

М.В. ЯКИМЧУК,
К.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, кандидати технічн. наук
Н.В. ПУШКІНА
Національний університет харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИДІЛЕННЯ ПАПЕРОВОЇ ВИКОРИСТАНОЇ УПАКОВКИ ПОВІТРЯНИМ СПОСОБОМ

Наведено матеріали дослідження процесів переміщення паперової використаної упаковки повітряним способом. Побудовані аналітичні моделі на основі енергетичних співвідношень.

Ключові слова: аеросепарація, транспортування, аеродинамічний опір, рівняння руху.

Приведены материалы исследования процессов перемещения использованной упаковки из бумаги воздушным способом. Построены аналитические модели на основе энергетических соотношений.

Ключевые слова: аэросепарация, транспортирование, аэродинамическое сопротивление, уравнение движения.

Для виділення паперової використаної упаковки із твердих побутових відходів доцільно застосувати сухі методи сортування, за необхідності переводячи в паперову масу мокрим способом. Основний метод виділення паперу із загальної маси — аеросепарація. При первинній аеросепарації разом із макулатурою в легку фракцію переходить також полімерна плівка.

Поводження важких часток суміші при повітряній сепарації визначається в основному масовими силами — вагою та силою інерції, які є пропорційними масі частинки. На поведження легких компонентів вирішальний вплив робить піднімальна аеродинамічна сила — рівнодіюча всіх нормальних і тангенціальних сил,

розподілених по поверхні частинки, що перебуває в повітряному потоці [1, 2].

Аеросепарація може здійснюватися за різних режимів, обумовлених параметрами потоку. Основними з яких є швидкість повітряного потоку, масове або об'ємне співвідношення твердого й газоподібного компонентів у потоці і величина надлишкового тиску. Залежно від значення цих параметрів розрізняють два режими аеросепарації сипучих вантажів: пневмотранспорт із низькими концентраціями і пневмотранспорт із високими концентраціями.

Транспортування в розрідженій фазі здійснюється в результаті аеродинамічного впливу повітряного по-

току на тверді частинки. Цей режим транспортування характеризується високими швидкостями повітряного потоку, що значно перевищує швидкість витання твердих часточок, великими витратами повітря, а отже, низькими концентраціями твердого компонента. Витрати тиску в трубопроводах при цьому режимі порівняно невеликі, що дозволяє застосовувати в якості обладнання як вентилятори, так і повітродувні машини [3, 4].

У загальному випадку сила впливу повітряного потоку на поміщену в нього тверду частинку може бути виражена залежністю

$$P = f F_1 \rho (v - u)^2 + c_x F_M \rho \frac{(v - u)^2}{2}, \quad (1)$$

де f — коефіцієнт тертя повітряного потоку об частинку; F_1 — площа поверхні тертя; v і u — швидкості повітряного потоку й частинки; c_x — коефіцієнт опору переміщенню, при обтіканні частинки повітряним потоком (коефіцієнт аеродинамічного опору); F_M — миделева площа перетину частинки; ρ — щільність повітря.

Перший член рівняння (1) має переважне значення в порівнянні із другим при малих швидкостях повітряного потоку (при ламінарному режимі). Пневматичне транспортування здійснюється при розвиненому турбулентному режимі повітряного потоку, коли число Рейнольдса $Re = 10^4 \dots 10^6$. У цьому випадку переважне значення має другий член рівняння, і зневажаючи значенням першого, одержимо

$$P = c_x F_M \rho \frac{(v - u)^2}{2}. \quad (2)$$

Рівняння (2) виражає силу опору частинки при її русі в повітряному потоці і є рівнодіючою всіх складових нормальних і тангенціальних сил, що діють на поверхню частинки в напрямку відносного обтікання; цю силу називають силою аеродинамічного опору.

На частинку, що переміщається в трубопроводі, крім сили аеродинамічного опору, діють поперечні сили. Вони є результатом несиметричності епюри швидкостей повітряного потоку, що обтікає частинку. Внаслідок різних швидкостей обтікання частинки виникає різниця тисків на протилежних її сторонах, що обумовлює появу поперечної сили.

