

## АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ПОДАЧІ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ В АСПІРАЦІЙНИЙ КАНАЛ ПНЕВМОВІДЦЕНТРОВИХ СЕПАРАТОРІВ

**Котов Б.І. д.т.н., проф.**

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

**Степаненко С.П. к.т.н., с.н.с.**

*Національний науковий центр „ІМЕСГ”, смт. Глеваха*

**Швидя В.О. асп.**

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*В статті досліджено умову раціональної подачі зернової суміші в аспіраційний канал. Знайдена умова ефективної роботи пневмовідцентрового сепаратора на високій подачі.*

**Постановка проблеми.** Сепарація повітряним потоком широко застосовується в зерноочисних та зерносортувальних машинах, в повітряних класифікаторах та інших сільськогосподарських машинах [1].

Більшість дослідників відзначають [1, 2], що істотним недоліком існуючих пневмосепараторів є суттєва залежність якісних показників процесу (ступінь розділення, наявність основної фракції у відходах та інші) від подачі матеріалу, а, відповідно, і його продуктивності. Тому теоретичне дослідження процесів сепарації в повітряному потоці представляє практичний інтерес для обґрунтування та пошуку шляхів підвищення ефективності та продуктивності пневмоочисних машин.

**Аналіз останніх досліджень.** Процесом пневмосепарації займалось багато вчених [3], проте в більшості досліджень по пневмосепарації [4] недостатньо уваги приділяється технологічному процесу вводу зернової суміші в повітряний потік. Але, як показує багаторічна практика [5], через недостатньо обґрунтований режим вводу зернової маси в повітряний потік та досліджений вплив рівномірності розподілення її по площі поперечного перерізу погіршується ефективність сепарації на 20% і продуктивність на 25%.

**Мета.** Отримання умови якісної очистки основної фракції від легкої та обґрунтування шляху підвищення продуктивності при збереженні високої ефективності процесу пневмосепарації при відцентровому введенні зернової суміші в повітряний потік.

При аналізі процесу пневмосепарації введемо наступні припущення:

- всі частки рівні за геометричною формою і представляють собою кулю еквівалентним діаметром  $d$ ;

- повітряний потік рівномірний по перетині аспіраційного каналу і постійний за значенням і напрямком.

Розглянемо два випадки сепарації в повітряному потоці: взаємодію повітряного потоку з розрідженою (рис. 1, а) та згущеною зерною масою (рис. 1, б).

