

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;

ρ_v и ρ_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 Δp - перепад давления на длине L участка пневмотранспортного трубопровода с вполне установившимся течением аэро-смеси;

g - ускорение свободного падения;

λ_v - коэффициент сопротивления воздушной фазы;

λ_m - коэффициент сопротивления перемещению частиц твердой фазы;

α - 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 ρ_0 - плотность воздуха в сечении трубопровода с давлением P_0 .

Среднее по длине участка L , на котором измеряется перепад давления Δp , 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) $F_{\epsilon 3}$, затем $\Delta p/L$ они приводятся к виду:

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

$$g(\rho_M - \rho_{\epsilon}) \sin \alpha - \lambda_{\epsilon} \rho_{\epsilon} \frac{g^2}{2D} + \lambda_M \rho_M \frac{g_M^2}{2D} - \rho_M \frac{F_{\epsilon 3}}{(1-c)} = 0. \quad (4')$$

Из последнего уравнения можно выразить λ_M :

$$\lambda_M = 2 \frac{D}{g_M^2} \frac{F_{\epsilon 3}}{(1-c)} - 2 \frac{gD}{g_M^2} \left(1 - \frac{\rho_{\epsilon}}{\rho_M}\right) \sin \alpha + \lambda_{\epsilon} \frac{\rho_{\epsilon}}{\rho_M} \frac{g^2}{g_M^2}.$$

С учетом выражения для силы межфазного взаимодействия:

$$F_{\epsilon 3} = g \frac{(\mathcal{G}_{\epsilon} - \mathcal{G}_M) Abs(\mathcal{G}_{\epsilon} - \mathcal{G}_M)}{g_s^2}, \quad (8)$$

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 λ_g сопротивления воздушной фазы определяется по эмпирическим зависимостям вида $\lambda_g = f(Re)$, где $Re = g_g D \rho_g / \eta$ - критерий Рейнольдса; η - 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 , ρ_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 λ_v сопротивления воздушной фазы.

Полученные значения используются для вычисления по (10) коэффициента λ_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 δ , 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 λ_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.