

УДК 681.5.015.23

*Осташко І.О., Науменко О.П.*

## МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОМЕХАНІКИ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ У ВІДЦЕНТРОВОМУ МЛИНІ

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

У статті розглядаються аеромеханічні процеси в відцентровому млині при різних швидкостях обертання з метою встановлення закономірностей кінематики потоку гетерогенного середовища в помольній камері млина, взаємодії його з робочим органом і класифікації подрібненого матеріалу під час видалення з помольної камери. Здійснено дослідження газодинаміки процесів у проточній частині відцентрового млина. Було досліджено траєкторії потоків, поля швидкості та тиску. Виявлено вплив різних факторів на ефективність класифікації та максимальний діаметр частинок, що виводяться з подрібнювальної камери. Встановлено закономірності переміщення гетерогенного середовища, взаємодії його з робочим органом і класифікації подрібненого матеріалу при видаленні з помольної камери, здійснено дослідження газодинаміки процесів в проточній частині відцентрового млина. Основним шляхом підвищення швидкості повітряних потоків є підвищення витрати транспортувального повітря, що в свою чергу впливає на аеродинаміку процесів у помольній камері млина, продуктивність і час подрібнення матеріалу. Газодинамічні процеси в стисненому середовищі проточної частини відцентрового млина описувалися системою нестационарних рівнянь нерозривності, Нав'є-Стокса, енергії і рівняння стану в наближенні моделі турбулентності. Аналіз результатів математичного моделювання процесів в робочій камері показав, що потік повітря здійснює складний обертальний рух в поздовжньому і поперечному перетинах з утворенням локальних зон підвищеної турбулентності. В результаті чисельного моделювання і аналізу результатів виявлено фактори, що дозволяють інтенсифікувати процес подрібнення матеріалу. Потоки мають яскраво виражену балістичну траєкторію. Вони починають свій рух від центру дна помольної камери та рухаються вздовж стінок камери, при цьому мають кручення по спіралі і рухаються вниз вздовж стінки полого вала. Спостерігається, що точка розділу потоків, які обертаються в нижній частині помольної камери та потоків, що рухаються у верхній частині, знаходиться на висоті 60% від висоти камери.

**Ключові слова:** моделювання, відцентровий млин, метод скінченних елементів, рівняння Нав'є-Стокса.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2020-8-2-59-66

### *Постановка проблеми*

Відцентрові млини широко використовуються для подрібнення неабразивних матеріалів. Ці млини, незважаючи на різні конструкції (млини з бильним елементом, дизембратори, роторно-вихрові млини, тощо) мають одну спільну особливість, а саме, робоче тіло, яке передає кінетичну енергію матеріалу, що підлягає руйнуванню. Конструкція робочого органа та спосіб впливу на подрібнюваний матеріал є основни-

ми відмінностями цих млинів. Продуктивність відцентрового млина взаємопов'язана з питомими енерговитратами на подрібнення матеріалу заданого класу. В Українському державному хіміко-технологічному університеті розроблено відцентровий млин з робочим органом, що мінімізує питоме споживання енергії в процесі подрібнення неабразивного матеріалу і дає можливість його первинної класифікації [1].

### Мета роботи

У помольній камері відцентрового млина в результаті обертання робочого органу розробленої конструкції виникають аеродинамічні процеси: рух повітряних потоків в ламінарних і турбулентних режимах. Видалення готової фракції та взаємодія частинок подрібнюваного матеріалу з робочим органом, стінками камери та між собою, обумовлені саме аеродинамікою потоків у помольній камері. Саме тому, важливим для розуміння процесу подрібнення матеріалу та видалення готового класу з відцентрового млина є вивчення аеродинаміки, що можливо втілити лише за допомогою математичного моделювання.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процес подрібнення характеризується високими капітальними та експлуатаційними витратами, а також високою енергоємністю самого процесу. Частка капітальних і експлуатаційних витрат на процес подрібнення у хімічній промисловості сягає 50–70% від загальних витрат [2].

