

**Енергоощадні аерозольтранспортні системи  
для зерна та продуктів його переробки**

Дмитрук Є.А., д.т.н., проф., Романенко О.П., м.н.с., Харченко Є.І., к.т.н.  
Національний університет харчових технологій

Пневмотранспорт сипких матеріалів, в тому числі цементу, борошна, зерна комбікормів тощо має широке застосування через свою надійність, простоту, екологічність і пожежо- та вибухобезпечність. Недоліком пневмотранспортних систем є їх відносно висока енергоємність в порівнянні з механічним транспортом.

Зменшити енерговитрати в 2...4 рази діючих аерозольтранспортних систем (транспортування при високих концентраціях  $\mu > 5 \frac{\text{кг.матеріалу}}{\text{кг.повітря}}$ ) можна шляхом застосування комплексу технічно-конструктивних і режимних рішень.

На рисунку 1 наведено пневмотранспортну систему подачі борошна.

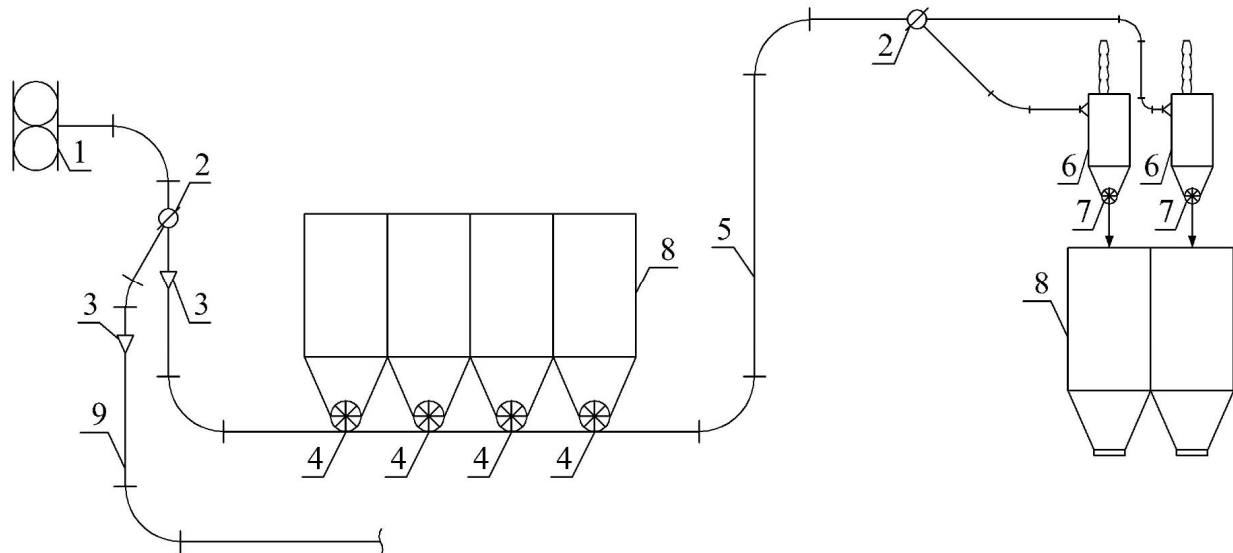


Рис. 1. Схема транспортування борошна.

1 – повітродувна машина; 2 – кран-перемикач; 3 – сопло Лавалю; 4 – шлюзовий живильник; 5 – матеріалопровід; 6 – циклон-фільтр; 7 – шлюзовий затвор; 8 – оперативні бункери; 9 – повітропровід.

Енергоощадність пневмотранспортної системи доцільно розглядати комплексно за окремими видами обладнання та режимами роботи системи.

Потужність електроприводу повітродувної машини розраховують за формулою:

$$N_{ел.пр} = \frac{Q_z \cdot H_{н.м}}{\eta_{н.м}}, \text{ кВт} \quad (1)$$

де,  $Q_z$  - загальні витрати на транспортування матеріалу, м<sup>3</sup>/год;  $H_{н.м}$  - загальні втрати тиску, Па;  $\eta_{н.м}$  - коефіцієнт корисної дії повітродувної машини (для повітродувних машин типу 3АФ і ВР  $\eta = 0,2 \dots 0,6$ ).

