

УДК 621.926.5:539.215

Науменко Ю. В., д.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ПСЕВДОТЕМПЕРАТУРА ЗЕРНИСТОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО ЗМІШУВАЧА

Розглянуто енергетичні параметри руху зсувного шару внутрішньокамерного зернистого завантаження обертового барабана. Проаналізовано інтенсивність циркуляції завантаження. Встановлено умови підвищення ефективності робочого процесу барабанного змішувача.

Ключові слова: барабанний змішувач, зернисте завантаження, зсувний шар, псевдотемпература.

Змішування зернистих матеріалів здійснюється переважно в машинах барабанного типу. Парадоксальною особливістю таких машин є поєднання граничної простоти конструкції та вкрай складної для описування поведінки оброблюваного середовища.

Традиційна теорія руху зернистого заповнення барабанних змішувачів базується на концепції ізольованого від оточуючого середовища окремого елемента завантаження камери [1-3]. Проте суттєва розбіжність результатів розрахунку із експериментальними даними спричинила тенденцію відмови від цієї гранично спрощеної гіпотези на користь моделі трифазного або «змішаного» режиму.

Натомість саме режим руху внутрішньокамерного завантаження визначає характер усереднюючої дії на складові суміші зернистих матеріалів, спосіб змішування, а отже, ефективність процесу.

За мету роботи було поставлено визначення параметрів реального режиму руху зернистого матеріалу, що впливають на ефективність усереднення в барабанному змішувачі.

Математичне моделювання робочого процесу барабанного змішувача зводиться, перш за все, до задачі багатьох тіл завантаження, взаємодія між якими носить стохастичний характер. При описуванні руху такої системи можна застосувати різні підходи.

З одного боку, рух елементів завантаження можна досліджувати використовуючи рівняння Ньютона, які описують рух кожного окремого елемента. Однак точне аналітичне описування руху завантаження на рівні окремих молекулних тіл видається неможливим внаслідок надзвичайної трудомісткості та практично непереборних обчислювальних

труднощів, що виникають. Така задача значно ускладнюється хаотичним дрібномасштабним рухом та зштовхуванням елементів між собою і зі стінкою камери.

У зв'язку з цим слід зазначити, що точна інформація про рух всіх елементів, яка одержується при такому підході, є надмірною, зайвою і непотрібною при розв'язуванні практичних задач, оскільки з прикладної точки зору найбільший інтерес становлять не деталі руху тіл завантаження, а інтегральні характеристики цього руху. Тому інтерес становить розробка ефективного наближеного способу аналізу та розрахунку, що базується на континуальній моделі завантаження із застосуванням осереднених параметрів. Залучення такого більш грубого підходу тим не менш дає можливість одержати інформацію про досліджувану систему, достатню для практичних цілей.

При роботі барабанних змішувачів процес усереднення здійснюється переважно в зсувній зоні зернистого завантаження. Швидка гравітаційна течія, що реалізується в цій зоні, відноситься до класу швидких зсувних течій, які є найбільш загальною формою руху зернистого середовища та супроводжується інтенсивною взаємодією елементів. Експериментальні дослідження засвідчили, що численна кількість технологічних процесів найактивніше протікають саме в режимі швидких зсувних течій зернистих середовищ, для яких характерною є активна взаємодія елементів при набуванні ними значної швидкості хаотичних переміщень.

Для описування швидких зсувних течій зернистих матеріалів було запропоновано низку методів. Однак, не дивлячись на різноманітність, застосування цих методів не забезпечує адекватного математичного моделювання в найбільш загальних випадках гравітаційних течій сипких середовищ, що характеризуються великими градієнтами швидкості зсування та концентрацій твердої фази.

