

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ФЕДІН ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 66.022.5:621.926.086

**Динаміка процесу кавітації та закономірності кінетики електрогідроімпульсного
подрібнення матеріалів**

05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

АВТОРЕФЕРАТ

Дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі „Український державний хіміко-технологічний університет” Міністерства освіти і науки України, м. Дніпропетровськ, Україна.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Виноградов Борис Володимирович,
ДВНЗ „Український державний
хіміко-технологічний університет”,
м. Дніпропетровськ, завідувач кафедрою
теоретичної механіки та опору матеріалів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Шапорєв Валерій Павлович
Національний технічний університет
„Харківський політехнічний інститут”, м. Харків,
завідувач кафедрою хімічної техніки та
промислової екології

кандидат технічних наук, доцент
Атаманюк Володимир Михайлович
Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, доцент кафедри хімічної
інженерії та промислової екології

Захист відбудеться « 31 » січня 2008 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий „ ___ ” _____ 2007 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

В.К. Тимченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне хімічне виробництво потребує підвищення темпів виробництва та ступеня подрібнення порошкової сировини. У багатьох процесах хімічної технології, таких як лакофарбове виробництво, каталітичне перетворення речовини та інше, використовуються тонко подрібнені порошки твердих матеріалів. Наприклад, для виробництва високоякісних фарб на основі металоокисних пігментів, таких як двоокис титану, оксид цинку та інше, розмір часток сировини має досягати 1 мкм та менше. Перспективним напрямком конверсії газів і створення низькотемпературних паливних елементів є процес каталізу на поверхні алмазного порошку, розмір часток якого має бути близький до колоїдного. Використання для подрібнення вказаних матеріалів традиційних апаратів, дія яких базується на ударно-стираючому механізмі подрібнення, недостатньо ефективне. Особливості механізму подрібнення призводять до підвищення витрат енергії, зносу тіл, що подрібнюють, та забрудненню продукту подрібнення. Вказані причини призводять до необхідності розробки нових апаратів для подрібнення, дія яких базується на принципово нових механізмах подрібнення.

Дослідженнями Інституту надтвердих матеріалів АН УРСР і Інституту тепло- і масообміну АН БРСР показані переваги використання пристроїв для подрібнення, дія яких ґрунтується на використанні явища високовольтного імпульсного електричного розряду в рідині. Високовольтний імпульсний електричний розряд є потужним чинником впливу на речовину. Різноманітні явища, які супроводжують імпульсний розряд в рідині, особливо кавітація, дозволяють здійснювати тонке і надтонке подрібнення твердих і абразивних матеріалів при значно меншому зносі робочих органів та меншому забрудненні продукту подрібнення.

Разом з тим до цього часу недостатньо вивчені основні закономірності гідромеханічних процесів при високовольтному імпульсному електричному розряді в розрядній камері. Зокрема невирішеною залишається задача управління електрогідроімпульсною кавітацією як чинника руйнуючої дії на матеріал. Недостатньо вивченими залишаються також закономірності кінетики тонкого і надтонкого електрогідроімпульсного подрібнення порошкових матеріалів. Вказані причини призводять до недостатньо повного використання енергії високовольтного імпульсного електричного розряду в рідині. Тому задача дослідження впливу конструкції розрядної камери на інтенсивність тонкого та надтонкого електрогідроімпульсного подрібнення порошкових матеріалів є актуальною.

Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі теоретичної механіки та опору матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» МОН України відповідно до тематики держбюджетних робіт „Розробка теоретичних основ і створення сучасної хімічної і екологічної техніки і систем управління” (ДР № 0102U004051) і „Розробка методів розрахунку і створення ефективного енергозбері-

гаючого устаткування” (ДР № 0105U000414) де здобувач був виконавцем окремих розділів роботи.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи є розробка та наукове обґрунтування параметрів розрядної камери електрогідроімпульсних пристроїв, що сприяють інтенсивній керованій кавітаційній дії на матеріал при тонкому і надтонкому подрібненні твердих порошкових матеріалів.*

Для досягнення цієї мети вирішуються наступні *задачі*:

- розробка математичної моделі гідродинамічних процесів при імпульсному електричному розряді в розрядній камері з урахуванням процесу кавітації;
- визначення закономірностей протікання процесу кавітації при імпульсному електричному розряді в розрядній камері;
- визначення закономірностей кінетики тонкого і надтонкого електрогідроімпульсного подрібнення порошкових матеріалів;
- розробка перспективної конструкції розрядної камери, яка сприяє інтенсивній керованій кавітаційній дії на матеріал.

Об'єкт дослідження – процес тонкого і надтонкого подрібнення порошкових матеріалів при високовольтному імпульсному електричному розряді в розрядній камері.

Предмет дослідження – конструкції розрядної камери та режими електрогідроімпульсного подрібнення, які сприяють інтенсивній керованій кавітаційній дії на матеріал.

Методи дослідження. Теоретичні та експериментальні дослідження гідромеханічних процесів подрібнення порошкових матеріалів здійснювались шляхом фізичного та математичного моделювання. Математичне моделювання динаміки рідини здійснювалось апробованими чисельними методами та методами математичного аналізу з використанням ЕОМ. При здійсненні експериментальних досліджень використано ситовий і мікроскопічний методи гранулометричного аналізу, апробовані методи планування експерименту і статистичної обробки результатів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше сумісно розглянуто гідромеханічний процес подрібнення при високовольтному імпульсному електричному розряді в розрядній камері та динаміка руху кавітаційної порожнини як нестационарна крайова задача з рухомою межею;
- встановлено, що інтенсивність процесу кавітації в розрядній камері електрогідроімпульсної установки залежить від величини проміжку часу між появою первинної і вторинної хвилі стискування, яке визначається співвідношенням геометричних параметрів камери і електричних характеристик розрядного контуру;
- досліджено кінетичну залежність кількості крупного класу часток порошкових матеріалів різної твердості від тривалості електрогідроімпульсного подрібнення;

