

Автомобільно-дорожній інститут Донецького національного
технічного університету

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКРУЧЕНОГО ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ ПРИ
ТРАНСПОРТУВАННІ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ

Розроблена математична модель течії закрученого двофазного потоку газ-тверді частинки в циліндричній трубі. Модель може бути пристосована для розрахунку параметрів пневматичного транспортування сипучих матеріалів.

В останній час у дослідників в галузі пневмотранспорту особливий інтерес викликає застосування закрутки для транспортування сипучих матеріалів. Завдяки закрутці тут виникає аеродинамічний ефект, який створює збільшений тиск повітря поблизу стін трубопроводу. Завдяки цьому знижується зношування транспортного трубопроводу. В запропонованій роботі було поставлено завдання теоретично визначити кількісні та якісні показники вищевказаного аеродинамічного ефекту, а також встановити, яким чином закрутка діє на параметри транспортування. Для цього була розроблена математична модель руху закрученого двофазного потоку на виході із живильника в транспортний трубопровід. В якості живильника, який забезпечував би обертально-поступальний рух транспортованої аеросуміші, можна використовувати різні закручувальні пристрої. Найбільш простим та надійним є вихровий ежектор, зображений на рисунку 1. Він представляє собою тангенціальний завихрувач, в якому закрутка повітря здійснюється завдяки тангенціальному соплу, а подача сипучого матеріалу із бункера – крізь осьовий підвід.

Для вирішення поставленого завдання була запропонована аналітично-експериментальна модель течії закрученого потоку в круглій трубі, заснована на апроксимації профілів обертаючої та осьової компонент швидкості. Для полегшення моделювання увесь потік поділяється на три зони:

1. Зона пристінної течії ($R - \delta < r \leq R$);
2. Зона основної течії ($r_{om} < r \leq R - \delta$), в якій осьова компонента швидкості має максимальне значення;
3. Зона оберненої приосьової течії ($r \leq r_{om}$).

Де: R – внутрішній радіус труби, r_{om} – радіус, на якому осьова швидкість дорівнює нулю, r – текучий радіус, δ – товщина приграничного шару [1]

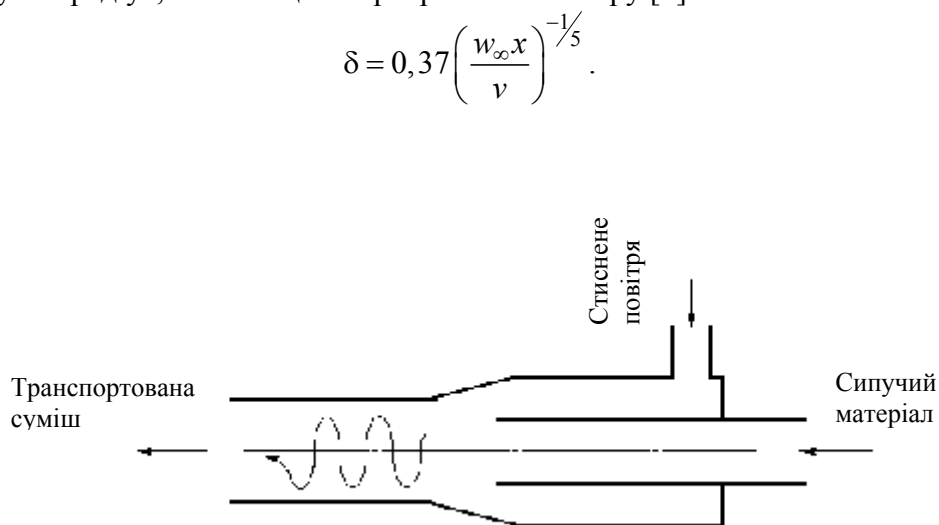


Рисунок 1 – Схема вихрового ежектора

З аналізу робіт різних дослідників ([2], [3]), кінематична подоба закрученого потоку в трубі залежить від безрозмірного параметру Φ_* , який характеризує відношення моменту кількості руху M до осьової кількості руху K_1 у будь-якому перерізі в масштабі лінійного розміру трубопроводу L :

$$\Phi_* = M / K_1 L.$$

Початкове значення параметра Φ_* знаходимо як відношення моменту кількості руху повітря, яке надходить в тангенціальне сопло, до кількості руху сипучого матеріалу в осьовому підводі, розрахованої в тім же перерізі. Для кожного перерізу трубопроводу можна знайти радіус зони обернених течій за розрахованим Φ_*

$$\frac{r_{om}}{R} = 0,3(\Phi_* - 0,24)^{0,72}.$$

Зона основної течії, ($r_{om} < r \leq R - \delta$):

