

УДК:669.18.001

Харлашин П.С.¹, Косолап Н.В.²

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПОПЕРЕЧНЫЕ СИЛЫ В ПОТОКАХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ, ПОДАВАЕМЫХ В ДОМЕННЫЕ ПЕЧИ

Показано, как давление несущего газа, градиент скорости, разность скоростей газообразной и твёрдой фазы, размер частиц, скорость их вращения влияют на поперечные силы, действующие на частицу в полёте. Представленная методика дополняет модели, которые созданы для расчёта систем пневмотранспорта порошков, подаваемых, например, в доменные печи.

Наиболее актуальная проблема современной металлургии – отказ от производства чугуна с использованием природного газа и перевод доменных печей металлургических комбинатов Украины на технологию вдувания пылеугольного топлива (ПУТ). Подача технологических порошков на расстояние до 500 м и рациональное использование в фурменном очаге и доменной печи в целом – весьма наукоёмкая технология. Достаточно сказать, что при внедрении ПУТ на ДМЗ с 1980 г. уже сменили 4 поколения оборудования. Для возможности проектирования надёжного и экономичного пневмотранспорта требуется более полный учёт всех реально существующих физических воздействий на отдельно взятую частицу, на дисперсный поток в целом. В то же время в ряде опубликованных работ [1, 2] при моделировании систем пневмотранспорта поперечные силы не учитывали, что вносит погрешность в расчёты.

Цель настоящей работы – при условии докватричного сопротивления установить влияние диаметра частиц, давления газозвеси, разности скоростей фаз, градиента скорости и скорости вращения частицы на поперечные силы в газодисперсном потоке.

Вращающаяся и перемещающаяся поступательно частица, взаимодействуя с окружающим газом, увлекает его во вращательное движение. В результате на той стороне частицы, где направления обтекания и вращение элементов жидкости совпадают, давление будет пониженным по сравнению с областью, где эти направления противоположны. Вследствие этого возникает поперечная сила (сила Магнуса), под действием которой частица будет стремиться в область пониженных давлений.

Для стоксовских частиц сила Магнуса определяется как

$$\vec{F}_m = \frac{1}{8} C_m \rho_l \delta^3 [\vec{w}_R \times \vec{\omega}_R], \quad \vec{w}_R = \vec{w}_1 - \vec{w}_2, \quad \vec{\omega}_R = \vec{\omega}_1 - \vec{\omega}_2, \quad (1)$$

где C_m – коэффициент, ρ_l – плотность газа при данных условиях; δ – диаметр частицы;

\vec{w}_1, \vec{w}_2 – векторы скорости несущего газа и частиц;

$\vec{\omega}_2$ – угловая скорость вращения частицы.

Вектор угловой скорости перпендикулярен вектору линейной скорости частицы $\vec{\omega}_2 \perp \vec{w}_1$ и $\vec{\omega}_2 \perp \vec{w}_2$ (рис. 1).

Введем систему координат:

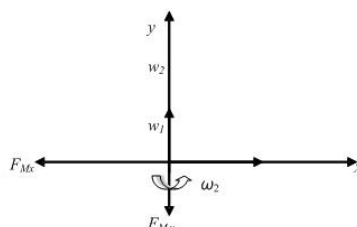


Рис. 1 – К расчёту силы Магнуса

¹ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

²ОАО «ММК им. Ильича», инж., соискатель

Здесь: $\vec{w}_1 = \{w_1; 0; 0\}$, $\vec{w}_2 = \{0; w_2; 0\}$, $\vec{\omega}_2 = \{0; 0; \omega_2\}$, $\vec{\omega}_1 = 0$.

Так как поток газа – однородный, то

$$\vec{w}_R = \{w_1; -w_2; 0\}, \quad \vec{\omega}_R = \{0; 0; -\omega_2\}.$$

$$[\vec{\omega}_R \times \vec{w}_R] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & -\omega_2 \\ w_1 & -w_2 & 0 \end{vmatrix} = -\vec{i} \omega_2 w_2 - \vec{j} \omega_2 w_1.$$

Число Рейнольдса вращательного движения

$$Re_\omega = \frac{|\vec{\omega}_R| \delta_2^2}{\nu}. \quad (2)$$

Если $Re_\omega < 100$, то $C_m = \pi$ и

$$a_m = \frac{1}{8} \pi \rho_1 \delta_2^3; \quad (3)$$

$$F_{Mx} = -a_m \omega_2 w_2; \quad (4)$$

$$F_{My} = -a_m \omega_2 w_1.$$

Знак « \leftarrow » означает, что вектор скорости \vec{F}_m направлен по оси y в отрицательную сторону.

