

УДК 622.331:622.767

О.С. СТАДНИК,

В.О. ГНЕСУШЕВ, канд. техн. наук

(Україна, Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПОЛЯ ШВИДКОСТІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПНЕВМАТИЧНОЇ СЕПАРАЦІЇ ТОРФУ В КРИВОЛІНІЙНОМУ ЗИГЗАГОПОДІБНОМУ ПОТОЦІ

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Застосування високозольного торфу для виробництва паливних брикетів дозволяє додатково залучити близько 0,3 млрд. тон сировини. Однак використання цієї сировини вимагає кондиціювання за зольністю. До 50% золи торфу зосереджено у класі крупності 0,1-1 мм. Зниження зольності торфу досягається за рахунок вилучення цього класу пневматичною сепарацією. Висока ефективність пневматичної сепарації високозольного торфу отримана на сепараторах типу "Зиг-заг". Проте ефективність пневматичної сепарації торфу суттєво залежить від нерівномірності поля швидкостей та вологості сировини. З метою підвищення ефективності пневматичних сепараторів типу "Зиг-заг" було запропоновано встановити жалюзійні екрани, виконані у вигляді набору плоских пластин (рис. 1).

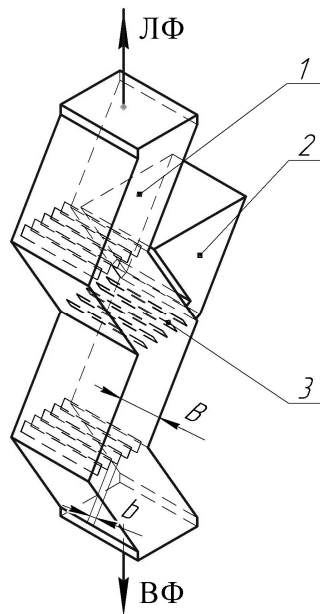


Рис. 1. Пневматичний сепаратор типу "Зиг-заг" з жалюзійними екранами:

- 1 – робочий канал; 2 – живильник;
- 3 – жалюзійний екран; B – ширина робочого каналу;
- b – крок встановлення пластин жалюзійного екрану;
- ЛФ, ВФ – легка та важка фракції

Жалюзійні екрани збільшують рівномірність поля швидкості у робочому об'ємі сепаратора і покращують дезінтеграцію частинок вологого торфу, що злипаються.

Аналіз досліджень та публікацій. Відомий метод збільшення рівномірності поля швидкості пневматичних сепараторів шляхом встановлення перфорованих перегородок [1, 2]. У вказаних роботах відмічена важлива роль рівномірності поля швидкості у робочому об'ємі сепаратора і встановлено зв'язок між параметрами сепараційних характеристик та конструктивними характеристиками перфорованих перегородок, проте критерії цієї рівномірності не наведені. Крім того, такий метод не може ефективно використовуватись при пневматичній сепарації високозольного торфу, оскільки його частинки легко руйнуються, що веде до забивання отворів перфорованих перегородок і ускладнення процесу сепарації.

Постановка задачі. Основною задачею цієї роботи є встановлення залежності параметрів сепараційних характеристик пневматичних сепараторів типу "Зиг-заг" з жалюзійними екранами від нерівномірності поля швидкості у робочому об'ємі сепаратора шляхом числового моделювання.

Викладення матеріалу та результати.

Методика. Методика розрахунку процесу пневматичної сепарації у криволінійному зигзагоподібному потоці складається з наступних етапів:

1. Розрахунок поля швидкостей криволінійного турбулентного потоку;
2. Розрахунок траєкторій руху частинок.

Розрахунок поля швидкостей криволінійного турбулентного потоку включала чисельне розв'язання рівняння Рейнольдса для нестисливої рідини з врахуванням гіпотези Бусінеска і k - ε моделі турбулентності [3].

Рівняння Рейнольдса для нестисливої рідини з врахуванням гіпотези Бусінеска:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

де u_i, u_j – усереднені компоненти вектора швидкості, м/с; t – час, с; p – усереднений тиск, Па; ρ – густина повітря, кг/м³; k – кінетична енергія турбулентності, м²/с²; v – кінематична в'язкість, м²/с; v_t – турбулентна кінематична в'язкість, м²/с; f – вектор зовнішніх сил (враховує силу тяжіння, відцентрову силу та силу Коріоліса), м/с²; $i=1..3, j=1..3$.

