

## ДИНАМІКА ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ ЗАПИЛЕНОГО ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ ПОТОЦІ ПНЕВМОСЕПАРАТОРІВ РУШАНКИ РИЦИНИ

Дідур В.А., акад. АН ВШУ, д.т.н., проф., Чебанов А.Б., інж.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

*Розроблені математичні вирази для визначення динамічних характеристик частинок дисперсної фази запилених повітряних потоків при пневмосепарації рушанки рицини.*

**Постановка проблеми.** Підвищення продуктивності пневмосепаратора для сепарації рушанки рицини [1, 2] пов'язано з необхідністю поліпшення процесу очищення повітряного потоку від часток легких домішок та пилу.

Крупні частинки легких домішок, які відділилися від основного компоненту (ядра рицини) з горизонтального каналу рухаються до пилоосаджувальної камери, де вони відділяються від повітряного потоку за рахунок інерційних і гравітаційних сил. Проблему представляють легкі частинки та пил розміром до 4мм. Для ефективного очищення повітряного потоку в технологічній схемі пропонується використати пиловловлюючий пристрій [2], у вигляді вертикального каналу. Конструктивна особливість пиловловлюючого пристрою призводить до виникнення просторового руху запиленого потоку в каналі, і дослідження його динаміки є складним теоретичним завданням. Для здобуття залежностей, що визначають вплив різних факторів на ефективність процесу, необхідно дослідити динаміку частинок домішок в направленому вертикальному потоці.

**Аналіз відомих досліджень.** На динаміку дисперсних частинок в повітряних потоках впливають чотири основні сили: тяжіння, тиску, внутрішнього тертя (в'язкості) і інерції. Для моделювання динаміки руху дисперсної частинки у вертикальному повітряному потоці найчастіше використовують рівняння побудовані на підставі законів Ньютона [3-5]. Створені диференціальні рівняння характеризують внутрішній механізм процесів, встановлюють взаємозв'язок між фізичними умовами процесу і змінами цих умов за часом. Однак рівняння не враховують особливостей процесу очищення повітряного потоку при сепарації рушанки рицини (склад пилу рушанки рицини, його фізико-механічні властивості, токсичність; змінність складових швидкості за перетином каналу і т.п.) [6], тому повинні бути доповнені деякими умовами.

**Мета роботи** – визначити динамічні характеристики частинок дисперсної фази в направленому вертикальному потоці в залежності від технологічних та конструктивних параметрів пневмосепаратора і фізико-механічних властивостей частинок дисперсної фази.

**Основна частина.** Для вибору крайових умов перш за все необхідно

встановити складові технологічного процесу очищення повітряного потоку в розробленому нами пневмосепараторі та їх взаємодію. Для цього побудовано алгоритмічну модель процесу сепарації за допомогою цього пневмосепаратора.