Натомість доволі перспективним видається при вивченні швидкої зсувної течії зернистих матеріалів застосування добре розробленої кінетичної теорії густих газів. Урахування непружності елементів у міжелементних зштовхуваннях дозволяє включити у рівняння балансу їх енергії параметр «температури» середовища [4]. Температурою зернистого середовища в механіці швидких течій сипких матеріалів називають кінетичну енергію, що відповідає випадковому хаотичному руху елементів. Механізм виникнення такої енергії впливає з енергетичного балансу при зсуванні зернистого середовища, який реалізується у локальній рівновазі між генеруванням енергії флуктуацій внаслідок зштовхування та дисипацією цієї енергії при зштовхуваннях.

Для визначення функції розподілу параметрів зсувного потоку по товщині шару, що скочується, можна використати гіпотезу про аналогію між гідростатичним тиском, дилатансією потоку, псевдотемпературою гранульованого середовища та відповідними параметрами стану густого газу – тиском, об'ємом і температурою. У відповідності із прийнятою аналогією може бути записано рівняння стану зернистого середовища у формі відомого закону стану ідеального газу.

Рівняння стану сипкого середовища при швидкому зсуванні встановлює взаємозв'язок між тиском, швидкістю зсування та порізністю в потоці середовища. Це рівняння є феноменологічним і таким, що принципово визначає фізичні закономірності течії. Із урахуванням феноменологічності рівняння, воно може бути представлено у зручній для аналізу формі за рахунок поглинання фізичних констант коефіцієнтом ζ

$$p(y) \cdot \nu(y) = \zeta \left(\frac{dV}{dy} \right)^2,$$

де p – аналог гідростатичного тиску; ν – дилатансія зернистого середовища, що визначає зміну об'єму матеріалу при зсувному деформуванні; ζ – коефіцієнт, що залежить від фізико-механічних властивостей середовища; $(dV/dy)^2$ – аналог температури середовища; dV/dy – швидкість зсування потоку; V – зсувна швидкість; y – координата, що перпендикулярна до потоку.

Вираз для дилатансії має вигляд:

$$\nu(y) = \frac{1}{1 - \varepsilon(y)} - \frac{1}{1 - \varepsilon_0(y)},$$

де ε – порізність середовища, що визначає відношення об'єму пор шару до об'єму всього шару, ε_0 – порізність нерухомого (густого) шару.

Результати експериментальних досліджень засвідчили про те, що для незв'язних нееластичних зернистих матеріалів, що складаються з елементів, близьких за формою до сферичних, коефіцієнт взаємозв'язку ζ між роботою та дилатансією зернистого середовища при швидкому засуванні ($p\nu$) та температурою середовища $(dV/dy)^2$ є близьким до 1 і практично не залежить від величини потоку в досліджуваному діапазоні його зміни. У такому випадку рівняння стану при швидкому зсуванні може бути представлено у вигляді

$$p(y) \cdot \nu(y) = \left(\frac{dV}{dy} \right)^2.$$

Слід зауважити, що показник температури зернистого середовища має комплексний характер і визначає ступінь активності взаємних переміщень елементів та інтенсивність протікання в середовищі технологічних процесів. Тому для інтенсифікації та раціональної організації із урахуванням кінетики процесу подрібнення в барабанних млинах у швидкому гравітаційному потоці внутрішньокамерного завантаження необхідно забезпечити умови течії, що сприяють підвищенню температури зернистого середовища, яке досягається за рахунок збільшення швидкості зсування в об'ємі шару. Крім того, підвищення швидкості зсування дозволяє збільшити середнє значення частоти співударянь тіл завантаження, що є особливо ефективним при тонкому помелі.

Для зручності аналізу впливу режиму руху завантаження на процес змішування доцільно застосувати на додаток до псевдотемператури та швидкості зсування ще градієнт зсувної швидкості.

Для чисельного визначення параметрів руху, прийнятих як критерії ефективності подрібнення, було застосовано аналітико-експериментальний метод [5, 6]. Він полягає у розрахунку низки параметрів на основі аналітичних залежностей із урахуванням експериментальних даних та встановлені інших параметрів за результатами візуального аналізу зареєстрованих картин руху завантаження (рис. 1).