Несиметричність епюри швидкостей викликає обертання частинки. Останнє, у свою чергу, сприяє виникненню ефекту Магнуса, що полягає в тому, що при обертанні частинки, що рухається в повітряному потоці, на неї діє сила, спрямована перпендикулярно швидкості потоку. Це відбувається тому, що частинка захоплює за собою в обертний рух прилеглі шари повітря, які, впливаючи на основний потік, викликають різницю тисків на протилежних сторонах частинки й появу поперечних сил.

Слід зазначити, що поперечні сили, що діють на частинку, і причини, що їх викликають, не піддаються строго математичному опису й мають стохастичний характер. Результатом дії цих сил є тертя вантажу об стін-

ки трубопроводу, тому в теорії пневмотранспорту звичайно їх розглядають не як окремі складові опорів, а відносять до загального опору на тертя часточок вантажу об стінки трубопроводу.

Розглянемо рух частинки у висхідному потоці повітря. На неї будуть діяти сили тяжіння й опору (рис. 1). Рівняння руху частинки у висхідному повітряному потоці запишеться у вигляді

$$m \frac{du}{dt} = c_x F_M \rho \frac{(v - u)^2}{2} - mg. \quad (3)$$

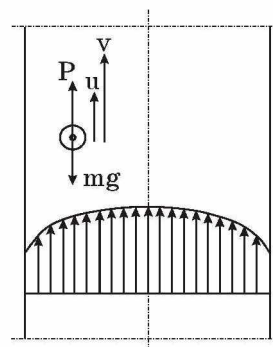


Рис. 1. Сили, що діють на частинку у вертикальному потоці

Якщо сила опору буде більше ваги, тобто $P > mg$, то частинка буде підніматися вгору і $du/dt > 0$; при $P < mg$ частинка опускається вниз і $du/dt < 0$. Якщо ж сила опору повітряного потоку зрівноважує вагу частинки, то її швидкість або дорівнює нулю, або частинка рухається з постійною швидкістю, тобто $du/dt = 0$. Тоді рівняння (3) прийме вид

$$c_x F_M \rho \frac{v_{\text{виг}}^2}{2} - mg = 0. \quad (4)$$

Відносну швидкість повітря, при якій частинка перебуває в стані витання біля деякого положення або рівномірно рухається у висхідному вертикальному потоці, називають швидкістю витання.

З рівняння (4) одержуємо

$$v_{\text{виг}} = \sqrt{\frac{2mg}{c_x F_M \rho}}. \quad (5)$$

Швидкість витання — найважливіша аеродинамічна характеристика сипкого матеріалу. Знаючи її, можна вибрати оптимальну швидкість повітря при транспортуванні.

Внаслідок дії поперечних сил зважена у висхідному потоці частинка не може займати в ньому постійного та певного положення стосовно напрямку швидкості потоку. Орієнтація її в потоці буде постійно змінюватися. Із цієї причини змінюється миделева площа перерізу, коефіцієнт аеродинамічного опору, а отже, і величина швидкості витання. Тому теоретично визначити величину швидкості витання можна тільки для частинок, що мають форму кулі, для яких величини c_x і F_M постійні.

Для частинки сферичної форми $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c$, та $F_M = \frac{\pi d^2}{4}$, а швидкість витання

$$v_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4gd\rho_{\text{ч}}}{3c_x\rho}}, \quad (6)$$

де $\rho_{\text{ч}}$ — густина речовини частинки.

Цю формулу можна використовувати і для визначення величини швидкості витання часток неправильної форми. Тоді в ній міститься еквівалентний діаметр d_e , для знаходження якого масу даної частинки прирівнюють масі еквівалентної кулі, тобто $m = \frac{\pi d_e^3}{6} \rho_{\text{ч}}$. Тоді

$$d = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho_{\text{ч}}}} = 1,24\sqrt[3]{\frac{m}{\rho_{\text{ч}}}} = 1,24\sqrt[3]{V_{\text{ч}}}, \quad (7)$$

де $V_{\text{ч}}$ — об'єм частинки.

