

Визначення коефіцієнта опору при русі кормоповітряної суміші у пневмокормороздавачі з дозуванням у трубі

Дем`яненко В.Я., ст.викл.

Болтянський Б.В., к.т.н.

Чаплинський А.П., асист.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.(0619) 42-24-36, 42-05-70

Анотація – у статті розглянуті питання теоретичного визначення коефіцієнта опору K при русі кормоповітряної суміші у пневмороздавачі з дозуванням у трубі.

Ключові слова. Коефіцієнт опору, кормоповітряна суміш, сила тиску, дотичні напруження, градієнт швидкості, поверхня тертя.

Постановка проблеми. Загально відомо, що роздавання кормів є однією з найбільш трудомістких операцій на фермах ВРХ (40%). Існуючі системи роздачі кормів не відповідають вимогам ні по технології ні по зоотехнічним нормам. Застосування пневмотранспортних систем в даному випадку є найбільш доцільним. Але їх використання знаходиться ще на недостатньому рівні, а питання транспортування подрібнених стеблових кормів у пневмопроводі кормороздавача потребують додаткових досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз публікацій з даної проблеми показує, що питання руху кормоповітряної суміші у пневмопроводі кормороздавача ще недостатньо досліджені і потребують теоретичного обґрунтування. Однією з важливих проблем, якій приділялось недостатньо уваги є визначення коефіцієнта опору основного розрахункового параметру, що враховує витрати енергії потоку на переміщення транспортуючого матеріалу.

Формування цілей статті. Метою даної статті є теоретичне визначення коефіцієнта опору при русі кормоповітряної суміші у пневмокормороздавачі з дозуванням у трубі.

Основна частина. Коефіцієнт опору K – основний розрахунковий параметр, який враховує витрати енергії потоку на переміщення матеріалу. Значення цього коефіцієнта залежить від якостей транспортуемого матеріалу і його визначення складає предмет цих досліджень.

В даному випадку стосовно до пневмотранспортування подрібнених стеблових кормів була використана теорія Л.О. Горцокаляна [1]. При здійсненні руху суміші в горизонтальному трубопроводі пневмокормороздавача на довжині $l_{тр}$ (рис. 1) втрати тиску визначаються різницею тиску в перерізах I-I і II-II [2]

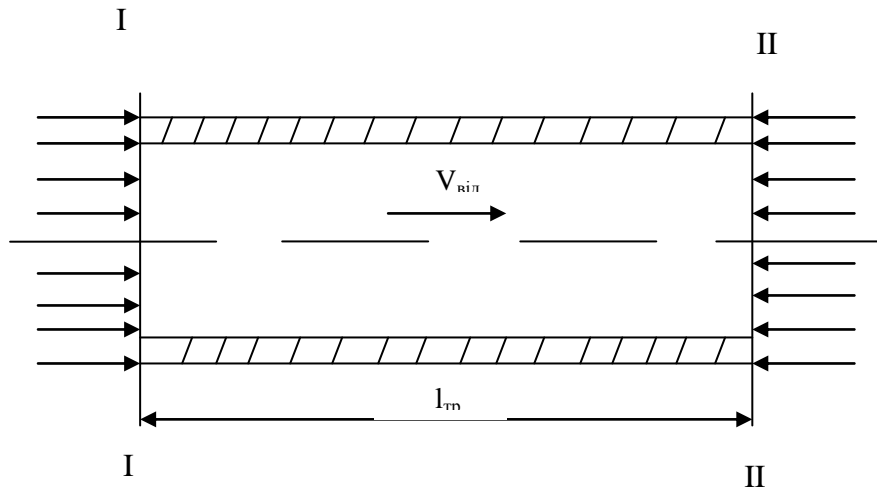


Рисунок 1 – До визначення коефіцієнту опору К.

$$H = H_1 - H_2 = H_n \left(1 + k\mu \right) = H_n + H_n + H_n \cdot k\mu, \quad (1)$$

