

Исследование поперечных сил в газодисперсных потоках

Показано, что при течении технологических порошков в транспортном пылепроводе обязательно возникают действующие на частицу поперечные силы, которые тормозят газодисперсный поток. Установлено влияние диаметра частиц, разности скоростей фаз, градиента скорости, давления газозвеси на поперечные силы Сафмена и Магнуса.

Ключевые слова: технологический порошок, частица, поперечная сила

Введение. Черная металлургия – самый крупный потребитель технологических порошков. По плану стратегического развития отрасли на металлургических комбинатах Украины при переводе доменных печей на вдувание пылеугольного топлива предусмотрено использование до 7 млн. т угля в год. Кроме того, порошкообразные десульфураторы многие годы подают в установках для ковшовой обработки чугуна, используют в технологиях инжекционной обработки стали путем вдувания десульфураторов и легирующих элементов под металл в ковше. Факельное торкретирование, газопорошковая раздувка шлака дают возможность радикально (в несколько раз) увеличить стойкость футеровки кислородных конвертеров. Трубопроводный пневмотранспорт широко используют для подачи извести в известково-обжигательных печах металлургических комбинатов.

Известно, что затраты на пневмотранспорт в ~6 раз больше, чем на другие виды транспорта – железнодорожный, автотранспорт, ленточные транспортеры и т. д. Поэтому чрезвычайно важно совершенствовать существующие модели пневмотранспорта и уметь определять как можно больше сил, действующих на частицу в дисперсных потоках. Модели расчета таких сложных, малоизученных течений, когда на частицу действует около 10 сил, в настоящее время еще недостаточно разработаны.

Постановка задачи. В транспортных системах диаметр пылепровода находится в пределах 50-150 мм, то есть размер частиц значительно меньше, чем диаметр трубы. В этом случае профиль скоростей в газопылевой смеси в пылепроводе не может быть равномерным, а поток одномерным. Поэтому любое газодисперсное течение в трубе является сдвиговым, что приводит к вращению частиц. Так как технологические порошки всегда являются полидисперсными [1], то причиной вращения частиц являются такие факторы, как неравномерное поле скоростей, постоянное столкновение частиц между собой, когда в полидисперсном потоке они, все без исключения, имеют разные диаметры, форму и летят в трубопроводе с разными скоростями. В этом случае более мелкие частицы ударяют в более крупные и отскакивают от них под определенным углом. При непрямом ударе частиц о стенку также происходит вращение этой частицы. Частицы вращаются после столкновения их о стенки кана-

ла под разными углами, при наличии поперечного градиента скорости в потоке несущего газа, под действием массовых сил, при несовпадении центра тяжести с центром приложения силы аэродинамического сопротивления. Таким образом, в движущемся потоке транспортного пылепровода, где течение всегда является сдвиговым и происходит столкновение частиц друг с другом, перемещение частицы без вращения физически невозможно. Поэтому любые модели движения газодисперсных многоскоростных потоков в каналах без учета поперечной миграции частиц дают только приближенное решение.

При изучении динамики многофазных систем обычно используют два метода – исследуют динамические характеристики одиночных частиц с последующим обобщением на случай системы, состоящей из множества частиц, и решают систему дифференциальных уравнений для сплошной среды с учетом концентрации твердой фазы и других физических воздействий. Если используют первый метод, то общее лагранжево уравнение поступательного движения единичной частицы записывают в форме [2]

$$m_2 \frac{dw_2}{d\tau} = F_g + F_c + F_b + F_m + F_s + F_{tm} + F_t + F_e + F_\phi + F_D + \dots \quad (1)$$

где обозначены силы, Н: F_g – тяжести; F_c – сопротивления; F_b – Бассе; F_m – Магнуса; F_s – Сафмена; F_{tm} – турбулентной миграции; F_t – термофореза; F_e – электростатическая; F_ϕ – фотофореза; F_D – диффузиофореза.

Для проектирования надежного и экономичного пневмотранспорта необходим более полный учет всех существующих физических воздействий на отдельно взятую частицу и на дисперсный поток в целом.