Кінематична турбулентна в'язкість визначалася за формулою:

$$v_t = C_v \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3)$$

де k – кінетична енергія турбулентності, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ε – дисипація турбулентної енергії, $\text{м}^2/\text{с}^3$; $C_v=0,09$.

Значення k та ε визначалися з відомих k - ε моделей турбулентності

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + v_t G + \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} v_t G + C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

де G – турбулентна енергія; $\sigma_k=1$, $\sigma_\varepsilon=1,3$, $C_1=1,44$, $C_2=1,92$ – параметри моделі.

Турбулентна енергія визначалася за формулою:

$$G = \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{k}{v_t} \right) \delta_{ij} \right] \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (6)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера.

Траєкторії руху частинок визначалися за допомогою числового розв'язання рівняння динаміки руху частинки [3]:

$$\frac{\partial u_q}{\partial t} = \frac{\pi d^2}{8m} C_d \rho |u - u_q| (u - u_q) + g, \quad (7)$$

де u – вектор швидкості потоку з врахуванням пульсацій, $\text{м}/\text{с}$, u_q – вектор швидкості руху частинки, $\text{м}/\text{с}$; m – маса частинки, кг ; C_d – коефіцієнт опору, який визначався за моделлю Стейна:

$$C_d = \frac{24}{Re} + 5,48 Re^{-0,573} + 0,36, \quad (8)$$

де Re – число Рейнольда.

При ударах частинок об стінки та перегородки враховувалися коефіцієнт відновлення 0,4 та коефіцієнт тертя ковзання залежно від розмірів частинок, експериментально досліджений у роботі:

$$f = \frac{1}{32} \cdot \frac{d_0}{d} + 0,5, \quad (9)$$

де d – діаметр частинки, мм; d_0 – відносний діаметр частинки, рівний 1 мм.

Моделювання процесу пневматичної сепарації торфу у криволінійному потоці виконувалося із застосуванням програмного забезпечення КОМПАС 3D-V13 (3D моделювання твердих тіл) та FlowVision 2.5.4 (моделювання руху рідини та газу) [3, 4]. Розрахунок виконувався для площини симетрії пневматичного сепаратора.

В якості показника, що характеризує нерівномірність поля швидкості, обрано коефіцієнт варіації швидкості у робочому об'ємі пневматичного сепаратора V . Для розрахунку коефіцієнта варіації швидкості використовувалися місцеві значення вертикальної складової швидкості у площині симетрії пневматичного сепаратора з кроком 3 мм у всіх напрямках. Значення коефіцієнта варіації, отримане для площини, приймалося рівним коефіцієнту варіації швидкості у робочому об'ємі сепаратора.

Серед конструктивних та режимних параметрів, що визначають нерівномірність поля швидкості, досліджувались ширина пневматичного сепаратора B , крок встановлення пластин жалюзійного екрану b , вертикальна складова середньої швидкості потоку повітря v_z . Ширина пластин жалюзійного екрану приймалася 30 мм, а їх товщина – 5 мм. Для пошуку залежності $V=f(B, b, v_z)$ виконано повнофакторний числовий експеримент з використанням програмного забезпечення FlowVision 2.5.4. У процесі розрахунку розглядалися й інші фактори, зокрема – масова концентрація частинок продукту та густина частинок. Вплив цих факторів у межах оптимальних масових концентрацій (1-3 кг/кг) і можливих значень густини 900-2600 кг/м³ на величину коефіцієнта варіації швидкості виявився не суттєвим. Через це розрахунок коефіцієнта варіації швидкості потоку виконувався при масовій концентрації продукту 2 кг/кг та густині частинок 1600 кг/м³.

Ширина пневматичного сепаратора змінювалася дискретно, від 60 до 300 мм, з кроком 120 мм, відстань між пластинами жалюзійного екрану – від 20 мм до 60 мм, з кроком 10 мм, а нормальна швидкість на виході з сепаратора – від 3 до 7 м/с, з кроком 2 м/с.

Результати. Розрахунки пневматичних сепараторів типу "Зиг-заг" з кроком встановлення перегородок жалюзійного екрану 20, 30 та 60 мм зображено на рис. 2, де вказано графік розподілу швидкості у вигляді заливки відтінками сірого кольору. Точками позначено положення частинок продукту, лініями – траєкторії руху елементарних частинок повітря.

