

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОТРАНСПОРТА ИЗМЕЛЬЧЕННОГО ТОРФА**

**Петренко С.М.**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

*Предложена методика численного определения действительных режимных параметров процесса пневмотранспорта измельченного торфа по расходным. Методика позволяет определить такие важные для технологии действительные параметры как истинная концентрация торфяных частиц в потоке аэросмеси, действительные скорости воздуха и материала и относительное скольжение воздушной и твердой фаз.*

Под режимными параметрами процесса пневмотранспорта сыпучих материалов понимаются факторы, изменение которых приводит к соответствующему изменению потерь давления на единице длины пневмотранспортного трубопровода. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что к ним относятся: физические свойства, состояние и расход несущей воздушной фазы, массовая расходная концентрация или производительность по транспортируемому материалу, размерно-плотностные и аэродинамические характеристики транспортируемых частиц, а также геометрические размеры трубопровода и угол наклона его к горизонту.

В соответствии с физической моделью регулирования силового взаимодействия в потоке аэросмеси [1] изменение любого режимного параметра или их совокупности вызывает изменение условий взаимодействия в объеме аэросмеси поверхностных, массовых и инерционных сил, что приводит к переходу к режиму течения с другим значением истинной объемной концентрации материала и другими потерями давления на пневмотранспорт.

Учет влияния всех режимных параметров на силовое взаимодействие в потоке аэросмеси возможен при описании ее движения как течения двухфазной гетерогенной среды с использованием действительных режимных параметров - истинной концентрации транспортируемого материала и действительных (с учетом стеснения поперечного сечения трубопровода частицами материала) скоростей несущей воздушной и твердой фаз [2]. Однако экспериментальное определение истинной объемной концентрации для определения действительных скоростей воздушной и твердой фаз достаточно сложно в отличие от регистрации так называемых расходных режимных параметров - приведенных (отнесенных ко всему поперечному сечению трубопровода) скоростей воздуха и витания частиц материала и расходной массовой концентрации.

В данной работе представлена методика численного определения действительных режимных параметров вертикального пневмотранспорта

измельченного торфа по известным из опыта перепаду давлений на участке пневмотранспортного трубопровода и расходным параметрам. Методика основывается на математической модели [3] процесса пневмотранспорта измельченного торфа при установившемся режиме.

Уравнения неразрывности воздушной и твердой фаз:

$$Q_v = (1-c)\rho_v g_v S, \quad (1)$$

$$Q_m = c\rho_m g_m S, \quad (2)$$

где  $Q_v$  и  $Q_m$  - массовые производительности соответственно по воздуху и по измельченному торфу;

$c$  - истинная объемная концентрация торфяных частиц в объеме аэро-смеси;

$\rho_v$  и  $\rho_m$  - плотности соответственно воздушной и твердой фаз;

$S$  - площадь поперечного сечения трубопровода;

$g_v$  и  $g_m$  - действительные (с учетом стеснения поперечного сечения трубопровода частицами материала) скорости воздуха и торфяных частиц.

Уравнения движения воздушной и твердой фаз:

$$\frac{\Delta p}{L} = \rho_v g \sin \alpha + \lambda_v \rho_v \frac{g_v^2}{2D} - \frac{c}{1-c} \rho_m F_{вз}, \quad (3)$$

$$\frac{\Delta p}{L} = \rho_m g \sin \alpha + \lambda_m \rho_m \frac{g_m^2}{2D} - \rho_m F_{вз}, \quad (4)$$

где  $\Delta p$  - перепад давления на длине  $L$  участка пневмотранспортного трубопровода с вполне установившимся течением аэро-смеси;

$g$  - ускорение свободного падения;

$\lambda_v$  - коэффициент сопротивления воздушной фазы;

$\lambda_m$  - коэффициент сопротивления перемещению частиц твердой фазы;

$\alpha$  - угол наклона трубопровода к горизонту;

$F_{вз}$  - отнесенная к единице массы сила аэродинамического взаимодействия несущей среды и твердых частиц.

Уравнение состояния воздушной фазы при допущении об изотермическом процесс расширения воздуха:

$$\frac{P_0}{\rho_0} = \frac{P}{\rho_v}, \quad (5)$$

где  $\rho_0$  - плотность воздуха в сечении трубопровода с давлением  $P_0$ .