Загальні витрати повітря розраховуються за формулою:

$$Q_z = Q_{тр} + Q_n, \text{ м}^3/\text{год}; \quad (2)$$

де,  $Q_{тр}$  - витрати повітря на транспортування продукту, м<sup>3</sup>/год;  $Q_n$  - втрати повітря через нещільності (в кранах, живильниках, перемикачах тощо), м<sup>3</sup>/год.

Загальні втрати тиску в аерозольтранспортній установці складаються із втрат в повітропроводах та матеріалоппроводах, шлюзовому живильнику, в розвантажувачі, у фільтрі [1,5]:

$$H_{н.м} = H_{н.пр} + H_{жс} + H_{мн} + H_p + H_\phi, \text{ Па} \quad (3)$$

де,  $H_{н.м}$  - загальні втрати тиску в установці, Па;  $H_{н.пр}$  - втрати тиску в повітропроводах, Па;  $H_{жс}$  - втрати тиску в живильниках, Па;  $H_{мн}$  - втрати тиску в матеріалопроводі, Па;  $H_p$  - втрати тиску в розвантажувачі, Па;  $H_\phi$  - втрати тиску у фільтрі, Па.

Об'єктивну порівняльну характеристику енерговитрат при різних режимах транспортування можна отримати від аналізу величини питомих витрат:

$$\Delta N = \frac{N_{ел.пр}}{G \cdot l}, \text{ кВт/кг} \cdot \text{м} \quad (4)$$

де,  $G$  – продуктивність системи, кг/с;  $l$  – довжина лінії транспортування матеріалу, м.

В таблиці 1 наведено результати досліджень герметичності шлюзових живильників типу М-122 в умовах реального виробництва.

Таблиця 1. Герметичність шлюзових живильників М-122

Тиск повітря перед живильником, кПа	Кількість повітря					
	перед живильником		після живильника		втрати повітря, м³/год	
	м³/год	%	м³/год	%	м³/год	%
30*	130	100	54	41	76	58
60*	180	100	30	17	150	83
10	860	100	597	69	265	31
20	759	100	361	47	398	52
30	559	100	136	24	422	75

\* - за даними А.Я.Маліса [4]

Дані табл. 1 підтверджують обов'язковість виконання налагоджувальних робіт при введенні в експлуатацію нових живильників і необхідності вимагати від виробників обладнання включати в показники технічного паспорту коефіцієнт герметичності –  $K = f(F_{нещ})$ .

Зменшити втрати тиску повітря через нещільності в живильниках можна двома способами: ущільненням спрацьованих живильників при їх капітальному ремонті або зниженням тиску повітря перед живильником. Радикальним є заміна шлюзових живильників на камерні або ежекторні.

Мінімально-допустима швидкість повітря  $V_{м.д}$  і запас тиску повітродувної машини визначають загальний об'єм повітря  $Q_{мн}$  і діаметр матеріалопровода  $D$ .