Основним недоліком типової конструкції відцентрово-роторних млинів є велика частина енергії, що витрачається на розгін рухомих елементів, які мають суттєву масу, а подрібнення матеріалу відбувається за рахунок ударного зіткнення матеріалу з відбійниками, що призводить до зайвого зростання питомих енерговитрат. Саме тому, було запропоновано нову конструкцію відцентрового млина для подрібнення неабразивних сипких матеріалів. Особливістю запропонованого млина є конструкція робочого органа і спосіб вивантаження матеріалу, який дає змогу суттєво знизити питомі енерговитрати на процес подрібнення, а також виконувати сепарацію готового продукту

### Викладення основного матеріалу

Для моделювання газодинамічних процесів у відцентровому млині необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь, що включає нестационарні рівняння Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності потоку. Для числового розв'язання такої системи рівнянь існує велика кількість комп'ютерно-орієнтованих програм, як комерційних, так і відкритих програмних кодів.

У сучасних програмно-орієнтованих пакетах для числового розв'язання систем диференціальних рівнянь початковим етапом моделювання є створення 3D геометричної моделі, що повністю відображає геометрію досліджуваного об'єму проточної частини та пов'язаних з нею елементів конструкції відцентрового млина.

Елементи конструкції відцентрового мли-

на, що утворюють геометрію проточної області, надані на рис. 1.

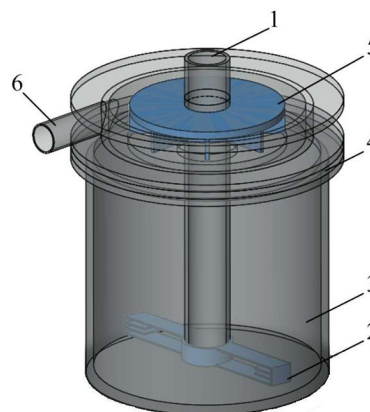


Рис. 1. Геометрична модель помольної камери відцентрового млина: 1 – полий вал; 2 – робочий орган; 3 – помольна камера; 4 – диск між помольною та вивантажувальною камерами; 5 – вивантажувальний вентилятор; 6 – відхідний патрубков

Основою для числового моделювання газодинамічних процесів є нестационарні рівняння Нав'є-Стокса. Загальновідома складність розв'язання рівняння Нав'є-Стокса полягає у тому, що вони мають властивості еліптичних рівнянь за просторовими координатами. Це означає, що збурення від будь-якої точки потоку або межі можуть поширюватись в усіх напрямках потоку. Одночасно, рівняння Нав'є-Стокса за часом мають властивості параболічних рівнянь, тобто на розв'язок впливає лише передісторія розвитку потоку, а подальша поведінка потоку не впливає на розв'язок у даний момент. Саме тому, розв'язок шукають з використанням методу становлення. Суть методу полягає в тому, що для деякого стаціонарного потоку, описаного рівняннями Нав'є-Стокса із заданими граничними умовами, задається початкове поле течії і розв'язується нестационарна задача для рівнянь Нав'є-Стокса з тими ж граничними умовами. Нестационарна задача розв'язується до того моменту часу, коли розв'язок за часом перестає змінюватися в межах заданої точності. Отриманий розв'язок приймається за розв'язок стаціонарної задачі. Такий метод можна застосовувати, якщо стаціонарний розв'язок існує і він єдиний, що може не завжди виконуватися, тому що ці рівняння нелінійні.

Числове розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, наприклад, методом скінченних різниць ускладнюються також тим, що ці рівняння нелінійні.

Цю складність зазвичай обходять шляхом лінеаризації рівнянь і застосування ітерацій. При розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса методом встановлення, просуваючись за часом крок за кроком, використовують найбільш простий метод лінеаризації рівнянь – перенесення рішення з попереднього кроку за часом на наступний або екстраполяцію розв'язку з двох попередніх кроків. Тоді на новому кроці за часом розв'язок стає наближено відомим і всі коефіцієнти рівнянь Нав'є-Стокса можуть бути наближено обчислені – рівняння стають лінійними, і для розв'язання системи дискретних рівнянь може бути використаний будь-який відповідний метод, наприклад, один з варіантів методу прогонки. Після того, як отримано новий розв'язок на цьому кроці за часом, коефіцієнти рівнянь можуть бути знову обчислені і розв'язок повторюється. Такі ітерації проводяться до тих пір, поки не отримують прийнятну збіжність для даного моменту часу.