Профіль обертаючої швидкості знаходимо за формулою Шліхтінга

$$\frac{u}{u_*} = \left(\frac{2\eta}{1 + \eta^2} \right)^k,$$

де параметр $\eta = \frac{r}{r_{\varphi m}}$,

$r_{\varphi m}$ – радіус максимальної обертаючої швидкості, знаходимо з відношення

$$\frac{r_{\varphi m}}{R} = 0,51\Phi_*^{0,41};$$

максимальне значення обертаючої швидкості $\frac{u_*}{W_{cp}} = 2,04\Phi_*^{1,09}$.

2. Профіль осьової швидкості знаходимо за формулою

$$w = \frac{u}{\Phi_*} \frac{r}{R}.$$

Зона пристінної течії, ($R - \delta < r \leq R$):

1. Профіль осьової швидкості знаходимо за формулою

$$\frac{w}{w_*} = \left(\frac{R-r}{r} \right)^n,$$

де показник ступеня знаходимо з виразу $\frac{n}{n_0} = [1 + 0,78(\Phi_* - 0,07)]^{0,7}$.

2. Профіль обертаючої швидкості знаходимо з відношення

$$u = w \frac{\Phi_*}{r} R.$$

Зона оберненої течії, ($r \leq r_{om}$):

1. Профіль осьової швидкості

$$\frac{w}{w_0} = 1 - \frac{r^2}{r_{om}^2}.$$

2. Профіль обертаючої швидкості знаходимо аналогічно попередньому пункту.
Профіль радіальної швидкості у всіх трьох зонах знаходимо з рівняння нерозриву

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0.$$

Додамо диференціальні рівняння руху для твердої частинки в закрученому потоці повітря

$$\frac{dV}{dt} - \frac{U^2}{r} = F(v-V) - \frac{1}{\rho_q} \frac{\partial p}{\partial r} - g \cos \varphi;$$

$$\frac{dU}{dt} + \frac{UV}{r} = F(u-U) + g \sin \varphi;$$

$$\frac{dW}{dt} = F(w-W) - \frac{1}{\rho_q} \frac{\partial p}{\partial x},$$

де U , V , W – обертаюча, радіальна та осьова компоненти швидкості частинки;
 F – реактивна сила, діюча з боку потоку повітря на частинку;
 ρ_q – щільність частинки.

$$F = \frac{3}{4} k_\phi C \frac{\rho}{\rho_q} \frac{1}{a} |\vec{u} - \vec{U}|,$$

де коефіцієнт аеродинамічного опору дорівнює

$$C = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4,4}{\sqrt{\text{Re}}} + 0,32$$

a – діаметр частинки;

Re – ефективне число Рейнольдса.

Коефіцієнт, що враховує відхилення форми частинки від сферичної

$$k_\phi = \left(0,843 \lg \frac{1}{0,065 f} \right)^{-1}, \text{ при } \text{Re} < 0,05;$$

$$k_\phi = 12,4 - 11,4 f^{-1}, \text{ при } 2 \cdot 10^3 < \text{Re} < 2 \cdot 10^5.$$

Перепад тиску по радіусу та по переміщенню знайдемо, з рівняння Нав'є – Стокса

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho \left(v \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{u^2}{r} \right);$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \left(v \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial x} \right).$$

Модель чисельно реалізувалась на ЕОМ методом Рунге – Кутта. Були одержані розрахункові залежності зміни швидкості та тиску двофазного закрученого потоку по довжині трубопроводу. Як ілюстрації нижче наведені розрахункові траєкторії руху твердих частин на розгінній ділянці трубопроводу в залежності від безрозмірного часу для різних діаметрів частин (рисунок 2). Тут цифра 1 відноситься до діаметру частин 40 мкм, 2–30 мкм.