– встановлена та теоретично обґрунтована можливість управління інтенсивністю процесу електрогідроімпульсного подрібнення порошкових матеріалів у розрядній камері з рухомою торцевою стінкою за рахунок зміни маси стінки і дотримання раціонального співвідношення геометричних параметрів розрядної камери та електричних характеристик розрядного контуру;

– розроблено принципово новий спосіб і пристрої для подрібнення порошкоподібної хімічної сировини з використанням електрогідроімпульсної кавітації.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Встановлені закономірності процесу електрогідроімпульсного подрібнення твердої порошкоподібної сировини для хімічних виробництв лягли в основу методики розрахунку основних параметрів електрогідроімпульсної установки для подрібнення порошоків твердих матеріалів, яка дозволяє визначити конструктивні параметри розрядної камери та електричні характеристики зарядного пристрою для забезпечення більш інтенсивного процесу подрібнення за рахунок кавітації рідини.

2. Розроблена методика розрахунку основних параметрів електрогідроімпульсної установки для подрібнення порошоків твердих матеріалів впроваджена у Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України (м. Дніпропетровськ), в якому методика використана при виборі та обґрунтуванні способу тонкого та надтонкого подрібнення при видобутку і збагаченні хімічної сировини, і на підприємстві ТОВ «Аліт» (Україна, м. Житомир) у виробництві субмікропорошків синтетичних алмазів.

3. Розроблений спосіб і пристрій успішно випробуваний при отриманні модифікованих нанодисперсних алмазних порошоків для гетерогенного та хімічного каталізу на підприємстві ТОВ «Аліт» (Україна, м. Житомир)

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні апаратів для подрібнення твердих порошкових матеріалів в хімічній, гірничій та інших галузях промисловості.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці математичної моделі гідродинамічних процесів при імпульсному електричному розряді в камері, розробці методик теоретичних і експериментальних досліджень, участі в створенні лабораторної електрогідроімпульсної установки, здійсненні та обробці результатів експериментальних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації докладалися на Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і аспірантів „Хімія і хімічна технологія - 2002” (м. Дніпропетровськ); I та II Міжнародній науково-практичній конференції «Динаміка наукових досліджень» (м. Дніпропетровськ); I Міжнародній науково-технічній конференції студентів і аспірантів „Хімія і сучасні технології” (м. Дніпропетровськ); I та II Міжнародній науково-практичній конференції «Наука і освіта 2003» (Дніпропетровськ - Чернівці - Рубіж); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми механіки гірничо-металургійного комплексу» (м. Дніпропет-

ровськ); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія і практика процесів подрібнення, розділення, змішування і ущільнення матеріалів» (м. Одеса); II Міжнародній науково-технічній конференції студентів і аспірантів і молодих вчених „Хімія і сучасні технології” (м. Дніпропетровськ); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія і практика процесів подрібнення, розділення, змішування і ущільнення матеріалів» (м. Одеса); «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения» (с. Морське, Крим); розширене засідання кафедри хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХПІ» (м. Харків); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія і практика процесів подрібнення, розділення, змішування і ущільнення матеріалів» (м. Одеса).

Публікації. По результатах дисертаційної роботи опубліковано 11 статей в наукових журналах, затверджених ВАК України, 7 матеріалів конференцій і 2 патенти України на винахід.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів основної частини, висновків, списку використаних літературних джерел та 4 додатків. Повний обсяг дисертації складає 155 сторінок, з них 25 ілюстрацій по тексту та 17 ілюстрацій на окремих сторінках, 12 таблиць по тексту, 8 таблиць на окремих сторінках, додатків на 15 сторінках, 115 найменувань використаних літературних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми наукового дослідження, сформульовані його мета та задачі, висвітлено наукове та практичне значення роботи.

Розділ 1 присвячено фізичним основам руйнування матеріалів під дією імпульсного електричного розряду у рідині та під впливом кавітації. У розділі наведено критичний аналіз існуючих способів і засобів тонкого подрібнення матеріалів у хімічному виробництві. Обґрунтовано перспективність використання електрогідроімпульсних пристроїв для тонкого і надтонкого подрібнення матеріалів, що дозволяють, на відміну від традиційних пристроїв, вести подрібнення твердих і надтвердих матеріалів до часток розміром менше 2 мкм при значно меншому абразивному зносі робочих органів. Особлива увага приділена умовам виникнення електрогідроімпульсної кавітації як чинника, що інтенсивно діє на середовище. У розділі приведено класифікацію та аналіз методів розрахунку гідродинамічних процесів при імпульсному електричному розряді у відкритому і обмеженому об'ємі та моделей динаміки кавітаційної порожнини під зовнішньою дією, визначені напрямки досліджень та їх об'єм.

Розділ 2 роботи присвячено теоретичному дослідженню гідродинамічних процесів при високовольтному імпульсному електричному розряді у камері електрогідроімпульсної установки. У розділі наведено методика розрахунків та аналіз отриманих результатів.

В якості фізичної моделі високовольтного імпульсного електричного розряду прийнято задачу про рух плоского одномірного поршня в рідині. Досліджено гідродинамічні процеси в закритій камері, камері з вільною поверхнею рідини та камері з рухомою стінкою. Рух ідеальної рідини, що стискається, описується рівняннями Ейлера

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де ρ – щільність рідини; u – швидкість передачі збурення; t – часова координата; x – просторова координата; P – гідродинамічний тиск у рідині.

Система (1) замикається рівнянням стану рідини в формі Тетта. Інтегрування рівнянь здійснюється з використанням чисельного методу характеристик, наведена розрахункова схема та виведення кінцево-різницевого рівнянь.