$$Q_{мн} = V_{м.д} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (5)$$

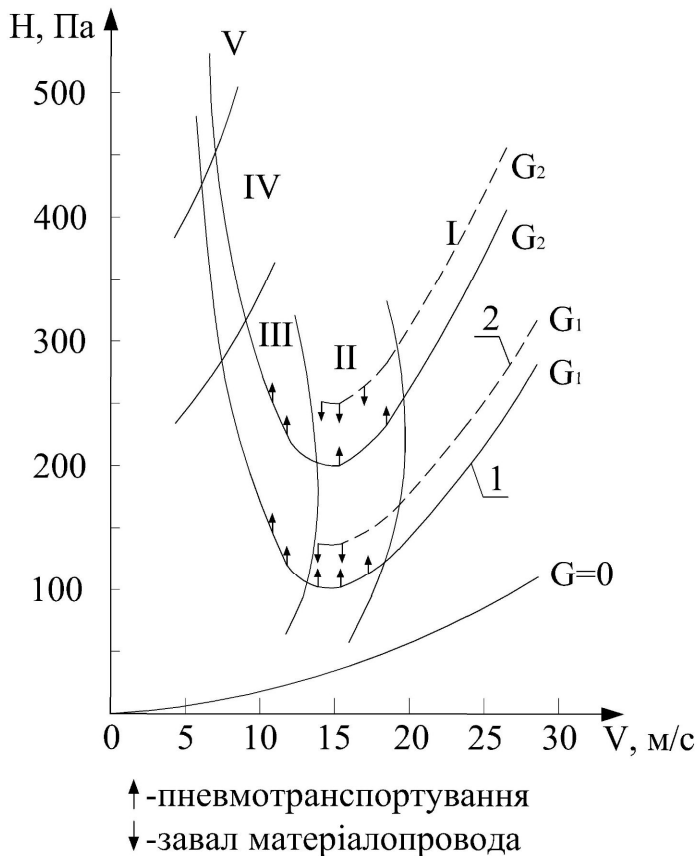
Визначенню і обґрунтуванню мінімально-допустимих швидкостей повітря при транспортуванні сипких матеріалів присвячено достатньо наукових праць і експериментальних досліджень, в тому числі в наукових школах А.В.Панченко, О.М.Дзядзіо, Г.Ф.Костюка (м.Одеса), В.С.Пальцева, Ф.Г.Зуєва (м.Москва) та інших.

Теоретично, візуально і експериментально підтверджено, що величину мінімально-допустимої надійно-транспортуючої швидкості повітря  $V_{мін.дон}$  в матеріалопроводах визначає швидкість зависання -  $V_{зв}$ .

$$V_{мін.дон} = 10,5 + 0,57 \cdot V_{зв}, \text{ м/с} \quad (6)$$

Для зернопродуктів, швидкість зависання яких орієнтовно в межах 1...15 м/с, мінімально-допустима швидкість транспортування дорівнює 11...20 м/с.

На рис. 2 наведено залежність втрат тиску на вертикальне і горизонтальне пневмотранспортування зернопродуктів –  $H_{мн}$  від швидкості повітря –  $V_{мп}$ .



допустимих швидкостей повітря, що відповідають мінімуму енерговитрат на горизонтальне пневмотранспортування зернопродуктів:

$$V_{мін.г} = 4 + 0,25 \frac{V_c}{\sqrt{g \cdot d}} \quad (7)$$

Рис. 2. Режими пневмотранспортування зернопродуктів в залежності від швидкості повітря [6]: 1 – горизонтальний матеріалопровід; 2 – вертикальний матеріалопровід; I – рух аеросуміші «льотом»; II – рух аеросуміші «днонами» (рис. 3); III – рух аеросуміші «по підстилці»; IV – рух аеросуміші «поршнями»; V – рух аеросуміші «суцільним потоком».

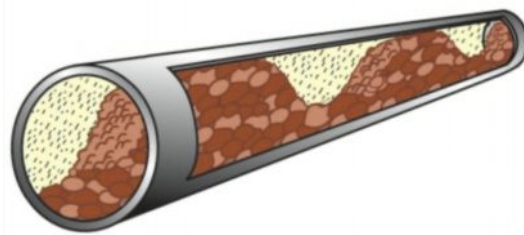


Рис. 3. Транспортування дюнами

Графіки на рис. 2 підтверджують висновки Г.Ф.Зуєва [3], що режими руху аеросуміші в горизонтальних і вертикальних матеріалопроводах суттєво відрізняються і тому цей фактор потрібно враховувати при проектуванні складних трас матеріалопроводів. Із графіків на рис. 2 видно, що швидкість повітря в матеріалопроводі в діапазоні 10...20 м/с є ризиковим для багатьох схем пневмотранспортування зернопродуктів (зерно, борошно, комбікорми). Вирішити цю проблему можна через зміну діаметра матеріалопровода на окремих ділянках траси.

