

УДК 621.852

В.М. Гушин, канд. техн. наук,

О.В. Гушин, канд. техн. наук

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск,

Р.И. Рыбалко, канд. техн. наук

Донбасская государственная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В ПНЕВОТРАНСПОРТНОМ ТРУБОПРОВОДЕ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ АЭРОСМЕСЕЙ

Розглянуто рух часток сыпучого матеріалу у пневмотранспортному трубопроводі на вертикальних та горизонтальних ділянках.

The analysis of the movement of owe particles of loose materials done in the pipeline for pneumatic transport.

Введение

Пневмотранспортные установки с различными режимами движения аэросмесей применимы для перемещения тонкодисперсных и мелкозернистых сыпучих материалов в различных областях промышленности. Силовое взаимодействие частиц дисперсного материала со стенками пневмотранспортного трубопровода определяет закономерности изнашивания трубопровода, влияет на величину потерь давления воздушного потока по длине транспортногo канала, которые складываются из потерь сопротивления движению газа и сопротивления движению частиц. Одним из главных условий, определяющих работоспособность пневмотранспортного трубопровода, его технические характеристики и параметры, является знание закономерностей движения твердой фазы в рабочем трубопроводе.

Вопросам траектории движения частиц в пневмотранспортном трубопроводе уделяется достаточно пристальное внимание. Почти в каждой известной монографии или учебнике, посвященных пневматическому способу перемещения сыпучих материалов, определенное внимание уделяется рассмотрению механики перемещения частиц во взвешенном состоянии. Наиболее глубоко изучено движение одиночных частиц на прямолинейных участках трубопровода [1–3]. В работе [4] исследовано качение по плоскости с проскальзыванием и без проскальзывания сферической частицы под действием постоянной силы, с начальным вращением и без него. Движение частиц вблизи горизонтальной стенки в газовом потоке под действием различных силовых факторов рассмотрено в работе [6]. Движение частиц эллиптической и сферической форм без скольжения и с проскальзыванием рассмотрено в работах [2, 4, 7]. Здесь же определены условия движения частиц и критическая скорость их взвешивания. Анализ процессов движения частиц на вертикальном участке выполнен в работе [8]. Движение частиц сыпучего материала в спиральном воздушном потоке на горизонтальном участке пневмотранспортного трубопровода

рассмотрено в работах [9–11]. Однако целый ряд вопросов остался недостаточно изученным. Так, траектория движения отдельных частиц и их силовые взаимодействия с твердыми стенками трубопровода играют существенную роль при перемещении двухфазных потоков «газ–твердые частицы».

Целью данной работы является исследование механики движения частиц сыпучего материала на вертикальных и горизонтальных участках пневмотранспортного трубопровода круглого сечения при поступательном и вращательном движении аэросмеси.

Основные результаты исследования

При движении потока гомогенной смеси на вертикальном участке пневмотранспортного трубопровода отдельные частицы имеют разную скорость вследствие их размещения по поперечному сечению трубопровода и разного аэродинамического сопротивления. При этом существенную роль играют траектории движения отдельных частиц.

Рассматривается движение одиночной твердой частицы в цилиндрической системе координат ρ, φ, z (рис. 1). Ось z совмещена с осью трубопровода. Поперечное сечение трубы полагается круглым с внутренним радиусом R ($0 \leq \rho \leq R$). Положительное направление оси z совпадает с направлением скорости воздушного потока U , причем U считается, в силу осевой симметрии и однородности потока по оси z , только функцией координаты ρ . В общем случае полагается, что $U(\rho)$ есть положительно определенная и монотонно убывающая функция при возрастании ρ и удовлетворяет следующим граничным условиям:

$$U|_{\rho=0} = U_0, \quad U|_{\rho=R} = 0, \quad \left. \frac{dU}{d\rho} \right|_{\rho=0} = 0. \quad (1)$$

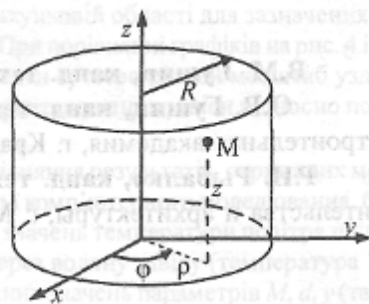


Рис. 1. Циліндрична система координат для частини в вертикальному трубопроводі.