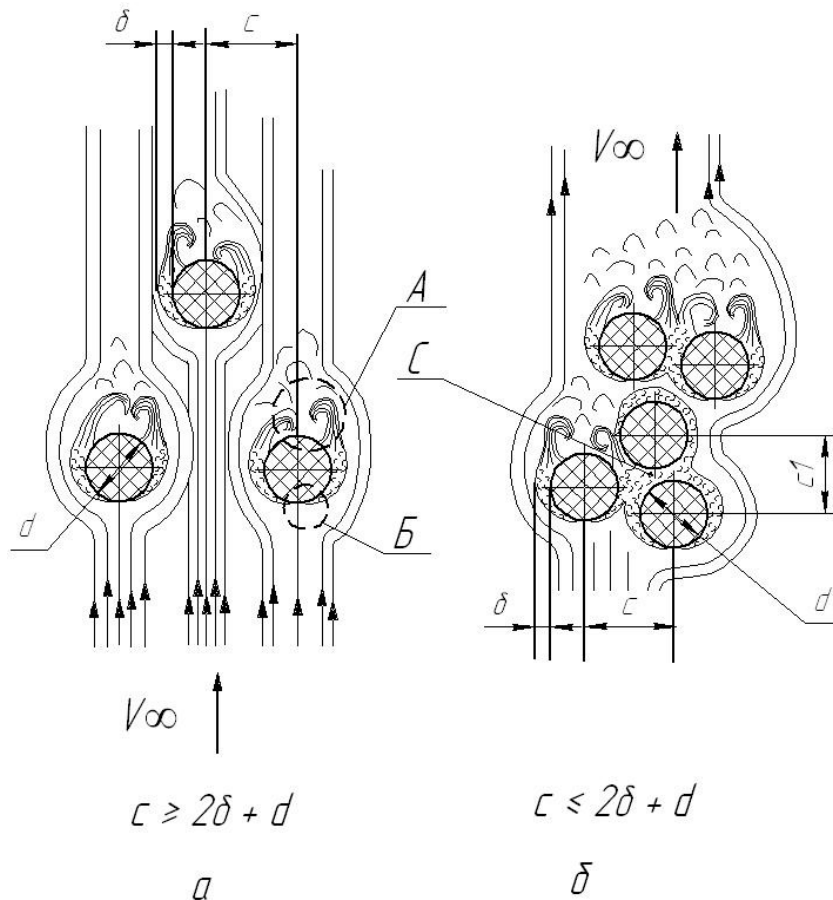


Рис. 1 – Схема обтікання нещільної (а) і щільної (б) зернової суміші повітряним потоком

В випадку зображеному на (рис.1, а) при обтіканні повітряним потоком зернової суміші, яка складається з часток еквівалентного діаметру  $d$ , відстань між якими  $c$ , швидкість частинок повітря у поверхні під впливом її жорсткості і в'язкості середовища стає рівною нулю. При віддаленні від поверхні частки швидкість частинок починає збільшуватись і на визначеній відстані досягає швидкості повітряного потоку  $V_{\infty}$ . Шар повітря, примикаючи до поверхні тіла, в котрому відбувається зміна швидкості руху частинок повітря, називається пограничним шаром і характеризується товщиною  $\delta_x$ . Ця товщина  $\delta_x$ , вимірювана в міліметрах, залежить від форми частки, жорсткості його поверхні, швидкості обтікання, положення поверхні відносно повітряного потоку, від в'язкості та густини повітря.

Крім того, внаслідок криволінійної форми часток зернової суміші товщина  $\delta_x$  пограничного шару різко збільшується і при деякій критичній товщині  $\delta$  виникає обернена течія. Це призводить до виносу повітря, загальмованого в пограничному шарі у зовнішній потік, внаслідок чого він відривається від поверхні частки. Відрив пограничного шару завжди відбувається з утворенням вихорів в кормовій частині частки (зона А, рис. 1,а) і зниженням тиску в порівнянні з передньою частиною частки (зона Б, рис. 1,а). Внаслідок цієї різниці тисків виникає так званий опір тиску, який збігається з

напрямом повітряного потоку і значно підвищує силу опору. В щільних зернових сумішах проміжок між частками може бути менший, ніж подвійна критична товщина пограничного шару  $2\delta$ . В результаті цього виникає значна сила тертя, яка перешкоджає відриванню пограничного шару і він засмоктується в щілину між суміжними частками (зона С, рис.1,б). При цьому значно зменшується сила опору, яка діє на окрему частку, і не тільки, тому що не утворюються вихори і області пониженого тиску, але ще й тому що зменшується число Рейнольдса, а значить і збільшується швидкість вітання. Чим менша відстань  $c_1$  в зоні С між частками зернової суміші, тим більша швидкість повітряного потоку потрібна, щоб відділити легкі домішки з зернової суміші. Тому при щільному вкиданні в повітряний потік можливе часткове захоплення легких домішок важкою фракцією і зниження ефективності сепарації.

Для ефективного виконання процесу необхідно дотримуватися наступної умови:

$$c \geq 2\delta + d. \quad (1)$$

Тобто проміжок між частками повинен бути більшим за подвійну критичну товщину пограничного шару  $2\delta$ .

З урахуванням умови (1) необхідна максимальна маса, що подається в одиницю об'єму аспіраційної камери і при якій ще можливе виконання ефективного процесу сепарації:

$$m' = \rho_{\text{час}} \cdot V \cdot n = \rho_{\text{час}} \cdot \frac{d^3}{\delta^3}, \quad (2)$$

де:  $\rho_{\text{час}}$  – густина частки, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – еквівалентний об'єм частки, м<sup>3</sup>;

$n$  – кількість часток в одиниці об'єму, потрібного для здійснення сепарації.

