

*А.М. Баранов, д.т.н., проф.
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків,
Р.І. Рибалко, к.т.н.
Донбаська національна академія будівництва та архітектури, м. Макіївка*

ВПЛИВ СТРУКТУРИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ТА КОНСТРУКЦІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ СЕПАРАТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗДІЛЕННЯ

Розроблено модель оцінки взаємодії часток матеріалу і турбулентного потоку повітря. Запропоновано новий теоретичний підхід до створення моделей руху часток у потоці газу з урахуванням турбулентності. Намічено шляхи створення нових конструкцій сепараторів і надано рекомендації щодо вдосконалення конструкцій існуючих сепараторів.

Ключові слова: устаткування сортування, турбулентний потік.

Разработана модель оценки взаимодействия частиц материала и турбулентного потока воздуха. Предложен новый теоретический подход к созданию моделей движения частиц в потоке газа с учетом турбулентности. Намечены пути создания новых конструкций сепараторов и даны рекомендации для совершенствования конструкций существующих сепараторов.

Ключевые слова: оборудование сортировки, турбулентный поток.

The model of estimation of co-operation of particles of material and turbulent flow is developed. The new theoretical way of models creation of particles motion in the gas flow, taking into account turbulence, is offered. The ways of creation of new constructions of separators are set and recommendations for elaboration of constructions of existent separators are suggested.

Key words: sorting equipment, turbulent flow.

Постановка проблеми. Подрібнення – це ланка операцій, що має за мету приведення часток твердого матеріалу до потрібних розмірів. Матеріали, які надходять для помелу, характеризуються неоднорідністю фракційного складу і міцнісних властивостей. Крім того, вони анізотропні за розподіленням неоднорідностей. Своєчасне видалення готового продукту із зони подрібнення за рахунок повітряного сортування дозволяє значно підвищити ефективність помелу в агрегатах замкненого циклу та дозволяє забезпечити заданий ступінь подрібнення матеріалу.

Головним недоліком існуючих повітряних сепараторів поряд зі складністю конструкції, високою вартістю та експлуатаційними витратами є те, що їх робота характеризується низькою ефективністю сортування (67 – 80%) і великою засміченістю фракцій (60 – 70%).

Це пов'язано з тим, що теоретичні основи створення машин розроблені з позицій взаємодії однорідного потоку повітря та окремої частки без урахування пульсаційних складових швидкості повітря й масштабів вихрових структур у потоках транспортувального середовища.

Аналіз останніх досліджень і виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Турбулентна течія характеризується осередненою складовою і пульсаційною, яка не є повністю «випадковою» величиною, оскільки, незважаючи на

те, що народження вихору, обумовлене нестійкістю в деякій точці поля течії, «випадкове», його наступна еволюція описується рівнянням Нав'є – Стокса [1]. Передбачуваність турбулентних течій обмежується відносно короткими проміжками часу і не залежить від того, наскільки точно відомі вихідні умови.

Формулювання цілей статті. Проблема розповсюдження двофазного турбулентного потоку та його взаємодія з елементами машин являє собою значний практичний інтерес. Слід зазначити, що розроблення теорії турбулентного руху навіть однофазного середовища далеке від свого завершення. Складність руху часток у турбулентному потоці обумовлена тим, що вони реагують на безладні турбулентні пульсації середовища. Поряд із поступовим рухом разом із потоком спостерігається турбулентна дифузія часток. Тому при створенні машин необхідно врахувати структури турбулентних потоків. Дослідження вихрових структур та динаміки їх розвитку з позицій теорії Прандтля потребують емпіричного визначення низки параметрів, що не завжди є можливим.

Виклад основного матеріалу. Перетворення Фур'є є математичною операцією, яка переводить розгляд задачі, що досліджується, з одного простору в інший. Аналіз динаміки турбулентності у Фур'є-просторі (в просторі хвильових чисел або частот) дозволяє інтерпретувати вихори з позицій хвильової механіки. Коефіцієнт Фур'є характеризує середню амплітуду складових швидкості при заданому значенні хвильового числа або частоти по всьому перерізу потоку.

