УДК 532.17

В. И. ТИМОШЕНКО, Ю. В. КНЫШЕНКО, В. И. ЩЕРБАКОВ

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА НА ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СО СТЕНКАМИ КАНАЛА

Рассмотрены вопросы взаимодействия частиц газодисперсного потока со стенками канала в условиях градиентов скорости несущего газа в пограничном слое. С использованием известных зависимостей для сил аэродинамического сопротивления Магнуса и Саффмена исследовано влияние размера частиц на характер их движения в плоском горизонтальном канале в переходных и стационарных режимах. Определяющее влияние на процессы движения частиц в канале оказывает сила Магнуса в пограничных слоях у нижней и верхней стенок канала в зависимости от размера частицы. Акты соударения мелкодисперсных частиц со стенками канала при невысоких скоростях несущего газа характеризуются многократными отскоками малой амплитуды в пределах пограничного слоя, в то время как для крупных частиц, размеры которых превосходят величину вязкого слоя, акты соударения носят однократный характер. Исследование процессов движения частиц в несущем газовом потоке с учетом взаимодействия их со стенками канала имеет как самостоятельное значение для определенных классов газодисперсных систем, так и может быть использовано при построении численных эйлерово-эйлеровой и эйлерово-лагранжевой расчетных моделей двухфазных газодисперсных сред с учетом влияния частиц на параметры несущего газа.

Розглянуто питання взаємодії частинок газодисперсного потоку зі стінками каналу в умовах градієнтів швидкості несучого газу в пограничному шарі. З використанням відомих залежностей для сил аеродинамічного опору Магнуса та Саффмена досліджено вплив розміру частинок на характер їхнього руху в плоскому горизонтальному каналі в перехідних і стаціонарних режимах. Визначальний вплив на процеси руху частинок у каналі має сила Магнуса у пограничних шарах біля нижньої та верхньої стінок каналу у залежності від розміру частинки. Акти зіткнення дрібнодисперсних частинок зі стінками каналу при невисоких швидкостях несучого газу характеризуються багатократними відскоками малої амплітуди в межах пограничного шару, в той час як для крупних частинок, розміри яких перевищують величину в'язкого шару, акти зіткнення носять однократний характер. Дослідження процесів руху частинок у несучому газовому потоці з урахуванням взаємодії їх зі стінками каналу має як самостійне значення для визначених класів газодисперсних систем, так і може бути використано при побудові числових розрахункових ейлерово-ейлеровой та ейлерово-лагранжової розрахункових моделей двофазних газодисперсних середовищ з урахуванням впливу частинок на параметри несучого газу.

Interactions between the gas-dispersive flow particles and the channel walls under conditions of the velocity gradients for the carrier gas in a boundary layer are examined. The effects of the particle sizes on their motion through horizontal plane channel under transient and stationary conditions are studied using the known dependencies of Magnus and Saffman forces. The Magnus force has the determining influence on the particle motion in the boundary layers at the lower and upper walls of the channel depending on the particle size. Collision of fine dispersive particles against the channel walls at a small velocity of the carrier gas is characterized by multiple small-amplitude recoils within the boundary layer, whereas for large particles, whose sizes are in excess of the magnitude of a viscous layer, collisions are single. The study of the particle motion in the carrier gas flow considering their interactions with the channel walls is of independent importance for specific classes of gas-dispersive systems. It can employed to build the numerical calculating Euler-Euler and Euler-Lagrange models of two-phase gas-dispersive media considering the effects of particles on the carrier gas parameters.

Ключевые слова: *газодисперсный поток, частица, плоский канал, стенка канала, расчет, сила Магнуса, сила Саффмена, градиентный поток, пограничный слой, траектория движения.*

Введение. Газодисперсные системы, как один из видов двухфазных потоков, характеризуются взаимодействием твердых частиц и несущей газовой среды, а также взаимодействием частиц со стенками канала и между собой [1 – 4]. Особенности этих процессов определяют траекторные параметры частиц газодисперсного потока. При математическом моделировании газодисперсных потоков необходимо принимать во внимание следующие основные параметры несущей газовой среды: характер течения (ламинарный или турбулентный), временные и пространственные масштабы турбулентных пульсаций, распределение осредненных скоростей по сечениям транспортных каналов, плотность и температуру, направление течения (вертикальное, наклонное, горизонтальное). Характер движения транспортируемых частиц определяется их размером, формой, плотностью и скоростью движения относительно несущего газа (скоростью скольжения). От соотношения параметров газа и частиц зависят режим обтекания частиц (ламинарный или турбулентный), времена динамической релаксации частиц, взаимодействие между частицами и со стенками канала.