Максимальна можлива подача зернової суміші  $q$  в аспіраційний канал діаметром  $D$ , при якій ще виконується ефективний процес сепарації:

$$q = \rho_{\text{час}} \cdot \frac{d^3}{\delta^3} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h, \quad (3)$$

де:  $h$  – товщина зернового шару, що сходить з розкидних робочих органів, м.

Звідки випливає, що для здійснення ефективного технологічного процесу в аспіраційному каналі діаметром  $D$  при деякій подачі  $q$  необхідно збільшити товщину зернового шару, що сходить з розкидувачів і зменшити товщину критичного пограничного шару. Тобто забезпечити більш розріджене сходження зернових мас в аспіраційний канал. При більшій подачі зернового матеріалу в повітряний потік, ніж подача, розрахована за формулою (3) можливе зниження ефективності сепарації і створюються умови для виносу легких домішок в важку фракцію.

Для розрахунку критичної товщини пограничного шару  $\delta$  розглянемо обтікання одиничної частки повітряним потоком при середніх числах

Рейнольдса ( $1 \times 10^5 - 3 \times 10^5$ ) (рис. 2). При такому діапазоні чисел Рейнольдса зазвичай і відбувається пневмосепарація в очисних машинах. При таких аеродинамічних режимах пограничний шар має подвійну структуру: тонкий внутрішній ламінарний шар і зовнішній товстий турбулентний шар. При цьому найбільша товщина пограничного шару  $\delta$  спостерігається в точці його відриву В. Для знаходження критичної товщини  $\delta$  пограничного шару потрібно розв'язати систему рівнянь руху в пограничному шарі, що представляють собою частинну систему диференціальних рівнянь Нав'є – Стокса [6]:

$$\begin{cases} V_x \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} = -1 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[ 2 \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right] \right\} \\ V_x \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} = -1 \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[ 2 \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right] \right\}; \end{cases} (4)$$

де:  $V_x$ ,  $V_y$  – горизонтальна та вертикальна складова швидкості руху часток повітря, м/с;  
 $p$  – тиск в пограничному шарі, Па;  
 $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  – динамічна в'язкість повітря, Н·с/м<sup>2</sup>.

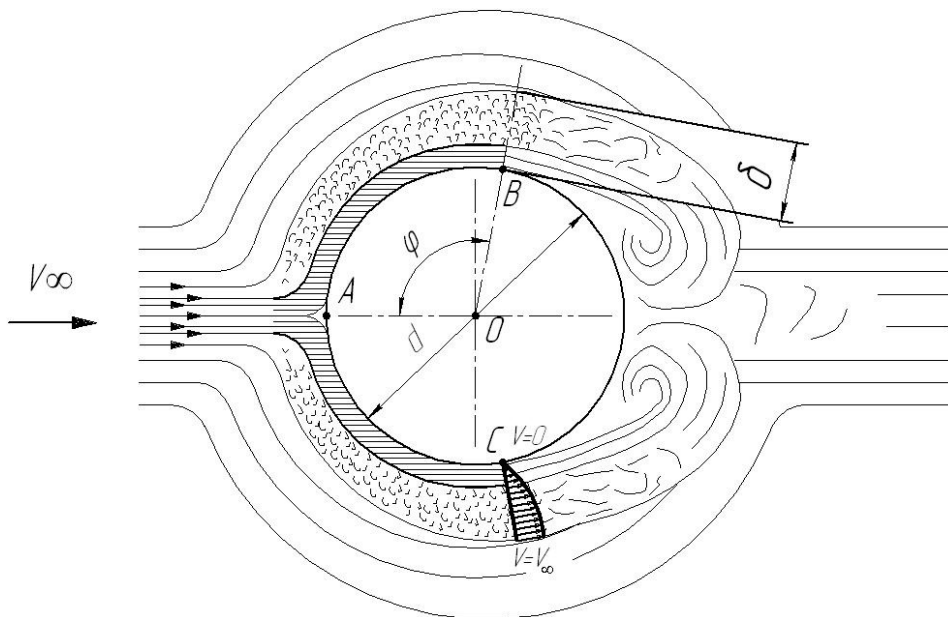


Рис. 2 – Схема обтікання одиничної частки повітряним потоком при середніх числах Рейнольдса