В работе [3] представлена методика расчета течения в транспортных трубопроводах, однако в ней не учитывали поступательное движение порошка и пренебрегали вращением частиц. В работах [4] и [5] вращение частиц также не учитывали, что вносит определенную погрешность в расчеты. Заслуживает внимания работа [6], где сделана попытка учесть поперечные силы, действующие на частицу в транспортном пылепроводе – силы Магнуса и Сафмена. Однако расчеты сил F_m и F_s не приведены.

Сила Магнуса. Она возникает в тех газодисперсных потоках, где по каким-либо причинам появляются области с различным статическим давлением. В результате на той стороне частицы, где направление обтекания и вращения элементов газа совпадают, давление будет пониженным по сравнению с областью, где эти направления противоположны (рис. 1). Вследствие этого возникает поперечная сила F_M (сила Магнуса), под действием которой частица перемещается в область пониженных давлений.

Сила Сафмена. Такая сила появляется в течениях газодисперсных потоков со сдвигом, то есть в любых течениях с неравномерным распределением скорости.

Данная работа отличается от [6] тем, что для определения главного физического воздействия (разности скоростей фаз $\Delta w = w_1 - w_2$) на поперечные силы F_M и F_C использован дифференциальный метод расчета течения в трубе. Метод дает возможность в каждом контрольном сечении учесть более 10 факторов и физических воздействий на движение частиц и, прежде всего, на скорости газа w_1 и частиц w_2 .

Цель работы – рассчитать скорости фаз и по ним, с учетом влияния различных факторов и физических воздействий, разделить только две силы – поперечные силы Магнуса F_M и Сафмена F_C , используя уравнения движения двухфазного газодисперсного потока в транспортном пылепроводе.

Система уравнений. Математическая модель квазидвумерного двухфазного течения в двухскоростном приближении включает целую систему дифференциальных и алгебраических уравнений [3-5]. Например, уравнение совместного движения фаз и движения частиц порошка в газозвеси представлено в виде

$$\varepsilon_1 \rho_1 w_1 \frac{dw_1}{dx} + \varepsilon_2 \rho_2 w_2 \frac{dw_2}{dx} = -\frac{dp}{dx} - F_{1w} - F_{2w} + g(\varepsilon_1 \rho_1 + \varepsilon_2 \rho_2) \cos \alpha. \quad (2)$$

Уравнение движения порошка в смеси записывали как

$$\varepsilon_2 \rho_2 w_2 \frac{dw_2}{dx} = -\varepsilon_2 \frac{dp}{dx} + F_{12} - F_{2w} + \varepsilon_2 \rho_2 g \cos \alpha \quad (3)$$

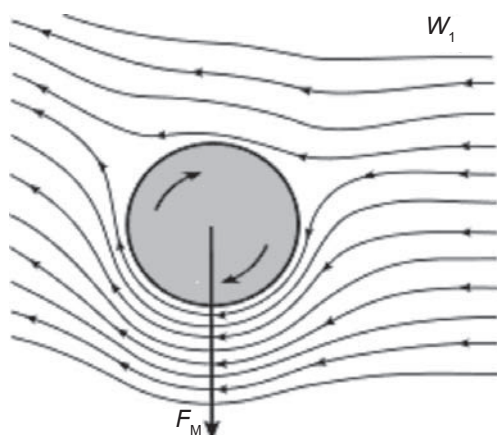


Рис. 1. Эффект Магнуса при воздействии на вращающуюся шаровую частицу

Уравнение состояния газовой фазы использовали в форме

$$\rho_1 = p / (RT_1). \quad (4)$$

В уравнениях (2)-(4) обозначены: w_1, w_2 – скорость газонесителя и частиц порошка, м/с; p – статическое давление в газозвеси, Па; ρ_1, ρ_2 – плотность несущего газа и порошка, кг/м³; T_1 – термодинамическая температура несущего газа, К; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – местная объемная доля газовой и твердой фаз; F_{1w}, F_{2w} – приведенная сила трения о стенку газа и порошка, Н/м³; R – газовая постоянная газонесителя, Дж/(кг·К).

Если газодисперсная смесь нагревается, например, в трубе форсунки, то для определения скорости фаз w_1 и w_2 уравнения (2) и (3) дополняли дифференциальными уравнениями энергии для каждой из фаз.

