

УДК 663.4 (035)

ББК 36.87я2

**В.А. ПІДДУБНИЙ**, доктор технічних наук

**А.А. ПАЛАШ**, інженер

**С.А. БУТ**, кандидат технічних наук

*Національний університет харчових технологій*

## **ПНЕВМО- І ГІДРОТРАНСПОРТ У ВИРОБНИЦТВІ СОЛОДУ**

*У статті наведено інформацію щодо вибору параметрів пневмо- та гідротранспортних систем у виробництві солоду.*

**Ключові слова:** *транспорт, параметри, пропускна здатність, ефективність.*

*В статті приведено інформацію относительно вибору параметров пневмо- и гидротранспортных систем в производстве солода.*

**Ключевые слова:** *транспорт, параметры, пропускная способность, эффективность.*

Використання пневматичного транспорту у виробництві солоду частіше стосується ділянок приймання, очищення і сортування зернової маси. В цих пристроях ячмінь або солод переміщується по трубопроводах потужним повітряним потоком. При цьому для піднімання зерна потрібно забезпечувати швидкість повітря біля 11 м/с, однак для підвищення надійності цей показник збільшують до 20 м/с. До числа переваг пневмотранспорту відносять:

- можливість переміщувати значні маси зерна;
- обмежені площі під обладнання;
- в системі відсутні залишки;
- напрямки переміщення не обов'язково є лінійними.

У разі використання пневматичних транспортних пристроїв зерноприпаси рухаються за рахунок розрідження або підвищення тиску. Для підтримання матеріалу у стані витання швидкість повітря для різних зерноприпасів повинна становити від 8 до 14 м/с. Тиск у системах, які працюють під розрідженням, становить 0,04–0,09, а для напірних систем – 0,11–0,14 МПа.

На рис. 1–3 зображено різні схеми пневмосистем та відокремлювача зерна.

У табл. 1 наведено деякі характеристики зерноприпасів, необхідні для виконання розрахунків.

Таблиця 1

### Характеристики зерноприпасів

Назва зерноприпасів	Насипна маса, кг/м <sup>3</sup>	Кут природного укусу, град.	Швидкість витання, м/с
Ячмінь	550-750	35	8,4-10,8
Сухий солод	-	22	9,0-10,0
Рис	600-800	28	8,6-11,0
Пшениця	700-830	25	8,9-11,5
Жито	650-790	35	8,7-9,9
Просо	700-760	23	9,8-11,8
Кукурудза	720-820	16,3	12,5-14,0

**Розрахунок пневмотранспортних систем.** Вихідними даними на розрахунок пневмотранспорту є масова або об'ємна продуктивність, довжина і конфігурація системи, фізико-хімічні властивості насипного вантажу. Пневматичне транспортування здійснюється у різних системах з різними масовими концентраціями суміші. Так,

в аспіраційних (вентиляційних) системах масова концентрація звичайно вибирається  $\mu = 1$  кг/кг, а за підвищення вакууму досягає  $\mu = 5$ . Залежно від тиску та умов транспортування звичайно приймають  $\mu = 8 \dots 25$ .

На цей вибір впливають ступінь сипучості вантажу, схильність до агрегування, наявність вологи, характеристика трубопроводу. Водночас слід враховувати, що енергетичні витрати пневмотранспорту підвищуються зі зменшенням концентрації аеросуміші.

Швидкість повітря по довжині повітропроводу є змінною. У вакуумних системах і в системах під-