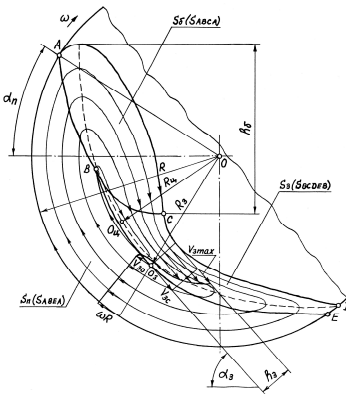


Рис. 1. Розрахункова схема визначення критеріїв ефективності змішування за допомогою візуалізації картини руху завантаження

Значення градієнта зсувної швидкості K_c обчислювалось за виразом

$$K_c = \frac{V_{3max} + |V_{30}|}{h_3} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}}$$

де R – радіус камери, V_{3max} – максимальна зсувна швидкість на вільній поверхні у вибраному перерізі зсувного шару, V_{30} – швидкість руху опорної поверхні у вибраному перерізі шару, h_3 – товщина шару у виб-

раному перерізі.

Значення температури середовища зсувного шару T обчислювалось за виразом

$$T = \left(\frac{V_{zmax} + |V_{z0}|}{h_s} \right)^2 \cdot \frac{R}{g}$$

Параметри руху визначались для діапазону ступеня заповнення камери $\kappa=0,25-0,45$. Відносна швидкість обертання ($\psi_\omega = \omega/\omega_{кр}$, $\omega_{кр} = \sqrt{g/R}$ – критична кутова швидкість, при якій відцентрове прискорення на циліндричній поверхні камери дорівнює гравітаційному прискоренню g) змінювалась у діапазоні $\psi_\omega=0-0,6$ із кроком 0,1, а при $\psi_\omega>0,6$ – із кроком 0,05.

Отримано результати для чотирьох типових випадків роботи барабанних змішувачів. Перший випадок характеризується відносним розміром елементів завантаження d у камері діаметром D – $d/D=0,022$ та хвильовою формою її поверхні. Другий – $d/D=0,026$, третій – $d/D=0,01$, четвертий – $d/D=0,0024$, а також гладкою камерою.

На рис. 2 зображено залежності градієнта зсувної швидкості K_Γ від ψ_ω . Абсолютне максимальне значення K_Γ становить 16-23, відповідає $\psi_\omega=0,85-1$ і зростає зі збільшенням κ та зменшенням d/D . При зношуванні футерівки цей максимум відповідає значенню $\psi_\omega=1,02-1,81$, що спадає зі збільшенням κ .

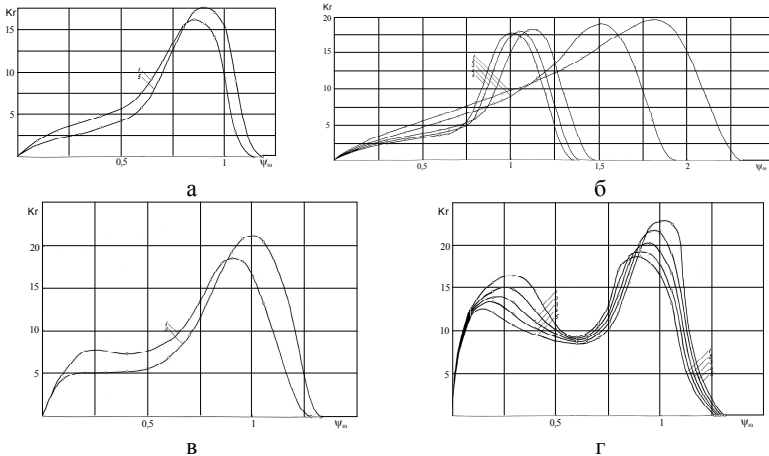


Рис. 2. Залежності K_Γ від ψ_ω при: а – $d/D=0,022$ та хвильовій камері, б – $d/D=0,026$ та гладкій камері, в – $d/D=0,01$ та гладкій камері, г – $d/D=0,0024$ та гладкій камері: 1 – $\kappa=0,25$; 2 – $\kappa=0,3$; 3 – $\kappa=0,35$; 4 – $\kappa=0,4$; 5 – $\kappa=0,45$