Для случая поступательного движения шарообразной свободновращающейся стоксовской частицы без сдвига силу Магнуса рассчитывали по формуле [2]

$$\vec{F}_M = \frac{\pi}{8} \rho_1 \delta^3 [(\vec{w}_1 - \vec{w}_2) \omega_2], \quad (5)$$

где δ – диаметр шаровой частицы, м; \vec{w}_1, \vec{w}_2 – векторы скорости несущего газа, м/с; ω_2 – скорость вращения частицы, 1/с.

Как показывают расчеты [2] и эксперименты, в результате удара частицы о стенку или в другую частицу в зависимости от δ угловая скорость ω_2 может достигать 10^5 - 10^7 с⁻¹. Под действием силы F_M частица перемещается в область более низкого давления.

Поперечную силу Сафмена при движении свободновращающейся сферической частицы в сдвиговом потоке определяли по выражению

$$F_C = 1,61 \sqrt{v} \rho_1 \delta^2 (w_1 - w_2) \sqrt{\partial w_1 / \partial y}, \quad (6)$$

где $\partial w_1 / \partial y$ – градиент скорости несущего газа в поперечном сечении, с⁻¹; v – коэффициент кинематической вязкости, м²/с. Более подробно методы решения уравнений (5) и (6) изложены в работах [2] и [6].

Метод расчета силы межфазного взаимодействия F_{12} , сил трения F_{1w} и F_{2w} , а также коэффициента аэродинамического сопротивления C_D изложен в [5]. В работах [3-5] для монодисперсного, а в [1] – для полидисперсного газовых потоков описаны граничные условия и способы решения дифференциальных уравнений численными методами. В контрольных сечениях, где по представленной методике рассчитаны плотность газа ρ_1 и скорости фаз w_1, w_2 , определяли поперечные силы F_M и F_C .

Данная математическая модель дает возможность определять скорости фаз в широком диапазоне числа Рейнольдса, в том числе и в доквадратичной области сопротивления, для которой выполнены расчеты в настоящей статье.

Исходные данные. Так как наиболее точные значения сил F_M и F_C получают, если уравнения (5) и (6) применяют для доквадратичной области сопротивления, то расчет по уравнениям (2)-(4) вели для очень мелких частиц диаметром $\delta = 1$ -10 мкм. Длина