А.В.Ульяницький [6] обґрунтував теоретично і підтвердив експериментально величини мінімально-

де,  $V_c$  – швидкість зависання, м/с;  $d$  – діаметр частинок зерно продукту, м.

Розрахункові мінімально-допустимі швидкості повітря для окремих зерно продуктів є наступними: пшениця – 17,3 м/с, овес – 14,1 м/с, висівки – 10,3 м/с.

Ф.Г. Зуєв [3] на основі теоретичних і експериментальних досліджень рекомендує вибирати мінімально-допустимі швидкості повітря із графіків залежності величин швидкості завалу в залежності від продуктивності і виду матеріалу. Всі ці графіки представляють однаковий характер зв'язку між параметрами процесу і їх можна звести в один (рис. 4).

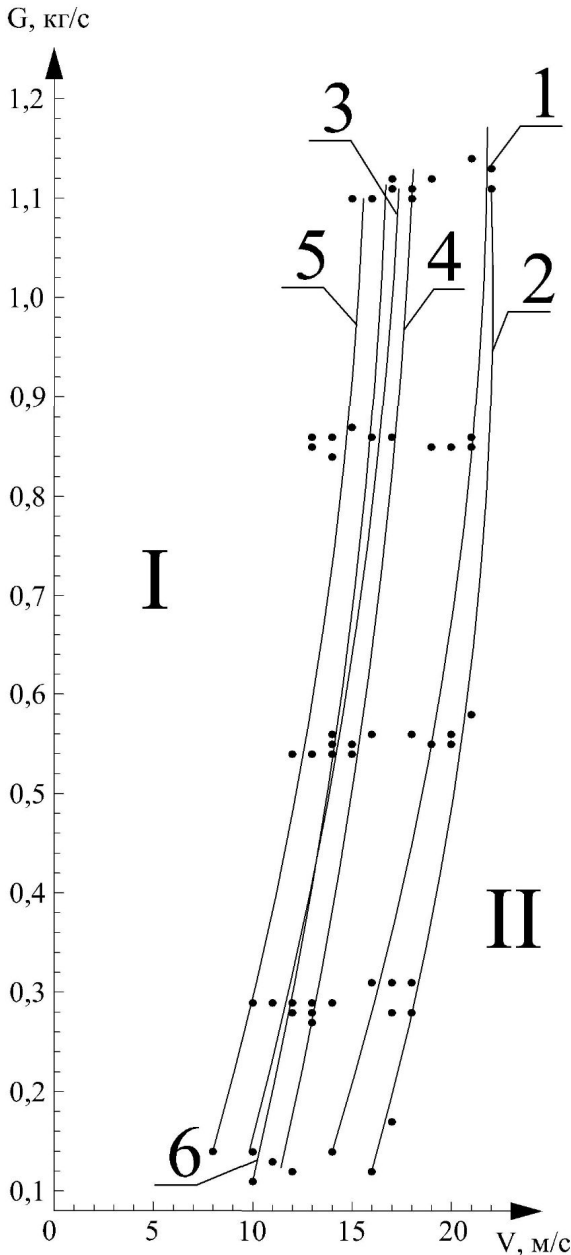


Рис. 4. Залежність мінімально-допустимої швидкості повітря від продуктивності і виду матеріалу [3]: I – область завалу; II – область надійного пневмотранспортування; 1 – транспортування пшениці в горизонтальному матеріалопроводі ( $D = 0,094$  м); 2 – транспортування пшениці у вертикальному матеріалопроводі ( $D = 0,094$  м); 3 – транспортування продуктів I др.с. в горизонтальному матеріалопроводі ( $D = 0,094$  м); 4 – транспортування продуктів I др.с. у вертикальному матеріалопроводі ( $D = 0,094$  м); 5 – транспортування висівок в горизонтальному матеріалопроводі ( $D = 0,094$  м); 6 – транспортування висівок у вертикальному матеріалопроводі ( $D = 0,094$  м).