Тогда в двумерном потоке сила равна

$$F_M = \sqrt{F_{Mx}^2 + F_{My}^2}. \quad (5)$$

Таким образом, сила Магнуса зависит от скорости вращения частиц ω_2 (w , ν , τ , δ , ρ_2),

$$\vec{F}_m = \frac{\pi}{8} \rho_1 \delta^3 \left[(\vec{w}_1 - \vec{w}_2) \omega_2 \right], \quad (6)$$

при этом угловая скорость несущего газа в точке, где находится частица

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_y}{\partial x} - \frac{\partial w_x}{\partial y} \right). \quad (7)$$

При движении невращающейся частицы в потоке со сдвигом также возникает поперечная сила, величину которой для потока с линейным профилем скорости оценил Сафмен [3]:

$$F_S = 1,61 \sqrt{\nu} \rho_2 \delta^2 (w_1 - w_2) \sqrt{\frac{\partial w_1}{\partial y}}, \quad (8)$$

где $\partial w_1 / \partial y$ – градиент скорости; $\Delta w = w_1 - w_2$ – относительная скорость газа и частиц;

ν – коэффициент кинематической вязкости.

Из-за инерционности частицы, например, в ламинарном горизонтальном слое, она сохраняет большую, чем у газа скорость $(w_1 - w_2) < 0$ и $F_S < 0$, то т.е. сила направлена к стенке.

Время вращательного движения частиц

$$\beta_{\omega} = \frac{\delta^2 \rho_2}{60\nu\rho_1}. \quad (9)$$

Расчеты были выполнены только для доквадратичной области сопротивления $Re_{l2} \leq 1$ и для очень мелких частиц ($\delta = 0,1 - 1 \text{ мкм}$).

Как следует из рис. 2а при любом давлении газа p существенное влияние на силы F_M и F_S оказывает размер частиц δ . Так, увеличение δ с $0,1 \text{ мкм}$ до 1 мкм при $p = 0,8 \text{ МПа}$ приводит к возрастанию F_M более, чем в 30 раз, с $1 \cdot 10^{-20} \text{ кН}$ до $32 \cdot 10^{-20} \text{ кН}$. Характерно, что чем больше p , тем выше темп прироста F_M и F_S . Из рис. 2а, видно – если $\delta \rightarrow 0$, то силы $F_M \rightarrow 0$, $F_S \rightarrow 0$, что естественно. Заметим, что если бы все частицы были бы размером $\delta = 1 \text{ мкм}$, а объемная доля твердой фазы $\varepsilon_2 = (1 + \frac{\psi \rho_2}{\mu \rho_1})^{-1} = 0,2$ (где $\psi = w_2 / w_1$; ρ_2 – плотность частиц; μ – массовая концентрация порошка в смеси), то в сечении трубы диаметром $\varnothing 100 \text{ мм}$ разместилось бы – $z = 2$ млрд. частиц. Тогда их суммарное воздействие на поперечное смещение порошка было бы достаточно большим.