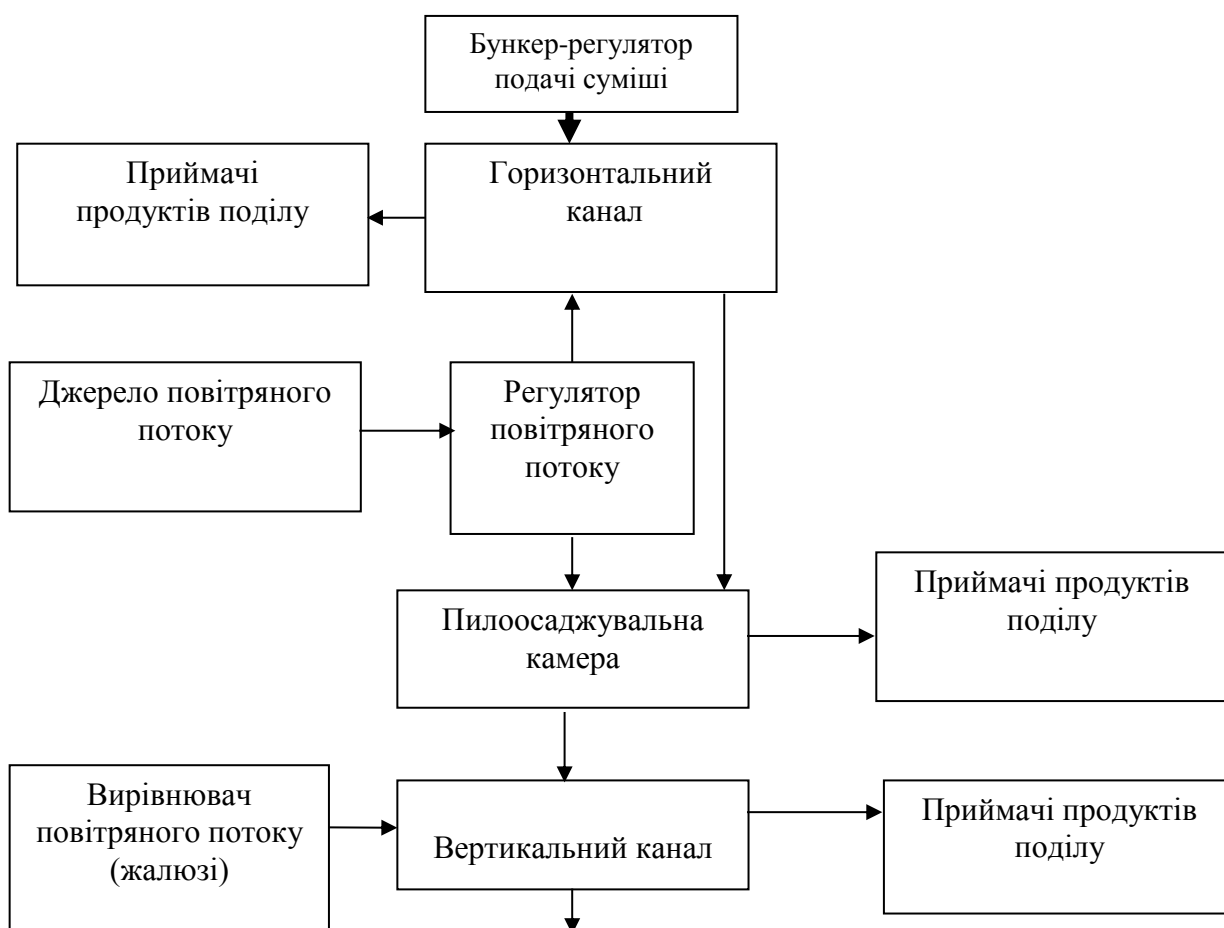
При роботі запропонованого пневмосепаратора (рис.1) рушанка насіння рицини подається до горизонтального каналу, де під дією повітряного потоку згідно аеродинамічних властивостей компонентів та сили тяжіння поділяється на фракції.

Запилений повітряний потік потрапляє в пилоосаджувальну камеру, де очищається від крупних домішок (з еквівалентним діаметром до 4 мм). Далі повітряний потік з частинками пилу попадає до пиловловлюючого пристрою. Його основним елементом є вертикальний канал, у якому за рахунок сил тяжіння та інерції відбувається очищення від частинок пилу. Вловлені частинки пилу направляються в нижню зону вертикального каналу у відповідний приймач. Кінцеве очищення повітряного потоку від дрібнодисперсного пилу (до 500 мкм) відбувається у інерційному пиловловлювачі та фільтрі.

Структурна та алгоритмічна схеми роботи розробленого пневмосепаратора зображені на рис.1, 2.

Аналіз розроблених схем роботи (рис.1, рис.2) свідчить, що значимими складовими, з точки зору забезпечення максимальної ефективності процесу очищення повітряного потоку, є пилоосаджувальна камера та пиловловлюючий пристрій.

Так як обґрунтування параметрів пилоосаджувальної камери проведено [7], то в подальшому слід особливу увагу приділити моделюванню процесу очищення повітряного потоку в пиловловлюючому пристрої.



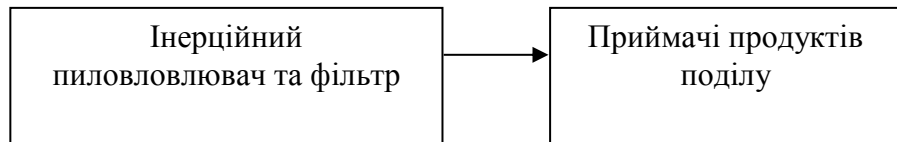


Рис. 1 – Структурна схема роботи нової конструкції пневмосепаратора з пиловловлювачем (Д.п. 58227)

Розглянемо завдання, що стосується визначення динаміки запиленого повітряного потоку. Він складається з середовища (повітряного потоку), яке діє вертикально, і дисперсної фази (частинки пилу і легких домішок). Частинки дисперсної фази комплексно характеризуються як геометричними ознаками (дисперсний склад, форма, макро- і мікрорельєф поверхні), так і фізико-механічними властивостями: масові (щільність однієї і сукупності частинок); аеродинамічні; електрофізичні; теплофізичні і ін. [8].