Вищенаведене підтверджує доцільність і практичну можливість в розрахунках і виборі надійних і енергоощадних режимів пневмотранспортування зернопродуктів приймати швидкість повітря в межах  $V = 20 \pm 2$  м/с. Для борошняних і тонкодисперсних матеріалів в порівнянні із зернистими продуктами запас швидкості повітря необхідно збільшувати із-за коливань в подачі матеріалу.

Реальна швидкість повітря в матеріалопроводах змінюється по довжині траси через зміну тиску повітря і відповідно його густини  $\rho$ .

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}, \text{ кг/м}^3 \quad (8)$$

де,  $P$  і  $T$  – відповідно абсолютний тиск (атм) і температура повітря ( $^{\circ}\text{K}$ );  $R = 29,27$  – газова стала, м/град.

Швидкість повітря в кінці матеріалопроводу  $V_k$  розраховують за формулою:

$$V_k = V_n \frac{101,4 + H_{mn}}{101,4} \quad (9)$$

де,  $V_n$  – початкова швидкість, м/с;  $H_{mn}$  – втрати тиску в матеріалопроводі, кПа.

Витрати повітря приводять до нормальних умов ( $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>,  $t = 20$   $^{\circ}\text{C}$ .  $P_{амм} = 101,4$  кПа):

$$Q_{mn} = 0,785 \cdot D^2 \cdot V_k, \text{ м}^3/\text{с} \quad (10)$$

Серед загальних втрат тиску повітрорудних машин енергоощадним є системи, в яких на процес пневмотранспортування відведено до 80 % втрат тиску:

$$H_{mn} = 0,8H_{nc} \quad (11)$$

Розрахунки втрат тиску для горизонтальних і вертикальних матеріалопроводів проводять по фізичним формулам, але є порівняльні дані ряду експериментальних досліджень, які обґрунтовують можливість застосування єдиної методики таких розрахунків:

$$H_{mn} = H_{cn} (1 + k \cdot \mu) \text{ або } H_{mn} = \Delta H \cdot l = A \cdot V_c^n \cdot \mu^m \quad (12)$$

де,  $H_{cn} = R \cdot l$  - втрати тиску на переміщення чистого повітря, Па;  $k$ ,  $A$ ,  $n$ ,  $m$  – експериментальні коефіцієнти, де

$$k_2 = k_6 = f(D); \mu = \frac{G}{\rho \cdot Q}, l - \text{довжина матеріалопроводу, м.}$$

В діапазоні діючих діаметрів матеріалопроводів ( $D = 50 \dots 250$  мм), їх продуктивності (до  $G = 3$  кг/с) можна пропонувати для вертикального пневмотранспортування вибирати енергоощадні діаметри –  $D_{omm}$ .

$$D_{omm} = 1,1 \cdot 10^2 \cdot V \cdot V_{sim}^{0,2} \cdot G^{0,33} \quad (13)$$

Значення експериментального коефіцієнта  $k$  для швидкості повітря 20 м/с можна вибрати із залежності на рис. 5.