Система рівнянь Нав'є-Стокса з використанням моделі турбулентності, що взята за основу для неідеального газу, записана в безрозмірному вигляді в декартовій системі координат [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{v}) = 0; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{v})}{\partial t} + (\bar{\rho} \tilde{v} \nabla) \tilde{v} = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\tau}_{\text{eff}}; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} k \tilde{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) \right] + \tilde{G}_k - Y_k + S_k; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \omega \tilde{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_w} \nabla \omega \right) \right] + \tilde{G}_w - Y_w + D_w + S_w; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{E})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{E} + \tilde{p}) = \nabla \cdot \left[ \left( \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \nabla \tilde{T} \right) \right] + \nabla \tilde{v} : \bar{\tau}_{\text{eff}} + q_v, \end{array} \right\} \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина, осереднена за Reynolds,  $\text{кг/м}^3$ ;  $t$  – час, с;  $S$  – оператор Гамільтона,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\tilde{v}$  – вектор швидкості, осереднений за Favre,  $\text{м/с}$ ;  $p$  – тиск, осереднений за Reynolds, Па;  $k$  – турбулентна кінетична енергія, Дж/кг;  $\omega$  – відносна швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\mu$  – динамічна в'язкість, Па·с;  $\mu_t$  – турбулентна в'язкість, Па·с;  $\sigma_k$  – коефіцієнт ослаблення  $\mu_t$  для малих чисел Reynolds;  $\tilde{G}_k$  – джерельний член для  $k$ ,  $\text{Вт/м}^3$ ;  $\tilde{G}_w$  – джерельний член для  $w$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}^2)$ ;  $D_w$  – член, що враховує перехресну дифузію,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}^2)$ ;  $\tilde{E}$  – масова повна енергія, Дж/кг;

$\bar{\tau}_{\text{eff}}$  – тензор девіаторних напружень, Па;  $q_v$  – густина об'ємного джерела теплоти,  $\text{Вт/м}^3$ ;  $\tilde{T}$  – абсолютна температура, осереднена за Favre, К.

Початкові та граничні умови для (1) мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{v}(X) = 0; \\ \bar{p}(X) = p_0; \\ k(X) = k_0; \\ \omega(X) = \omega_0; \\ \tilde{T}(X) = \tilde{T}_0, \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} n \cdot \tilde{v} = 0; \\ \bar{p} = p_{\text{вх}}; \\ k = k_{\text{вх}}; \\ \omega = \omega_{\text{вх}}; \\ \tilde{T} = \tilde{T}_{\text{вх}}, \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} n \cdot \tilde{v} = \tilde{v}_{\text{вих}}; \\ \bar{p} = p_{\text{вих}}; \\ k = k_{\text{вих}}; \\ \omega = \omega_{\text{вих}}; \\ \tilde{T} = \tilde{T}_{\text{вих}}, \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \tilde{v} = 0; \\ n \cdot \nabla \bar{p} = 0; \\ k = 0; \\ \omega = \omega_{\text{ст}}; \\ n \cdot \nabla \tilde{T} = 0, \end{array} \right\} \quad (2)$$

де  $X(x, y, z) \in \Omega$  – декартові координати, м;  $\Omega$  – розрахункова область.

Математична постановка (1), (2) використана для числового моделювання аеродинаміки відцентрового млина методом скінченних об'ємів в системі Flow Simulation.

Кількість розрахункових комірок в проточному середовищі складає 866301, кількість ітерацій на одну продувку – 571. Основними цілями числового моделювання було визначити динамічний, статичний та повний тиск, а також поля компонент вектора швидкості потоку та її модуля. Розв'язок виконувався до отримання повної збіжності за параметрами повного тиску та сумарної швидкості в кожній точці проточної області.

Для перевірки адекватності числової моделі та результатів моделювання було виконано зіставлення результатів моделювання (рис. 2) з експериментально отриманими даними при роботі млина зі знятою камерою та при роботі в камері [4].

Результати зіставлення показали, що дані числового моделювання збігаються з експериментом в межах похибки приладу.

На початковому етапі моделювання розглядалася газодинаміка процесу в проточній частині без завантаження матеріалу. На рис. 3 показано результати розрахунків і експериментально зафіксованих значень швидкості повітря на виході з помольної камери відцентрового млина при різних частотах обертання ротора.