При обтіканні частки пилу повітряним потоком, на неї діє сила (рис.3), згідно формули Ньютона [9]:

$$P_w = \frac{\rho \cdot C_x \cdot F \cdot V^2}{2}, \quad (1)$$

де:  $\rho$  - питома вага повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $C_x/2$  - коефіцієнт, що враховує аеродинамічну форму поверхні дисперсної частинки;  $F$  - площа, на яку діє потік.

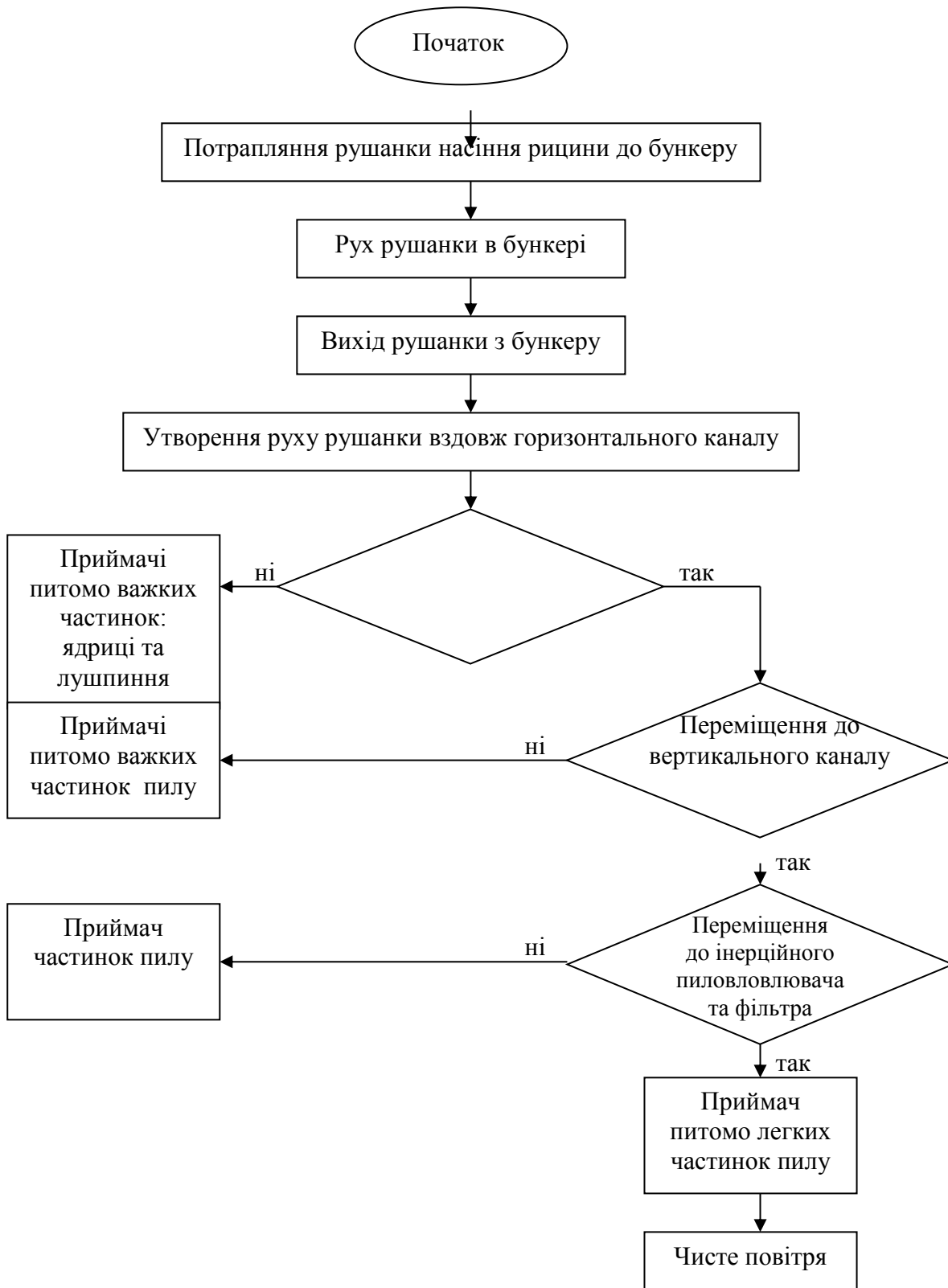


Рис. 2 – Алгоритмічна схема роботи нової конструкції пневмосепаратора з пиловловлювачем (Д.п. 58227)

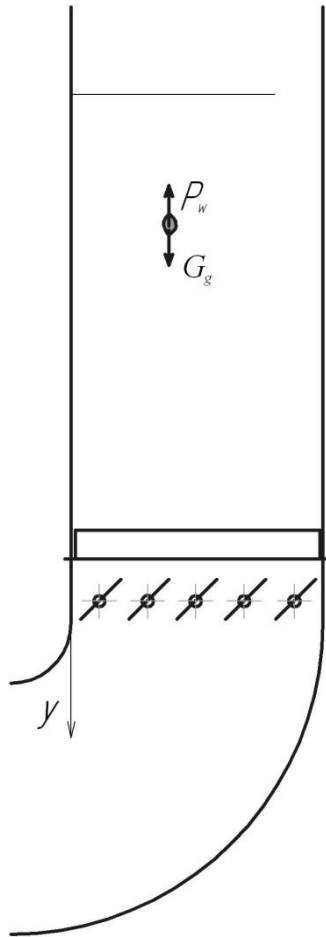


Рис.3 – Схема сил, що діють на дисперсну частинку у вертикальному каналі

На частинку також діє сила тяжіння (рис.3), розрахована за формулою Ньютона:

$$G_g = m \cdot g, \quad (2)$$

де:  $m$  – маса дисперсної частинки, кг;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.  
Таким чином, рівняння відносно вісі  $y$ :

$$m \cdot a = G_g - P_w,$$

або

$$m \cdot a = m \cdot g - k \cdot F \cdot V^2, \quad (3)$$

де:  $a$  – вертикальне прискорення,  
 $k$  – коефіцієнт,  $k = \rho C_x / 2$ ,  
 $V^2$  – відносна швидкість потоку, м/с,

$$V = V_n + V_B, \quad (4)$$