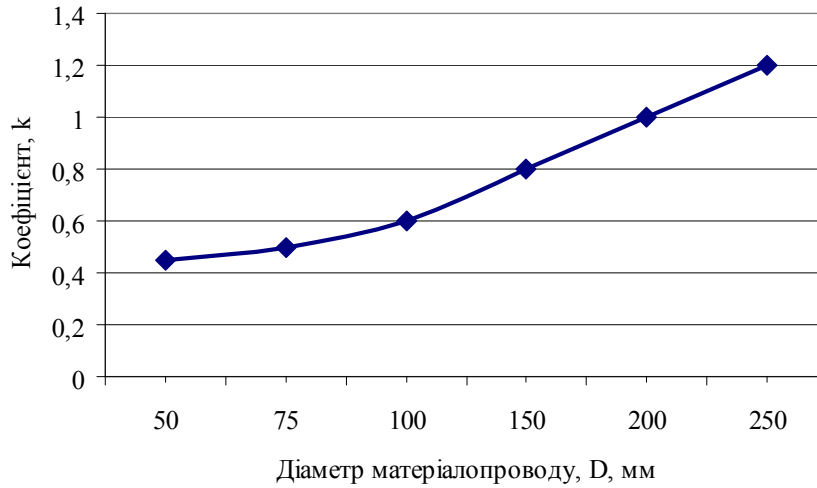


Рис. 5. Залежність коефіцієнта  $k$  від діаметру матеріалопроводу  $D$ .

Для практичного використання можна пропонувати залежність на рис. 6 з розрахунків втрат тиску на пневмотранспортування зерно продуктів при швидкості повітря 20 м/с:

$$H_{mn} = \Delta H \cdot G \cdot l, \text{ Па} \quad (14)$$

де,  $\Delta H = H_{cn} (1 + k \cdot \mu)$  – питомі втрати тиску, Па/т·м;  $G$  – продуктивність, т/год;  $l$  – довжина матеріалопроводу, м.

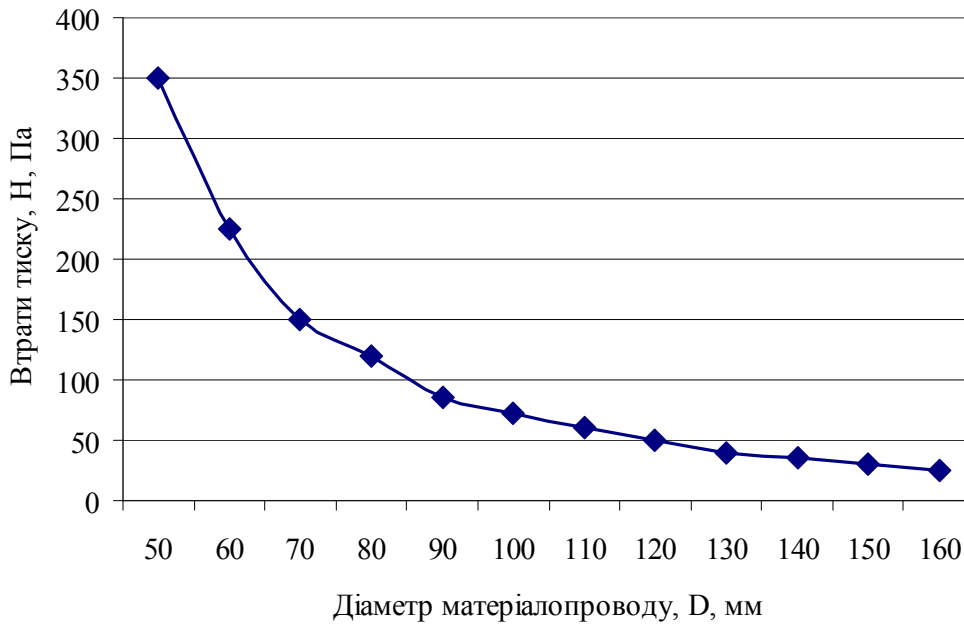


Рис. 6. Залежність питомих втрат тиску від діаметра матеріалопроводу при швидкості повітря 20 м/с, довжині матеріалопроводу, 1 м і продуктивності 1 т/год.

Енергоощадним режимом пневмотранспортування будь-яких пневмосистем є стабілізація швидкості повітря в межах до мінімально-допустимої, тобто 20 м/с.

При використанні пневмосистем з високим тиском повітря необхідно передбачити зміну швидкості повітря по довжині траси і прорахувати довжини кожної із ділянок при використанні заданого тиску повітродувної машини.

Без зміни діаметру матеріалопроводу кінцева швидкість повітря буде відповідно до величини втрат тиску (при  $V_n = 20$  м/с) визначатися за формулою 9.