Результати моделювання свідчать, що ударна хвиля, яка генерується розрядною порожниною, є послідовністю фронту стискання та фронту розрідження (рис. 1). Згідно з розвинутим в роботі підходом зміна фізичних властивостей рідини при падінні тиску нижче тиску насиченої пари рідини в нормальних умовах P_v враховується зменшенням густини рідини $\rho'_0 < \rho_0$. Отримано співвідношення (2), яке визначає чи має місце інтенсивна кавітація в закритій розрядній камері

Рис. 1. Розподіл тиску в розрядній камері при високовольтному імпульсному електричному розряді при відстані до стінки 0,07 м та тиску у розрядній порожнині $1 \cdot 10^8$ Па в момент часу $t = 7,75 \cdot 10^{-5}$ с, масі стінки m_c та жорсткості пружин c_n :

1 – $m_c = 100$ г, $c_n = 3 \cdot 10^8$ Н/м; 2 – закрыта камера; 3 – $m_c = 1000$ г, $c_n = 1 \cdot 10^7$ Н/м; 4 – $m_c = 100$ г, $c_n = 1 \cdot 10^7$ Н/м.

$$k = \pi \sqrt{LC} \frac{c}{x_c}, \quad (2)$$

де L – індуктивність розрядного контуру; C – ємність конденсатора; c – швидкість звуку у незбуреній рідині; x_c – відстань між центром розряду та межею камери.

При розряді у закритій камері зі значенням параметра k значно менше 0,1 тиск у фронті розрідження досягає тиску насичених парів і виникає область кавітації. Механізм електрогідроімпульсного руйнування твердої частинки полягає в наступному. При проходженні прямої хвилі стиснення через тверду частинку доля енергії надається частинці. В частинці виникають напруги розтягування і зсуву, які перевищують межу міцності матеріалу та виникають тріщини. Під дією гра-

дієнта напруги між фронтом стиснення і фронтом розрідження тріщини розкриваються і відбувається часткове руйнування. Коли тиск по близькості частинки падає нижче за тиск насиченої пари рідини, на поверхні частинки і в об'ємі рідини починається зростання кавітаційних пухирців. Пройдення віддзеркаленого фронту стиснення викликає закриття кавітаційних пухирців, що супроводжується випромінюванням мікроударних хвиль і високошвидкісних струменів, і що призводить до більш повного руйнування твердої частинки. При розряді у закритій камері зі значенням параметра k більше 0,1 прямі та віддзеркалені хвилі стискання накладаються одна на одну і тиск у фронті розрідження не досягає тиску насичених парів. Результати моделювання розряду у камері з вільною поверхнею рідини показали, що ударна хвиля віддзеркалюється від поверхні у вигляді хвилі розрідження великої амплітуди та тривалості, параметрами якої керувати неможливо. Результати моделювання розряду у камері з рухомою стінкою у вигляді диска з пружиною показали, що ударна хвиля віддзеркалюється від рухомої поверхні у вигляді фронту стискання, за яким прямує фронт розрідження, амплітуда та тривалість якого збільшується зі зменшенням маси рухомої стінки m_c (рис. 1). Зміна маси рухомої стінки дозволяє створювати в рідині імпульс розрідження різної амплітуди та тривалості. При збільшенні сумарної жорсткості пружин рухомої стінки c_n до величини $3 \cdot 10^8$ Н/м зворотний рух пружного елемента призводить до виникнення хвилі стискання, яка керує схлопуванням кавітаційних пухирців. Таким чином маса рухомої торцевої стінки, безрозмірний параметр k , що визначає певне співвідношення геометричних параметрів розрядної камери та електричні характеристики розрядного контуру, сумісно з напругою розряду є факторами керування електрогідроімпульсною кавітацією.

Розділ 3 присвячено вибору і обґрунтуванню моделі динаміки кавітаційного пухирця та теоретичному дослідженню закономірностей руху кавітаційного пухирця при високовольтному імпульсному електричному розряді в камері електрогідроімпульсної установки. В якості математичної моделі кавітаційного пухирця прийнято диференціальне рівняння руху сферичної порожнини Нолтінга-Непайраса

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho_0} [P_\infty - P(R)] = 0, \quad (3)$$

де R – радіус порожнини; ρ_0 – щільність рідини при нормальних умовах; P_∞ – тиск у рідині на відстані від порожнини; $P(R)$ – тиск на поверхні порожнини. Згідно з розвинутим в роботі підходу процеси пароутворення у порожнині є рівноважними. У рівноважному стані порожнина містить повітря. При падінні тиску до тиску насиченої пари процес утворення пари підтримує стале значення тиску. В якості критерію інтенсивності схлопування кавітаційної порожнини прийнято швидкість адіабатичного схлопування сферичної порожнини при $R=1,3R_{\min}$, де R_{\min} – мінімальний радіус кавітаційної порожнини.

Результати моделювання динаміки кавітаційної порожнини при зовнішній дії, що змінюється за гармонічним законом $P_{\infty} = \sin(\omega t)$, показали, що вплив процесу пароутворення на стадії росту та початковій стадії схлопування незначний. У випадку, коли тривалість імпульсу мала, що відповідає великій масі рухомої торцевої стінки, порожнина не встигає значно зрости та досягти значної швидкості схлопування при проходженні імпульсу стискання (рис. 2).

При достатній тривалості імпульсу розрідження порожнина зростає та досягає великих швидкостей при схлопуванні.

Якщо тривалість імпульсу розрідження більше порогової величини, що відповідає дуже малій масі стінки, то завдяки великим силам інерції схлопування триває з запізненням у наступний період розрідження, що перешкоджає схлопуванню. Існує обмежений діапазон тривалостей імпульсу розрідження, в межах якого спостерігається інтенсивне схлопування порожнини та інтенсивна кавітаційна дія.