Як видно з вищенаведених графіків розбіжність між експериментальними і розрахунковими значеннями швидкості повітря на виході з помольної камери несуттєві та складають 8,2%, що може бути обумовлено як похибками вимірювання, так і похибками розрахунку, що підтверджує адекватність розробленої

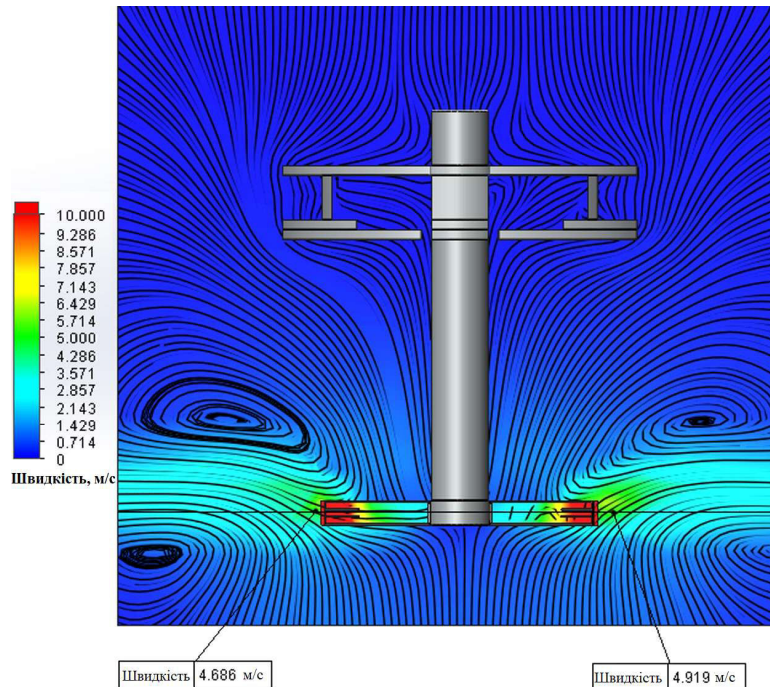


Рис. 2. Епюра розподілу швидкостей при знятій помольній камері

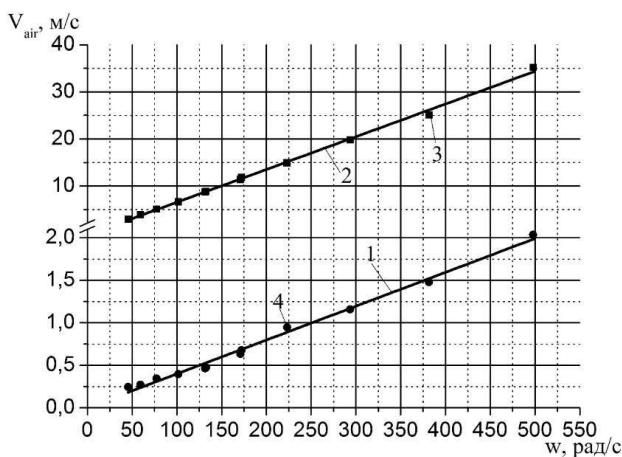


Рис. 3. Залежність швидкості повітряного потоку з вихідного патрубку від кутової швидкості:

1, 4 – експериментальна і розрахункова криві відповідно для робочого органа; 2, 3 – експериментальна і розрахункова криві відповідно для робочого органа і крильчатки

числової моделі та достовірність результатів моделювання.

Аналіз результатів числового моделювання процесів у робочій камері показав, що потік повітря здійснює складний обертальний рух в повздовжньому і поперечному перерізах з утворенням локальних зон підвищеної турбулентності. Середня швидкість потоку матеріалу в зоні бильних елементів становить 12,6 м/с, а швид-

кість робочого органа 68,72 м/с. Таким чином, відносна швидкість зіткнення становить 56 м/с, тобто 81,5% від швидкості обертання робочого органа.

Важливим, з точки зору підвищення ефективності подрібнення, є те, що повітря з частинками матеріалу, проходячи через зазори між бильними елементами, збільшує швидкість до 31 м/с, а в зоні бильних елементів робочого органа утворюються турбулентні каверни, що сприяє концентрації матеріалу.

В результаті числового моделювання і аналізу результатів було виявлено, що в області робочого органа в поперечному перерізі повітряні потоки можна розділити на три групи, а саме: потоки перед робочим органом, що охоплюють зону на відстані 15–20 мм перед робочим органом; потоки за робочим органом, що охоплюють зону на відстані 60–70 мм за робочим органом; відносно незбурені потоки. Як зазначалося вище, вельми важливим фактором подрібнення є швидкість зіткнення матеріалу з робочим органом, тому досліджено її залежність від кутової швидкості робочого органа (рис. 4).