де:  $V_n$  – швидкість направленого потоку, м/с;  
 $V_B$  – вертикальна швидкість дисперсної частки, відносно потоку, м/с.

Прискорення дисперсної частки, відносно потоку, якщо поділити на  $m$ , має вигляд:

$$a = \frac{m \cdot g - k \cdot F \cdot V^2}{m} = g - \frac{k}{m} F (V_n + V_\epsilon)^2 \quad (5)$$

Провівши перегрупування та з урахуванням, що  $a = dV / dt$ , отримуємо такий вигляд (5):

$$\frac{m}{kF} \int \frac{dV}{\frac{gm}{kF} - (V_n + V_\epsilon)^2} = dt$$

або

$$\frac{m}{kF} \int \frac{dV}{\left(\sqrt{\frac{gm}{kF}}\right)^2 - (V_n + V_\epsilon)^2} = dt$$

$$L = \left(\sqrt{\frac{gm}{kF}}\right) = V_{kr}$$

Введемо позначення

Рішення інтеграла має вигляд:

$$\frac{1}{2L} \ln \left| \frac{L + (V_n + V_\epsilon)}{L - (V_n + V_\epsilon)} \right| = \frac{k}{m} F \cdot t + C_1 \quad (6)$$

а помноживши обидві частини на  $2L$  отримаємо:

$$\ln \left| \frac{L + (V_n + V_\epsilon)}{L - (V_n + V_\epsilon)} \right| = \frac{2k}{m} F \cdot L \cdot t + C_1$$

або

$$\left| \frac{L + (V_n + V_\epsilon)}{L - (V_n + V_\epsilon)} \right| = e^{\frac{2k}{m} F \cdot L \cdot t + C_1} \quad (7)$$