Отримання точного аналітичного загального рішення системи рівнянь (4) пов'язано зі значними математичними труднощами. Застосування чисельних методів інтегрування призводить до дуже складних розрахунків. Тому всі способи розрахунку турбулентних пограничних шарів з градієнтом тиску засновані на теоремі імпульсів та теоремі енергії для пограничного шару. В основі цих теорем лежить рівняння імпульсів виведене Е. Грушвитцем [6]:

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{d}{dx} (V_\infty^2 \delta_2) + \delta_1 \cdot V_\infty \cdot \frac{dV_\infty}{dx}; \quad (5)$$

де:  $\tau_0$  – дотичне напруження на стінці частки, Па;  
 $V_\infty$  – швидкість повітряного потоку, м/с;  
 $\delta_2$  – товщина втрати імпульсу;  
 $\delta_1$  – товщина витіснення, які рахуються за наступними формулами:

$$\delta_1 = \frac{1}{V_\infty} \int_{y=0}^{\delta} (V_\infty - u) dy; \quad (6)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{V_\infty^2} \int_{y=0}^{\delta} u \cdot (V_\infty - u) dy; \quad (7)$$

де:  $u$  – швидкість в пограничному шарі, м/с;  
 $y$  – відстань від стінки частки, м.

Оскільки для турбулентного режиму загальних законів зміни дотичного напруження  $\tau_0$  на криволінійній стінці та залежності швидкості повітря  $u$  від відстані від стінки частки  $y$  та довжини дуги  $x$  немає, то потрібно використовувати додаткові дані, отримані експериментальним шляхом.

Для розрахунку товщини пограничного шару скористаємось формулою Г. Хольштейна та Т. Болена для пограничного шару з градієнтом тиску, яка базується на рівнянні (5) [7]:

$$\chi = \frac{\delta_2^2}{\nu} \cdot \frac{dV_x}{dx}, \quad (8)$$

де:  $\chi$  – другий форм-фактор;  
 $\nu$  – кінематична в'язкість повітря, м<sup>2</sup>/с.

Товщина пограничного шару  $\delta$  згідно експериментальних досліджень залежить від товщини втрати імпульсу  $\delta_2$  наступною залежністю:

$$\delta = \frac{\delta_2}{\frac{27}{215} - \frac{\Delta}{945} - \frac{\Delta^2}{9072}}; \quad (9)$$

де:  $\Delta$  – перший форм-параметр.

$\frac{dV}{dx}$  представляє собою похідну проекції швидкості потоку  $V_x$  на дотичну до кривої поверхні по довжині дуги  $x$ .

Знайдемо залежність проекції швидкості потоку  $V_x$  від довжини дуги кривої  $x$ . Залежність довжини дуги кривої поверхні від центрального кута  $\alpha$  виражається наступною залежністю:

$$x(\alpha) = \frac{d}{2} \alpha. \quad (10)$$

Тоді залежність проекції швидкості потоку  $V_x$  від довжини дуги  $x$  буде (рис. 3):

$$V_x = V_\infty \cdot \sin(\alpha) = V_\infty \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot x}{d}\right). \quad (11)$$

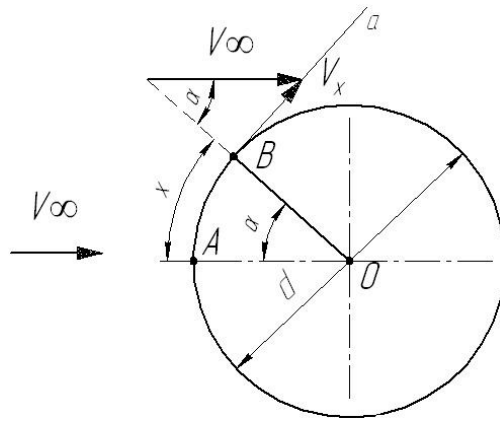


Рис. 3 – Схема до визначення залежності проекції швидкості повітряного потоку  $V_x$  на дотичну від довжини дуги  $x$

А похідна по довжині дуги  $x$ :

$$dV = 2 \cdot \frac{V_{\infty}}{d} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot x}{d}\right) \cdot dx. \quad (12)$$