Відповідно до розташування визначених числовим моделюванням точок залежності було апроксимовано лінійними функціями з середньоквадратичним відхиленням 0,99 та 0,91 для прямих 1 та 2 (рис. 4) відповідно. Більшу дисперсність при обробці результатів для області

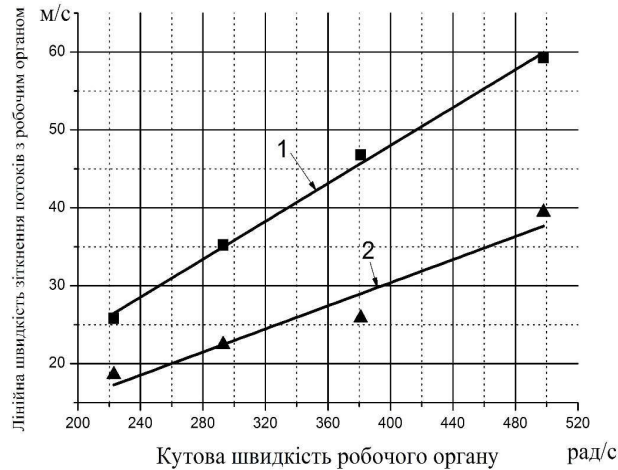


Рис. 4. Залежність лінійної швидкості зіткнення потоків повітря з робочим органом в області бильних елементів:  
1 – потоки області 3; 2 – потоки області 1

перед робочим органом можна пояснити високою турбулентністю, що вносить свою корекцію в розподіл поля швидкостей.

Основним шляхом підвищення швидкості повітряних потоків є підвищення витрати транспортувального повітря, що в свою чергу впливає на аеродинаміку процесів у помольній камері млина. Саме тому цікавим буде дослідити вплив підвищення продуктивності пневмотранспорту на швидкість потоків у помольній камері млина.

Дослідження проводимо на основі математичної моделі, опис та підтвердження адекватності якої наведено вище. Початковою точкою відліку для аналізу взято режим роботи при кутовій швидкості ротора млина 498 рад/с та продуктивності пневмотранспорту на рівні  $9,62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , що відповідає середній швидкості повітря в перерізі вихідної камери на рівні 1 м/с. Діаграма розподілу поля швидкостей і траєкторії потоків для точки відліку наведено на рис. 5.

Подальше збільшення відносної витрати повітря через помольну камеру до  $0,59 \text{ с}^{-1}$  призводить лише до збільшення швидкості потоків і суттєво не впливає на траєкторію потоків. Починаючи з відносної витрати  $0,59 \text{ с}^{-1}$  спостерігається утворення другої кишені потоків з закрученим турбулентним режимом над першою, при цьому розміри першої області зменшуються (рис. 6). Помітно також зниження граничної точки між групами потоків на 10–15% від висоти помольної камери.

Подальше збільшення відносної витрати транспортувального повітря є небажаним ос-

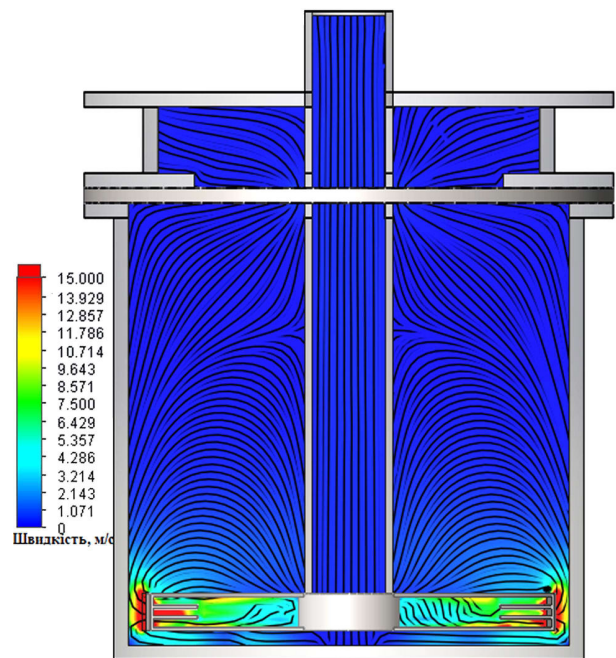


Рис. 5. Діаграма розподілу швидкостей і траєкторій потоку по висоті помольної камери при відносній витраті повітря  $0,16 \text{ с}^{-1}$

кільки починають виноситися частинки розміром 120 мкм і більше. Як видно з діаграми швидкість потоку між робочим органом і стінкою камери становить більше 30 м/с, у нижній кишені дещо нижча 23–27 м/с, а у верхній 9–15 м/с. При цьому у кишенях спостерігається підвищення інтенсивності закручення турбулентних потоків, що ймовірно призводить до збільшення ефективності подрібнення.