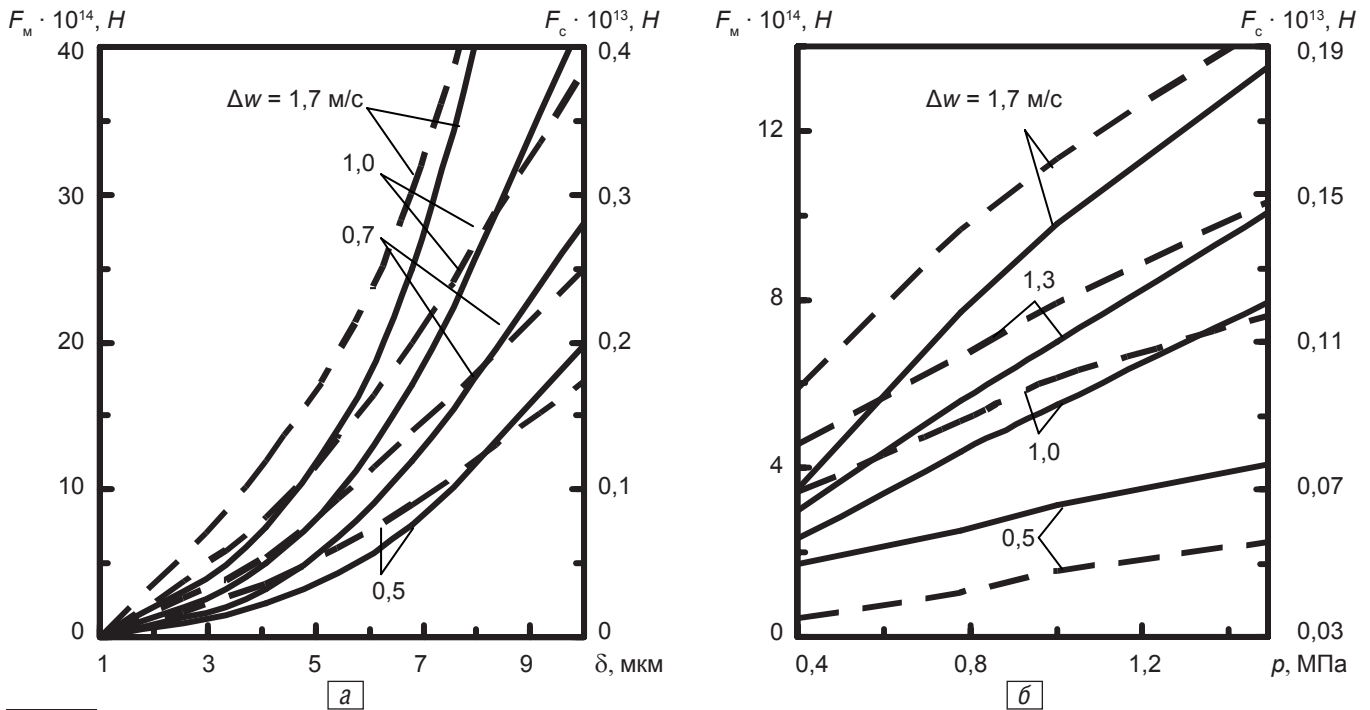


Рис. 2. Изменение сил Магнуса F_M (—) и Саффмена F_C (---) от разности скоростей фаз Δw при различном размере частиц δ (а) и давлении p газозвеси (б)

транспортного пылепровода от питателя до распределителя доменной печи № 5 ММК им. Ильича составляет $l = 253 \text{ м}$ и имеет 7 участков, а также три поворота под углом 90° и три – под углом 45° , радиус поворота $r = 1000 \text{ мм}$. Для таких режимов принимали, что расход несущего газа $V_H = 520 \text{ м}^3/\text{ч}$ (н. у.), расход порошка $m_2 = 500\text{-}550 \text{ кг/мин}$. Диаметр пылепровода составляет $D = 79 \text{ мм}$, температура $t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ (кроме рис. 5), диаметр частичек $\delta = 5 \text{ мкм}$ (кроме рис. 2, а; 4). Изменяя расходы m_2 тонкодиспергированного порошка поддерживали разность скоростей фаз $\Delta w = w_1 - w_2 = 0,5\text{-}2,0 \text{ м/с}$. При вязкости азота $\nu = 17,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ($t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$) и $\nu = 94,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

($t_1 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$) и принятых выше условиях течение происходило в околочватричной области. Принимали, что градиент скорости $\partial w_1 / \partial y = 5 \text{ с}^{-1}$ (кроме рис. 3, 5), скорость вращения частицы $\omega_2 = 100 \text{ с}^{-1}$.

Результаты расчетов и их анализ. При вышепринятых исходных данных получено, что абсолютное давление на входе в транспортный пылепровод $p = 0,86 \text{ МПа}$, скорости фаз w_1 и w_2 по длине находились в пределах 5-6 м/с, а местная объемная концентрация ε_2 по длине порошкопровода снижалась с 0,19 до 0,17.

Наиболее существенно на поперечные силы F_M и F_C влияет диаметр δ частиц газозвеси. Исходя из