При $d/D < 0,01$ виникає локальний максимум значення K_T , що становить 12,5-16,4, відповідає значенню $\psi_{\omega} = 0,15-0,3$ і спадає зі збільшенням κ . Співвідношення між локальним тихохідним та абсолютним швидкохідним максимумами становить 0,54-0,88 і спадає зі збільшенням κ . Значення середньоходового мінімуму K_T між цими максимумами становить 8,4-9,1, відповідає $\psi_{\omega} = 0,58-0,61$ і слабо залежить від κ .

На рис. 3 зображено залежності температури середовища зсувного шару T від ψ_{ω} . Абсолютне максимальне значення T становить 250-530, відповідає $\psi_{\omega} = 0,85-1$ і зростає зі збільшенням κ та зменшенням d/D . При зношуванні футерівки цей максимум відповідає значенню $\psi_{\omega} = 1,02-1,81$, що спадає зі збільшенням κ .

При $d/D < 0,01$ виникає локальний максимум значення T , що становить 155-270, відповідає значенню $\psi_{\omega} = 0,15-0,3$ і спадає зі збільшенням κ . Співвідношення між локальним тихохідним та абсолютним швидкохідним максимумами становить 0,28-0,78 і спадає зі збільшенням κ . Значення середньоходового мінімуму T між цими максимумами становить 70-83, відповідає $\psi_{\omega} = 0,58-0,61$ і слабо залежить від κ .

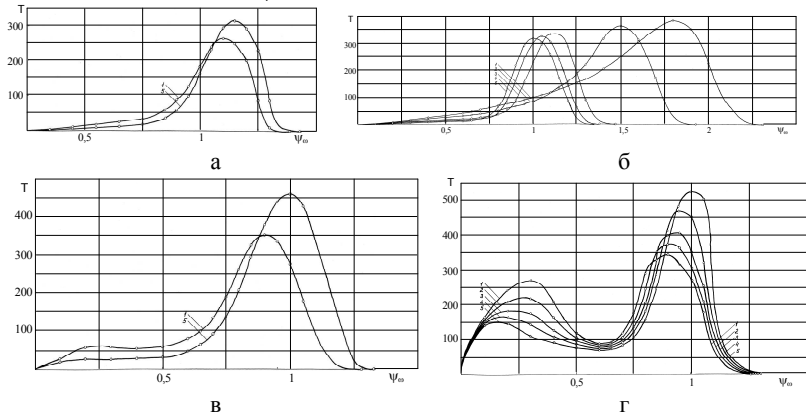


Рис. 3. Залежності T від ψ_{ω} (позначення за рис. 2)

Було введено комплексні характеристики продуктивності для загальної кількісної оцінки продуктивності процесу барабанних змішувачів. Як складові таких параметрів було використано питому енергію зсувної зони завантаження, масову частку цієї зони та оборотність завантаження. Добуток питомої енергії на масову частку характеризує повну енергію зсувної зони. Добуток питомої енергії на масову частку та на оборотність характеризує продуктивність змішування від дії цієї зони зернистого завантаження на матеріал.

Повна енергія хаотичного руху у поперечному напрямку зсувного шару, що визначає зсувну дію завантаження, характеризується добутком температури середовища шару T , як питомої енергії, на масову частку шару $K_{3a} - T \cdot K_{3a}$, а продуктивність зсувної дії шару характеризується добутком цих множників на оборотність завантаження $K_o - T \cdot K_{3a} \cdot K_o$.