Узагальнення результатів моделювання розряду в обмеженому об'ємі рідини дозволило змодельовати зміну тиску у перетині камери у вигляді аналітично заданої функції. Моделювання динаміки пухирця при імпульсному електричному розряді у камері з рухомою стінкою показало, що існує залежність швидкості схлопування кавітаційної порожнини від маси рухомої стінки, яка визначає тривалість імпульсу розрідження, і вона підкоряється залежності (рис. 2)

$$U = a + b \cdot x^c e^{-d \cdot x}, \quad (4)$$

розрахункові значення параметрів якого на рівні значущості $\alpha = 0,05$ становлять $a = 0,09$; $b = 29,88$; $c = 1,56$; $d = 5,1$. При розряді у камері з відстанню від центру розряду до межі $x_c = 0,07$ м, часі розряду $\tau_p = 0,85 \cdot 10^{-5}$ с та початковому тиску у розрядній порожнині $P_0^n = 1 \cdot 10^8$ Па крива залежності (4) у точці $x=0,03$ м (рис. 2) має максимум при значенні маси 0,3 кг. Це свідчить про те, що на кожному рівні напруги розряду існує маса рухомої стінки, при якій кавітація протікає найбільш ефективно.

Рис. 2. Теоретична залежність швидкості схлопування кавітаційної порожнини від тривалості імпульсу розрідження та маси рухомої межі.

Розділ 4 присвячено вибору та обґрунтуванню конструкції розрядної камери електрогідроімпульсної установки, що сприяє кавітаційному подрібненню, та дослідженню закономірностей кінетики тонкого та надтонкого подрібнення порошкових матеріалів. Наведено опис лабораторної електрогідроімпульсної установки (рис. 3 та 4) та методику експериментальних досліджень.

Проведено дослідження з підвищення повноти перетворення енергії електричного розряду у механічну роботу за рахунок використання лінійної електродної системи з подвійним міжелектродним проміжком. Данні свідчать про більш повне перетворення енергії розряду в роботу над рідиною при використанні електродної системи з подвійним міжелектродним проміжком. Отримано величину оптимального сумарного проміжку при $U_3 = 40$ кВ та ін.

В розділі надано результати дослідження ефективності роботи розрядної камери з рухомою торцевою стінкою. Досліджено два типи камер: камера з вільною поверхнею рідини та складена розрядна камера з рухомою стінкою у вигляді диска з пружинами (рис. 4). Ефективність камери оцінювалась за ступенем подрібнення вапняку після 50 розрядних імпульсів при співвідношенні твердої та рідкої фази $T:Ж=1:10$ та напрузі розряду 40 кВ. Дослідження показали, що залежність ступеня подрібнення від маси диска дійсно підкоряється функції (4). Розрахункові значення параметрів на рівні значущості $\alpha = 0,05$ склали $a = 1,22$,

Рис. 3. Зовнішній вигляд лабораторної електрогідроімпульсної установки.

Рис. 4. Розрядна камера з рухомою торцевою стінкою: 1, 3, 5 – фланці; 2 – ізоляційна основа; 4 – дистанційна втулка; 6 – шпилька; 7 – диск; 8 – пружина; 9 – завантажувальна воронка; 10 – клапан; 11, 12, 13 – позитивний, негативний та проміжний електрод; 14 – сміть.

$b=0,79$, $c=0,32$, $d=0,65$. Пошук екстремального значення, відповідного точці перегину кривої, свідчить про те, що максимальний ступінь подрібнення спостерігається при масі пружного елемента 0,67 кг, що підтверджує існування оптимальної величини маси пружного елемента, при якому спостерігається найбільша ефективність кавітаційного подрібнення. Спостерігається також збільшення ступеня подрібнення та зменшення широти розподілу гранулометричного складу продукту подрібнення, що виходить з камери крізь зазори, при збільшенні маси диска, що свідчить про суміщення процесів подрібнення та класифікації матеріалу. Однак, залежність виявилась хоч і значуща, але слабка, що свідчить про необхідність дослідження сумісного впливу на ефективність процесу маси стінки, параметра k та напруги розряду.

Експериментальні дослідження впливу вказаних факторів на процес електрогідроімпульсного подрібнення виконано з використанням методів планування експерименту. Застосовано повний факторний експеримент першого порядку типу 2^n , де n – кількість факторів, що становить 3, з урахуванням парної взаємодії.

Область визначення факторів визначена за результатами попередніх дослідів з урахуванням можливого апаратного оформлення та становить: $0,025 \leq k \leq 0,075$; $0,6 \leq m \leq 8$ (кг); $20 \leq U_3 \leq 40$ (кВ) (рис. 5).

Перевірка однорідності дисперсій, оцінювання значущості коефіцієнтів регресії та перевірка адекватності рівняння регресії виконано на рівні значущості $\alpha=0,05$ за апробованою методикою з використанням критеріїв Кохрена, Стьюдента та Фішера. Адекватне рівняння регресії має вигляд:

$$\hat{y} = -3,03 + 69,02 \cdot k + 0,20 \cdot m_c + 0,23 U_3 - 2,72 \cdot k \cdot m_c - 2,93 \cdot k \cdot U_3, \quad (5)$$

де k – безрозмірний параметр, що визначається за формулою (2); m_c – маса рухомої торцевої стінки, кг; U_3 – напруга заряду конденсаторів, кВ. Рівняння (5) дає можливість визначити найбільш сприятливі умови для процесу електрогідроімпульсного подрібнення. Найбільше значення ступеня подрібнення вапняку у зазначених межах визначення факторів під дією 300 імпульсів (5 хвилин при частоті 1 Гц) складає 6,12 (рис. 5).