**Таблиця 4. Розрахункові втрати тиску при початковій швидкості повітря 20 м/с і діаметрі матеріалопроводу 80 мм**

Найменування показника	Значення				
Тиск машини, $H_{mn}$ , кПа	20	40	60	80	100
Кінцева швидкість повітря, $V_k$ , м/с	24	28	32	36	40
Середня швидкість повітря, $V_{cp}$ ,	22	24	26	28	30
Втрати тиску на 1 м довжини матеріалопроводу, $R$ , Па/м	70	80	95	105	120

Із даних табл. 4 можна визначити, що використання режимів із втратами тиску в матеріалопроводі 80 кПа приводить до збільшення енерговитрат до 50 % в порівнянні з втратами тиску 20 кПа:

$$\Delta R = \frac{105 - 70}{70} = \frac{35}{70} \approx 50\%$$

Відповідно до заданого запасу тиску повітродувної машини, що витрачається на пневмотранспортування  $H_{mn}$  можна прирахувати варіанти зменшення енерговитрат в залежності від ступеня зміни діаметру по довжині траси. Ідеальним є варіант використання конусних матеріалопроводів в яких  $V_n = V_k$ .

Практичне розв'язання проблеми в збільшенні діаметра матеріалопровода вздовж траси. Наприклад, довжина траси – 30 п.м., продуктивність – розрахункова, запас тиску 80 кПа, початковий діаметр матеріалопроводу – 100 мм, витрати повітря  $Q = 580 \text{ м}^3/\text{год}$ ,  $\Delta H = 72 \text{ Па/т.м}$ .

$$G = \frac{H_{mn}}{\Delta H \cdot l} \quad (15)$$

За формулою 15 маємо:

$$G = \frac{80000}{72 \cdot 30} = 37 \text{ т/год}$$

Витрати повітря складають  $Q = 800 \text{ м}^3/\text{год}$  при кінцевій швидкості  $V_k = 28 \text{ м/с}$ . Початкові витрати повітря при цьому рівні  $680 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Виходячи із цього можна підібрати більші діаметри матеріалопроводу для другої ділянки витримуючи умови надійного пневмотранспортування:

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 680}{3,14 \cdot 20 \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{2720}{3,14 \cdot 72000}} = 0,11 \text{ м або } 110 \text{ мм}$$

Вкінці другої ділянки швидкість повітря збільшується до  $24 \text{ м/с}$  і відповідно зростають витрати повітря з  $680$  до  $800 \text{ м}^3/\text{год}$ . На третій ділянці діаметр матеріалопровода доцільно збільшити до  $D_3 = 120 \text{ мм}$  при початковій швидкості  $V_n = 20 \text{ м/с}$ , а також відкорегувати довжину ділянки:

$$l_3 = \frac{H_{mn}}{G \cdot \Delta H} = \frac{20000}{37 \cdot 50} = 11 \text{ м}$$

Витрати повітря при цьому будуть становити:

$$Q_3 = V_k \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} = 960 \text{ м}^3/\text{год}$$

Аналогічне збільшення діаметру матеріалопроводу доцільно і на четвертій ділянці:  $D_4 = 130 \text{ мм}$ ,  $Q_3 = 1200 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Довжина окремої ділянки  $l_i$  заданого діаметра від продуктивності  $G$  і запасу тиску  $H_{mn}$  закладеного в розрахунки поділу траси на ділянки:

$$l_i = \frac{H_{mn}}{\Delta H \cdot G}, \text{ м} \quad (16)$$

При використанні матеріалопровода діаметром  $130 \text{ мм}$  і запасі тиску до  $80 \text{ кПа}$  продуктивність траси довжиною  $30 \text{ м}$  становить:

$$G = \frac{H_{mn}}{\Delta H \cdot l} = \frac{80000}{45 \cdot 30} = 60 \text{ т/год}$$

Очевидно, що матеріалопровід перемінного по довжині траси діаметру забезпечує енергоощадний і надійний режим пневмотранспортування сипких матеріалів і його застосування знижує енерговитрати до  $30 \%$ .

