

## К ВОПРОСУ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СИСТЕМ ПНЕВМОТРАНСПОРТА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

При транспортировании смеси воздуха с частицами материала можно наблюдать несколько схем движения двухфазного потока.

Движение двухфазного потока "воздух — частицы твердого сыпучего материала" можно представить в виде нескольких схем (табл. 1). Более точное разграничение указанных областей невозможно из-за постоянного перехода движения из одного вида в другой.

Чаще всего сыпучий материал транспортируется по схеме 2 движения двухфазного потока (табл. 1). Для этой схемы характерно неравномерное распределение частиц транспортируемого материала по сечению трубопровода, что приводит к неустойчивому движению твердой фазы потока.

В этом случае подавляющее большинство исследователей пневматического транспорта (1—4 и т.д.) для аэродинамического расчета трубопровода применяют метод, предложенный Гастерштадтом, по которому потери давления зависят от концентрации материала и опытного коэффициента  $K$ ,

$$H_{\text{тр}} = \lambda \frac{\bar{w}_B^2}{2g} \frac{1}{D} \gamma_B (1 + K\mu), \quad (1)$$

где  $\lambda$  — безразмерный коэффициент сопротивления трению;  $l$  — длина трубопровода, м;  $D$  — диаметр трубопровода, мм;  $\bar{w}_B$  — средняя скорость движения воздуха по сечению трубопровода, м/с;  $\gamma_B$  — удельный вес воздуха, Н/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\mu$  — массовая концентрация материала,

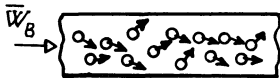
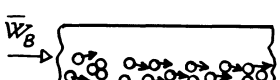
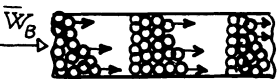
кг/кг;  $\lambda \frac{\bar{w}_B^2}{2g} \frac{1}{D} \gamma_B$  — потеря давления при перемещении несущей среды,

Па;  $H_{\text{тр}}$  — потеря давления при перемещении единичного дисперсоида, Па;  $K$  — опытный коэффициент.

В выражении (1) наиболее сложным является определение значения опытного коэффициента  $K$ . Установлено, что  $K$  — сложная функция, зависящая от многих факторов: вида транспортируемого материала, размера и формы частиц, скорости и характера движения, крутки потока, диаметра трубопровода, концентрации материала, числа Рейнольдса и т.д. [1—4 и др.].

Используя данные экспериментов по определению опытного коэффициента  $K$ , входящего в формулу Гастерштадта, Л.С. Клячко теоретически определил величину этого коэффициента:

Т а б л и ц а 1. Схемы движения двухфазного потока "воздух-твердые частицы сыпучего материала"

Схемы движения	Вид движения твердой фазы	Характеристика движения твердой фазы	Характеристика движения по показаниям приборов	Скорость движения воздуха	Значение коэффициента К
1	Устойчивое транспортирование	Равномерное распределение по сечению трубопровода 	Отсутствие пульсации	$\bar{w}_B = (1,5 - 2,0) w_S$	$K = 1$ $H_{тр} = H_B' (1 + \mu)$
2	Переходное движение	Неравномерное распределение по сечению трубопровода (в нижней части концентрация больше, чем в верхней) 	Пульсация	$\bar{w}_B \approx 1,5 w_S$	$K = \frac{2gD}{\lambda \bar{w}_B^2} \beta$ , или [1,2,4] $H_{тр} = H_B (1 + K\mu)$
3	Неустойчивое транспортирование	Частичное выпадение из потока с последующим ее передвижением по дну трубопровода (перемещение при подстилающем слое) 	Сильная пульсация	$1,5 > \bar{w}_B > w_S$	Резкое увеличение К с уменьшением скорости. Значение К определяется ориентировочно [1-4]
4	Невозможность транспортирования	Закупорка трубопроводов (возможно перемещение поршнями) 	Отсутствие показаний	$\bar{w}_B \ll w_S$	Значение коэффициента К возрастает до бесконечности

$$K = \frac{2gD}{\lambda \bar{w}_B^2} \frac{\bar{w}_m^2}{w_s^2} = \frac{2gD}{\lambda \bar{w}_B^2} \beta, \quad (2)$$

где  $\beta = \frac{\bar{w}_m^2}{w_s^2}$  – отношение квадрата средней относительной скорости несущей среды к квадрату скорости витания частиц материала (с достаточной для практики достоверностью можно принять в среднем для всей сети  $\beta=1$ ).

Выражение (2) наиболее полно отражает физический смысл и величину  $K$  для данной схемы движения двухфазного потока.

С учетом (2) общую потерю давления можно определить по зависимости [3]

$$H_{Tr} = H_B (1 + K\mu) = H_B \left(1 + \frac{2gD}{\lambda \bar{w}_B^2} \beta\mu\right). \quad (3)$$

Как видно из выражения (2), значение  $K$  зависит от  $\bar{w}_B$  и при определенном значении  $\bar{w}_B$  наступает режим устойчивого транспортирования материала, т.е. движение двухфазного потока, описываемое схемой 1 (табл. 1). Данная схема движения наиболее совершенная и экономичная, так как частицы материала равномерно распределяются во взвешенном состоянии по сечению трубопровода. Это значительно уменьшает износ трубопроводов систем пневмотранспорта от воздействия частиц транспортируемого материала, а также исключает возможность закупорки трубопроводов твердой фазой.