При змішуванні зсувною дією завантаження енергетична ефективність процесу характеризується відношенням $(T \cdot K_{3a} \cdot K_o) / \psi_{N0.5}$, а питома витрата енергії на реалізацію процесу визначається виразом $\psi_{N0.5} / (T \cdot K_{3a} \cdot K_o)$, де $\psi_{N0.5}$ – відносна потужність, що визначає відношення дійсної потужності опору завантаження обертанню барабана до добутку умовного максимального моменту, який відповідає розподілу завантаження в поперечному перерізі камери у вигляді ідеального твердотільного сегмента, що повернуто разом із барабаном відносно початкового положення на прямий кут, при половинному заповненні камери на критичну кутову швидкість.

Наведені графічні залежності комплексних параметрів $T \cdot K_{3a}$, $T \cdot K_{3a} \cdot K_o$ від ψ_{ω} для четвертого випадку роботи барабаних змішувачів (рис. 4 та 5) характеризуються, порівняно з $T(\psi_{\omega})$ (рис. 3), поступовим переходом тихохідних максимумів значень параметрів з локальних у абсолютні.

Зокрема, якщо співвідношення між тихохідним та швидкохідним максимумами значень для $T(\psi_{\omega})$, при четвертому випадку роботи змішувачів, становить 0,28-0,79, то для комплексних параметрів $T \cdot K_{3a}(\psi_{\omega}) - 0,66-0,85$, а для $T \cdot K_{3a} \cdot K_o(\psi_{\omega}) - 0,9-1,16$. Тихохідний максимум $T \cdot K_{3a} \cdot K_o$ відповідає $\psi_{\omega} = 0,2-0,3$. Значення цих максимумів знижуються зі зростанням κ .

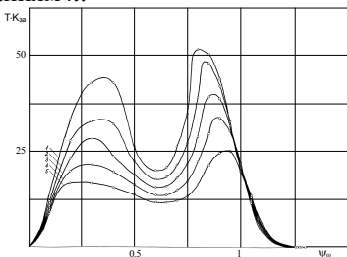


Рис. 4. Залежності $T \cdot K_{3a}$ від ψ_{ω} при $d/D=0,0024$ та гладкій камері: 1 – $\kappa=0,25$; 2 – $\kappa=0,3$; 3 – $\kappa=0,35$; 4 – $\kappa=0,4$; 5 – $\kappa=0,45$

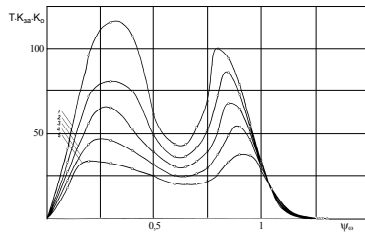


Рис. 5. Залежності $T \cdot K_{3a} \cdot K_o$ від ψ_{ω} (позначення за рис. 4)

Наведені графічні залежності енергетичних параметрів $(T \cdot K_{3a} \cdot K_o) / \psi_{N0.5}$ та $\psi_{N0.5} / (T \cdot K_{3a} \cdot K_o)$ від ψ_{ω} для четвертого випадку роботи

барабанних змішувачів (рис. 6 та 7) характеризуються, порівняно із залежностями продуктивності $T \cdot K_{за} \cdot K_o(\psi_{\omega})$, утворенням загального абсолютного екстремуму при тихохідному обертанні. При змішуванні зсувною дією енергетична ефективність набуває максимального значення, а питома витрата енергії – мінімального, при $\psi_{\omega}=0,15-0,2$ і віддаляється від екстремуму зі зростанням κ .