В условиях реальных газодисперсных потоков частицы, размеры которых не превышают 100 – 200 мкм, могут рассматриваться как составляющие квазигомогенного потока [5]. Для частиц, эквивалентный диаметр которых превышает эти значения, определяющим является взаимодействие частиц с несущим газом, параметры которого являются осредненными, между собой и со стенками канала. При этом существенное влияние на характер движения частиц имеет соотношение размеров частиц и пристеночных областей течения с большими градиентами скорости, обусловленными торможением газа при его взаимодействии с обтекаемыми поверхностями. Особенности влияния относительных размеров частиц на их взаимодействие со стенками канала и траектории движения рассмотрены в настоящей статье. Влияние частиц на параметры несущего газового потока и столкновения их между собой не учитывается. Примерами таких течений являются системы подачи угольной пыли в топки энергетических установок, в горновое пространство доменных печей, системы аспирации и пневмотранспорта сыпучих и гранулированных материалов [2, 6, 7].

Расчетная модель. Для простоты и наглядности рассмотрения процессов взаимодействия частиц со стенками канала полагается, что частицы имеют сферическую форму и вводятся в установившийся газовый поток в плоском горизонтальном канале. Рассматривается переходный режим движения частиц от начального состояния (ввод частиц в поток) до установившегося. Распределение скоростей турбулентного несущего газа u в плоском канале высотой h подчиняется закону 1/7, имеющему эмпирическое подтверждение [8]

$$u(y/h) = u_{\max}(2y/h)^{1/7} \quad \text{при } y < h/2;$$
$$u(y/h) = u_{\max}(2 - 2y/h)^{1/7} \quad \text{при } y > h/2, \qquad (1)$$

где y – координата по высоте канала, $u_{\max} = u_{\text{ср}}/0{,}817$ – максимальное значение скорости газа в середине канала, $u_{\text{ср}}$ – среднее значение скорости в канале.

Система координат, схема ввода частиц в газовый поток и сил, действующих на частицы, представлены на рис. 1.

Рис. 1

Здесь $u = u(y/h)$ – распределение скоростей несущего газа в канале; $\vec{U}$, $\vec{U}_p$, $\vec{U}_{\text{отн}} = \vec{U} - \vec{U}_p$ – векторы скорости газового потока, частицы и разности их скоростей (скорость скольжения); ω_p – угловая скорость вращения частицы; $\vec{F}_g$ – сила тяжести; $\vec{F}_a$ – сила аэродинамического сопротивления частицы; $\vec{F}_{\text{М}}$, $\vec{F}_{\text{S}}$ – сила Магнуса и сила Саффмена, обусловленные вращением частицы и градиентом скорости газа, обтекающего частицу, соответственно; $\vec{F}_{\text{ин}}$ – инерционная сила; $\vec{M}_{\text{с}}$ – момент аэродинамического сопротивления вращению частицы.

Начальные положения частиц определяются координатами y_{pi}^0 (i =1, 2, 3, …, n) и значениями продольных u_{pi}^0 и поперечных v_{pi}^0 скоростей, а также угловых скоростей вращения ω_{pi}^0 (векторы угловых скоростей направлены перпендикулярно плоскости течения).

Уравнения движения частицы массой m_p в потоке несущего газа [9]

$$\begin{cases} m_p \dfrac{d\vec{U}_p}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_a + \vec{F}_{\text{М}} + \vec{F}_{\text{S}}\vec{F}_S; \\ J_p \dfrac{d\vec{\omega}_p}{dt} = M_{\text{с}}, \end{cases}$$

(2)

где J_p, – момент инерции частицы.

Действующие на частицу силовые факторы определяются по зависимостям [1, 9]

$$F_a = 0{,}125\pi c_d \rho d^2 \left[(u(y) - u_p)^2 + v_p^2 \right];$$
$$F_g = \frac{\pi\pi d^3}{6} \rho_p g;$$
$$F_{\text{S}} = k_s (\rho\mu)^{1/2} d^2 (u - u_p)(du/dy)^{1/2}; \qquad (3)$$
$$\vec{F}_{\text{М}} = c_{\text{м}} d^3 \vec{\omega}_p \times \vec{U}_{\text{отн}};$$
$$M_c = -\frac{c_\omega \rho d^5 |\omega_p| \omega_p}{64},$$