Среднее по длине участка  $L$ , на котором измеряется перепад давления  $\Delta p$ , давление воздуха

$$p_{cp} = 2,3 p_H \lg \left( \frac{p_H}{p_K} \right) / \left( \frac{p_H}{p_K} - 1 \right), \quad (6)$$

где  $p_H$  и  $p_K$  – соответственно давление в начале и конце участка, на котором измеряется перепад давления, и расчетная плотность воздуха

$$\rho_{\epsilon} = \rho_{\text{вк}} (p_{cp} / p_K), \quad (7)$$

где  $\rho_{\text{вк}}$  - плотность воздуха при давлении  $p_K$ .

После последовательного исключения из уравнений (3) и (4)  $F_{\text{вз}}$ , затем  $\Delta p/L$  они приводятся к виду:

$$\frac{\Delta p}{L} = ((1-c)\rho_{\epsilon} g + c\rho_M g) \sin \alpha + (1-c)\lambda_{\epsilon} \rho_{\epsilon} \frac{g^2}{2D} + c\lambda_M \rho_M \frac{g_M^2}{2D}, \quad (3')$$

$$g(\rho_M - \rho_{\epsilon}) \sin \alpha - \lambda_{\epsilon} \rho_{\epsilon} \frac{g^2}{2D} + \lambda_M \rho_M \frac{g_M^2}{2D} - \rho_M \frac{F_{\text{вз}}}{(1-c)} = 0. \quad (4')$$

Из последнего уравнения можно выразить  $\lambda_M$ :

$$\lambda_M = 2 \frac{D}{g_M^2} \frac{F_{\text{вз}}}{(1-c)} - 2 \frac{gD}{g_M^2} \left(1 - \frac{\rho_{\epsilon}}{\rho_M}\right) \sin \alpha + \lambda_{\epsilon} \frac{\rho_{\epsilon}}{\rho_M} \frac{g^2}{g_M^2}.$$

С учетом выражения для силы межфазного взаимодействия:

$$F_{\text{вз}} = g \frac{(\mathcal{G}_{\epsilon} - \mathcal{G}_M) Abs(\mathcal{G}_{\epsilon} - \mathcal{G}_M)}{g_s^2}, \quad (8)$$

где  $\mathcal{G}_s$  - действительная (с учетом стеснения потока частицами транспортируемого материала) скорость витания

$$\mathcal{G}_s = \mathcal{G}_{sn} (1-c)^3 (1 - (d_s / D)^2)^{\frac{3}{2}}, \quad (9)$$

$\mathcal{G}_{sn}$  - определяемая по методике [4] приведенная (т. е. без учета стеснения потока) скорость витания;

$d_s$  – эквивалентный диаметр торфяных частиц, получим

$$\lambda_M = 2 \frac{gD (\mathcal{G}_{\epsilon} - \mathcal{G}_M) Abs(\mathcal{G}_{\epsilon} - \mathcal{G}_M)}{g_M^2 (1-c)} - 2 \frac{gD}{g_M^2} \left(1 - \frac{\rho_{\epsilon}}{\rho_M}\right) \sin \alpha + \lambda_{\epsilon} \frac{\rho_{\epsilon}}{\rho_M} \frac{g^2}{g_M^2} \quad (10)$$

Действительная скорость воздуха определяется по известной из опыта приведенной (отнесенной ко всему поперечному сечению трубопровода) скорости  $V_g = 4Q_g / \pi D^2 \rho_g$ :

$$g_g = V_g / (1 - c) \quad (11)$$

Действительная скорость материала определяется по известной из опыта массовой производительности по материалу

$$g_m = \frac{4Q_m}{\pi D^2 \rho_m c} \quad (12)$$

Коэффициент  $\lambda_g$  сопротивления воздушной фазы определяется по эмпирическим зависимостям вида  $\lambda_g = f(Re)$ , где  $Re = g_g D \rho_g / \eta$  - критерий Рейнольдса;  $\eta$  - динамическая вязкость воздуха.

Алгоритм определения действительных режимных параметров по расходным следующий. Используются получаемые обычно в экспериментах зависимости  $\Delta p/L = f(V_g)$  при известной производительности по материалу  $Q_m$  или зависимости  $\Delta p/L = f(\mu)$  при постоянной приведенной скорости воздуха  $V_g$  ( $\mu = Q_m / Q_g$  - массовая расходной концентрация).