Обобщенные результаты аналитического и экспериментального исследований автора позволили установить качественную картину влияния величины концентрации материала на количество транспортирующего воздуха: при переходе от транспорта чистого воздуха к транспорту двухфазного потока в системе, работающей при неизменной частоте вращения вентилятора, с увеличением концентрации материала скорость транспортирующего воздуха уменьшается. Последнее вызывает уменьшение аэродинамического сопротивления вентиляционной сети. Одновременно увеличивается удельный вес транспортируемого двухфазного потока. Это способствует увеличению аэродинамического сопротивления вентиляционной сети. В результате величина аэродинамического сопротивления вентиляционной сети остается практически неизменной.

Проведенный анализ позволил установить закономерность, согласно которой для пневмотранспортных вентиляционных установок при  $n=\text{const}$  с увеличением (уменьшением) концентрации материала уменьшается (увеличивается) расход транспортирующего воздуха. При этом произведение измененного относительного расхода  $V_m/V_B$  на  $(1 + \mu)$  – величина постоянная и равна единице, аэродинамическое сопротивление при данном режиме работы сохраняет постоянство.

Установленную закономерность для устойчивого режима движения двухфазного потока "воздух— твердые частицы сыпучего материала" (схема 1 в табл. 1) можно описать зависимостью

$$\left(\frac{V_m}{V_B}\right)^n R_B (1+\mu) l = R_B l \quad (4)$$

$$\text{или } \left(\frac{\bar{w}_m}{\bar{w}_B}\right)^n R_B (1+\mu) l = R_B l, \quad (4')$$

где  $V_B$  и  $V_m$  — соответственно количество чистого транспортирующего воздуха и измененное количество воздуха, содержащее твердые примеси, м<sup>3</sup>/ч;  $n$  — показатель степени, равный 2 для режима движения потока с сильно развитой турбулентностью, и  $n=1,75$  для режима движения потока со слабо развитой турбулентностью;  $R_B$  — удельное аэродинамическое сопротивление при движении по трубопроводу чистого воздуха в количестве  $V_B$ , Па/м;  $\left(\frac{V_m}{V_B}\right)^n R_B$  — удельное аэродинамическое сопротивление при движении по трубопроводу чистого воздуха в количестве  $V_m$ , Па/м;  $\left(\frac{V_m}{V_B}\right)^n R_B (1+\mu)$  — удельное гидравлическое сопротивление при движении по трубопроводу двухфазного потока с учетом массовой концентрации материала, Па/м.

В уравнении (4) член  $\left(\frac{V_m}{V_B}\right)^n R_B$  представляет собой удельное аэродинамическое сопротивление трубопровода при движении чистого воздуха в количестве  $V_m$ , и этот член можно представить как величину  $R_B^1$ . Произведение  $R_B^1 (1+\mu)$  есть не что иное, как удельное аэродинамическое сопротивление трубопровода при перемещении двухфазного потока с учетом концентрации материала, т.е.  $R_{\text{тр}}^1 = R_B^1 (1+\mu)$ .

Измененное количество чистого воздуха при транспортировании двухфазного потока, а также точное значение концентрации материала можно определить по выражениям (4), (4'), приведенным к виду

$$V_m = \frac{V_B}{\sqrt[n]{1+\mu}}; \quad (5)$$

$$\bar{w}_m = \frac{\bar{w}_B}{\sqrt[n]{1+\mu}}. \quad (5')$$

Полученные закономерность и аналитические зависимости справедливы для участков трассы пневмотранспортных установок в стабилизированном режиме течения транспортируемой массы.

Под устойчивым (стабилизированным) транспортированием следует понимать скорость единичного дисперсоида, при которой исключается возможность выпадения твердой фазы из движущегося потока. Скорость потока в этом случае должна быть равна  $\bar{w}_m \geq 2w_s$  (при  $1,5 > \bar{w}_B > w_s$  и  $\bar{w}_B \ll w_s$  наступает неустойчивое транспортирование твердой фазы, описанное схемами движения № 3 и 4 в табл. 1).

Теоретический анализ и его экспериментальное подтверждение на специально проведенных опытах автора показали, что при устойчивом режиме движения двухфазного потока (схема движения № 1 в табл. 1) общая потеря давления в системах пневмотранспортных вентиляционных установок определяется с учетом изменения транспортирующего воздуха по выражению

$$H_{\text{тр}} = H'_B (1 + \mu). \quad (6)$$

В ы в о д ы. 1. На основании анализа результатов экспериментального исследования показаны наиболее часто встречающиеся в практике пневмотранспорта сыпучих материалов схемы движения двухфазного потока.

2. Предложена зависимость для определения аэродинамического сопротивления трубопроводов в системах пневмотранспортных вентиляционных установок при устойчивом транспортировании двухфазного потока.

### Л и т е р а т у р а

1. У с п е н с к и й В.А. Пневматический транспорт. – М., 1952, с. 42. 2. Д з я д з и о А.М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях. – М., 1961, с. 23. 3. К л я ч к о Л.С. Обоснование минимальных скоростей воздуха в воздухопроводах обеспыливающих вентиляционных установок. – Тр. ЛИОТ ВЦСПС, отд. пром. вентиляции, кн. 5. М., 1958, с. 38. 4. К р у г л о в А.Н. Пневматический транспорт зерна и его отходов. – М., 1947, с. 169.

УДК 697:621.577

О.Г. Зеленко, *зав.отделом*  
(БелНИИГипросельстрой)

### ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ КОМПРЕССИОННОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ

На примере типового проекта животноводческой фермы крупного рогатого скота на 400 голов выполнены исследования по расчетным максимально-часовым и годовым расходам тепла и топлива на отопление, вентиляцию