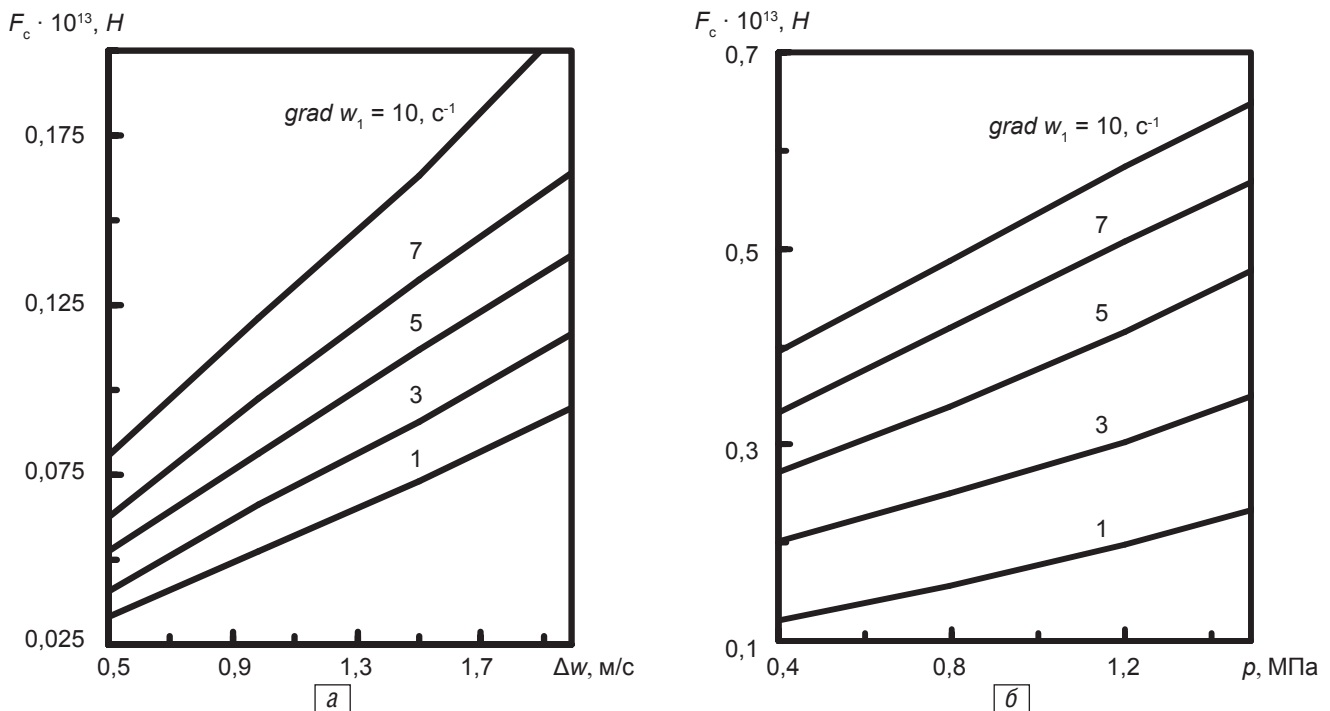


Рис. 3. Влияние градиента скорости $\text{grad } w_1$ (а) и давления газозвеси p (б) на силу Саффмена F_C

данных рис. 2, а, силы F_M и F_C возрастают существенно при любом значении разности скоростей фаз Δw . Так, например, при $\Delta w = 0,7$ м/с увеличение δ с 1 до 7 мкм приводит к росту F_M с $1,2 \cdot 10^{-14}$ до $12 \cdot 10^{-14}$ Н, а при этих же условиях сила F_C возрастает с $0,01 \cdot 10^{-13}$ до $0,16 \cdot 10^{-13}$ Н. Второй пример (рис. 2, а): если $\delta = 9$ мкм, а Δw повышается с 0,5 до 1,0 м/с, то силы увеличиваются F_M – с $15 \cdot 10^{-14}$ до $34 \cdot 10^{-14}$ Н, а F_C – с $0,14 \cdot 10^{-13}$ до $0,32 \cdot 10^{-13}$ Н.

Силы F_M и F_C с повышением разности скоростей фаз Δw возрастают при любом значении давления p (рис. 2, б). Так, если Δw увеличивается с 0,5 до 1,7 м/с, то при $p = 1,2$ МПа сила F_M возрастает с $2,8 \cdot 10^{-14}$ до $11 \cdot 10^{-14}$ Н, а сила F_C при этих же условиях увеличивается с $0,05 \cdot 10^{-13}$ до $0,175 \cdot 10^{-13}$ Н. Если разность скоростей $\Delta w = 1,3$ м/с, а давление p увеличивается с 0,4 до 1,6 МПа, то сила F_M возрастает соответственно с $3,8 \cdot 10^{-14}$ до $10 \cdot 10^{-14}$ Н, а сила F_C повышается с $0,085 \cdot 10^{-13}$ до $0,150 \cdot 10^{-13}$ Н.