Сучасні наукові розробки і техніко-технологічні досягнення в області аеродинаміки, в тому числі пневмотранспорту сипких матеріалів, обумовлюють застосування надійних енергозберігаючих режимів і систем автоматизованого їх забезпечення.

Для аерозольтранспортних систем борошна і комбікормів енергоощадні режими можна створювати і підтримувати за допомогою частотних регуляторів і сопел Лавалю. За допомогою цих пристроїв можна забезпечити стабільний режим пневмотранспортування з мінімально-допустимою швидкістю повітря і підтримувати максимально можливий коефіцієнт корисної дії повітродувної машини.

Оптимального техніко-технологічного ефекту можна досягти комплексним застосуванням:

- регулятора обертів повітродувної машини;
- мінімізації втрат повітря через нещільності, шляхом спеціальних живильників;
- підтримання мінімально-допустимої швидкості повітря в матеріалопроводі по довжині траси;
- стабілізації режимів в паралельно діючих трасах за допомогою сопел Лавалю.

Використання однієї повітродувної машини для одночасного пневмотранспортування по двом і більше трасам є надійним і економічно доцільним при умові використання сопел Лавалю і частотного регулятора обертів ротора.

Експериментально підтверджено, що витрати повітря через сопло Лаваля можна розраховувати за формулою:

$$Q = F_c \cdot V_c, \text{ м}^3/\text{с} \quad (17)$$

де,  $F_c$  – площа перерізу сопла Лавалю,  $\text{м}^2$ ;  $V_c$  – швидкість повітря на виході із сопла Лавалю і залежить від повного тиску  $H_{mn}$  перед соплом

$$V_c = 0,84 \sqrt{H}, \text{ м/с} \quad (18)$$

В табл. 5 наведено результати експериментальних досліджень витрат повітря  $Q$  в залежності від запасу тиску перед соплом Лавалю діаметром  $31 \text{ мм}$  ( $0,031 \text{ м}$ ).

Таблиця 5. Витрати повітря в залежності від запасу тиску перед соплом Лавалю

Найменування показника	Значення				
Тиск перед соплом Лавалю, кПа	25	30	38	45	55
Швидкість повітря, $V_c$ , м/с	133	145	168	178	196
Розрахункова витрата повітря, $Q_p$ , м <sup>3</sup> /год	368	402	465	493	540
Фактична витрата повітря, $Q_{\phi}$ , м <sup>3</sup> /год	329	388	417	461	470

Дані табл. 6 підтверджують можливість регулювання швидкості повітря в матеріалопроводі через підтримання відповідного тиску повітря перед соплом Лавалю. Очевидно, що типорозміри сопел Лавалю підбираємо по витратам повітря окремих матеріалопроводів.

Наші дослідження і аналіз діючих методик вибору пневмотранспортного обладнання для зернопродуктів визначають шляхи суттєвого підвищення їх економічної ефективності та зниження енергозатрат. Перед виробниками транспортно-технологічного обладнання постає задача оснащення аеродинамічних систем приладами автоматизованого управління і стабілізації проектних режимів за витратами повітря і його тиску.

#### Література:

1. Володин Н.П. и др. Справочник по аспирационным и пневмотранспортным установкам /Н.П. Володин, М.Г. Касторных, А.И. Кривошеин. – М.: Колос, 1984. – 288 с.
2. Дзязю А.М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Заготиздат, 1961. – 328 с.
3. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Колос, 1976. – 344 с.
4. Малис А.Я. Пневматический транспорт сыпучих материалов при высоких концентрациях. – М.: Машиностроение, 1969. – 177 с.
5. Снижение энергоемкости мельничных пневмотранспортных установок. – М.: Колос, 1978 с.
6. Уляницький А.В. Обґрунтування мінімальних витрат енергії при горизонтальному пневмотранспорту ванні сипких матеріалів. Автореферат дис. канд. техн. наук. – Одеса, ОТХП, 1993. – 15 с.