Рис. 5. Залежність ступеня подрібнення від маси стінки, параметра k при напрузі розряду $U_3=40$ кВ

Отримані результати підтвердили гіпотезу про сумісний вплив маси стінки, співвідношення геометричних і електричних параметрів установки та напруги розряду на процес електрогідроімпульсного подрібнення. Зменшення параметра k , що відповідає сприятливим для протікання кавітаційного подрібнення умовам, дійсно сприяє підвищенню ступеня подрібнення (рис. 6). Вплив параметра k тим більший, чим більша маса стінки та напруга розряду. Підтверджено також, що значення маси рухомої торцевої стінки впливає на процес подрібнення. В дослідженій області визначення факторів підвищення маси стінки сприяє підвищенню ступеня подрібнення (рис. 7). Вплив маси зростає при малих значеннях параметра k , що свідчить про велику роль стінки у виникненні та інтенсивному схлопуванні кавітаційних порожнин.

Пряма залежність ступеня подрібнення від напруги розряду відповідає загально визнаній уяві про процес, що підтверджує адекватність емпіричної моделі.

Регресійний аналіз експериментальних даних показав, що при електрогідроімпульському подрібненні порошкових матеріалів зміна кількості крупного класу підкоряється основному рівнянню кінетики подрібнення, згідно з яким швидкість зміни кількості часток крупного класу пропорційна його кількості (рис. 8).

Рис. 6. Залежність ступеня подрібнення тестового матеріалу від значення параметра k при:

1 – $m_c = 5$ кг, $U_3 = 20$ кВ; 2 – $m_c = 8$ кг, $U_3 = 20$ кВ;

3 – $m_c = 0,6$ кг, $U_3 = 30$ кВ; 4 – $m_c = 8$ кг, $U_3 = 30$ кВ;

5 – $m_c = 0,6$ кг, $U_3 = 40$ кВ; 6 – $m_c = 8$ кг, $U_3 = 40$ кВ.

Рис. 7. Залежність ступеня подрібнення тестового матеріалу від маси рухомої торцевої стінки розрядної камери при:

1 – $k = 0,025$, $U_3 = 20$ кВ; 2 – $k = 0,025$, $U_3 = 30$ кВ;

3 – $k = 0,025$, $U_3 = 40$ кВ; 4 – $k = 0,075$, $U_3 = 20$ кВ;

5 – $k = 0,075$, $U_3 = 30$ кВ; 6 – $k = 0,075$, $U_3 = 40$ кВ.

В рамках розділу досліджено кінетику електрогідроімпульсного подрібнення порошків штучного алмазу та двоокису титану.

Випробування електрогідроімпульсного способу та пристрою надтонкого подрібнення мікропорошку штучного полікристалічного алмазу здійснені за участю представників фірми ТОВ „Аліт” (Україна, м. Житомир). Подрібнення здійснювалось з метою отримання максимальної кількості часток зернистості 1/0. Згідно з результатами растрової мікроскопії мінімальний діаметр часток у вихідному матеріалі склав від 3 до 4 мкм (рис. 9). Після обробки порошку під дією імпульсних електричних розрядів у кількості $n=1000$ (що відповідає часу подрібнення 17 хвилин при частоті імпульсів 1 Гц) кількість часток фракції $-1+0$ мкм склало 67,3%.

Подрібнення рутилу здійснювалось з метою отримання максимальної кількості часток крупністю менше 1 мкм. Після обробки порошку під дією імпульсних електричних розрядів у кількості $n=600$ (що відповідає часу подрібнення 10 хвилин при частоті імпульсів 1 Гц) кількість часток крупністю $-1+0$ мкм склало 84% проти 39% у вихідному матеріалі.

Отримані експериментальні результати свідчать про те, що електрогідроімпульсний спосіб та розроблений пристрій для подрібнення дозволяє здійснювати процес надтонкого подрібнення надтвердих матеріалів, зокрема штучного алмазу та двоокису титану, які важко піддаються подрібненню навіть на найсучасніших шарових млинах.

Узагальнення теоретичних та експериментальних результатів дослідження дозволило розробити методику розрахунку основних параметрів електрогідроімпульсної установки для подріб-

Рис. 8. Залежність вагової долі фракції $-125,0+80,0$ мкм шліфпорошку АС 80/60 від тривалості подрібнення.

Рис. 9. Гранулометричний склад мікропорошку штучного алмазу у вихідному матеріалі (1) та продукті подрібнення (2).

нення порошків твердих матеріалів. Методика дозволяє визначити конструктивні параметри розрядної камери та електричні характеристики зарядного пристрою, які забезпечують більш інтенсивний процес подрібнення за рахунок кавітації рідини. Розроблену методику впроваджено в Інституті геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України (м. Дніпропетровськ), в якому методика використана при виборі та обґрунтуванні способу тонкого та надтонкого подрібнення при видобутку та збагаченні хімічної сировини, та на підприємстві ТОВ «Аліт» (Україна, м. Житомир) у виробництві субмікропорошків синтетичних алмазів

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації дано перспективне рішення важливої науково-практичної задачі, яка полягає у виборі та науковому обґрунтуванні конструкції розрядної камери, яка сприяє інтенсивній керованій кавітаційній дії на матеріал на базі сумісного розгляду ударно-хвильових та кавітаційних процесів при високовольтному електричному розряді у розрядній камері та експериментального дослідження кінетики подрібнення порошків твердих матеріалів.

Основні результати досліджень:

1. Здійснено критичний аналіз існуючих способів і засобів тонкого та надтонкого подрібнення порошкових матеріалів, на базі якого встановлена перспективність електрогідроімпульсного способу подрібнення.

2. Вдосконалено математичну модель гідродинамічних процесів при високовольтному імпульсному електричному розряді у розрядній камері електрогідроімпульсної установки урахуванням фізичних властивостей рідини при кавітації, що дало змогу сумісно розглянути хвильові та кавітаційні процеси.