На поперечную силу Сафмена F_C существенное влияние оказывают $grad w_1$, разность скоростей фаз и давление в транспортном пылепроводе. По рис. 3, а видно, что, например, при значении градиента $\partial w_1 / \partial y = 10$ с⁻¹ увеличение Δw с 0,5 до 1,7 м/с приводит к повышению силы Сафмена F_C почти вдвое – с $0,080 \cdot 10^{-13}$ до $0,185 \cdot 10^{-13}$ Н. Или, например, при $\Delta w = 1,3$ м/с и увеличении $\partial w_1 / \partial y$ с 1 до 10 с⁻¹ сила F_C возрастает с $0,06 \cdot 10^{-13}$ до $0,15 \cdot 10^{-13}$ Н.

На поперечную силу F_C не менее значительно влияет давление газозвеси в трубопроводе (рис. 3, б). Видно, что при любом градиенте скорости повышение p приводит к росту силы F_C . Например, при $\partial w_1 / \partial y = 5$ с⁻¹ увеличение давления p с 0,4 до 1,5 МПа приводит к росту силы F_C с $0,28 \cdot 10^{-13}$ до $0,45 \cdot 10^{-13}$ Н.

Значительное влияние на силу F_M оказывает и градиент скорости $\partial w_1 / \partial y$ (рис. 3, б). Так, при по-

вышении $grad w_1$ с 1 до 10 с⁻¹ сила F_M увеличивается при любой величине градиента.

Представляет научный интерес зависимость силы F_M и F_C от размера частиц δ при изменении давления p (рис. 4). Влияние δ проявляется сильнее при большем давлении p . В более плотном потоке частица активнее взаимодействует с окружающим газом, поперечные силы возрастают, что соответствует физическим представлениям.

Силы F_M и F_C с увеличением δ возрастают при любом значении давления p газозвеси. Из данных на рис. 4 следует, что, например, с ростом δ от 4 до 10 мкм при $p = 1$ МПа сила F_M увеличивается с $4 \cdot 10^{-14}$ до $42 \cdot 10^{-14}$ Н, а сила F_C при этих условиях возрастает с $0,08 \cdot 10^{-13}$ до $0,37 \cdot 10^{-13}$ Н. По рис. 4 также видно, что, например, если $\delta = 10$ мкм, то увеличение давления p с 0,4 до 1,2 МПа приводит к увеличению сил F_M с $0,24 \cdot 10^{-14}$ до $55 \cdot 10^{-14}$ Н, а силы F_C – с $0,28 \cdot 10^{-13}$ до $0,42 \cdot 10^{-13}$ Н.

Если газозвесь перемещается в трубе с теплоподводом (форсунка дутьевого прибора доменной печи, неводоохлаждаемая фурма технологии газопорошковой раздувки шлака в конвертере и другие), то дополнительное физическое воздействие существенно влияет на силу F_C . Чем больше нагрев несущего газа, тем меньше сила F_C (рис. 5). Так, при $\partial w_1 / \partial y = 10$ с⁻¹ повышение температуры азота с 50 до 600 °С приводит к снижению силы F_C с $0,28 \cdot 10^{-13}$ до $0,09 \cdot 10^{-13}$ Н. Такая закономерность F_C ($grad w_1$) является очевидной – при всех прочих равных условиях в менее плотном газе сила F_C будет ниже.

Расчеты сил Магнуса F_M и Сафмена F_C выполняли для единичной частицы и эти силы действительно малы. Однако, следует помнить, что в одном сечении пневмопровода частиц порошка очень много. Так, например, для данного случая, если расход несущего