де H_n – втрати тиску по всій довжині трубопроводу пневмокормороздавача;
 k – коефіцієнт, який враховує додаткові втрати тиску від наявності транспортуючого матеріалу в повітряному потоці;
 μ – коефіцієнт концентрації кормосуміші.

$$H_n = \lambda \frac{l_{тр}}{d_{тр}} \cdot \frac{\rho_n \cdot V_{пов}^2}{2}, \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт повітряних втрат;
 $d_{тр}$ – діаметр трубопроводу пневмокормороздавача;
 ρ_n – щільність повітря у пневмокормороздавачі;
 $V_{пов}$ – швидкість повітря у пневмокормороздавачі.

Без урахування втрат на тертя повітря об стінки трубопроводу, сила тиску повітряного потоку, яка дорівнює $H \cdot A_{тр}$, повинна врівноважуватись силами лобового тиску і дотичних напружень, що виникають при обтіканні рухаючих часток корму

$$H_n \cdot k\mu A_{тр} = F_l + F_{тер}, \quad (3)$$

де $A_{тр}$ – розглядаємий переріз трубопроводу;
 F_l – сила лобового тиску;
 $F_{тер}$ – сила тертя при русі часток корму в повітряному потоці.

Сила лобового тиску дорівнює

$$F_l = C \cdot A_s \frac{V_{від}^2}{2} \cdot \rho_{пов}, \quad (4)$$

де A_s – міделевий переріз часток корму;
 c – коефіцієнт опору розриву часток корму;
 $V_{від}$ – відносна швидкість повітря

$$V_{від} = V_ч - V_п, \quad (5)$$

де $V_ч$ – швидкість переміщення часток корму.

Сили тертя, які виникають при русі часток корму в потоці повітря, пропорційні градієнту швидкості у поверхні цих часток. Припускаючи, що градієнт буде лінійним, отримаємо

$$F_{\text{тер.}} = \eta \cdot S_{\text{ч}} \cdot \frac{V_{\text{від}}}{y_1}, \quad (6)$$

де η – коефіцієнт пропорційності – динамічний коефіцієнт в'язкості;

$S_{\text{ч}}$ – поверхня тертя часток корму;

y_1 – відстань від поверхні часток корму до рухомого шару повітря (товщина граничного шару).

Тоді,

$$H_{\text{п}} \cdot k \cdot \mu \cdot A_{\text{тр}} = C \cdot A_{\text{с}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \frac{V_{\text{від}}^2}{2} + \eta \cdot S_{\text{ч}} \cdot \frac{V_{\text{від}}}{y_1}. \quad (7)$$

Звідки,

$$K = C \frac{V_{\text{від}}^2 \cdot A_{\text{с}} \rho_{\text{п}}}{2\mu \cdot H_{\text{п}} \cdot A_{\text{тр}}} + \frac{\eta \cdot V_{\text{від}} \cdot S_{\text{ч}}}{y_1 \cdot \mu \cdot H_{\text{п}} \cdot A_{\text{тр}}}. \quad (8)$$

Положення часток корму у повітряному потоці повинні визначати діючі на них зусилля.

У зв'язку з цим розглянемо два варіанти положення часток корму в повітряному потоці:

- 1) частки розташовані повздовжньою віссю паралельно вісі трубопроводу кормороздавача;
- 2) повздовжня вісь часток корму розташована перпендикулярно вісі трубопроводу.

Перший варіант. Частка корму розташована віссю паралельно вісі трубопроводу.

У цьому випадку площа поперечного перерізу частки корму, на яку діють сили лобового тиску повітряного потоку, дорівнює

$$A_{\text{с}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \cdot n_{\text{ч}}. \quad (9)$$

Поверхня тертя дорівнює циліндричній поверхні часток корму

$$S_{\text{пч}} = \pi \cdot d_{\text{ч}} \cdot l_{\text{ч}} \cdot n_{\text{ч}}, \quad (10)$$

де $n_{\text{ч}}$ – кількість часток корму в даному об'ємі повітря;

$d_{\text{ч}}$ – діаметр часток.