Здесь в первом условии U_0 — максимальное значение скорости потока по оси трубопровода. Условие второе отражает равенство нулю скорости потока непосредственно на внутренней поверхности трубопровода из-за вязкостных свойств воздуха и шероховатости поверхности потока.

Для общности положим, что

$$U(\rho) = U_0 f\left(\frac{\rho}{R}\right), \quad (2)$$

где безразмерная функция $f = f(\rho/R)$, зависящая от безразмерной переменной $r = \rho/R$, удовлетворяет аналогично (1) условию:

$$f(0) = 1, \quad f(1) = 0, \quad \frac{df(0)}{dr} = 0. \quad (3)$$

В простейшем частном случае функция $f(\rho/R) = f(r)$, в выражении (2) представляется в формуле $f(r) = 1 - r^n$, где $n = 2, 3, 4, \dots$

Считается также, что движущаяся в потоке частица приводит к возмущению потока лишь в ее малой окрестности, несоизмеримой с R , что, очевидно, имеет место при

$$R \gg d_0$$

где d_0 — характерный линейный размер частицы, а также при условии «неограниченной» мощности потока. Уравнения Лагранжа представляются как система трех нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{\rho} - m\rho\dot{\phi}^2 = Q_r + P_r, \\ m\rho^2\ddot{\phi} + 2m\rho\dot{\rho}\dot{\phi} = \rho Q_t, \\ m\ddot{z} + mg = Q_z. \end{cases} \quad (4)$$

где Q_r, Q_t, Q_z — обобщенные непотенциальные силы сопротивления движению частицы в потоке; при этом Q_r — радиальная, Q_t — тангенциальная, Q_z — фронтальная силы сопротивлений.

Данные силы зависят прежде всего от соответствующих скоростей: радиальной $\dot{\rho}$, тангенциальной $\dot{\rho}\dot{\phi}$ и фронтальной \dot{z} , причем Q_z зависит не просто от \dot{z} , а

является функцией относительной скорости $U(\rho) - \dot{z}$. Обобщенная сила P_r в первом уравнении системы (4) своего рода «центробежная» сила, всегда направленная перпендикулярно к оси трубопровода.

Выражения для сил сопротивления зависят от соответствующих скоростей. В общем случае их удобно представить в форме разложения по степеням этих скоростей, сохраняя первые два числа:

$$\begin{cases} -Q_r = C_r \dot{\rho} + D_r \dot{\rho}^2 \text{sign}(\dot{\rho}), \\ -Q_t = C_t (\rho\dot{\phi}) + D_t (\rho\dot{\phi})^2 \text{sign}(\rho\dot{\phi}), \\ +Q_z = C_z (U - \dot{z}) + D_z (U - \dot{z})^2 \text{sign}(U - \dot{z}), \end{cases} \quad (5)$$

где C_r, C_t, C_z и D_r, D_t, D_z — исходные определенные неотрицательные константы, имеющие соответственно размерности $[Hc/m]$ и $[Hc^2/m^2]$. Их численные значения определяются экспериментальным путем. Считаем, что

$$C_r = C_t = C_z = C, \quad D_r = D_t = D_z = D, \quad (6)$$

так как физическая природа и суть этих констант одинаковы, и фактически величины Q_r, Q_t, Q_z являются компонентами одного и того же вектора сопротивлений.

Центробежная сила вызвана разностью давлений воздушного потока на «внутренней», обращенной к оси трубопровода, и «внешней», противоположной, стороне частицы из-за переменности скорости обтекания согласно допущению (2). Таким образом, можно записать

$$P_r = k(P_2 - P_1) = -\frac{S\gamma}{2}(V_2^2 - V_1^2), \quad (7)$$

где S — коэффициент пропорциональности, зависящий, в частности от средней площади частицы с размерностью $[m^2]$; P_1 и P_2 — давления воздушного потока соответственно на «внутренней» и «внешней» сторонах частицы; V_1 и V_2 — относительные скорости обтекания потоком на соответствующих сторонах; γ — плотность воздуха.