У направленому потоці  $|L| > |V_n + V_\epsilon|$ . Знайдемо  $V_\epsilon$  в:

$$V_\epsilon = \frac{e^{C_1 + \beta t} (L - V_n) - (L + V_n)}{e^{C_1 + \beta t} + 1} \quad (8)$$

де: 
$$\beta = \frac{2F \cdot L \cdot k}{m}$$

Знайдемо постійну інтегрування  $C_1$  підставивши в (7) початкові умови  $V_\epsilon=0, t=0$ :

$$e^{C_1} = \frac{2L - L + V_n}{L - V_n} = \frac{L + V_n}{L - V_n},$$

$$C_1 = \ln \left| \frac{L + V_n}{L - V_n} \right|. \quad (9)$$

Таким чином, вертикальна швидкість дисперсної частинки, відносно потоку дорівнює:

$$V_s = \frac{e^{\ln \left| \frac{L+V_n}{L-V_n} \right| + \frac{2F \cdot V_{kr} \cdot k \cdot t}{m}} (V_{kr} - V_n) - (V_{kr} + V_n)}{e^{\ln \left| \frac{L+V_n}{L-V_n} \right| + \frac{2F \cdot V_{kr} \cdot k \cdot t}{m}} + 1}. \quad (10)$$

Для  $V = \frac{dS}{dt}$  маємо:

$$dS = \left( \frac{e^{\ln \left| \frac{L+V_n}{L-V_n} \right| + \frac{2F \cdot V_{kr} \cdot k \cdot t}{m}} (V_{kr} - V_n) - (V_{kr} + V_n)}{e^{\ln \left| \frac{L+V_n}{L-V_n} \right| + \frac{2F \cdot V_{kr} \cdot k \cdot t}{m}} + 1} \right) dt.$$

Або переміщення дисперсної частинки дорівнює:

$$S = \int \frac{e^{C_1 + \beta t} (L - V_n) - (L + V_n)}{e^{C_1 + \beta t} + 1} dt =$$

$$= (L - V_n) \int \frac{e^{C_1 + \beta t} dt}{e^{C_1 + \beta t} + 1} - (L + V_n) \int \frac{dt}{e^{C_1 + \beta t} + 1} =$$

$$= \frac{(L - V_n)}{\beta} \ln |e^{C_1 + \beta t} + 1| - \frac{(L + V_n)}{\beta} \cdot (C_1 + \beta t - \ln |e^{C_1 + \beta t} + 1|) + C_2,$$

$$S = \frac{(L - V_n)}{\beta} \ln |e^{C_1 + \beta t} + 1| - \frac{(L + V_n)}{\beta} \cdot (C_1 + \beta t - \ln |e^{C_1 + \beta t} + 1|) + C_2. \quad (11)$$

Знайдемо постійну інтегрування  $C_2$  підставивши початкові умови в (11)  $S=0, t=0$

$$C_2 = \frac{(V_n - L)}{\beta} \ln |e^{C_1} + 1| + \frac{(L + V_n)}{\beta} \cdot (C_1 - \ln |e^{C_1} + 1|). \quad (12)$$

Часткове рішення диференціального рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned}
S = & \frac{(L - V_n)m}{2F \cdot L \cdot k} \ln \left| e^{\ln \left| \frac{L+V_n}{L-V_n} \right| + \frac{2F \cdot L \cdot kt}{m}} + 1 \right| - \\
& - \frac{(L + V_n)m}{2F \cdot L \cdot k} \cdot \left( \ln \left| \frac{L + V_n}{L - V_n} \right| + \frac{2F \cdot L \cdot kt}{m} - \ln \left| e^{\ln \left| \frac{L+V_n}{L-V_n} \right| + \frac{2F \cdot L \cdot kt}{m}} + 1 \right| \right) + \\
& + \frac{(V_n - L)m}{2F \cdot L \cdot k} \ln \left| e^{\ln \left| \frac{L+V_n}{L-V_n} \right|} + 1 \right| + \frac{(L + V_n)m}{2F \cdot L \cdot k} \cdot \left( \ln \left| \frac{L + V_n}{L - V_n} \right| - \ln \left| e^{\ln \left| \frac{L+V_n}{L-V_n} \right|} + 1 \right| \right). \quad (13)
\end{aligned}$$

Таким чином, маючи рівняння вертикальної швидкості руху (10) дисперсних частинок у вертикальному каналі пиловловлюючого пристрою та їх переміщення (13) можливо обґрунтувати деякі конструктивні параметри пневмосепаратору.