Оцінювання розмірів, швидкості руху й енергії вихорів дозволяє оптимально вибрати конструктивні параметри машин класифікації подрібненого матеріалу в агрегатах помелу. Коефіцієнт Фур'є при заданому хвильовому числі λ відображає вплив усіх вихорів при значенні λ або близьких значеннях, якими б не були вихори в об'ємі, зайнятому турбулентним потоком. Процес розпаду вихорів пов'язаний із каскадним перенесенням енергії в просторі хвильових чисел, однак коефіцієнти Фур'є, що використовуються при описанні каскадного процесу, не містять інформації про те, де відбуваються окремі події, які породжують каскадний процес. Коефіцієнти Фур'є асоціюються з ансамблем вихорів, і при аналізі динаміки турбулентності в просторі хвильових чисел слід розглядати множину вихорів, а саме множину вихорів при деякому хвильовому числі або в його околі.

Якщо турбулентність складається з вихорів, то вони локалізовані як у координатному просторі, так і в просторі хвильових чисел. Це означає, що вихор не є хвилею, а подібний до хвильового пакета.

Із властивостей перетворень Фур'є та теорії розмірності виходить, що

$$\Delta x \cdot \Delta k \sim 2\pi, \quad (1)$$

де Δx – просторовий інтервал оцінки вихору;

Δk – інтервал у просторі хвильових чисел.

Згідно із цією оцінкою, великий вихор займає малий об'єм у просторі хвильових чисел, а малий вихор містить вкладення від багатьох коефіцієнтів Фур'є. Близькі коефіцієнти Фур'є можуть відповідати одному й тому ж вихору, і їх взаємодії між собою, очевидно, повністю відрізняються від взаємодії з коефіцієнтами Фур'є, що відстоять на декілька інтервалів Δk .

Якщо розглядається вихрове кільце (наприклад, типу деформованого тора), то очевидно, що розмір такого вихору приблизно визначається домінуючою довжиною хвилі його руху. Тому найменшим розміром, який спостерігається Δx , є

$$\Delta x \approx \lambda. \quad (2)$$

Оскільки довжину хвилі λ необхідно визначати за коротким хвильовим пакетом (який містить лише один період), то відповідне розмиття в просторі хвильових чисел виявляється значним. Хвильове число k пов'язане з λ рівнянням $k = 2\pi/\lambda$. Це означає, що співвідношення (2) можна записати у вигляді

$$\Delta x \cdot k \sim 2\pi. \quad (3)$$

За допомогою співвідношення (1) отримуємо

$$\Delta k/k \sim 1. \quad (4)$$

Згідно з формулою (4) вихору (або групі вихорів) у просторі хвильових чисел відповідає інтервал шириною в октаву. Еволюція вихорів та їх взаємодія супроводжується нелінійним перемішуванням як у координатному просторі, так і в просторі хвильових чисел.

Каскадний процес перенесення енергії за спектром, очевидно, супроводжується збільшенням «черговості» зі зростанням хвильового числа: чим менші розміри вихорів, тим меншу частину повного об'єму вони займають. За аналогію з формулою (1) зв'язок між часом та частотою описується співвідношенням

$$\Delta t \cdot \Delta \omega \sim 2\pi. \quad (5)$$

Однак співвідношення (5) не пояснює, яким чином визначається частота ω . Методи хвильової механіки в цьому випадку виявляються некорисними, оскільки швидкість розповсюдження в цьому виразі відсутня і, як наслідок, відсутнє дисперсійне співвідношення, котре пов'язує хвильове число із частотою. Однак відомо, що істотним для турбулентності є процес розтягування вихрових трубок, і тому в якості частоти у співвідношенні (5) можна розглядати завихреність ω .

Зв'язок між швидкістю та завихреністю визначається за допомогою інтеграла Біо-Савара

$$V = c_0 \int \frac{(\omega \times r)}{r^3} dr.$$

Великомасштабний вихровий елемент утворює окружність радіуса r_0 . Індукована ним швидкість примушує рухатися сам вихор. Швидкість поступового руху вихору була визначена Прандтлем

$$V = \frac{a^2 \Omega}{2r_0} \ln\left(\frac{6r_0}{a}\right),$$

де r_0 – радіус вихрового елемента;

a – його тороїдальний радіус, для суцільного вихору він складає $0,5r_0$;

Ω – завихреність (змінюється від 2 до 7,12, у нашому випадку $\Omega = 2$ [3]).