3. Уточнено умови виникнення кавітації в рідині при високовольтному імпульсному електричному розряді в закритій камері, камері з вільною поверхнею рідини та камері з рухомою торцевою стінкою.

4. Досліджено закономірності руху кавітаційного пухирця при високовольтному імпульсному електричному розряді в закритій камері, камері з вільною поверхнею рідини та камері з рухомою торцевою стінкою.

5. Розроблено перспективну конструкцію розрядної камери з рухомою торцевою стінкою, яка дозволяє на практиці подрібнювати тверді та надтверді порошкові матеріали з використанням керованої кавітаційної дії на матеріал.

6. Експериментально встановлена можливість управління процесом електрогідроімпульсного подрібнення за рахунок сумісного регулювання маси рухомої торцевої стінки камери, геометричних параметрів розрядної камери та електричних характеристик розрядного контура.

7. Показано, що кінетика тонкого та надтонкого електрогідроімпульсного подрібнення порошків різної твердості підкоряється основному рівнянню кінетики подрібнення.

8. Розроблений пристрій для тонкого і надтонкого подрібнення твердих порошкових матеріалів і методика для розрахунку його основних параметрів впроваджені у процесах видобутку, збагачення та переробки сировини для хімічної промисловості.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Виноградов Б.В., Федин Д.А. К вопросу о развитии кавитационной полости при внешнем воздействии// Вопросы химии и химической технологии. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2003. – №1. – С.151-153. Здобувачем зроблено аналіз, вибір та обґрунтування математичної моделі розвитку кавітаційної порожнини при зовнішній дії, обґрунтовано область застосування моделі Нолтінга-Непайраса.

2. Виноградов Б.В., Федин Д.А. Влияние частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний на интенсивность кавитации// Вопросы химии и химической технологии. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2003. – №4. – С.141-144. Здобувачем на базі математичної моделі Нолтінга-Непайраса розглянуто вплив на швидкість схлопування кавітаційного пухирця частоти та амплітуди імпульсної зовнішньої дії.

3. Виноградов Б.В., Федин Д.А., Никулин Д.С. Особенности гидродинамических процессов при импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости // Вопросы химии и химической технологии. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2004. – №2. – С.190-192. Здобувачем з використанням метода характеристик досліджено гідродинамічні процеси при високовольтному імпульсному електричному розряді у камері електрогідроімпульсної установки; визначено умови виникнення кавітації в обмеженому об'ємі рідини.

4. Виноградов Б.В., Федин Д.А. О механизме сверхтонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов // Сборник научных трудов Национального горного университета. – Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – №19. – С.115-119. Здобувачем шляхом математичного моделювання розглянуто поведінку кавітаційної порожнини у замкненій електророзрядній камері та камері з вільною поверхнею рідини; досліджено характер залежності інтенсивності кавітації від тривалості та амплітуди імпульсу розрядження.

5. Виноградов Б.В., Емельяненко В.И, Федин Д.А. О влиянии конструкции разрядной камеры на эффективность преобразования энергии в электрогидроимпульсных установках // Вопросы химии и химической технологии. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2005. – №1. – С.170-174. Представлено результати експериментальних досліджень по підвищенню повноти перетворення енергії розряду у механічну роботу над рідиною в розрядній камері шляхом використання раціональної конструкції клапанної та електродної системи.

6. Виноградов Б.В., Федин Д.А. Экспериментальное и теоретическое исследование тонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов // Новые огнеупоры. – Москва: «Интермет инжиниринг», 2005. – №3. – С.41-43. Здобувачем проаналізовано результати експериментальних досліджень впливу характеристик гранулометричного состава порошкових матеріалів на ефективність електрогідроімпульсного подрібнення; представлено результати теоретичних досліджень механізму тонкого та надтонкого електрогідроімпульсного подрібнення.

7. Виноградов Б.В., Филатов Г.В., Харлан Б.А., Немчинов С.И., Федин Д.А. Динамика и прочность механических систем, и оптимальное проектирование конструкций// Вопросы химии и химической технологии. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2005. – №2. – С.201-209. Здобувачем представлено основні результати теоретичних досліджень гідродинамічних процесів у розрядній камері та експериментальних досліджень електрогідроімпульсного подрібнення порошкових матеріалів.

8. Федин Д.А. Исследование динамики кавитации при импульсном электрическом разряде в камере с упругим элементом// Вопросы химии и химической технологии. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2005. – №4. – С.171-174. Здобувачем представлено основні результати теоретичних досліджень гідродинамічних процесів у розрядній камері з рухомою торцевою стінкою у вигляді пластини з пружинами.

9. Виноградов Б.В., Федин Д.А., Емельяненко В.И. Эффективность измельчения порошков в составной электроразрядной камере с упругими элементами// Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – №51. – С. 99-105. Представлено результати експериментальних досліджень ефективності електрогідроімпульсного подрібнення порошків у розрядній камері з рухомою стінкою.

10. Виноградов Б.В., Федин Д.А. Управление динамикой процесса кавитации при импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости // Сборник научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: НГУ, 2005. – №12. – С.49-51. Здобувачем з використанням методу характеристик розглянута залежність характеру гідродинамічних процесів при імпульсному електричному розряді в камері з рухомою торцевою стінкою різної маси. Встановлена принципова можливість управління інтенсивністю кавітації в електрогідроімпульсних установках регулюванням динамічних параметрів пружного елемента.

11. Виноградов Б.В., Федин Д.А., Емельяненко В.И. Об использовании разрядноимпульсной технологии для получения субмикророшков синтетического алмаза // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ. – 2006. – Вып. 9. – С. 186-189. Здобувачем досліджено можливість використання розрядноімпульсної технології отримання субмікророшків штучного алмазу.