Значення $n_{\text{ч}}$ визначається через коефіцієнт масової концентрації суміші μ .

Об'єм повітря у трубі діаметром $d_{\text{тр}}$ і довжиною $l_{\text{тр}}$ дорівнює

$$V = \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}{4} \cdot l_{\text{тр}}. \quad (11)$$

Маса цього об'єму повітря дорівнює

$$m_{\text{пов}} = V \cdot \rho_{\text{к}} = \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4} \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{к}}, \quad (12)$$

де $\rho_{\text{к}}$ – об'ємна маса частки корму.

Загальна маса часток корму, які знаходяться в даному об'ємі повітря при даній концентрації кормоповітряної суміші

$$m_k = \mu \cdot m_{\text{пов}} = \mu \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4} \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов}}. \quad (13)$$

Маса однієї частки дорівнює

$$m_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}. \quad (14)$$

Кількість часток корму в даному об'ємі

$$n_{\text{ч}} = \frac{m_k}{m_{\text{ч}}} = \frac{\mu \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4} \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{\frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}} = \frac{\mu \cdot d_{\text{тр}}^2}{d_{\text{ч}}^2} \cdot \frac{l_{\text{тр}}}{l_{\text{ч}}} \cdot \frac{\rho_{\text{пов.}}}{\rho_{\text{к}}}. \quad (15)$$

Підставляючи значення $n_{\text{ч}}$ у формули (9) і (10), отримаємо

$$A_s = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2 \cdot \mu \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{4 \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\mu \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}}; \quad (16)$$

$$S_{\text{п.ч}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ч}} \cdot l_{\text{тр}} \cdot \mu \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{d_{\text{ч}}^2 \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}} = \frac{\pi \cdot \mu \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}}. \quad (17)$$

Підставляючи значення A_s , $S_{\text{п.ч}}$ і $A_{\text{тр}}$ у рівняння (8), отримаємо

$$K = C \frac{V_{\text{від}}^2 \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{2H_{\text{п}} \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}} + \eta \frac{4V_{\text{від}} \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{y_1 \cdot H_{\text{п}} \cdot d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}}. \quad (18)$$

Втрати тиску повітря визначаються залежністю

$$H_{\text{п}} = \lambda \frac{l_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}}} \cdot \frac{V_{\text{пов}}^2}{2} \cdot \rho_{\text{п}}. \quad (19)$$

Підставляючи значення $H_{\text{п}}$ у формулу (18), отримаємо

$$K = C \frac{d_{\text{тр}}}{\lambda \cdot l_{\text{ч}}} \cdot \frac{V_{\text{від}}^2}{V_{\text{пов}}^2} \cdot \frac{\rho_{\text{пов.}}}{\rho_{\text{к}}} + \eta \frac{8 \cdot V_{\text{від}} \cdot d_{\text{тр}}}{y_1 \cdot d_{\text{ч}} \cdot \lambda \cdot V_{\text{к}}^2};$$

$$K = \frac{d_{\text{тр}} \cdot V_{\text{від}}}{\lambda \cdot V_{\text{пов}}^2 \cdot \rho_{\text{к}}} \left(C \frac{V_{\text{від}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{l_{\text{ч}}} + \eta \frac{8}{y_1 \cdot d_{\text{ч}}} \right). \quad (20)$$

При невеликих розмірах транспортуємих часток корму і невеликому значенні відносної швидкості $V_{\text{від}}$, коефіцієнт опору K пропорційний в'язкості середовища і градієнту швидкості. В цьому випадку визначення коефіцієнта опору K треба проводити тільки з урахуванням сил в'язкості

$$K = 8 \cdot \eta \cdot V_{\text{від}} \frac{d_{\text{тр}} \cdot V_{\text{від}}}{y_1 \cdot d_{\text{ч}} \cdot \lambda \cdot V_{\text{пов}}^2 \cdot \rho_{\text{к}}}. \quad (21)$$