Так как $R \gg d_0$ можно заменить $\frac{V_2 - V_1}{d_0}$ производ-

ной $\frac{dV}{d\rho}$, вычисленной в точке нахождения частицы, а среднее значение скоростей равным скорости в данной

точке $\frac{V_2 + V_1}{2} = V$, можем записать разностью квадратов скоростей в виде:

$$V_2^2 - V_1^2 = 2d_0 \frac{V_2 - V_1}{d_0} \cdot \frac{V_2 + V_1}{2} \approx 2d_0 \frac{dV}{d\rho} \cdot V. \quad (8)$$

После подстановки (6) в (7), учитывая, что $V = U - \dot{z}$, получим

$$P_r = -S\gamma d_0 (U - \dot{z}) \frac{d}{d\rho} (U - \dot{z}). \quad (9)$$

В этом выражении необходимо формально вычислять производную \dot{z} по ρ , а так как \dot{z} в общем случае некоторая функция переменных t, z, τ, ρ , то следовало бы,

строго говоря, в (9) вместо $\frac{dz}{d\rho}$ писать $\frac{\partial z}{\partial \rho}$. Так как вели-

чина $\left| \frac{\partial z}{\partial \rho} \right|$ пренебрежимо мала в сравнении с $\left| \frac{dU}{d\rho} \right|$ запишем (8) в виде

$$P_r = -m\mu(U - z) \frac{dU}{d\rho}, \quad (10)$$

где $\mu = \frac{Svd_0}{m}$ — некоторый безразмерный параметр.

Система уравнений (4) с учетом соотношений (5), (6), (10) представляется в форме

$$\begin{cases} m\ddot{\rho} - m\rho\dot{\phi}^2 + C\dot{\rho} + D\dot{\rho}^2 \text{sign}(\dot{\rho}) - m\mu(U - z) \frac{dU}{d\rho} = 0, \\ m\rho\ddot{\phi} + 2m\dot{\rho}\dot{\phi} + C(\rho\dot{\phi}) + D(\rho\dot{\phi})^2 \text{sign}(\rho\dot{\phi}) = 0, \\ m\ddot{z} + mg - C(U - z) + D(U - z)^2 \text{sign}(U - z) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Для анализа и решения полученные уравнения приводятся к безразмерной форме, сделав замену переменных:

$$t = \frac{U_0}{g} \tau, \quad \rho = U_0 V_r, \quad \rho\dot{\phi} = U_0 V_t, \quad U_0 - z = U_0 V_z, \quad \dot{\rho} = Rr,$$

где, по сути дела, новые переменные V_r, V_t, V_z являются относительными радиальными, тангенциальными и фронтальными скоростями, а переменный параметр τ является своего рода «безразмерным» временем.

Тогда в новых переменных система (11) выглядит

$$\begin{cases} \frac{dV_r}{d\tau} - \lambda \frac{V_t^2}{r} + F(V_r) - \mu\lambda V_z \frac{df}{dr} = 0, \\ \frac{dV_t}{d\tau} + \lambda \frac{V_t V_r}{r} + F(V_t) = 0, \\ \frac{dV_z}{d\tau} - \lambda V_r \frac{df}{dr} + F(V_z) = 1, \\ \frac{dr}{d\tau} = \lambda V_r, \end{cases} \quad (12)$$

где введен безразмерный параметр

$$\lambda = \frac{U_0^2}{Rg},$$

и безразмерная функция сопротивления

$$F(V) = \frac{U_0}{mg} \{ CV + DU_0 V^2 \text{sign} V \}. \quad (13)$$

Рассматривается случай, когда в выражении (8) для сил сопротивления $D=0$. Обозначив при этом

$$\delta = \frac{U_0 C}{mg}$$

и применив простейшую форму функции $f(r)$, определяемой соотношением (11) при $n=2$, то есть положим $f(r) = 1 - r^2$,

получим $\frac{df}{dr} = -2r$ и система (12) примет вид

$$\begin{cases} \frac{dV_r}{d\tau} - \lambda \frac{V_t^2}{r} + \delta V_r + 2\mu\lambda V_z r = 0, \\ \frac{dV_t}{d\tau} + \lambda \frac{V_t V_r}{r} + \delta V_t = 0, \\ \frac{dV_z}{d\tau} - 2\lambda V_r r + \delta V_z = 1, \\ \frac{dr}{d\tau} = \lambda V_r. \end{cases} \quad (14)$$

Графики функций V_r, V_t, V_z получены в результате численного интегрирования уравнений (14) для параметров, соответствующим затухающим движениям по трем координатам (рис. 2).