Величина швидкості витання, що визначається за рівнянням (6) для частинки сферичної форми досить добре збігається з експериментальними величинами. Для часточок неправильної форми значення швидкості витання розраховані за еквівалентним діаметром рідко збігаються з експериментальними значеннями. Різниця тим більше, ніж значніше відхилення форми частинки від сферичної. Тому величину швидкості витання, як правило, визначають експериментально.

Визначивши з рівняння (4) значення коефіцієнта c_x і підставивши його у вираз (3), перепишемо рівняння руху частинки у вигляді

$$\frac{du}{dt} = \frac{g}{v_{\text{вит}}^2} [(v-u)^2 - v_{\text{вит}}^2]. \quad (8)$$

Вирішуючи це рівняння щодо швидкості частинки при початкових умовах $u_{\text{п}} = u$ і $t_{\text{п}} = 0$, одержимо

$$u = v - v_{\text{вит}} \frac{K_0 \exp \frac{2gt}{v_{\text{вит}}} - 1}{K_0 \exp \frac{2gt}{v_{\text{вит}}} + 1}, \quad (9)$$

де

$$K_0 = \frac{v_{\text{вит}} - u_{\text{п}} + v}{v_{\text{вит}} + u_{\text{п}} - v}. \quad (10)$$

Аналіз рівняння (9) показує, що швидкість частинки у вертикальному турбулентному потоці залежить від її аеродинамічних властивостей, часу перебування частинки в потоці повітря й середньої швидкості повітряного потоку. Межею швидкості частинки буде різниця між швидкістю повітря і її швидкістю витання

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u = v - v_{\text{вит}}. \quad (11)$$

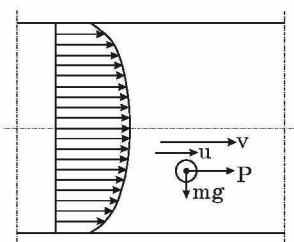


Рис. 2. Сили, що діють на частинку в горизонтальному потоці

Рівняння руху частинки в горизонтальному трубопроводі (рис. 2) має вигляд

$$m \frac{du}{dt} = c_x F_M \rho \frac{(v-u)^2}{2}. \quad (12)$$

Підставивши у вираз (12) значення c_x із рівняння (4) і вирішуючи його відносно u , одержимо

$$u = v - \frac{(v-u_{\text{п}})v_{\text{вит}}^2}{gt(v-u_{\text{п}}) + v_{\text{вит}}^2}. \quad (13)$$

З рівняння (13) неважко побачити, що зі збільшенням часу перебування частинки в трубопроводі її швидкість зростає й прагне до межі, що дорівнює

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u = v. \quad (14)$$

Висновки. Знайдені кінематичні параметри переміщення паперових відходів використаної упаковки для випадку вертикальних горизонтальних і вертикальних трубопроводів достатньо не погано підходять для часточок у вигляді кульки. Для часточок іншої форми для визначення кінематичних параметрів доцільно провести експериментальні дослідження. В зв'язку з викладеним на кафедрі технічної механіки та пакувальної техніки НУХТ виготовлений стенд для проведення експериментальних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бурсиан В.М. Пневматический транспорт на предприятиях пищевой промышленности. М.: Машиностроение. — 1966.
2. Машины для разгрузки и транспорта порошкообразных материалов. Подборский М. Е., Ильгисонис В. К. М.: Машгиз. — 1961.
3. Урбан Я. Пневматический транспорт. Пер. с чеш. Мельцера Р.Е. М.: Машиностроение. — 1967.
4. Подъемно-транспортные машины зерноперерабатывающих предприятий. Ф. Г. Зуев. и др. М.: Колос. — 1978. — 264 с.

Одержана редколлегією 27.08.08р.