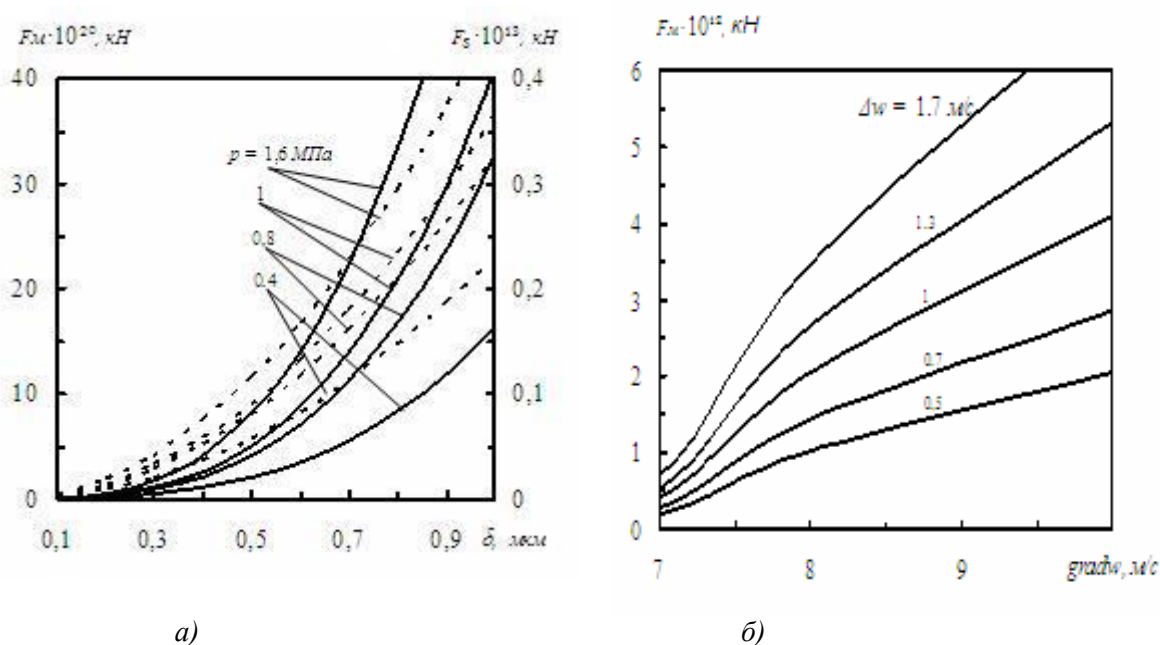


Рис. 2 – Зависимость сил Магнуса F_M (сплошные линии) и Сафмена F_S (пунктир) от размера частиц δ при изменении давления p (а), а так же силы Магнуса от градиента скорости при различной относительной скорости фаз Δw (б).

Исходные данные: а) $\Delta w = 1 \text{ м/с}$, $t = 50^\circ\text{C}$, $\text{grad} w = 5 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 100 \text{ с}^{-1}$;
 б) $t = 50^\circ\text{C}$, $\text{grad} w = 5 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 100 \text{ с}^{-1}$, $\delta = 2 \text{ мкм}$

Сила Магнуса F_M тем больше, чем выше градиент $\partial w_1 / \partial y$ при любой относительной скорости Δw . Например, увеличение Δw с $0,5$ до $1,7 \text{ м/с}$ при $\partial w_1 / \partial y = 10 \text{ м/с}$ приводит к увеличению F_M с $2 \cdot 10^{-12}$ до $7 \cdot 10^{-12} \text{ кН}$ (рис. 2б). Естественно, что если $\text{grad} w \rightarrow 0$, то и $F_M \rightarrow 0$ при любом значении Δw .

Из рис.3 следует, что силы $F_M(p, \Delta w)$ и $F_S(p, \Delta w, \text{grad} w, \omega_2)$, с увеличением p возрастают при любом значении давления среды, градиента скоростей, скорости вращения частиц ω_2 и разности скоростей Δw . Например, увеличение p с $0,4 \text{ МПа}$ до $1,6 \text{ МПа}$ при $\Delta w = 1,7 \text{ м/с}$ приводит к росту F_M с $2,4 \cdot 10^{-20} \text{ кН}$ до $14 \cdot 10^{-20} \text{ кН}$, при значении $\omega_2 = 100 \text{ об/с}$ (рис. 3а, сплошные линии). Менее существенное влияние на F_M и F_S оказывает $\text{grad} w$ (рис. 3б).

Влияние Δw проявляется сильнее при большем давлении p . В более плотном потоке частица активнее взаимодействует с окружающим газом, поперечные силы возрастают, что соответствует физическим представлениям.