На рис. 3 показана фактическая траектория частицы в плоскости, перпендикулярной оси трубопровода, для рассматриваемых на рис. 2 движений.

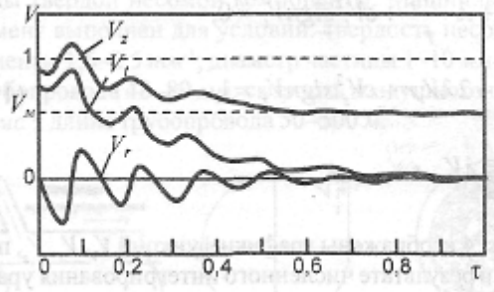


Рис. 2. Изменение скорости движения частицы при линейном сопротивлении воздушного потока.

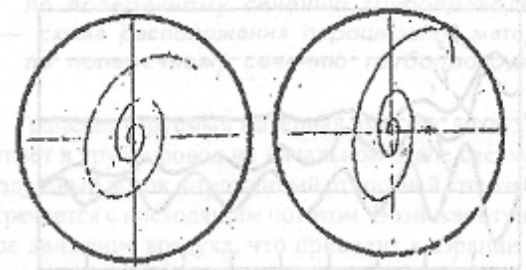


Рис. 3. Траектория движения частицы по поперечному сечению вертикального трубопровода при линейном сопротивлении воздушного потока.

Рассматривается случай, когда в выражении (13) для сил сопротивления $C = 0$, а $D \neq 0$, что соответствует пропорциональности сил квадрату относительных скоростей, а с точки зрения аэродинамики — большим значениям чисел Рейнольдса, при которых сила сопротивления практически не зависит от Re и определяется следующим выражением

$$|Q| = \bar{D} S_m \frac{\gamma W^2}{2},$$

где $\bar{D} \approx 0,5$ (для автомодельного режима обтекания) — безразмерный коэффициент.

Таким образом, из этого соотношения устанавливается, что

$$D = \frac{S_m \gamma}{4}.$$

В соответствии с выражением (13) и этим обозначением вводится следующий безразмерный параметр:

$$\varepsilon = \frac{DU_0^2}{mg} = \frac{S_m \gamma}{4} \cdot \frac{U_0^2}{mg}.$$

Как и прежде считается, что $f(R) = 1 - r^2$. Тогда система (12) принимает вид

$$\begin{cases} \frac{dV_r}{d\tau} - \lambda \frac{V_r^2}{r} + \varepsilon V_r^2 \text{sign} V_r - 2\mu \lambda V_z r = 0, \\ \frac{dV_z}{d\tau} + \lambda \frac{V_z V_r}{r} + \varepsilon V_z^2 \text{sign} V_z = 0, \\ \frac{dV_\varphi}{d\tau} - 2\lambda V_r r + \varepsilon V_z^2 \text{sign} V_z = 1, \\ \frac{dr}{d\tau} = \lambda V_r. \end{cases} \quad (15)$$

На рис. 4 изображены графики функций V_r, V_φ, V_z , полученные в результате численного интегрирования уравнений (15) для параметров, соответствующих затухающим движениям по трем координатам.

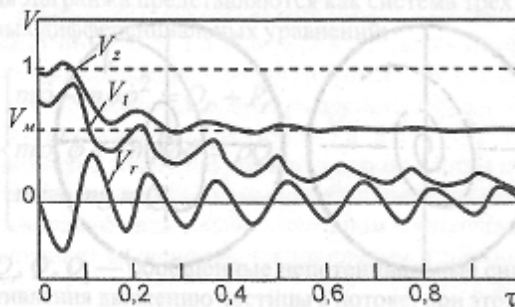


Рис. 4. Колебательный характер изменения скорости частицы при квадратичном сопротивлении воздушного потока.

Обращает на себя внимание медленное затухание колебаний компонента скорости. Как следует из рис. 5, траектория частицы представляет собой спираль, медленно сужающуюся к оси трубопровода.

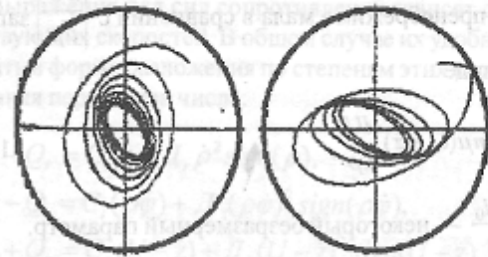


Рис. 5. Траектория частицы в сечении трубопровода при квадратичном сопротивлении воздушного потока.