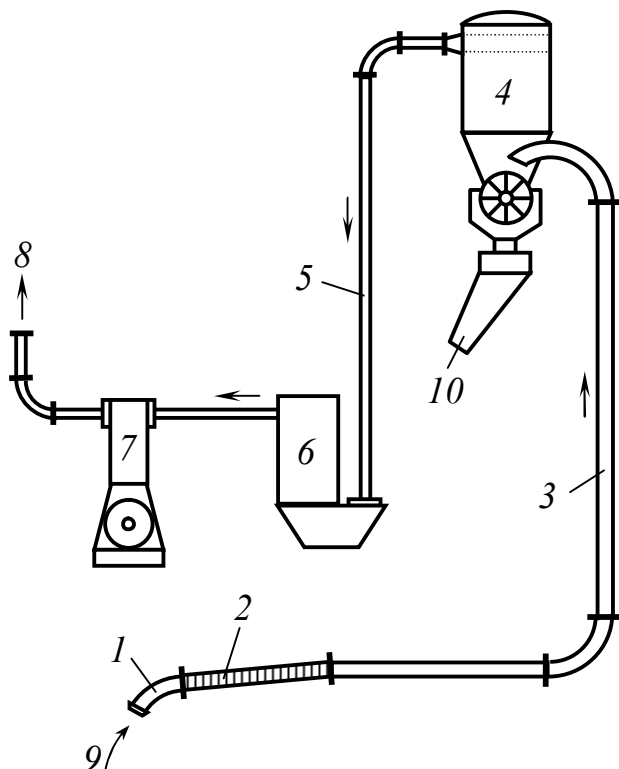


Рис. 1. Засмоктувальна система пневмотранспорту: 1 – засмоктувальний патрубок; 2 – рухомий рукав; 3 – трубопровід; 4 – відокремлювач; 5 – вакуумний трубопровід; 6 – пиловий фільтр; 7 – повітродувна машина; 8 – випуск повітря; 9 – ячмінь; 10 – відбір ячменю

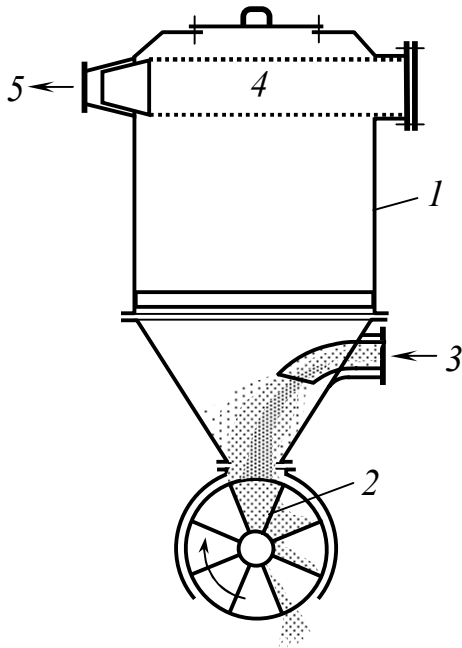


Рис. 2. Відокремлювач зерна: 1 – корпус; 2 – шлюзовий затвор з приводом; 3 – подавання повітря; 4 – ситові патрони; 5 – відокремлення запиленого повітря

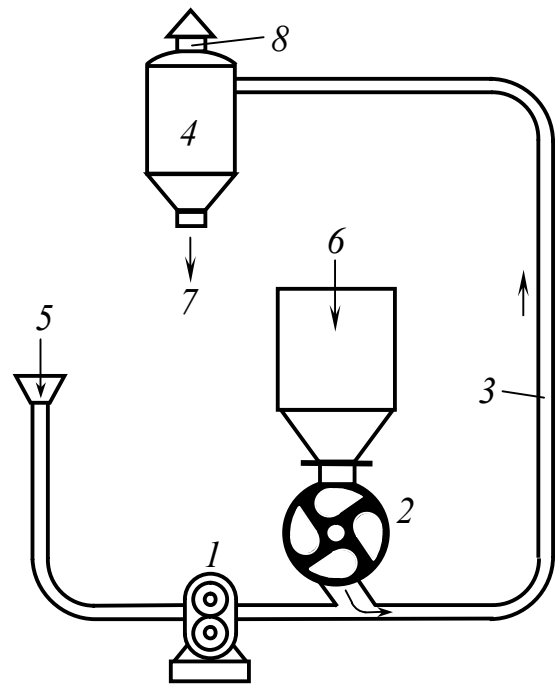


Рис. 3. Нагнітальний пневмотранспортний пристрій: 1 – нагнітальна повітрорудувна машина; 2 – шлюзовий затвор; 3 – транспортний трубопровід; 4 – ємкість для вивантаження; 5 – вхід повітря; 6 – подавання ячменю; 7 – вивантаження ячменю; 8 – випуск повітря до загальної системи аспірації

вищеного тиску вона зростає від початкової позиції транспортування до кінцевої і це супроводжується падінням тиску. Важливо, що здатність потоку переміщувати частинки вантажу зростає прямо пропорційно квадрату швидкості і обернено пропорційно щільності середовища. У зв'язку із цим вакуумні системи і системи підвищеного тиску розраховуються по початковій ділянці трубопроводу.