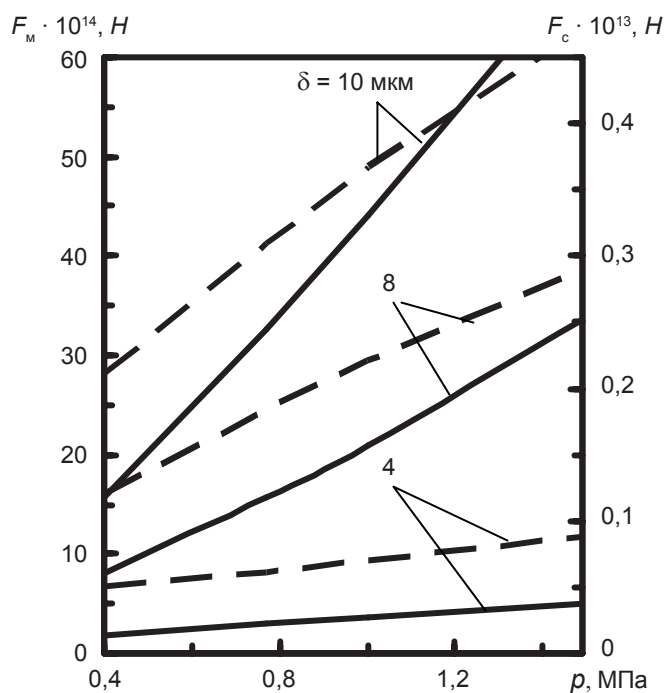


Рис. 4. Изменение поперечных сил F_M (—) и F_C (---) от размера частиц δ , при различном давлении p газозвеси

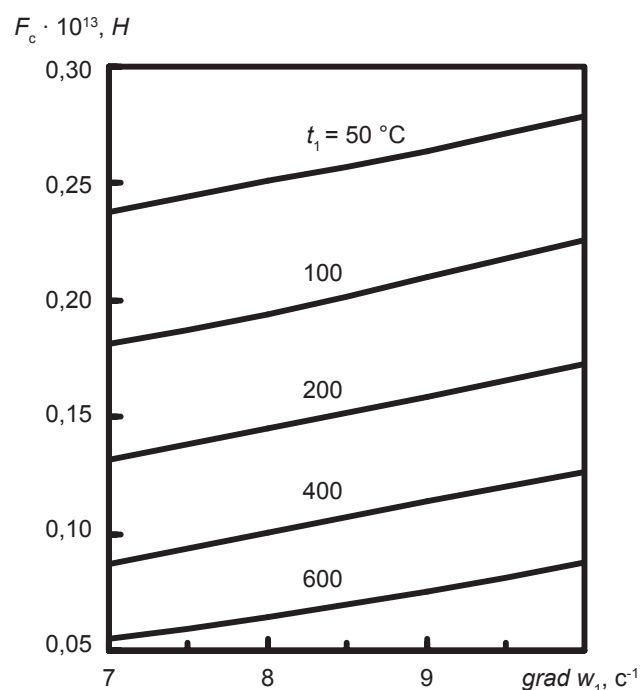


Рис. 5. Изменение силы Сафмена F_C от градиента скорости при различной температуре газа t

газа пневмотранспортного трубопровода на доменную печь № 5 ММКИ $V_n = 520 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход порошка $m_2 = 500 \text{ кг/мин}$, плотность угля $\rho_2 = 1700 \text{ кг/м}^3$, то в одном из контрольных сечений трубопровода длиной $l = 253 \text{ м}$ скорости фаз составляют (м/с) $w_1 = 6$, $w_2 = 5,6$. Решая уравнение неразрывности для газа $m_1 = \rho_1 w_1 F_1$ и частиц $m_2 = \rho_2 w_2 F_2$ легко определить, что только в одном сечении пневмопровода диаметром $D = 79 \text{ мм}$ местная объемная концентрация твердой фазы составляет $\varepsilon_2 = 0,18$. При этом количество частиц диаметром $\delta = 5 \text{ мкм}$, которые размещаются в сечении трубы, доходит до ~45 млн. шт. Большинство этих частиц увлекает во вращательное движение окружающей газ и поперечное перемещение этих частиц будет препятствовать движению основного газодисперсного потока.

Адекватность модели. Так как выполнить эксперимент по определению поперечных сил невозможно, то для проверки адекватности решения применили метод тестирования. Так, если:

– диаметр частиц $\delta \rightarrow 0$, то при любых значениях разности скоростей фаз Δw поперечные силы $F_m \rightarrow 0$ и $F_c \rightarrow 0$ (рис. 2, а; 4);

– разность скоростей фаз $\Delta w \rightarrow 0$, то при любых значениях давления p газозвеси силы $F_m \rightarrow 0$ и $F_c \rightarrow 0$ (рис. 2, б);

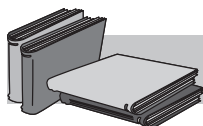
– $\text{grad } w_1 \rightarrow 0$, то при любом давлении p газозвеси $F_c \rightarrow 0$ (рис. 3, б).