Значительное влияние на силу F_M оказывает Δw и градиент скорости (рис. 3б). Так, при повышении $grad w$ с 1 до 10 м/с и $p = 1$ МПа сила F_M увеличивается с $0,002 \cdot 10^{-13}$ до $0,038 \cdot 10^{-13}$ Н. Причем, чем больше $grad w$, тем выше прирост F_M . Видно, что если $\Delta w \rightarrow 0$ и $grad w \rightarrow 0$, то сила $F_M \rightarrow 0$. Это так же не вызывает сомнений.

С повышением скорости вращения частицы ω_2 и $grad w$ силы F_M и F_S возрастают при любом значении δ (рис. 4а). Однако, чем крупнее частица, тем с увеличением δ выше прирост F_M и F_S , что соответствует физическому смыслу этих сил.

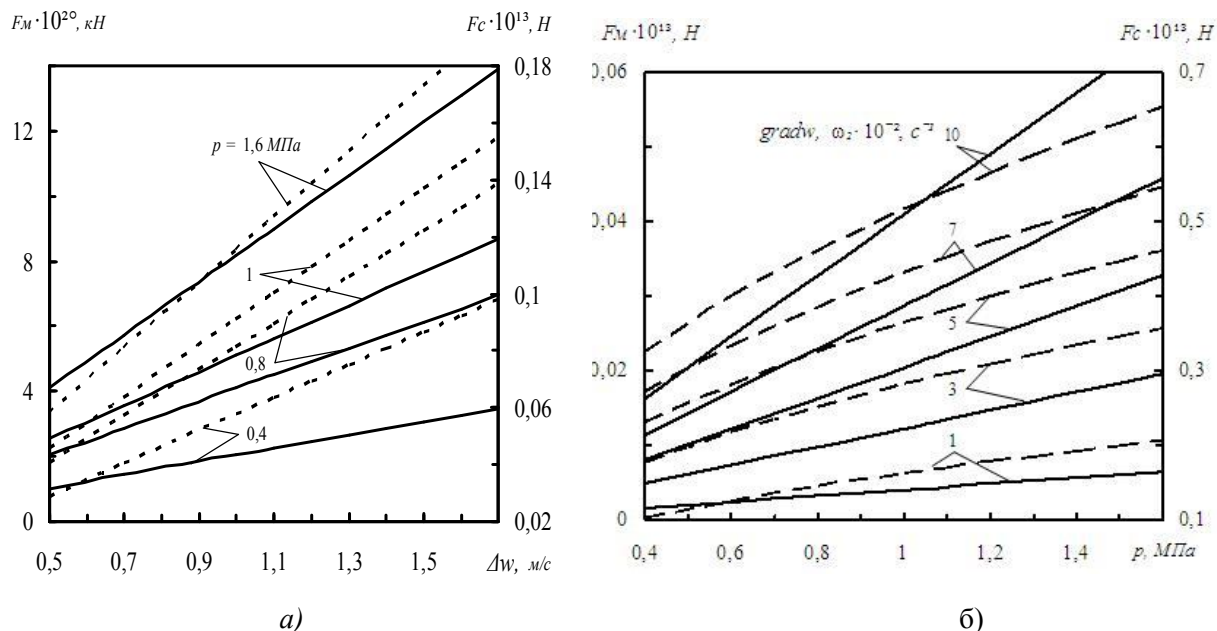


Рис. 3 – Влияние давления p , градиента скорости, скорости вращения частиц ω_2 (а), скольжения фаз Δw и давления p на силы Магнуса F_M (сплошные линии) и Саффмена F_S (пунктир).
Исходные данные: а) $\Delta w = 1$ м/с, $t = 50^\circ\text{C}$, $\delta = 1$ мкм;
б) $\delta = 2$ мкм, $grad w = 5$ м/с², $\omega_2 = 10^{-2}$ с⁻¹, $\Delta w = 2$ м/с

