, который является самым эффективным предизмельчителем, а также и самостоятельным помольным агрегатом.

Усовершенствована математическая модель, позволяющая рассчитать параметры скольжения мелющих тел с учётом степени заполнения загрузкой корпуса мельницы и профиля футеровки при прочих равных условиях.

Впервые теоретически установлена закономерность изменения угла подъема мелющих тел вдоль барабана мельницы на основе энергоадаптированного режима их работы за счет соответствия угла подъема (следовательно и режима работы) критическому размеру частиц, требующих измельчения истиранием. Так, для клинкера этот критический размер составляет в среднем  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м. Разработаны варианты реализации энергоадаптированного режима, один из которых – использование конического корпуса мельницы. Для такой мельницы разработана новая технологичная футеровка, обоснован оптимальный угол конусности. Научно обоснованы и разработаны новые высокоэффективные пульсирующий и энергоадаптированный режимы работы МТ в любом поперечном сечении по длине мельницы на базе соответствия чередования водопадного и каскадного режимов количеству крупных и мелких частиц

пропорционально ординатам под и над диаграммой помола, построенной по остаткам на сите, размер ячеек которого равен критическому размеру частиц, требующих измельчения истиранием,

Научно обоснована модель наиболее производительной изоскоростной структуры потока, критерием оптимальности которой является постоянство осевой скорости продвижения измельчаемого материала вдоль барабана. Для реализации изоскоростной структуры разработана спиральная футеровка с изменяющимся углом наклона спирали, а также технология подачи ПАВ на различные участки мельницы с целью выравнивания подвижности потока измельчаемого материала вдоль оси мельницы.

Установлено, что ПАВ снижают прочность частиц всех фракций в разной степени, поэтому целесообразно подавать ПАВ в мельницу в зону с максимальным количеством частиц трудноразмалываемых и малоподвижных фракций. Исследована вязкость ЛСТМ –1 и влияние на неё различных факторов. Разработана методика и определены значения транспортных характеристик ЛСТМ-1 (коэффициент  $\alpha$  и коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$ ), который относится к вязким неньютоновским жидкостям ЛСТМ-1 к мельницам.

Доказана целесообразность подачи ПАВ на определенные участки по длине мельницы. Подача ПАВ на участок 0,15-0,4 от диаметра барабана мельницы  $D_6$  положительно сказывается на работе мельницы и дает прирост производительности на 11,4 %, а при подаче ПАВ на два участка, т.е. ещё и на участок трудноразмалываемой фракции  $(0,7-1,1)D_6$ , – на 18,5 %. Количество ПАВ при подаче на указанные зоны можно сократить на 15 – 20 % без существенного снижения эффективности помола.

Разработана техническая документация на новые конструкции: барабанно-валковые предизмельчители, реализующие принцип измельчения в слое материала; футеровки, создающие энергоадаптированный и пульсирующий режимы работы мелющей загрузки; междукамерные перегородки и бронеплиты; устройства для ввода ПАВ на заданные участки мельницы; схему подачи вязких ПАВ к трубным мельницам.

Ключевые слова: процесс измельчения, дробилка, параметры трубной мельницы, классификация, интенсификация, тонкость помола,

## ABSTRACT

Ivanov A. N. Scientific a justification and creation of high performance grinding operations in grinding aggregate with a tube mill on a principle of selectivity.- Manuscript.

Thesis for a Doctor's degree by speciality 05.17.08 - processes and equipment of cemical tecnologe.- National technical University «Kharkov Politechnical Institution », Kharkov, 2006.

The dissertation is devoted to a solution of the important complex scientific - application problem of increase of an overall performance grinding aggregate with tube mill at the expense of a theoretical justification and making of high performance processes on a base of study of three principal complex factors: rational prelevigating in all his sorts, energy adopted and pulsating duties of milling bodies at constant speed to flow pattern of

a grinded material with use of a principle of selectivity. The maximum size of particles of the material given to an a mill is justified. The expediency of feeding of grit after a separator on fixed lots inside the first cabinet of an mill is scientifically justified. “ The theory of a heredity ” with reference to deriving of cements of different marks is improved; scientific fundamentales of process of beating of the multicomponent cements Are developed, permitting to define a degree of pre-award levigating intractable a component.

For the first time theoretical fundamentales energy adopted in longitudinal and pulsating in transversal sectional views of an mill of a duty of milling loading that allows to select rational schemas of lining and the form of the cage of mills are generated. The mathematical model of sliding of spherical loading. on liners different a profile has received the further development in view of degree of fullness of the cage of an attritor spheres, Flow pattern of a grinded material and application of surface active substance her realization are scientifically justified constant speed .

Key words: a grinding operation, crusher, parametres of tube mill, classification, intensification, fineness of grinding.