Критична швидкість (м/с) руху суміші визначається за формулою

$$w_{кр} = C_2 \sqrt{\mu a g D},$$

де  $C_2$  – експериментальна константа;  $\mu$  – масова концентрація суміші,  $\mu = M_3/M_{пов}$ ;  $M_3$  і  $M_{пов}$  – відповідно масові витрати насипного вантажу і повітря, кг/с;  $a$  – співвідношення густин частинок вантажу і повітря,  $a = \frac{\rho_s - \rho_{пов}}{\rho_{пов}}$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $D$  – діаметр трубопроводу, м.

Для пиловидних вантажів приймають  $C_2 = 0,1$ , для зернистих – до 0,3, а для кускових – до 0,35.

Реальна швидкість руху суміші повинна перевищувати критичну, тобто  $w \geq w_{кр}$ .

Опір переміщенню аеросуміші по трубопроводу і тиск (МПа) на його початку збільшується зі збільшенням довжини системи  $L_{\text{тр}}$

$$P_T = 0,1P_0 \left( 1 + \frac{C_3 \mu a g D}{w^2} \right),$$

де  $C_3$  – експериментальна константа,  $C_3 = 0,1 \dots 0,075$ .

Втрати тиску (МПа) за ізотермічного процесу руху чистого повітря

$$P_0 = 0,1 \left( \sqrt{\frac{M_{\text{пов}}^2 R T \lambda L_{\text{тр}}}{F^2 g D \cdot 10^8} + \frac{P_K}{10^2}} - 1 \right),$$

де  $M_{\text{пов}}$  – витрати повітря, кг/с;  $R = 29,3$  – універсальна газова стала;  $T$  – абсолютна температура середовища, К;  $\lambda$  – коефіцієнт опору: для труб з  $D = 150; 175; 200$  мм приймають  $\lambda = 0,016 \dots 0,02; 0,015 \dots 0,018; 0,014 \dots 0,016$ ;  $L_{\text{тр}}$  – приведена довжина трубопроводу з урахуванням еквівалентних відрізків замість заокруглень для  $\mu \geq 10$  (табл. 2);  $F$  – площа поперечного перерізу трубопроводу,  $\text{м}^2$ ;  $P_K = 0,105$  МПа – тиск у кінці трубопроводу.

Таблиця 2

Довжина (м) еквівалентних відрізків

Вантаж	Кут повороту, заокруглення радіусом 0,7-1 м, градус					
	8-12	15	20	30	45	90
Пиловидний	-	-	2	4	6	10
Зернистий	-	-	3	5	8	15
Кусковий	8	10	12	15	25	45

Втрати тиску в трубопроводі спричинені внаслідок опору руху аеросуміші на горизонтальних ділянках, поворотних ділянках, інерційними втратами і втратами на вертикальних переміщеннях. Інерційні втрати тиску визначаються за виразом (МПа)

$$P_d = \frac{w^2}{2} \rho_0 (1 + \beta \mu) \cdot 10^{-5},$$

де  $\beta = 0,35 \dots 0,85$  – показник відносної швидкості руху частинок: для пиловидних вантажів  $\beta = 0,6 \dots 0,85$ ;  $\rho_0$  – густина матеріалу частинок,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Втрати тиску (МПа) на ділянках підйому трубопроводу висотою  $H_{\text{п}}$  (м)

$$P_{\text{п}} = 10^{-3} (1 + \mu) \rho_0 g H_{\text{п}}.$$

Повні витрати тиску

$$P = P_T + P_d + P_{\text{п}} + P_{\text{зав}},$$

де  $P_{\text{зав}}$  – втрати тиску в завантажувальній пристрої.

Витрати повітря ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) на виході з повітродувної машини або вентилятора

$$V_{\text{в}} = kV_{\text{о}},$$

де  $k = 1,10 \dots 1,15$  – коефіцієнт, що враховує втрати повітря через нещільності;  $V_{\text{о}}$  – витрати повітря, необхідні для транспортування вантажу.