При вращательном режиме движения сыпучего материала на горизонтальном участке пневмотранспортного трубопровода на частицу действуют следующие силы: сила трения воздушного потока о частицу \vec{F}_T , воздушного давления \vec{F}_D , аэродинамическая сила \vec{F}_A , обусловленная разностью скоростей потока воздуха, обтекающих частицу, и гравитационная сила \vec{F}_G . Все указанные силы зависят от скорости движения частицы \vec{V} и от поля скоростей движения воздушного потока \vec{W} . Принято допустить, что массовая концентрация аэросмеси имеет величины, позволяющие пренебречь столкновением отдельных частиц. В этом случае закон движения частицы в трубопроводе определяется из системы уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \vec{F}_{Tx} + \vec{F}_{Dx} + \vec{F}_{Ax} + \vec{F}_{Gx}, \\ m\ddot{y} = \vec{F}_{Ty} + \vec{F}_{Dy} + \vec{F}_{Ay} + \vec{F}_{Gy}, \\ m\ddot{z} = \vec{F}_{Tz} + \vec{F}_{Dz} + \vec{F}_{Az} + \vec{F}_{Gz}. \end{cases} \quad (16)$$

Силы, действующие на частицу, показаны на рис. 6.

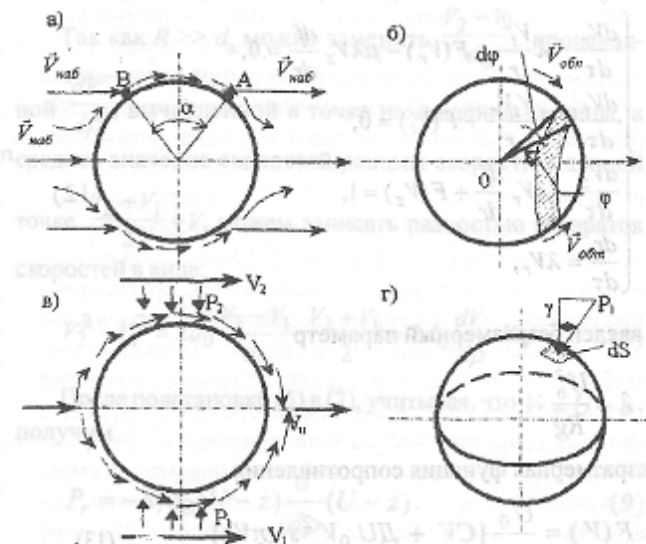


Рис. 6. Схема к расчету действующих сил: а — обтекание частицы воздушным потоком; б — силы трения воздуха о частицу; в — аэродинамическая сила; г — вертикальная составляющая воздушного давления.

Действующие на частицу силы в соответствии со схемой [10] равны

$$F_T = 3,6\pi\rho \frac{R^2 v_{наб}^2}{\sqrt{Re}}; F_D = 6\pi\eta R_p^2 v_{наб}; \quad (17)$$

$$F_A = \frac{P}{\rho} \cdot \frac{D_p^2}{4} v_{обр} \frac{dW}{dR}; F_G = \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho g.$$

В данных зависимостях приняты обозначения: ρ, ρ_m — плотность воздуха и транспортирующего материала, R_p — радиус сопел-побудителей; P — избыточное давление; $v_{наб}, v_{обр}$ — скорость набегания и обтекания частицы воздушным потоком; Re — число Рейнольдса, W — линейная скорость движения воздушного потока вдоль оси трубопровода.

В связи с вращательным движением и торможением потока о стенки трубы

$$W = \sqrt{\omega^2 R^2 + W_{max}^2 \left(1 - \frac{R}{R_T}\right)^n}; \quad (18)$$

$$\frac{dW}{dR} = \frac{\omega^2 R^2}{\sqrt{\omega^2 R^2 + W_{max}^2}} \left(1 - \frac{R}{R_T}\right)^n - \frac{n\sqrt{\omega^2 R^2 + W_{max}^2}}{R_T \left(1 - \frac{R}{R_T}\right)^{(1-n)}}. \quad (19)$$

Вращательное движение воздуха в транспортном трубопроводе поддерживается действием вспомогательного побуждения потока, который со скоростью W_p истекает из сопла-побудителя. Если W_p — скорость истечения воздушного потока из сопла-побудителя, то в воздушный поток транспортного трубопровода за единицу времени накачивается дополнительная энергия

$$K = \frac{mW_p^2}{2} = \frac{\rho WS_p W_p^2}{2}, \quad (20)$$

где S — суммарная площадь поперечного сечения сопел-побудителей; ρ — плотность воздуха.