При пневматичному транспортуванні частки корму рухаються у турбулентному потоці, де значенням в'язкості можна знехтувати [3]. В цьому випадку тертя не здійснює помітного впливу, тоді значення K визначиться таким чином

$$K = C \frac{d_{\text{тр}} \cdot V_{\text{від}}^2 \cdot \rho_{\text{пов.}}}{\lambda \cdot l_{\text{ч}} \cdot V_{\text{пов.}}^2 \cdot \rho_{\text{к}}}. \quad (22)$$

Визначимо значення коефіцієнта с. При витанні тіла має місце рівняння ваги і аеродинамічної сили, тоді

$$m_{\text{ч}} \cdot g = c \cdot A_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{пов.}} \frac{V_s^2}{2}, \quad (23)$$

де V_s – швидкість витання часток корму

$$C = \frac{2 \cdot m_{\text{ч}} \cdot g}{A_{\text{ч}} \cdot V_s^2 \cdot \rho_{\text{пов.}}}, \quad (24)$$

де $A_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4}$ - площа перерізу частки корму.

Тоді,

$$C = \frac{2 \cdot m_{\text{ч}} \cdot g}{\frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \cdot V_s^2 \cdot \rho_{\text{пов.}}}; \quad (25)$$

$$K = \frac{2 \cdot m_{\text{ч}} \cdot g \cdot d_{\text{тр}}}{\frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \cdot V_s^2 \cdot \lambda \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{пов.}}} \left(\frac{V_{\text{від}}}{V_{\text{пов.}}} \right)^2. \quad (26)$$

Враховуючи, що $m_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}$, отримаємо

$$K = \frac{2 \cdot g \cdot d_{\text{тр}}}{\lambda \cdot V_s^2} \left(\frac{V_{\text{від}}}{V_{\text{пов.}}} \right)^2. \quad (27)$$

Другий варіант. В цьому випадку частки корму розташовані повздовжньою віссю перпендикулярно осі трубопроводу пневмокормороздавача. Площа поперечного перерізу часток корму, на яку будуть діяти сили лобового тиску дорівнює

$$A_s = d_{\text{ч}} \cdot l_{\text{ч}} \cdot n_{\text{ч}}. \quad (28)$$

Поверхня тертя дорівнює

$$S_{\text{пч}} = 2 \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} l_{\text{ч}} \cdot n_{\text{ч}}. \quad (29)$$

Підставивши значення $n_{\text{ч}}$ у формулу (28), отримаємо

$$A_s = d_{\text{ч}} \cdot l_{\text{ч}} \cdot \mu \frac{d_{\text{тр}}^2 \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{d_{\text{ч}}^2 \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}} = \frac{d_{\text{тр}}^2 \cdot \mu \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}}. \quad (30)$$

Значення коефіцієнта К отримаємо згідно виразу

$$K = C \frac{4 \cdot V_{\text{від}}^2 \cdot d_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов.}}}{\pi \cdot d_{\text{ч}} \cdot \lambda \cdot V_{\text{пов.}}^2 \cdot \rho_{\text{к}}} + \eta \frac{4 V_{\text{від}} \cdot d_{\text{тр}}}{y_1 \cdot \lambda \cdot V_{\text{пов.}}^2 \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}};$$

$$K = \frac{4 \cdot V_{\text{від}} \cdot d_{\text{тр}}}{\lambda \cdot V_{\text{пов}}^2 \cdot \rho_{\text{к}}} \left(C \frac{V_{\text{від}} \cdot \rho_{\text{пов}}}{\pi \cdot d_{\text{ч}}} + \eta \frac{1}{y_1 \cdot l_{\text{ч}}} \right). \quad (31)$$

При невеликих розмірах часток корму і невеликій відносній швидкості переважають сили в'язкості, тоді

$$K = \eta \frac{4 \cdot V_{\text{від}} \cdot d_{\text{тр}}}{y_1 \cdot \lambda \cdot V_{\text{пов}}^2 \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}}. \quad (32)$$