Підставивши замість довжини дуги  $x$  вираз (7) і замінивши  $\alpha$  критичним центральним кутом  $\varphi$ , при якому відбувається відрив пограничного шару (рис.2) після нескладних алгебраїчних перетворень отримуємо:

$$\frac{dV}{dx} = 2 \cdot \frac{V_{\infty}}{d} \cdot \cos(\varphi). \quad (13)$$

Згідно досліджень Г. Блазіуса для нижньої ламінарної частини пограничного шару кулі (рис.2), відрив настає при значенні кута  $\varphi = 1,913$  рад та форм-параметрів  $\chi$ ,  $\Delta$  відповідно: -12 і -0,1567 (Г. Хольштейн та Т. Болен), причому, як показали дослідження, наведені форм-параметри не залежать від форми частки [6, 7]. Підставляючи чисельні значення форм-параметрів  $\chi$ ,  $\Delta$  та кута в вирази (13), (9) і (8), після нескладних перетворень отримаємо напівемпіричну залежність:

$$\delta = 4,337 \cdot \sqrt{\frac{v \cdot d}{V_{\infty}}}. \quad (14)$$

Підставивши її в вираз (3) отримаємо умову ефективної роботи пневмосепаратора:

$$q \leq \rho_{\text{час}} \cdot \frac{d^2}{81,577 \cdot \left(\frac{v \cdot d}{V_{\infty}}\right)^2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h; \quad (15)$$

З цієї умови видно, що максимально можлива подача нелінійно залежить ще й від швидкості повітряного потоку та розміру зернової фракції. Емпіричний коефіцієнт свідчить проте, що отримана залежність наближено описує технологічний процес, внаслідок складності теоретичного розрахунку критичної товщини пограничного шару.

## Висновки

В результаті проведений теоретичний аналіз показав, що причиною зниження ефективності сепарації є щільне вкидання в повітряний потік, в

результаті чого внаслідок дії сил тертя значно погіршуються умови відриву пограничного шару і як наслідок зменшуються сили опору. Отримано умову, яка показує максимально можливу подачу без зниження ефективності процесу в залежності від показників вкидання в повітряний потік.

### Список використаних джерел

1. Малис А.Я. Машины для очистки зерна воздушным потоком. / А.Я. Малис, А.Р. Демидов – М.:Машгиз, 1962. – 175 с.
2. Гладков Н.Г. Зерноочистительные машины. Конструкция, расчёт, проектирование и эксплуатация. / Н.Г. Гладков – М.: МАШГИЗ, 1961. – 447 с.
3. Заика П.М. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. / П.М. Заика, Г.Е. Мазнев. — М.: Колос, 1978.
4. Гортинский В.В. Процессы сепарации на зерноперерабатывающих предприятиях. / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. — М.: Колос, 1980 .- 303 с.
5. Авдеев Н.Е. Центробежные сепараторы для зерна. / Н.Е. Авдеев — М.: Колос, 1975. – 152с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. / Г. Шлихтинг пер. с немецкого. – М.: Наука, 1974 – 711 с.
7. Holstein H. Ein einfaches Verfahren zur Berechnung laminarer Reibungsschichten, die dem Näherungsverfahren von K. Pohlhausen genügen. / H. Holstein, T. Bohlen, Lilienthal - Bericht - 10, 5 — 16 (1940).

### Аннотация

#### **АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ПОДАЧИ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ В АСПИРАЦИОННЫЙ КАНАЛ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНЫХ СЕПАРАТОРОВ**

Котов Б.И., Степаненко С.П., Швидя В.А.

*В статье исследовано условие рациональной подачи зерновой смеси в аспирационный канал. Найдено условие эффективной работы пневмоцентробежного сепаратора на высокой подаче.*

### Abstract

#### **ANALYTICAL RESEARCHES OF RATIONAL SERVE CORN MIXTURE IN THE ASPIRATION CHANNEL OF PNEUMATIC CENTRIFUGAL SEPARATORS**

B. Kotov, S. Stepanenko, V. Shvidia

*The article in the condition of rational serve of corn mixture in an aspiration channel is explored. The condition of effective work of pneumatic centrifugal separator on the high serve is found.*