Продуктивність млина обумовлена двома факторами: швидкістю утворення готового класу (швидкість подрібнення) і видалення з помольної камери готового класу. Тому важливим науковим і практичним результатом є визначення залежності максимального розміру частинок, які видаляються з помольної камери від швидкості потоку та розрідження створеного на виході.

Траєкторії руху твердих частинок визначаються інтегруванням за псевдо-часовими кроками рівняння балансу сил, що діють на частинку, записані у Лагранжевій системі відліку:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho - \rho_p)}{\rho_p}, \quad (3)$$

де  $u$  – вектор швидкості газового середовища,

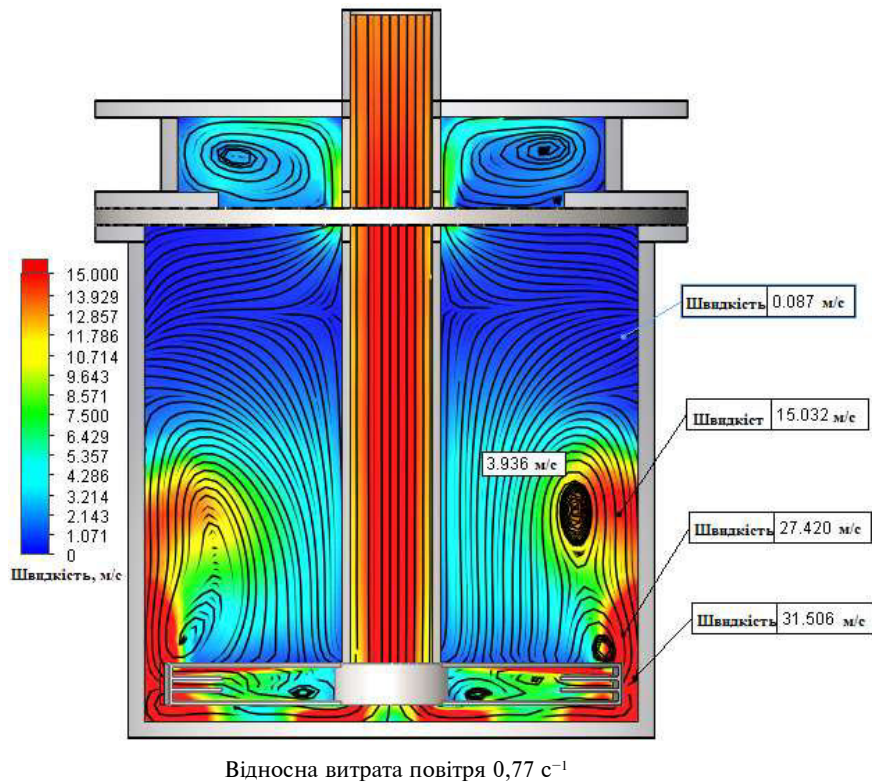


Рис. 6. Видалення готового класу з помольної камери при різних режимах роботи

м/с;  $u_p$  – вектор швидкості твердих частинок, м/с;

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} - \text{сила гідравлічного опору, відне-}$$

сена до одиниці маси частинки, 1/с;  $C_D$  – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору;  $\rho_p$  – густина твердих частинок кг/м<sup>3</sup>,  $d_p$  – усереднений діаметр твердих частинок, м;  $Re$  – число Рейнольдса.

Розрахункове визначення діаметру частинок, які видаляються потоком з помольної камери при різних швидкостях потоків, надано на рис. 7.

Експериментально визначалися залежності максимального діаметру частинок  $d_{max}$ , що видаляється з помольної камери, від величини витрати повітря на виході. Для узагальнення отриманих результатів на рис. 7 наведена залежність  $d_{max}$  від відносної витрати повітря, що дорівнює відношенню витрати повітря до об'єму помольної камери  $q=Q/V$  ( $Q$  – витрата повітря,  $V$  – об'єм камери).