Аналіз відомих досліджень та проведення попередніх експериментів дозволили визначити діапазони варіювання вихідних параметрів процесу очищення повітряного потоку в вертикальному каналі. Так, швидкість повітряного потоку на вході в вертикальний канал змінюється в залежності від швидкості повітряного потоку в горизонтальному каналі та пилоосаджувальній камері (рис.1, рис.2). Причому параметри останніх є технологічними і можуть змінюватися лише в певних діапазонах. Зменшення швидкості потоку в горизонтальному каналі проєцирується на пилоосаджувальну камеру і на вертикальний канал, що сприяє поліпшенню ефективності очистки повітряного потоку. Але при цьому відбувається зменшення якості сепарації в горизонтальному каналі, що є недопустимим. Проведеними попередніми експериментами визначено, що за умови максимальної технологічної ефективності, оптимальний діапазон варіювання швидкості повітряного потоку на вході в вертикальний канал становить від 2 до 7 м/с.

Попередніми випробуваннями також визначено дисперсний склад частинок пилу, що потрапили до приймачів пилоосаджувальної камери, вертикального каналу та фільтру. Аналізом дисперсного складу частинок встановлено: до приймача пилоосаджувальної камери потрапили частинки розміром 4-6мм – 42%, 6-7мм – 28%; до приймача вертикального каналу – 0,5-2мм – 15%, 2-4 мм – 14%; до фільтру частинки розміром до 0,5мм - 1% від загальної маси. Таким чином, при дослідженнях обрано діапазон варіювання розмірів частинок дисперсної фази 0,5...4мм, та з урахуванням загальновідомих джерел [4] щільністю  $\rho_q = 0,0009 \dots 0,0011 \text{ кг/см}^3$ .

Для теоретичних досліджень різних процесів застосовують спрощення форми частинок дисперсної фази - шар. Це веде до зміни реальних результатів. Аналізом відомих досліджень [9, 10] встановлено, що при моделюванні процесів динаміки частинок зі складною формою використовуються поправочні коефіцієнти. З урахуванням складної форми частинок пилу ричини та відомих досліджень, при визначенні розмірів використовували еквівалентний діаметр та ввели відповідний коефіцієнт, що враховує аеродинамічну форму поверхні дисперсної частки  $C_x/2=0,7 \dots 0,8$ .

За результатами математичного моделювання побудовано закономірності зміни вертикальної швидкості частинок дисперсної фази у вертикальному каналі пневмосепаратору в залежності від розмірів частинок (рис.4) та їх щільності (рис.5). При цьому швидкість повітряного потоку на вході в канал варіювалася у заданому діапазоні 2-7м/с.



Позитивне значення вертикальної швидкості частинок свідчить про те, що частинка рухається вниз по вісі  $Y$  (рис.2), а негативне, навпаки, – рухається вгору. Рух частинки вгору небажане явище, так як веде до збільшення кількості частинок що потрапили до фільтру. Як видно з рис.4, збільшення швидкості повітряного потоку веде до виносу частинок з вертикального каналу при їх розмірах в заданих діапазонах. Причому при швидкостях потоку 6-7 м/с 100% дисперсних частинок направляється у фільтр. Оптимальний діапазон швидкості повітряного потоку на вході, з точки зору позитивних значень вертикальної швидкості частинок, складає 2-5м/с.