Якщо частки корму будуть рухатися в турбулентному потоці, то значення коефіцієнта опору K буде дорівнювати

$$K = C \frac{4 \cdot V_{\text{від}}^2 \cdot d_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пов}}}{\pi \cdot d_{\text{ч}} \cdot \lambda \cdot V_{\text{пов}}^2 \cdot \rho_{\text{к}}}. \quad (33)$$

Величина коефіцієнта C дорівнює

$$C = \frac{2 \cdot m_{\text{ч}} \cdot g}{A_{\text{ч}} \cdot V_{\text{s}}^2 \cdot \rho_{\text{пов}}}$$

Для такого положення часток корму $A_{\text{ч}} = d_{\text{ч}} \cdot l_{\text{ч}}$.

Тоді,

$$C = \frac{2 \cdot m_{\text{ч}} \cdot g}{d_{\text{ч}} \cdot l_{\text{ч}} \cdot V_{\text{s}}^2 \cdot \rho_{\text{пов}}}. \quad (34)$$

Після підставлення значення коефіцієнта C , отримаємо

$$K = \frac{8 \cdot m_{\text{ч}} \cdot g \cdot V_{\text{від}}^2 \cdot d_{\text{тр}}}{\pi \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot l_{\text{ч}} \cdot \lambda \cdot V_{\text{пов}}^2 \cdot \rho_{\text{к}} \cdot V_{\text{s}}^2}. \quad (35)$$

Величину $m_{\text{ч}}$ можна представити виразом

$$m_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \cdot l_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{к}}.$$

Тоді, коефіцієнт опору K визначиться як

$$K = \left(\frac{V_{\text{від}}}{V_{\text{пов}}} \right)^2 \frac{2 \cdot g \cdot d_{\text{тр}}}{V_{\text{s}}^2 \cdot \lambda}. \quad (36)$$

Висновки. Таким чином, розрахункове значення коефіцієнта опору K для різного положення часток корму у повітряному потоці (для стебел, повздожня вісь яких розташована паралельно і перпендикулярно потоку) дорівнює

$$K = \left(\frac{V_{\text{від}}}{V_{\text{пов}}} \right)^2 \frac{2 \cdot g \cdot d_{\text{тр}}}{\lambda \cdot V_{\text{s}}^2},$$

де V_{s} – швидкість витання при розташуванні повздожньої осі часток корму паралельно і перпендикулярно потоку повітря.

Отриманий вираз для коефіцієнта опору K характеризує рух різноманітних матеріалів. Для сипучих матеріалів, коли завантаження проходить рівномірно, величина $\left(\frac{V_{\text{від}}}{V_{\text{пов}}} \right)^2$ і V_{s}^2 у формулі (36) має постійне

значення. При транспортуванні кормосуміші, коли у трубопроводі пневмокормороздавача одночасно з сипучими матеріалами завантажуються стеблові частки корму, які поступають комками і викликають зміну швидкості повітряного потоку, величина відношення $\left(\frac{V_{\text{від}}}{V_{\text{пов}}}\right)^2$ і швидкість витання V_s^2 теж змінюються. Визначити ці величини аналітичним шляхом в такому випадку складно, тому їх визначають експериментально.

Література

1. Горцакалян Л.О. Исследование процесса транспортирования фрезерного торфа пневматическим способом. /Л.О. Горцакалян// Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – Москва, 1961г.
2. Дем'яненко В.Я. Умови транспортування стеблових кормів у пневмопроводі / В.Я. Дем'яненко // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь; ТДАТА, 2001. – Вип.1 т.18.
3. Коба В.Г. Теоретическое исследование процесса перемещения кормовых масс по трубам сжатым воздухом / В.Г. Коба, В.В. Потапов// Труды СИМСХ, Саратов, 1970г. Вип.46.