12. Пат. 63176 А Україна, МКИ В 02С 19/18. Пристрій для одержання тонко дисперсних систем / Б.В.Виноградов, В.І. Ємельяненко, Д.О.Федін (Україна) Український державний хіміко-технологічний університет. – №2003021226; Заявл. 11.02.2003; Опубл. 15.01.2004; Бюл. №1. Здобувачем розроблено пристрій для тонкого та надтонкого подрібнення з використанням явища електрогідроімпульсної кавітації.

13. Пат. 60736 А Україна, МКИ В 02С 19/18. Спосіб для одержання тонко дисперсних систем / Б.В.Виноградов, В.І.Ємельяненко, Д.О.Федін (Україна) Український державний хіміко-технологічний університет. – №2003021241; Заявл. 11.02.2003; Опубл. 15.10.2003; Бюл. №10. Здобувачем розроблено спосіб управління коливально-хвильовими процесами в пристроях для тонкого та надтонкого подрібнення з використанням явища електрогідроімпульсної кавітації.

14. Федін Д.А. Образование и динамика кавитационной полости при внешнем воздействии // Тези доп. IV Регіональної конференції молодих вчених та студентів з актуальних питань хімії. – Дніпропетровськ, 2002. – С.117. Здобувачем здійснено критичний аналіз існуючих моделей динаміки кавітаційної порожнини.

15. Федін Д.А. Образование и динамика кавитационной полости при внешнем воздействии // Тези доп. Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів „Хімія і хімічна технологія – 2002”. – Дніпропетровськ: ІнКомЦентр, 2002. – С.116-118. Здобувачем проаналізовано можливість використання моделі Нолтинга-Непайраса для опису процесу кавітації при імпульсній дії.

16. Федін Д.А. Влияние внешнего воздействия на развитие кавитационной полости // Тези доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції студентів і аспірантів “Хімія і сучасні технології”. – Дніпропетровськ: ІнКомЦентр. – 2003. – С. 242-243. Здобувачем розглянуто вплив таких параметрів ультразвукової дії як частота та амплітуда на швидкість схлопування кавітаційного пухирця.

17. Федін Д.А. О закономерностях тонкого и сверхтонкого измельчения твердых порошковых материалов // Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції студентів і аспірантів та молодих вчених “Хімія і сучасні технології”. – Дніпропетровськ: ІнКомЦентр. – 2005. – С.71. Здобувачем можливість застосування загального рівняння подрібнення крупного класу часток до умов електрогідроімпульсного подрібнення.

18. Федін Д.А. Влияние частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний на интенсивность кавитации // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції “Динаміка наукових досліджень ‘ 2003’”. – Том 17. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2003. – С. 46-50. Здобувачем розглянуто вплив параметрів ультразвукової дії на швидкість схлопування кавітаційного пухирця. Досліджено вплив відношення статичного та динамічного тиску на інтенсивність замикання кавітаційного пухирця.

19. Федін Д.А. Исследование гидродинамики подводных искровых разрядов на наличие условий возникновения кавитации // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Україна наукова ’ 2003”. – Том 14. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2003. – С.21-24. Здобувачем розглянуті гідродинамічні процеси при імпульсному електричному розряді в розрядній камері.

20. Федін Д.А. О механизме кавитационной интенсификации процессов химической технологии и расчете ее эффективности // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції “Наука і освіта ’ 2003”. – Том 16. Хімія та хімічна технологія. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2003. – С. 46-48. Здобувачем запропоновані шляхи використання кавітації у хімічній технології.

АНОТАЦІЇ

Федін Д.О. Динаміка процесу кавітації та закономірності кінетики електрогідроімпульсного подрібнення матеріалів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології. – Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпропетровськ, 2007 р.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності роботи електрогідроімпульсного пристрою для тонкого та надтонкого подрібнення порошкоподібної сировини для виробництва пігментів та низькотемпературних каталізаторів, які використовуються у хімічному виробництві. Розглянуто переваги та недоліки традиційних пристроїв для подрібнення. Обґрунтовано перспективність електрогідроімпульсного подрібнення твердих порошкових матеріалів. Розроблено математичну модель гідродинамічних процесів при високовольтному імпульсному електричному розряді в камері електрогідроімпульсної установки з урахуванням процесу кавітації. Адаптовано рівняння динаміки кавітаційної порожнини Нолтінга-Непайраса до умов електрогідроімпульсного впливу. Уточнено умови виникнення та найбільш інтенсивного протікання процесу кавітації в закритій камері, камері з вільною поверхнею рідини та камері з рухомою торцевою стінкою у вигляді диска з пружинами. Розроблено нову конструкцію розрядної камери, яка дозволяє керувати інтенсивністю кавітації. Експериментально доведено можливість регулювання процесу подрібнення за рахунок зміни сумісного регулювання маси рухомої торцевої стінки камери, геометричних параметрів розрядної камери та електричних характеристик розрядного контура. Експериментально досліджено ефективність роботи камери з рухомою торцевою стінкою та кінетику подрібнення вапняку, синтетичного алмазу та двоокису титану (рутил). Показано, що електрогідроімпульсне подрібнення є ефективним способом тонкого та надтонкого подрібнення твердих матеріалів. Розроблено та

впроваджено методику розрахунку основних параметрів електрогідроімпульсних пристроїв для подрібнення порошків твердих матеріалів.

Ключові слова: подрібнення хімічної сировини, пристрій для електрогідроімпульсного подрібнення, кавітація, параметри пристрою для подрібнення.

Федин Д.А. Динамика процесса кавитации и закономерности кинетики электрогидроимпульсного измельчения материалов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и оборудование химической технологии. – Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», Днепропетровск, 2007 г.