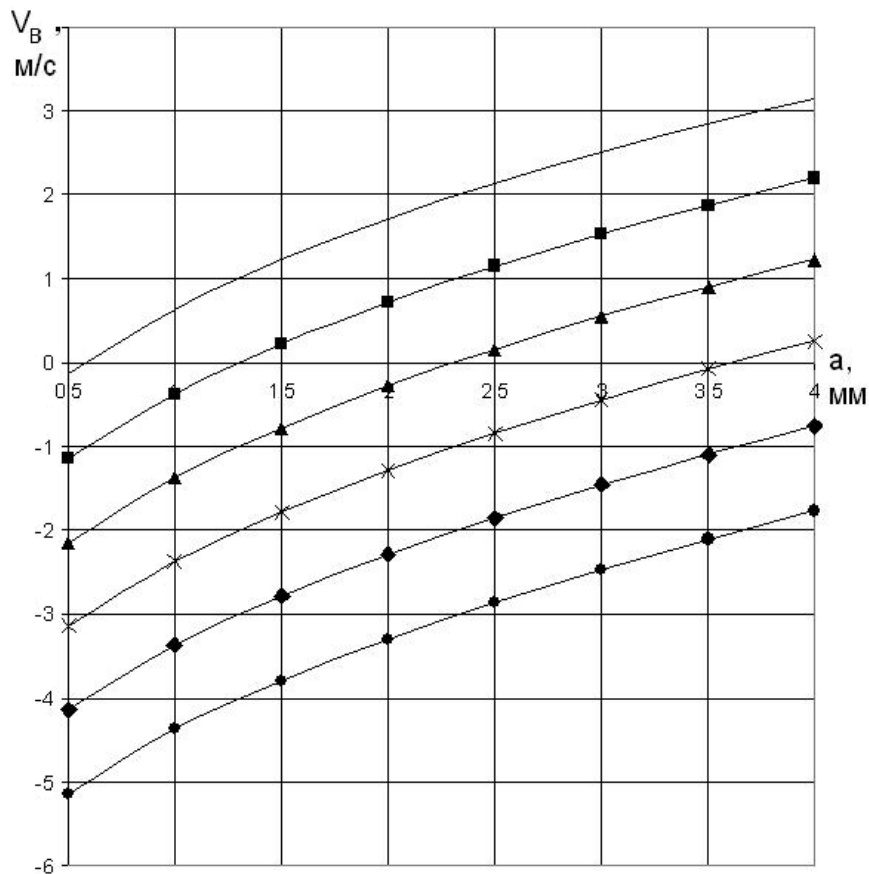


Рис.4 – Залежності вертикальної швидкості частинки дисперсної фази від розміру частинки, при: — -  $V_n = 2$  м/с; —■— -  $V_n = 3$  м/с; —▲— -  $V_n = 4$  м/с; —×— -  $V_n = 5$  м/с; —◆— -  $V_n = 6$  м/с; —●— -  $V_n = 7$  м/с ( $Cx/2=0,75$ ;  $\rho_u = 0,001$  кг/см<sup>3</sup>;  $\rho = 1,26$  кг/м<sup>3</sup>)

Аналізом залежностей (рис.5) встановлено, що з підвищенням швидкості повітряного потоку на вході, в діапазоні що досліджується (від 2 до 6м/с) вертикальна швидкість частинок дисперсної фази зменшується в 1,1...1,6 разів. Зниження швидкості також відбувається при зменшенні щільності частинок дисперсної фази (від 0,0009 до 0,0011 кг/см<sup>3</sup>) - їх вертикальна швидкість змінюється до 20%.

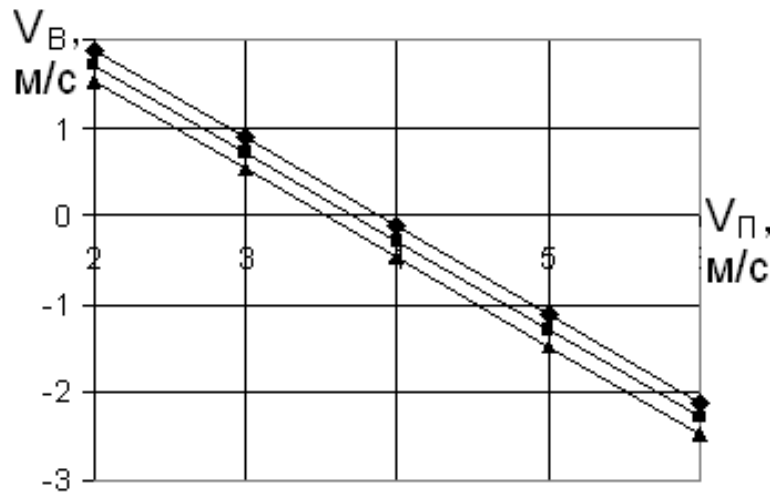


Рис.5 – Залежності вертикальної швидкості частинки дисперсної фази від швидкості повітряного потоку на вході у вертикальний канал, при: ◆ -  $\rho_{\text{ч}} = 0,0011 \text{ кг/см}^3$ ; ■ -  $\rho_{\text{ч}} = 0,001 \text{ кг/см}^3$ ; ▲ -  $\rho_{\text{ч}} = 0,0009 \text{ кг/см}^3$  ( $Cx/2=0,75$ ;  $a=2\text{мм}$ ,  $\rho = 1,26 \text{ кг/м}^3$ )