Потужність двигуна повітродувної машини

$$N = \frac{A_{\text{м}} V_{\text{пов}}}{1000\eta},$$

де  $A_{\text{м}}$  – теоретична робота повітродувної машини, віднесена до  $1 \text{ м}^3$  засмоктуюваного повітря за ізотермічного стискання,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $\eta = 0,65 \dots 0,85$  – ККД повітродувної машини.

$$A_{\text{м}} = 2303P_{\text{к}} \lg \frac{P_{(\text{п})}}{P_{(\text{к})}},$$

де  $P_{(\text{п})}$  та  $P_{(\text{к})}$  – початковий та кінцевий тиск стискання відповідно.

**Гідравлічний транспорт** доцільно використовувати на ділянках між замоченими чанами і апаратами для пророщування зернової маси.

На пристроях гідравлічного транспорту насипний вантаж переміщується по трубах або жолобах у струмені води. Цю суміш називають пульпою або гідросумішшю, а консистенцію її визначає співвідношення твердих та рідинних компонентів. Використовують самоплинний гідравлічний транспорт, який працює за рахунок гравітаційних сил, і напорний за рахунок використання насосів. До переваг гідравлічного транспорту відносять високу пропускну здатність і можливість мати складну форму траси, нескладність в обслуговуванні та експлуатації, суміщення транспортування з технологічними операціями тощо.

Критична швидкість суміші в гідротранспортуванні турбулентними потоками визначається так:

$$w_{\text{кр}} = n\sqrt{a g D},$$

де  $n = 1 \dots 1,5$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує ступінь перемішування суміші.

$$a = \frac{\rho_{\text{с}} - \rho_{\text{вод}}}{\rho_{\text{вод}}},$$

де  $\rho_{\text{вод}}$  – густина води.

Тонкодисперсні насипні вантажі транспортуються за високих об'ємних концентрацій, які визначаються за виразом:

$$S = \frac{V}{V + V_B} = \frac{\rho_{\text{ван}} - \rho_{\text{вод}}}{\rho - \rho_{\text{вод}}},$$

де  $V$  і  $V_B$  – об'ємні витрати вантажу і води відповідно;  $\rho_{\text{ван}}$ ,  $\rho_{\text{вод}}$  і  $\rho$  – відповідно густина вантажу, води і гідросуміші;  $S = 0,2 \dots 0,5$ .

За вибраного діаметра трубопроводу перевіряється умова

$$w = \frac{4(V + V_B)}{3600 \pi D^2} \geq w_{\text{кр}},$$

якщо  $V$  і  $V_B$  мають розмірність  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Питомі втрати напору (м/м) під час руху суміші

$$H' = kH_0 (1 + aS),$$

де  $k_1 = 1,10 \dots 1,15$  – коефіцієнт, що враховує ступінь перемішування суміші;  $H_0$  – питомі втрати напору під час руху чистої води зі швидкістю, що дорівнює швидкості суміші, м/м

$$H_0 = \lambda w^2 / Dg,$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору.

Якщо трубопровід має вертикальні ділянки висотою  $l_H$ , то потрібний тиск збільшується на величину статичного напору на ділянках піднімання або зменшується на ділянках опускання, тому

$$H_{\text{втр}} = \pm l_H.$$

Місцеві втрати напору  $H_M$  звичайно приймають на рівні 5 % від загальних втрат на прямолінійних ділянках. Повний напор системи визначають з виразу

$$H_{\text{розр}} = H_{\text{втр}} + H_M.$$

За напором і об'ємними витратами визначається потужність двигуна насоса

$$N = \frac{k_3 H_{\text{розр}} (V + V_B)}{1000 \eta}, \text{ кВт},$$

де  $H_{\text{розр}}$  – в Па;  $(V + V_B)$  – в  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $k_3 = 1,1 \dots 1,2$  – коефіцієнт запасу;  $\eta = 0,7 \dots 0,9$  – ККД насосного агрегату.