Крім геометричних параметрів вихору та його переносної швидкості, на взаємодію частки й вихору значно впливає енергія вихорів, яка змінюється із часом.

Згідно зі співвідношенням (5) завихреність для даного вихору зворотно пропорційна його «часу існування». Часовим еквівалентом співвідношення (2) є

$$\Delta t \sim T, \quad (6)$$

де T – період вихору, який визначається рівнянням $T = 2\pi / \omega$.

Співвідношення (6) описує динаміку вихорів у турбулентному середовищі. Відповідно до нього час існування вихору порівняний за величиною з періодом його обертання, тобто можна вважати, що Δt є постійною часу, яка характеризує еволюцію

вихору. Згідно з формулою (6), будь-який вихор повністю зникає через декілька обертань.

З оцінювання (6) розраховують часовий еквівалент співвідношення (3) у вигляді

$$\Delta t \cdot \omega \sim 2\pi \quad (7)$$

та еквівалент оцінки (4) для простору «частот»

$$\Delta\omega / \omega \sim 1. \quad (8)$$

Простір частот є тримірним, оскільки завихреність являє собою вектор. Співвідношення (7) показує, що високочастотні вихори руйнуються і що для еволюції низькочастотних вихорів необхідні значні проміжки часу.

Турбулентний рух суцільного середовища являє собою набір багатьох хвильових пакетів, які й слід розглядати як «одиниці», з яких складено систему з великою кількістю ступенів свободи, що нами розглядається. При $\gamma / \omega \ll 1$ ці пакети існують досить тривалі проміжки часу і є протяжними, тому можна говорити про хвилі, що зовсім не локалізовані у просторі. Але якщо γ/ω збільшується, то ми повинні реально враховувати, що одиницями турбулентного руху є не Фур'є-компоненти величини, яку ми розглядаємо (наприклад, швидкості), а окремі хвильові пакети. Іншими словами, при кінцевому γ/ω близькі Фур'є-компоненти вже не можна вважати слабкорельєваними.

Оскільки вихори не розповсюджуються, як хвилі, необхідно мати співвідношення, яке виступало б у ролі дисперсійного співвідношення, але мало б іншу інтерпретацію. Вектор завихреності визначається як ротор вектора швидкості

$$\omega_i = \varepsilon_{ijk} du_k/dx_j, \quad (9)$$

де ε_{ijk} – антисиметричний одиничний тензор третього рангу, компоненти якого змінюють знак при перестановці будь-яких двох індексів, причому $\varepsilon_{123} = 1$.

Частоту ω вихору, який має швидкість \hat{u} та хвильове число k , можна оцінити, використовуючи співвідношення

$$\omega \sim \hat{u} k. \quad (10)$$

Згідно із цією оцінкою, розмір Δx вихору або хвильового пакета пов'язаний із постійною часу Δt :

$$\Delta x / \Delta t \sim \hat{u}. \quad (11)$$

Головним рішенням для ефективної класифікації в сепараторі є забезпечення для заданого діаметра врівноважених часток необхідних параметрів однорідності турбулентного потоку та граничних розмірів вихорів за рахунок установаження решіток для руйнування великомасштабних турбулентних структур [1]. Наявність у потоці часток, які значно перевершують розмір урівноважених часток, призводить до створення турбулентного сліду за ними під час руху в потоці, що різко знижує ефективність роботи решіток. Для підвищення ефективності класифікації в зоні точного розділення на першому етапі пропонується встановити екран під визначеним кутом атаки на шляху двофазного турбулентного потоку [1]. Однак наявність у потоці часток, значно менших за розміром, ніж урівноважені частки, також знижує ефективність роботи зони точного розділення. Пилоподібні частки мають швидкість, вищу за швидкість урівноважених часток, тому відбувається їх налипання на більші, що погіршує роботу сепаратора.

Обладнання для тонкого розділення характеризується двома особливостями. Особливість конструкторська полягає в забезпеченні такого балансу масових та аеродинамічних сил, при якому характерні для розділення розміри часток знаходились би в мікрометровій зоні.