За результатами числового експерименту отримана емпірична залежність для розрахунку коефіцієнта варіації швидкості V :

$$V = \frac{18,2b^{1,16}}{(v_c B)^{0,16}}, \text{ ч.од.}, \quad (10)$$

де B – ширина каналу пневматичного сепаратора, м; b – крок пластин жалюзійного екрану, м.

Спеціальні та комбіновані методи

Кореляційне відношення для отриманої залежності становить 0,967, максимальна відносна похибка 18,2 %.

З розрахунків слідує, що нерівномірність поля швидкості найбільш суттєво залежить від кроку встановлення пластин жалюзійного екрану. При великих відстанях між пластинами у потоці спостерігаються завихрення, що негативно впливають на ефективність сепарації.

Для отримання зв'язку між параметрами сепараційної характеристики та коефіцієнтом варіації швидкості у робочому об'ємі сепаратора була розроблена критеріальна залежність виду:

$$E_{pm1}/d_p = f(V), \quad (11)$$

де E_{pm1} – середнє імовірнісне відхилення від крупності розділення, що відповідає одній секції сепаратора типу "Зиг-заг".

Сепараційні характеристики визначалися з числового моделювання траєкторій руху частинок з різною густиною та крупністю у програмному забезпеченні FlowVision 2.5.4. Паралельно визначався коефіцієнт варіації швидкості у робочому об'ємі пневматичного сепаратора. В результаті числового експерименту були розраховані кількості частинок з певними параметрами, які потрапили до легкої та важкої фракцій.

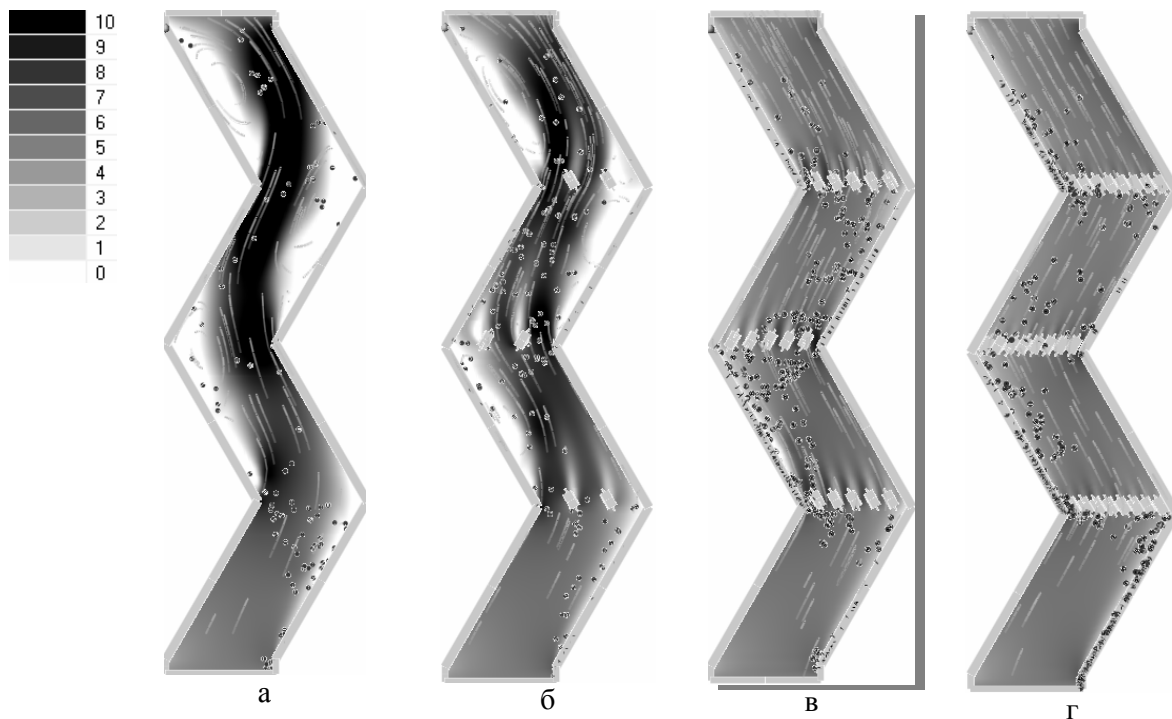


Рис. 2. Графік розподілу швидкості (м/с) у центральній вертикальній площині сепаратора типу "Зиг-заг" з входним перерізом 210×300 мм, швидкість повітря на вході 5 м/с, сепаратор працює під розрідженням: а – без жалюзійних екранів; б – крок перегородок жалюзійного екрану 60 мм; в – 30 мм; г – 20 мм

При виконання числового експерименту для отримання залежності (10) змінювалася густина частинок від 1000 до 2600 кг/м³, з кроком 400 кг/м³. Графік отриманої залежності зображено на рис. 3.