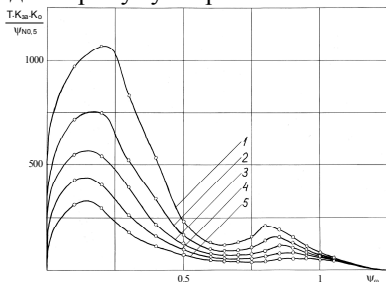


Рис. 6. Залежності $(T \cdot K_{за} \cdot K_o) / \psi_{N0,5}$ від ψ_{ω} (позначення за рис. 4)

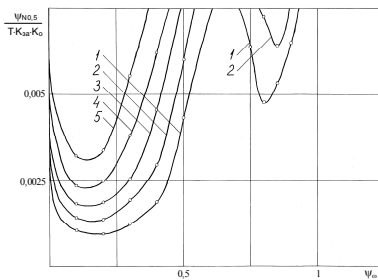


Рис. 7. Залежності $\psi_{N0,5} / (T \cdot K_{за} \cdot K_o)$ від ψ_{ω} (позначення за рис. 4)

Таким чином, змішування рухливих дрібнодисперсних зернистих сумішей в барабанних змішувачах доцільно реалізовувати шляхом створення зсувної дії на середовище в зоні зсувного руху завантаження, а змішування малорухливих крупнодисперсних матеріалів – шляхом створення динамічної дії в зоні руху завантаження із невідільним падінням. На підставі отриманих результатів щодо підвищення псевдотемператури завантаження, продуктивності та енергетичної ефективності, раціональними параметрами процесу змішування дрібнодисперсних матеріалів є низька швидкість обертання барабана ($\psi_{\omega}=0,15-0,3$) та мала ступінь заповнення камери ($\kappa < 0,5$), коли інтенсивність зсувної циркуляції, зокрема тихохідний діапазон зазначених параметрів процесу, набуває максимального значення. Натомість раціональними параметрами процесу змішування крупнодисперсних матеріалів є висока швидкість обертання ($\psi_{\omega}=0,85-1$) та велика ступінь заповнення камери ($\kappa > 0,5$), коли інтенсивність динамічної активації, зокрема швидкохідний діапазон зазначених параметрів процесу, набуває максимального значення.

1. Макаров Ю. И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с. 2. Кафаров В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М. : Наука, 1985. – 440 с. 3. Першин В. Ф. Переработка сыпучих материалов в ма-

шинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М. : Машиностроение, 2009. – 220 с. **4.** Борщев В. Я. «Температура» зернистой среды и физические эффекты взаимодействия частиц при быстром сдвиговом течении зернистых материалов / В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, вып. 8. – С. 78-82. **5.** Науменко Ю. В. Основы теорії режимів роботи барабаних млинів: Монографія / Ю. В. Науменко. – Рівне : Видавництво СПД Зелент О. І., 2009. – 282 с. **6.** Напружено-деформований стан будівельних матеріалів в технологічних процесах виробництва / В. Й. Сівко, В. А. Поляченко, М. П. Кузьмінець, Є. В. Сівко, Ю. В. Науменко. – К. : НТУ, 2010. – 352 с.

Рецензент: к.т.н., професор Сухарев Е. О. (НУВГП)

Naumenko Y. V., Doctor of Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

PSEUDOTEMPERATURE OF GRANULAR FILLING OF DRUM MIXERS

The rotating drum intrachamber filling shifting layer energy flow conditions are considered. The filling circulation intensity is examined. The possibilities for raising the value of a drum mixer operating conditions are established.

Keywords: drum mixer, granular filling, shifting layer, pseudotemperature.

Науменко Ю. В., д.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ПСЕВДО ТЕМПЕРАТУРА ЗЕРНИСТОЙ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННОГО СМЕСИТЕЛЯ

Рассмотрены энергетические параметры движения сдвигового слоя внутрикамерной зернистой загрузки вращающегося барабана. Проанализована интенсивность циркуляции загрузки. Установлены условия повышения эффективности рабочего процесса барабанного смесителя.

Ключевые слова: барабанный смеситель, зернистая загрузка, сдвиговый слой, псевдотемпература.