По известным степени разложения, степени механической переработки, влажности и гранулометрическому составу образца фрезерного торфа определяются значения  $d_v$ ,  $\rho_m$  и  $g_m$  по эмпирическим зависимостям, приведенным в [4].

Среднее по длине  $L$  участка трубопровода давление и соответствующая этому давлению плотность воздуха определяются по известным значениям  $(\Delta p/L)_{оп}$  по зависимостям (6) и (7).

Для каждой опытной точки определяются пары значений  $(\Delta p/L)_{оп}$  и  $V_g$ . При известном  $Q_m$  для этих значений циклическими итерациями с изменением истинной объемной концентрации от  $c_{max}$  до  $c_{min}$  с заданным шагом  $dc$  по формулам (9), (11) и (12) вычисляются действительные скорости витания, воздуха и материала. Затем по действительной скорости воздуха вычисляется значение  $Re$  и коэффициент  $\lambda_v$  сопротивления воздушной фазы.

Полученные значения используются для вычисления по (10) коэффициента  $\lambda_m$  сопротивления перемещению частиц твердой фазы. Далее вычисленные значения подставляются в (3) для определения расчетного значения  $(\Delta p/L)_p$  при текущем значении истинной концентрации. Расчетное значение  $(\Delta p/L)_p$  сравнивается с опытным  $(\Delta p/L)_{оп}$ . Если абсолютное значение разности расчетного и опытного значений  $|(\Delta p/L)_p - (\Delta p/L)_{оп}|$  превышает заданную погрешность вычислений  $\delta$ , текущее значение истинной объемной концентрации уменьшается на величину шага  $dc$  и вычисления продолжают-

ся. Если текущее значение истинной объемной концентрации достигло  $c_{min}$  и условие  $|(\Delta p/L)_p - (\Delta p/L)_{оп}| \leq \delta$  не выполнилось, итерации повторяются с уменьшенным шагом  $dc$  до выполнения условия.

Значение истинной объемной концентрации, при котором выполняется условие  $|(\Delta p/L)_p - (\Delta p/L)_{оп}| \leq \delta$ , удовлетворяет уравнениям (3) и (4) и соответствует реализуемой в данном конкретном случае пневмотранспорта совокупности режимных параметров.

По известному значению  $c$  и расходным параметрам можно определить действительные скорости воздуха и материала, влияние совокупности реализуемых в данном конкретном случае режимных параметров на величину коэффициента сопротивления перемещению торфяных частиц  $\lambda_m$ . Далее легко определяются все важные для понимания закономерностей процесса пневмотранспорта действительные параметры: относительная скорость и относительное скольжение воздушной и твердой фаз, сила их аэродинамического взаимодействия, которая является движущей при направленном перемещении торфяных частиц. Можно определить потери давления только на перемещение торфяных частиц и только воздуха, их вклад в суммарные потери давления.

Погрешность предложенной методики определения действительных режимных параметров по расходным прежде всего обусловлена погрешностями определения приведенной скорости витания полидисперсной смеси торфяных частиц, а также приведенной скорости воздушной фазы и давления, т. к. погрешность расчета может быть задана сколь угодно малой.

#### Литература

1. Петренко, С.М. Формирование режимов движения аэросмеси при пневмотранспорте сыпучих материалов/ С.М.Петренко // Машины и технология торфяного производства. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – Вып.16. –С.73-77.
2. Петренко, С.М. Уравнения движения двухфазной среды в пневмотранспортном трубопроводе / С.М.Петренко // Проблемы технологии и механизации разработки месторождений полезных ископаемых: сб. науч. тр. Междунар. научно – техн. конф., Минск, 20 -23 февраля 2009 г. / Часть 1. –Минск, 2009. –С. 106 – 109.
3. Петренко С. М. Математическая модель установившегося режима пневмотранспорта измельченного торфа / С.М.Петренко // Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых: сб. науч. тр. МНТК, Минск, 17 -20 апреля 2012 г. / Минск, 2012. –С. 243 – 247.
4. Кислов, Н.В. Аэродинамика измельченного торфа / Н.В. Кислов / под. ред. И.И. Лиштвана. – Минск: Наука и техника, 1987. -175 с.