Аналіз отриманих даних підтверджує, що розроблена методика розрахунку дає змогу оцінювати крупність видаленого матеріалу з млина

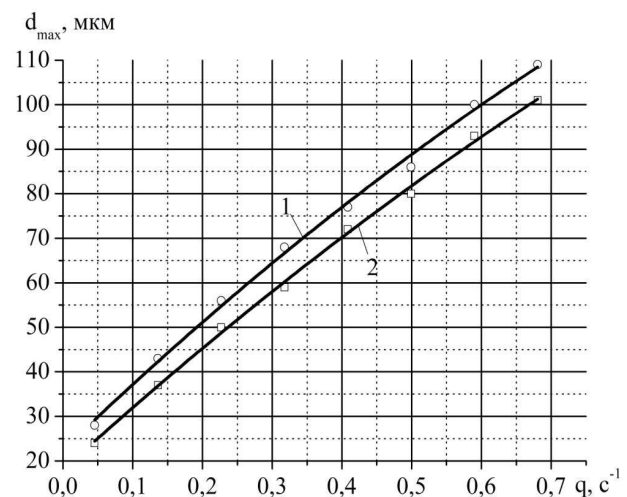


Рис. 7. Залежність максимального діаметру частинок, які видаляються з помольної камери, від відносної витрати повітря на виході: 1, 2 – експериментальна та розрахункова залежності

залежно від величини витрати повітря.

### Висновки

1. Розроблено методику дослідження аеродинамічних процесів в проточній частині відцентрового млина, яка дає можливість зробити

оцінювання газодинамічних потоків у помольній камері млина з урахуванням особливостей конструкції його проточної частини, робочого органа, параметрів подрібнюваного матеріалу та тиску на вході і виході, а також виявити закономірності впливу вищенаведених факторів на видалення максимального діаметра матеріалу, що подрібнюється. Порівняння експериментальних і розрахункових даних показує, що похибка не перевищує 15%.

2 Встановлено, що крупність подрібнених частинок матеріалу, які видаляються з млина, пропорційно залежить від витрати повітря і вакууметричного тиску на виході з розвантажувальної камери.

3. Лінійна та кутова швидкість зіткнення потоків повітря і твердих частинок з бильними елементами пропорційні кутовій швидкості робочого органа.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 90631 С Україна, МПК В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Виноградов Б.В., Ємельяненко В.І., Осташко І.О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № 200905165; заявл. 25.05.2009; опубл. 11.05.2010; Бюл. № 9.
2. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 367 с.
3. Карвацький А.Я. Механіка суцільних середовищ. Розв'язання задач: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2016. – 392 с.
4. Карвацький А.Я. Механіка суцільних середовищ [Електронний ресурс]: навч. посіб. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 290 с.
5. Ostashko I.O., Vinogradov B.V. Aeromechanics of processes in the flow part of a centrifugal mill // Acta Mechanica Slovaca. – 2017. – Vol. 21 – № 3. – P.51-57. ISSN: 1335-2393. <https://doi.org/10.21496/ams.2017.027>

Надійшла до редакції 01.12.2020

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОМЕХАНИКИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Осташко И.А., Науменко А.П.

В статье рассматриваются аэромеханические процессы в центробежной мельнице при различных скоростях вращения с целью установления закономерностей кинематики потока гетерогенной среды в помольной камере мельницы, взаимодействия его с рабочим органом и классификации измельченного материала при удалении с помольной камеры. Проведено исследование газодинамики процессов в проточной части центробежной мельницы. Было исследовано траектории потоков, поля скорости и давления. Выявлено влияние различных факторов на эффективность классификации и максимальный диаметр частиц, выводимых из помольной камеры. Установлены закономерности перемещения гетерогенной среды, взаимодействия ее с рабочим органом и классификации измельченного материала при удалении из помольной камеры, проведено исследование газодинамики процессов в проточной части центробежной мельницы. Основным путем повышения скорости воздушных потоков является повышение расхода транспортируемого воздуха, что в свою очередь влияет на аэродинамику процессов в помольной камере мельницы, производительность и время измельчения материала. Газодинамические процессы в сжатой среде проточной части центробежной мельницы описывались системой нестационарных уравнений неразрывности Навье-Стокса, энергии и уравнения состояния в приближении модели турбулентности. Анализ результатов математического моделирования процессов в рабочей камере показал, что поток воздуха осуществляет сложное вращательное движение в продольном и поперечном сечениях с образованием локальных зон повышенной турбулентности. В результате численного моделирования и анализа результатов выявлены факторы, позволяющие интенсифицировать процесс измельчения материала. Потоки имеют ярко выраженную баллистическую траекторию. Они начинают свое движение от центра дна помольной камеры и двигаются вдоль стенок камеры при этом имеют кручение по спирали и двигаются вниз вдоль стенки полого вала. Наблюдается, что точка раздела потоков, которые вращаются в нижней части помольной камеры и потоков, движущихся в верхней части, находится на высоте 60% от высоты камеры.