Выводы

1. Силы Магнуса и Сафмена вносят существенные изменения в структуру дисперсного потока, увеличивают диссипацию энергии. Неучет этих сил может заметно повлиять на выбор начального давления пылепровода, на конструктивные характеристики пневмотранспортной системы.

2. Анализ различных факторов и физических воздействий показывает, что на поперечные силы F_m и F_c наибольшее влияние оказывают (в порядке уменьшения) размер частиц δ , разность скоростей Δw , давление p , нагрев газа, $\text{grad } w_1$.

3. Повышение давления в транспортном пылепроводе в ~4 раза приводит к увеличению сил Магнуса F_m и Сафмена F_c в 1,5-3 раза.



ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование полидисперсного течения в форсунке для подачи пылеугольного топлива в доменную печь / В. С. Волошин, Ю. А. Зинченко, Р. Д. Куземко и др. // *Металл и литье Украины*. – 2013. – № 10. – С. 15-20.
2. Турбулентное течение газозвеси / А. А. Шрайбер, А. Б. Гавин, В. А. Наумов и др. // К.: Наук. думка, 1987. – 240 с.
3. Харлашин П. С., Косолап Н. В., Куземко Р. Д. Моделирование пневмотранспорта угольной пыли в доменную печь при минимальных энергозатратах // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2008. – № 2 (12). – С. 16-19.
4. Kharlashin P. S., Kosolap N. V., Kuzemko R. D. Aerodynamic Drag in the Supply of a High-Density Coal-Dust Flux to a Blast Furnace. 09 // *Steel in translation*. – 2009. – Vol. 39, No S. – P. 663-668.
5. Косолап Н. В., Харлашин П. С., Куземко Р. Д. Моделирование подачи высокоплотного потока угольной пыли в доменную печь // *Сталь*. – 2010. – № 1. – С. 13-17.
6. Пневмотранспорт металлургических порошков на большие расстояния / Ю. М. Кузнецов, С. В. Ли, Л. К. Шляпников и др. // *Сталь*. – 1998. – № 10. – С. 66-69.

Анотація

Харлашин П. С., Ассіл Кадхім Мохаммед, Куземко Р. Д.

Дослідження поперечних сил в газодисперсних потоках

Показано, що при течії технологічних порошків в транспортному пилопроводі обов'язково виникають діючі на частинку поперечні сили, які гальмують газодисперсний потік. Встановлено вплив діаметру частинок, різниці швидкостей фаз, градієнта швидкості, тиску газосуспензії на поперечні сили Сафмена та Магнуса.

Ключові слова

технологічний порошок, частинка, поперечна сила

Summary

Kharlashin P. S., Assilem Mohammed Kadhim, Kuzemko R. D.

Research transverse forces hazodispersnyh flows

It is shown that the flow of technology in the transport of powders dust conduit necessarily arise acting on the particle, the lateral forces that hamper the flow of gas-dispersed. The effect of the particle diameter, the speed difference phases of the gradient of velocity, pressure on the gas suspension and transverse forces Safmena Magnus.

Keywords

technological powder, particle, the lateral force

К сведению читателей и подписчиков!

Телефон редакции

журнала «Металл и литье Украины»:

(044) 424-04-10

**Предлагаем разместить в нашем журнале
рекламу продукции или рекламного материала
о Вашем предприятии**

РАСЦЕНКИ НА РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ

(цены приведены с учетом налога на рекламу)

2, 3-я страницы обложки		страница внутри журнала	
цветная	1400 грн.	цветная	1050 грн.
черно-белая	700 грн.	черно-белая	500 грн.
1/2 страницы формата		1/2 страницы формата A4	
цветная	900 грн.	цветная	800 грн.
черно-белая	500 грн.	черно-белая	450 грн.
1/4 страницы формата		1/4 страницы формата A4	
цветная	550 грн.	цветная	300 грн.
черно-белая	300 грн.	черно-белая	200 грн.

При повторном размещении рекламы – скидка 15 %