## Висновки

1. Одержані математичні вирази дозволяють керувати процесом очищення повітряного потоку у вертикальних каналах. Крім цього значення вертикальної швидкості дозволяють прогнозувати ефективність очищення повітряного потоку з урахуванням фізико-механічних властивостей частинок дисперсної фази та швидкості потоку на вході у вертикальний канал. Наприклад, при відомих характеристиках частинок пилу та швидкості повітряного потоку за допомогою рис.4 можна визначити кількість частинок, що мають позитивну швидкість – тобто є вловленими.
2. Збільшення швидкості повітряного потоку на вході, зменшення розмірів та щільності дисперсних частинок веде до підвищення їх кількості у фільтрі. Оптимальний діапазон швидкості повітряного потоку на вході, з точки зору позитивних значень вертикальної швидкості частинок, складає 2-5м/с.
3. Подальшим завданням досліджень є визначення складових швидкості по перетину вертикального каналу з урахуванням решітки з жалюзі та уточнення з урахуванням технологічних показників роботи пневмосепаратора.

## Список використаних джерел

1. Пиловлівлювач аеродинамічної сепарації сипких матеріалів, в тому числі і рушанки рицини: Д.п. 58227 Україна, МПК В01 D45/00/ В.А. Дідур, А.Б. Чебанов (Україна). – U201010090; Заявл. 16.08.2010; Опубл. 11.04.2011, Бюл.№7. – 2с
2. Дідур В.А. Оптимізація параметрів пневмосепаратора для сепарації рушанки рицини / В.А. Дідур, А.Б. Чебанов // Праці Таврійського

- державного агротехнологічного університету. – Мелітополь, 2010. – Вип.10, Т.8.- С. 70-77.
3. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое / Гольдштик М.А. – Новосибирск: Ин-т теплофизики АН СССР СО, 1984. - 163с.
  4. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / [Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А.]. – М.: Колос, 1980.- 304с.
  5. Денисенко Л.И. Определение скорости движения минеральных зерен в стесненных условиях / Денисенко Л.И. // Техника и технология обогащения руд. - Днепропетровский горн. ин-т, 1975. – С.112-117.
  6. Дідур В.А. Оптимізація параметрів пневмосепаратора для сепарації рушанки рицини / В.А. Дідур, А.Б. Чебанов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь, 2010. – Вип.10, Т.8. – С. 70-77.
  7. Харченко С.О. Обґрунтування параметрів процесу очищення повітряного потоку пилоосаджувальною камерою вібровідцентрових зернових сепараторів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / ХНТУСГ. – Харків, 2007. – 20 с.
  8. Вентиляторные установки зерноперерабатывающих предприятий / [Панченко А.В. и др.]. – 3-е изд. доп. и перераб. – М.: Колос, 1974. – 400с.
  9. Єрмак В.П. Вдосконалення способу сепарування насіння соняшника у повітряних потоках: дис. ... кандидата техн. наук / ЛНАУ. – Луганськ, 2003. – 170 с.
  10. Васильева Г.А. Исследование аэродинамической характеристики зернистого материала: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.02.14/ Одесский технол. ин-т. пищевой пром. им. Ломоносова. – Одесса, 1973.- 20с.

## **Анотация**

### **ДИНАМИКА ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ЗАПЫЛЕННОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПОТОКЕ ПНЕВМОСЕПАРАТОРОВ РУШАНКИ КЛЕЩЕВИНЫ**

Дідур В.А., Чебанов А.Б.

*Разработаны математические выражения для определения динамических характеристик частиц дисперсной фазы запыленных воздушных потоков при пневмосепарировании рушенки клещевины*

## **Abstract**

### **DYNAMICS OF DUST DISPERSED PHASE OF AIR FLOW IN VERTICAL FLOW PNEVMOSEPARATORS PEARLED GRAIN OF CASTOR**

V. Didur, A. Chebanov

*The mathematical expression for determining the dynamic characteristics of the dispersed phase in the dusty air streams pnevmo separators pearled of castor*