Диссертация посвящена повышению эффективности работы электрогидроимпульсного устройства для тонкого и сверхтонкого измельчения порошковых материалов.

Современная химическая промышленность испытывает необходимость в повышении темпов производства тонко и сверхтонко измельченных порошковых синтетических и природных материалов. Высоковольтный импульсный электрический разряд является мощным фактором влияния на вещество. Разнообразные явления, которые сопровождают импульсный разряд в жидкости, в особенности кавитация, позволяют осуществлять тонкое и сверхтонкое измельчение твердых и абразивных материалов. Однако основные закономерности динамики жидкости при высоковольтном импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости недостаточно изучены. В частности нерешенной остается задача управления электрогидроимпульсной кавитацией как фактора разрушающего воздействия на материал. Разработка и создание устройств, параметры которых способствуют интенсивному кавитационному воздействию на материал, позволит повысить производительность и уменьшить удельные расходы энергии на измельчение.

В диссертации рассмотрены преимущества и недостатки традиционных способов и устройств для тонкого и сверхтонкого измельчения порошковых материалов. Показано, что электрогидроимпульсное измельчение является перспективным способом измельчения твердых и сверхтвердых материалов благодаря отсутствию мелящих тел и совместному действию ударно-волнового и кавитационного механизма измельчения. Дан критический анализ методов расчета гидродинамических процессов при импульсном электрическом разряде в открытом и ограниченном объеме жидкости и моделей динамики кавитационной полости при внешнем воздействии. Разработана математическая модель гидродинамических процессов при импульсном электрическом разряде в разрядной камере. Модель позволяет решать краевую задачу течения жидкости в камере с подвижной границей с учетом процесса кавитации. Проведены теоретические исследова-

ния динамики жидкости в закрытой камере, камере со свободной поверхностью жидкости и камере с подвижной торцевой стенкой в виде диска с пружинами. Показано, что разряд в камере сопровождается образованием области кавитации, интенсивность и длительность существования которой зависит от соотношения геометрических параметров камеры и режимных параметров разряда. Получено соотношение, связывающее указанные параметры и позволяющее управлять механизмом электрогидроимпульсного измельчения. Электрический разряд в камере с подвижной торцевой стенкой сопровождается образованием области кавитации, длительностью существования которой можно управлять путем подбора массы упругого элемента. Адаптирована модель динамики кавитационной полости Нолтинга-Непайраса к условиям электрогидроимпульсного воздействия. Математическое моделирование динамики полости при ультразвуковом воздействии показало, что учет процесса парообразования незначительно влияет на динамику полости. Существует оптимальная длительность импульса разрежения, при котором скорость схлопывания полости и, следовательно, интенсивность кавитационного воздействия наибольшая. Моделирование динамики полости при электрическом разряде с подвижной торцевой стенкой показало, что зависимость скорости схлопывания полости от массы упругого элемента имеет глобальный максимум. Определен вид функции зависимости.

Разработана новая конструкция разрядной камеры с подвижной торцевой стенкой в виде диска с пружиной. Показано, что линейная электродная система с двумя последовательными межэлектродными промежутками позволяет более эффективно преобразовать энергию разряда по сравнению с электродной системой с одним межэлектродным промежутком. Экспериментально подтверждено существование величины массы подвижной торцевой стенки, при котором интенсивность измельчения наибольшая. Показано, что камера с подвижной торцевой стенкой позволяет осуществлять измельчение более эффективно, чем закрытая камера и камера со свободной поверхностью жидкости.

Электрогидроимпульсное измельчение известняка и искусственного алмаза показало, что измельчение крупного класса частиц подчиняется основному уравнению кинетики измельчения. Исследован процесс тонкого и сверхтонкого электрогидроимпульсного измельчения порошков искусственного алмаза и двуокиси титана. Сверхтонкое измельчение микропорошка поликристаллического искусственного алмаза и рутила показало, что электрогидроимпульсный способ является перспективным способом получения субмикропорошков сверхтвердых материалов.

Разработана и внедрена методика расчета основных параметров электрогидроимпульсных установок для тонкого и сверхтонкого измельчения порошков твердых материалов, которая позволяет рассчитать основные конструктивные параметры разрядной камеры и электрические характеристики зарядного устройства.

Ключевые слова: измельчение химического сырья, устройство для электрогидроимпульсного измельчения, кавитация, параметры устройства для измельчения.

Fedin D.O. The cavitation dynamics and conformities of electric-discharge grinding of materials. – Manuscript.

Dissertation on the competition of scientific degree of candidate of engineering sciences on specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – SHEE «Ukrainian State chemical technology university», Dnipropetrovs'k, 2007.

Dissertation is devoted to the rise of efficiency of work of electric discharge device for the thin and hyperfine disintegration of chemical raw material. A mathematical model of hydrodynamic processes at the high-voltage impulsive electric discharge in the chamber of the electric discharge equipment taking into account the process of cavitation is developed. Mathematical model of Noltingk-Neppiras cavity dynamics to the terms of the electric discharge influencing is adapted. Terms of origin and most intensive flowline of process of cavitation in the closed chamber, the chamber with the free surface of liquid and the chamber with the moving boundary in kind of the disk with springs are specified. New construction of discharge chamber, which allows managing intensity of cavitation, is developed. The possibility of regulation of thin and hyperfine disintegration process due to the moving boundary parameters regulation is experimentally proved. The efficiency of work of chamber with the moving boundary and kinetics of thin and hyperfine disintegration of the limestone and synthetic diamond and titan dioxide is experimentally explored. It is shown, that the electric discharge thin and hyperfine disintegration is an effective method of receipt of flower. A design procedure of electric-discharge device is developed and applied in industry.

Keywords: chemical raw material disintegration, electric discharge grinding device, cavitation, grinding device parameters.