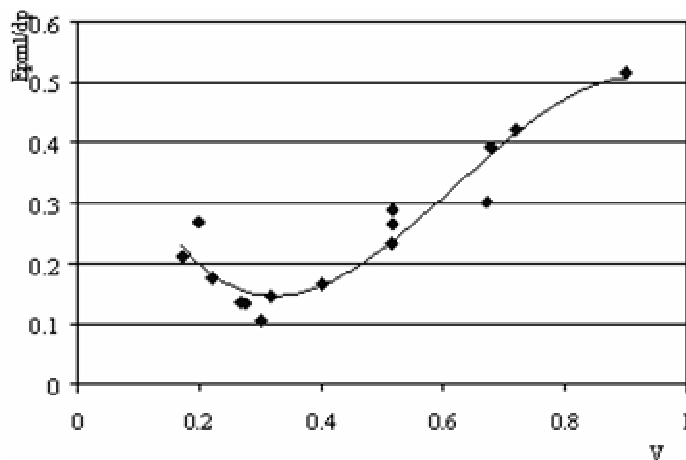


Рис. 3. Графік залежності $E_{pm1}/d_p = f(V)$

Для залежності відношення E_{pm1}/d_p від коефіцієнта варіації швидкості у робочому об'ємі сепаратора отримане рівняння регресії:

$$\frac{E_{pm1}}{d_p} = -3,38V^3 + 6,34V^2 - 3,06V + 0,60. \quad (12)$$

Коефіцієнт детермінації для отриманої залежності становить 0,908, середньоквадратичне відхилення не перевищує 19%.

Отримана залежність у досліджуваному діапазоні значень має екстремальне значення. Мінімальне значення відношення E_{pm1}/d_p , а також значення E_{pm} досягається при величині коефіцієнта варіації швидкості у потоці пневматичного сепаратора типу "Зиг-заг" 0,30-0,4, що відповідає кроку пластин жалюзійного екрану 30-50 мм. Ці значення відповідають режиму пневматичної сепарації з максимальною ефективністю. За візуальними спостереженнями числових експериментів, при зменшенні коефіцієнта варіації швидкості (збільшенні рівномірності поля швидкостей) до 0,3 і менше ускладнюється проходження частинок через жалюзійний екран, що знижує ефективність пневматичної сепарації.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Використання коефіцієнта варіації швидкості як критерію рівномірності поля швидкостей повітряного потоку в пневматичному сепараторі типу "Зиг-заг" і отримана емпірична залежність для розрахунку цього критерію для різних конструктивних та режимних параметрів сепаратора дозволяють покращити ефективність пневматичної сепарації подрібненого торфу. Отримана за допомогою числового моделювання процесу пневматичної сепарації поліноміальна залежність між параметрами сепаратора та ефективності сепарації.

Збагачення корисних копалин, 2016. – Вип. 63(104)

Спеціальні та комбіновані методи

параційних характеристик (відношенням E_{pm1}/d_p) та коефіцієнтом варіації швидкості у робочому об'ємі пневматичного сепаратора дає можливість визначати раціональні параметри сепараційних характеристик сепараторів типу "Зиг-заг" з урахуванням конструктивних та режимних параметрів.

Список літератури

1. Кирсанов В.А. Основные принципы конструирования контактных элементов каскадных пневмокласификаторов // Сб. докладов Междунар. науч.-практической конф. "Пищевые продукты XXI века". – М, 2001. – С. 13.

2. Кирсанов В.А., Титаренко В.В. Разработка и исследование перспективных конструкций каскадных воздушных классификаторов // Сб. докладов Междунар. науч.-практической конф. "Пищевые продукты XXI века". – М, 2001. – С. 20-21.

3. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision 2.5.4: Руководство пользователя / ООО "ТЕСИС". – М: ТЕСИС, 2008. – 284 с.

4. Компас-3D V13: Руководство пользователя / ЗАО АСКОН, 2011. – 2223 с. [Електронний ресурс] – режим доступу: http://sd7.ascon.ru/Public/Documents/Kompas/KOMPAS_V13/KOMPAS-3D_Guide.pdf

© Стадник О.С., Гнеушев В.О., 2016

*Надійшла до редколегії 21.08.2016 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.С. Білецьким*