**Ключевые слова:** моделирование, центробежная мельница, метод конечных элементов, уравнения Навье-Стокса.

## SIMULATION OF AEROMECHANICS OF THE GRINDING PROCESS IN A CENTRIFUGAL MILL

*Ostashko I.A., Naumenko A.P.*

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

*The article discusses aeromechanical processes in a centrifugal mill at different speeds of rotation in order to establish the regularities of the kinematics of the flow of a heterogeneous medium in the grinding chamber of the mill, its interaction with the working body and the classification of the crushed material when removed from the grinding chamber. The study of gas dynamics of processes in the flow path of a centrifugal mill has been carried out. The trajectories of streams, velocity and pressure fields were investigated. The influence of various factors on the efficiency of the classification and the maximum diameter of particles removed from the grinding chamber was revealed. The regularities of the movement of a heterogeneous medium, its interaction with the working body and the classification of the crushed material when removed from the grinding chamber were established, the gas dynamics of processes in the flow path of a centrifugal mill was studied. The main way to increase the speed of air flows is to increase the flow of transport air, which in turn affects the aerodynamics of the processes in the grinding chamber of the mill, productivity and grinding time of the material. Processes of gas dynamics in a compressed medium of the flow path of a centrifugal mill were described by a system of non-stationary Navier-Stokes equations of continuity, energy and equation of state in approximation of the turbulence model. Analysis of the results of mathematical modeling of processes in the working chamber showed that the air flow carries out a complex rotational movement in the transverse and longitudinal sections with the formation of local zones of increased turbulence. As a result of numerical modeling and analysis of the results, factors have been identified that make it possible to intensify the process of material grinding. The flows have a pronounced ballistic trajectory. They start their movement from the center of the bottom of the grinding chamber and move along the walls of the chamber while rotating in a spiral and moving down the wall of the hollow shaft. It is observed that the point of separation of the flows rotating in the lower part of the grinding chamber and the flows moving in the upper part is on 60% of the height of the chamber.*

**Keywords:** modeling, centrifugal mill, finite element method, Navier-Stokes equation.

## REFERENCES

1. Vinogradov B.V., Yemel'yanenko V.G., Ostashko G.O. Pat. 90631 S Ukrayina, MPK V02S 13/14. *Vidcentrovij mlin udarnoyi di'yi* [Centrifugal impact mill]; zayavnik ta patentovlasnik DVNZ „Ukr. derzh. khi'm, tekhn. un-t.“, no. 200905165; zayavl. 25.05.2009; opubl. 11.05.2010; Byul. No. 9. (in Ukrainian).
2. Sidenko P.M. *Izmel'chenie v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry]. Moscow, Khimiya, 1977. 367 p. (in Russian).
3. Karvacz'kij A.Ya. *Mekhani'ka suczi'l'nikh seredovishh. Rozv'yazannya zadach* [Mechanics in continuous media. Problems solving]: navch. posib., Kyiv, NTUU «KPI» Vid-vo «Poli'tekhnika», 2016. 392 c. (in Ukrainian).
4. Karvacz'kij A.Ya. *Mekhani'ka suczi'l'nikh seredovishh* [Mechanics in continuous media. Problem solving]: navch. posi'b. Kyiv, KPI i'm. I'gorya Si'kors'kogo, 2016. 290 c. (in Ukrainian).
5. Ostashko I.O., Vinogradov B.V. Aeromechanics of processes in the flow part of a centrifugal mill. *Acta Mechanica Slovaca*, 2017, vol. 21, no. 3, pp.51-57. ISSN: 1335-2393. <https://doi.org/10.21496/ams.2017.027>