Друга особливість пов'язана з тим, що зі зміною характерного розміру матеріалу поведінка його часток виявляє якісно нові сторони. Процес подрібнення поділяється на два етапи. Перший – руйнування часток зовнішньою силою, що прикладається зазвичай до їх сукупності. Другий – агрегація часток як самочинна, так і викликана зовнішніми стискальними зусиллями. Вивчення диспергування пов'язане, як наслідок, із проблемою міцності твердого тіла й проблемою агрегативної сталості, яка розглядається фізико-хімією дисперсних систем та поверхневих явищ. Обидва процеси – руйнування й агрегація – істотним чином залежать від природи зовнішнього середовища та умов його взаємодії із частками. Для дисперсних систем унаслідок існування відносно дуже розвиненої поверхні розділення фаз вплив середовища особливо значний.

Наявність надзвичайно розвиненої питомої поверхні тонко здрібнених матеріалів призводить до прояву різноманітних форм її активності, у тому числі до утворення агломератів часток, які поводять себе у повітряному потоці, як одна велика частка, і відповідно потрапляють у не «свій» продукт розділення.

Гравітаційні апарати зовсім непридатні для розділення, оскільки перехід на тонкі межі пов'язаний зі зниженням швидкості висхідного потоку до значень, які не тільки роблять неприйнятними габарити класифікаторів, але й у принципі не можуть забезпечити поперечної однорідності процесу (при малих швидкостях, точніше, при малих значеннях числа Рейнольдса пересипні полиці перестають відігравати свою позитивну роль).

Запропонований новий принцип розділення матеріалів на вході у другий ступінь за крупністю у середині розподільної тарілки. Елемент тарілки являє собою зигзагоподібний канал. По каналу в одному напрямку рухається повітря, а в іншому під дією відцентрових сил – матеріал.

Швидкість повітря відповідає межі розділення. У кожній секції каналу виникає турбулентний вихровий потік із дрібномасштабними вихровими структурами. Матеріал, переходячи з однієї секції каналу в іншу, перетинає потік повітря і дрібна фракція рухається по каналу до центра тарілки, а велика фракція сягає протилежної стінки й після співударяння з нею знову перетинає потік повітря. При кожному перетинанні відбувається класифікація й дезагломерація часток. У цьому русі часток із руйнуванням агломератів і міститься новий принцип класифікації.

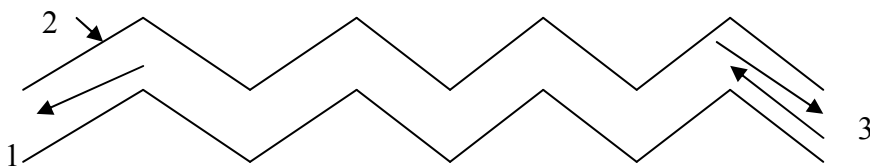


Рисунок 1 – Схема зигзагоподібного каналу тарілки:

1 – вихід дрібного продукту й повітря; 2 – завантаження вихідного матеріалу; 3 – вихід великої фракції та вхід повітря

У зигзагоподібному каналі спостерігається поперечно-поточна класифікація. Однак різноманітні за крупністю продукти із зони розділення видаляються не через два кармани, як у традиційних поперечно-поточних класифікаторах, а шляхом дії зовсім іншого механізму.

Висновки

1. Розроблено новий теоретичний підхід до створення моделей руху частки, які побудовано з урахуванням турбулентності в стаціонарному потоці газу.

2. На базі моделі оцінки взаємодії часток матеріалу і турбулентного потоку повітря надано рекомендації для вдосконалення конструкцій існуючих сепараторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. 1. Пат. № 18198, Україна МПК В02С 23/10 (2006.01). Двостадійний класифікатор сипучих матеріалів / Р.І. Рибалко, А.М. Баранов. – № и2006 09779; заявлено 12.09.06 р.; опубл. 16.10.06 р., 2006 р., Бюл. № 10.

2. 2. Назаренко І.І. Машини для виробництва будівельних матеріалів: підручник / І.І. Назаренко. – К.: КНУБА, 1999. – 488 с.

3. 3. Заленский В.С. Строительные машины и оборудование: учебник / В.С. Заленский, А.И. Иванов. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.

Надійшла до редакції 25.02.2010 р.

© А.М. Баранов, Р.І. Рибалко