Эта вспомогательная энергия переходит во вращательное движение воздушного потока. Если принять интервал между соплами-побудителями равным t_p , то это есть энергия вращательного движения цилиндрического воздушного столба радиусом R_T и длиной t_p .

Кинетическая энергия вращательного движения цилиндрического столба воздуха равна

$$K = \frac{\omega^2 J}{2},$$

где ω — угловая скорость вращения; J — момент инерции столба воздуха относительно оси вращения.

Если скорость движения воздуха вдоль трубы равна W_{cp} , а радиус трубы равен R_T , то

$$J = \frac{\pi}{2} \rho R_T W_{cp}.$$

Из этих выражений следует, что угловая скорость вра-

щения потока равна

$$\omega = \sqrt{\frac{2S_p W_p^3}{\pi R_T^4 W_{cp}}}. \quad (21)$$

Линейная скорость вращения потока $W(R)$ равна

$$W_{cp}(R) = \omega R.$$

С учетом (21)

$$W_{cp}(R) = R \sqrt{\frac{2S_p W_p^3}{\pi R_T^4 t_p}}. \quad (22)$$

Скорость истечения воздуха из побудителей равна линейной скорости потока вдоль трубы.

Линейная скорость вращательного движения вихревого потока на расстоянии R от центра трубы равна ωR . Следовательно, на оси трубы линейная скорость потока равна нулю. Также линейная скорость вихревого потока равна нулю при $R = R_T$ вследствие торможения потока о стенки трубы. Так как аэродинамическая сила направлена перпендикулярно скорости потока от слоев с меньшей скоростью к слоям с большей скоростью, то возникает эффект отжатия смеси от центра и от стенок трубы и основная масса транспортируемого материала располагается в трубопроводе в виде кольцевого слоя (рис. 7в).

Алгоритм расчета траектории движения частицы аэросмеси разработан в работах [10, 11]. При этом учитывается диаметр и длина трубопровода, скорость линейного потока воздуха вдоль трубы, плотность и диаметр частицы твердой несомой компоненты. Машинный эксперимент выполнен для условий: твердость несомой компоненты 1,6–2,5 тм³; диаметр частицы 1–10 мм; диаметр трубопровода 48–89 мм; скорость воздушного потока 5–15 мс⁻¹; длина трубопровода 50–500 м.



Рис. 7. Схема трубопровода: а, б — схема расположения сопел-побудителей вдоль и по поперечному сечению трубопровода; в — схема расположения порошкового материала по поперечному сечению трубопровода.

Транспортируемый материал вместе с воздухом поступает в трубопровод на начальном этапе сверху вниз. Воздушный поток, отраженный от нижней стенки трубы, встречается с нисходящим потоком. Возникает турбулентное движение воздуха, что приводит к аэрации транспортируемого материала, предотвращению слипания частиц и экранирования их друг другом. Вследствие этого можно анализировать траекторию каждой частицы в отдельности.

Проведенный расчет показывает следующее. Частицы небольшого диаметра при малой плотности сыпучего материала легко отжимаются вихревым потоком от стенок трубы.

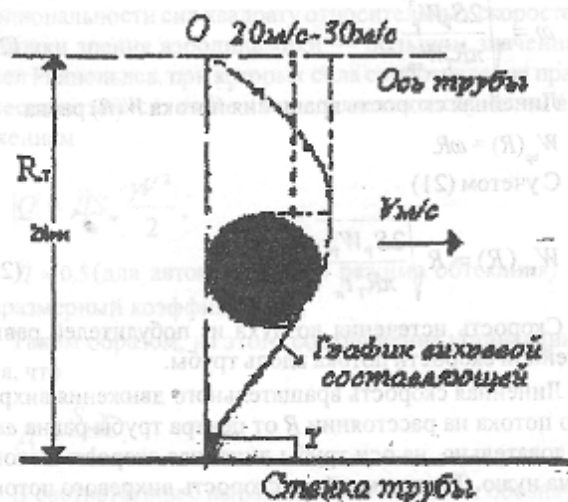


Рис. 8. Схема к пояснению действия на частицу относительной силы.