**Безнапорний транспорт.** Пристрої для самоплинного транспортування гідросумішей виконуються у вигляді трубопроводів, відкритих лотків, каналів. Формула Шезі, якою звичайно користуються, має вигляд

$$w = C \sqrt{Ri} \quad \text{або} \quad i = \frac{w^2}{C^2 R},$$

де  $w$  – швидкість струменя потоку, м/с;  $C$  – коефіцієнт Шезі;  $R$  – гідравлічний радіус, м;  $i$  – ухил трубопроводу, жолоба тощо.

Коефіцієнт Шезі  $C$  залежить від шорсткості поверхні й гідравлічного радіуса  $R$ . Гідравлічним радіусом називають відношення площі перерізу струменя до змоченого периметру, і цей показник залежить від форми перерізу жолоба і співвідношення його розмірів. Так, для заповненого гідросумішшю перерізу у вигляді напівкруга діаметром  $D$  гідравлічний радіус

$$R = \frac{\pi D^2}{8} \cdot \frac{2}{\pi D} = \frac{D}{4}.$$

Для відкритого жолоба прямокутного перерізу шириною  $B$  і висотою  $h$  гідравлічний радіус дорівнює

$$R = \frac{Bh}{B + 2h}.$$

За запропонованого співвідношення  $B/h = 3 \dots 4$   $R = (0,60 \dots 0,66)h$ .

Аналогічним чином визначаються значення  $R$  для будь-якої іншої форми поперечного перерізу. Значення коефіцієнта  $C$  залежно від шорсткості поверхні  $\lambda$  і гідравлічного радіуса  $R$  наведено в табл. 3.

Таблиця 3

**Значення коефіцієнта  $C$  залежно від гідравлічного радіуса  $R$  і відносної шорсткості  $\lambda$**

$\lambda \backslash R, \text{ м}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,010	70	75	80	90	95
0,012	60	65	70	75	78
0,015	45	50	55	58	60
0,020	30	35	38	40	43

Значення коефіцієнтів шорсткості  $\lambda$  залежно від типу поверхні жолоба наведено нижче.

Ретельно обстругані і добре підігнані дошки; штукатурка з чистого цементу	- 0,010
Нестругані, добре підігнані дошки, чисті водосточні труби, гладенький бетон	- 0,012
Цегляна кладка, тесаний камінь	- 0,015
Бутова кладка, канали в щільній землі, канали в щільному ґравії	- 0,020

Порядок розрахунку безнапорного транспорту такий: за заданим об'ємом вантажів  $V'$  ( $\text{м}^3/\text{год}$ ) за викладеними вище рекомендаціями приймають концентрацію гідросуміші  $S$  і знаходять об'ємну продуктивність з гідросуміші  $V_r$  ( $\text{м}^3/\text{год}$ ). Вибирають швидкість гідросуміші  $w$ , рівну або трохи більшу за критичну; прийнявши форму і співвідношення розмірів перерізу каналу за величинами  $V_r$  та  $w$ , визначають площу, геометричні розміри і гідравлічний радіус  $R$  з урахуванням коефіцієнта шорсткості  $\gamma$   $R$  знаходять коефіцієнт Шезі  $C$  і необхідний ухил жолоба.

**Висновки.** Пневматичні і гідравлічні системи транспортування зернової маси є важливими складовими виробництва. При цьому зазначені швидкості повітряних потоків 20 м/с знаходяться на межі економічно доцільних у зв'язку з втратами на подолання опорів, які пропорційні квадрату швидкості. Разом з тим обмеження по швидкості супроводжується меншим рівнем руйнування зернівок за взаємодії їх з елементами траси.

Використання гідротранспорту на ділянках між замочними чанами і апаратами для пророщування забезпечує підтримання досягнутої вологості ячменю 46–48 %, що відповідає технологічним вимогам.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Соколенко А.І., Українець А.І., Піддубний В.А. Транспортно-технологічні системи пивзаводів. К.: АртЕк. – 2002. – 304 с.
2. Кунце В. Технология солода и пива. Перекл. з нім. – С.-Петербург, 2001. – 912 с.
3. Домарецький В.А. Технология солоду та пива. – К.: Урожай, 1999. – 542 с.
4. Колотуша П.В. Технология солоду. – К.: Ін-тут системн. дослідж. освіти, 1993. – 136 с.