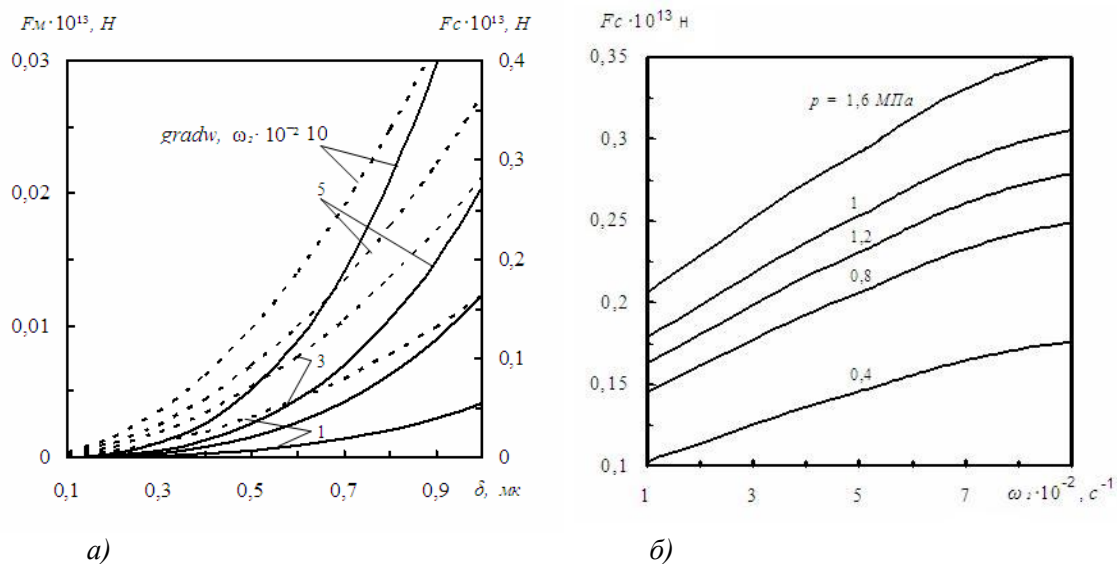


Рис. 4 – Зависимость поперечных сил F_M (сплошные линии) и F_S (пунктир) от размера частиц δ , градиента скорости и скорости вращения ω_2 (а) и силы F_S от скорости вращения ω_2 при различном давлении p (б).
Исходные данные: а) $\Delta w = 1$ м/с, $t = 50^\circ\text{C}$, $p = 1$ МПа;
б) $\delta = 1$ мкм, $grad w = 5$ м/с², $t = 50^\circ\text{C}$, $\Delta w = 1$ м/с

Представляет интерес, как давление газозвеси p и скорость вращения частиц ω_2 влияют на силу F_s (рис. 4б). Видно, что в более плотном потоке сила F_s больше при любой скорости ω_2 .

Выводы

1. Расчёты, проведенные для мелкодисперсного порошка при одних и тех же условиях, показали, что преобладающей из поперечных сил является сила Сафмена по сравнению с силой Магнуса.
2. Из рассмотренных физических воздействий наибольшее влияние на поперечные силы F_m и F_c оказывают размеры частиц δ .

Перечень ссылок

1. Кузнецов Ю.М. Газодинамика процессов вдувания порошков в жидкий металл / Ю.М. Кузнецов. – Челябинск: Metallurgy, 1991. – 160 с.
2. Косолап Н.В. Моделирование подачи пылеугольного топлива в доменную печь при высокой концентрации порошка / Н.В. Косолап, И.А. Лукьяненко, Р.Д. Куземко // Metallurgical processes and equipment. – 2006. – № 4 (6). – С. 40 – 43.
3. Турбулентное течение газозвеси / А.А. Шрайбер, А.Б. Гавин, В.А. Наумов и др. – Киев: Наукова думка, 1987. – 240 с.
4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. Ч. I. – М.: Наука, 1987. – 494 с.
5. Пневмотранспорт металлургических порошков на большие расстояния / Ю.М. Кузнецов, С.В. Ли, Л.К. Шляпников и др. // Сталь 1998. – № 10. – С. 66 – 69.
6. Харлашин П.С. Исследование сил Магнуса и Сафмена в газопорошковых потоках, подаваемых в доменную печь / П.С. Харлашин, Н.В.Косолап, Р.Д. Куземко // Дисперсные системы. Материалы XXIII научной конференции стран СНГ. – Одесса: Астрапринт, 2008. – С. 361 – 362.

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 01.04.2009