Як можна побачити з наведеної діаграми більш великі, а отже більш масивні частинки, що мають відносно більшу інерцію, мають більш полого траєкторію, ніж більш маленькі частинки. Але маючи більшу інерційність, вони довше розганяються, і тому більш довгий час знаходяться під дією закрутки, яка прагне концентрувати частинки біля осі трубопроводу. Взагалі ж спостерігається тенденція зміщення твердої фази обертаючого потоку до його осі на початку трубопроводу під час його розгону. В подальшому, в міру затухання закрутки, частинки починають випадати на стінки (рисунок 3).

Таким чином підтверджуються припущення що до виникання «захисного шару» повітря поблизу стінки трубопроводу, який оберігає його від підвищеного зношування.

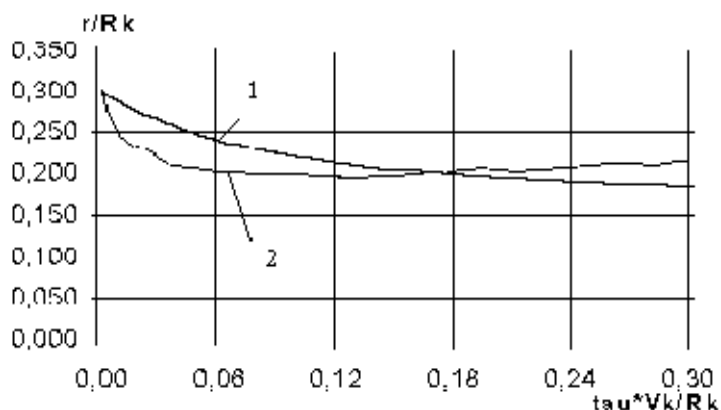


Рисунок 2 – Траєкторії частинок

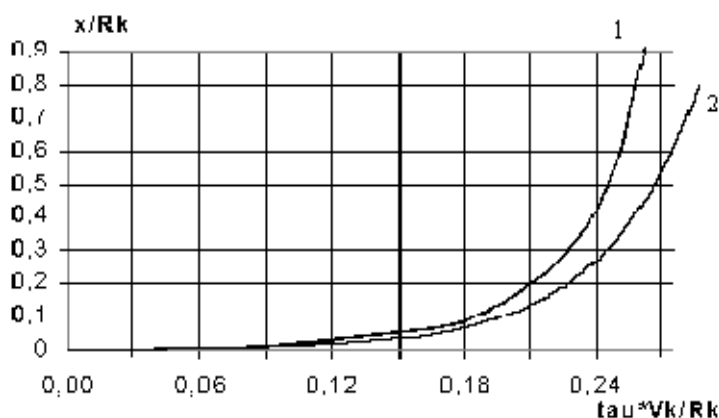


Рисунок 3 – Координата випадання частинок на стінку трубопроводу

Наведена математична модель описує рух твердих частинок в закрученому потоці повітря в циліндричній трубі та може бути пристосована для розрахунку параметрів пневматичного транспортування сипучих матеріалів закрученим потоком стиснутого повітря. При цьому найбільша об'ємна концентрація твердої фази не повинна перевищувати 2 %. Наприклад для золи, що знімається з електрофільтрів вугільних ТЕС, це складає 40 кг сипучого матеріалу на 1 кг повітря.

Література

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1984. – 712 с.
Shlikhting G. Teoriya pogranichnogo sloya (The Shear Layer Theory) / G. Shlikhting. – М.: Nauka, 1984. – 712 s.
2. Халатов А. А. Теория и практика закрученных потоков / А. А. Халатов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
Khalatov A. A. Teoriya i praktika zakruchennykh potokov (Vortex Flows Theory and Practice) / A. A. Khalatov – К.: Naukova dumka, 1989. – 192 s.
3. Щукин В. К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В. К. Щукин, А. А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
Shchukin V. K., Khalatov A. A. Teploobmen, massoobmen i gidrodinamika zakruchennykh potokov v osesimmetrichnykh kanalakh (Vortex Flows Heat Exchange, Mass Transfer and Hydrodynamics in Axially Symmetric Paths) / V. K. Shchukin, A. A. Khalatov. – М.: Mashinostroyeniye, 1982. – 200 s.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкостей и газов / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
Loityanskiy L. G. Mekhanika zhidkostey i gazov (Fluids and Gases Mechanics) / L. G. Loityanskiy. – М.: Nauka, 1987. – 840 s.