Поскольку наибольший износ рабочей поверхности трубопровода вызывается действием тяжелых частиц небольшого диаметра, то именно по таким частицам следует определить режим транспортирования для случая, когда материал содержит частицы разного диаметра.

Так, например, для смеси частиц с плотностью 2 тм^3 диаметром 1–10 мм при диаметре трубопровода $\varnothing 56 \text{ мм}$ доля составляющей по отношению к линейному потоку должна быть равна $\approx 35\%$.

Выводы

Раскрыта механика движения частиц сыпучего материала в пневмотранспортном трубопроводе при вращательном режиме перемещения аэросмесей на вертикальных и горизонтальных участках. Показано, что на вертикальных участках траектория движения частицы по поперечному сечению трубопровода имеет форму спирали, поднимаясь в вертикальном направлении. Частица материала перемещается в серединной части трубы, периодически соприкасаясь с вертикальной плоскостью. Скорость движения частиц носит колебательный характер.

Траектория движения одиночной частицы сыпучего материала на горизонтальном участке трубопровода имеет сложный пространственный профиль. Двигаясь в основном в свободном полете, частицы на определенных участках соприкасаются с внутренней поверхностью трубы, скользя по ней. Путь перемещения частицы в свободном полете существенно больше пути движения частицы в скользящем контакте с внутренней поверхностью трубопровода. Профиль траектории движения частицы мало зависит от транспортируемого материала и дальности пути, но существенно зависит от плотности материала, диаметра перемещаемых частиц и диаметра трубопровода.

При таком режиме движения следует ожидать снижения энергозатрат на процесс транспортирования и уменьшения износа рабочей поверхности материалопровода. Полученные результаты исследований становятся основой дальнейшего обоснования оптимальных параметров пневмотранспортных установок, работающих при нетрадиционных режимах аэросмесей.

Литература

1. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт. — М.: Недра, 1980. — 292 с.
2. Волошин, А.И. Механика транспортирования сыпучих материалов / А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. — К.: Наукова думка, 2001. — 519 с.
3. Потураев, В.Н. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В.Н. Потураев, А.Ф. Булат, А.И. Волошин, С.Н. Пономаренко, А.Д. Волошин. — К.: Наукова думка, 2001. — 176 с.
4. Пономарев, Б.В. Движение вращающихся частиц в потоке газа по горизонтальному трубопроводу с ударами по обе стенки // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць, Інститут геотехнічної механіки НАН України, — Дніпропетровськ, 1998. — Вип. 7. — С. 72–87.
5. Бусройд, Р. Течение газа со взвешенными частицами. — М.: Мир, 1975. — 378 с.
6. Штрайбер, А.А. Турбулентные течения газозвеси / А.А. Штрайбер, Л.Б. Гавин, В.А. Наумов, В.П. Яценко. — К.: Наукова думка, 1987. — 240 с.
7. Пономарев, Б.В. Взвешивание твердых частиц в горизонтальном пневмотранспортном трубопроводе // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць, Ін-т геотехнічної механіки НАН України. — Дніпропетровськ, 1998. — Вип. 8. — С. 191–196.
8. Дворников, В.И. Динамика твердых частиц шелегазового потока в вертикальной трубе / В.И. Дворников, С.В. Кононыхин, Р.И. Рыбалко // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. — 1998. — Вип. 98. — 6(14). — С.189–206.
9. Гуцин, В.М. Режимы движения двухкомпонентной фазы в транспортном трубопроводе // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць, Інститут геотехнічної механіки НАН України. — Дніпропетровськ, 1999. — Вип. 13. — С. 71–78.
10. Гуцин, В.М. Рух аеросуміші у спіральному повітряному потоці пневмотранспортного трубопроводу / В.М. Гуцин, Л.М. Топтунова // Вісник ВПІ, — 2000. — № 3. — С. 90–95.
11. Топтунова, Л.М. Движение порошковых материалов в пневмотранспорте трубопроводе при вращательном режиме перемещения аэросмеси / А.М. Топтунова, В.М. Гуцин, М.В. Брус // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тем. зб. наук. праць ДДМА, Краматорськ. — 2004. — С. 168–172.

Надійшла 19.05.2011 р.