где ρ – плотность несущего газа; d – диаметр частицы; c_d – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения; $\vec{j}$ – единичный вектор вертикальной оси; ρ_p – плотность материала частицы; k_s =6,46;

$$c_{\text{м}} = 6{,}05\pi \,\mathrm{Re}_\omega^{-0{,}39};\ \mathrm{Re}_\omega > 40;\quad \mathrm{Re}_\omega = \rho |\omega_p| d^2/\mu;$$
$$c_\omega = \frac{12{,}6}{\mathrm{Re}_\omega^{0{,}5}} + \frac{128{,}4}{\mathrm{Re}_\omega};$$
$$c_d = 0{,}44 \text{ при } \mathrm{Re}_d > 800;$$
$$c_d = 12{,}3/\mathrm{Re}_d^{0{,}5} \text{ при } \mathrm{Re}_d < 800;\ \mathrm{Re}_d = \frac{\rho \cdot d \cdot u}{\mu};$$

μ – коэффициент динамической вязкости газа.

Сила Саффмена $\vec{F}_S$ направлена перпендикулярно направлению потока для частиц в верхней части канала вниз, а для частиц в нижней части – вверх [9]. Сила Магнуса направлена перпендикулярно относительной скорости обтекания частицы так, что векторы $\vec{\omega}_p, \vec{U}_{\text{отн}}, \vec{F}_{\text{М}}$ образуют правую тройку векторов.

С учетом приведенных соотношений уравнения движения частицы (2) в проекциях на оси декартовой системы координат, представленной на рис. 1, имеют вид

$$\frac{d\overline{u}_p}{d\tau} = \frac{3c_d}{4}\varphi(\overline{u}-\overline{u}_p)\left[(\overline{u}-\overline{u}_p)^2+\overline{v}_p^2\right]^{1/2} + \frac{6c_{\text{м}}}{\pi}\varphi\overline{\omega}_p\overline{v}_p +$$
$$+\frac{3k_s}{2\pi}\frac{\varphi\overline{u}_{\text{p}}}{\text{Re}_h^{1/2}}(d\overline{u}/d\overline{y})^{1/2};$$
$$\frac{d\overline{v}_p}{d\tau} = -\psi - \frac{3c_d}{4}\varphi\overline{v}_p\left[(\overline{u}-\overline{u}_p)^2+\overline{v}_p^2\right]^{1/2} + \frac{6c_{\text{м}}}{\pi}\varphi\overline{\omega}_p(\overline{u}-\overline{u}_p) +$$
$$+\frac{3k_s}{2\pi}\frac{\varphi(\overline{u}-\overline{u}_p)}{\text{Re}_h^{1/2}}(d\overline{u}/d\overline{y})^{1/2}; \qquad (4)$$
$$\frac{d\overline{\omega}_p}{d\tau} = -\frac{15c_\omega}{16\pi}\varphi\left|\overline{\omega}_p\right|\overline{\omega}_p; \qquad \frac{d\overline{x}_p}{d\tau} = \overline{u}_p; \qquad \frac{d\overline{y}_p}{d\tau} = \overline{v}_p.$$

Эти соотношения написаны в безразмерном виде. В качестве масштабов принято: для линейных размеров – высота канала h, скорости – средняя по сечению скорость газа $u_{\text{ср}}$, угловая скорость и время отнесены к $u_{\text{ср}}/d$ и $h/u_{\text{ср}}$ соответственно. Кроме того, введены следующие обозначения безразмерных комплексов определяющих параметров

$$\varphi = \frac{\rho h}{\rho_p d}; \quad \psi = \frac{gh}{U^2}; \quad Re_h = \frac{\rho U h}{\mu}.$$

Характерные особенности движения частиц в горизонтальном канале. Можно выделить ряд основных фаз, характеризующих особенности силовых факторов, действующих на частицу в зависимости от ее размеров.

Фаза 1. Начало движения частицы и движение ее в сторону нижней стенки без вращения.

В начальный момент времени $t = 0$, $y_p = y_p^0$, $u_p = v_p = 0$, $\omega_p = 0$. На частицу действует сила тяжести, аэродинамического сопротивления и сила Саффмена, обусловленная градиентом скорости несущего газа. Под действием этих сил частица начинает двигаться к нижней стенке канала, при этом она разгоняется за счёт энергии потока и приобретает некоторую скорость $\vec{U}_p$ с составляющими u_p и v_p. Скорость скольжения убывает с уменьшением размера частиц (см. рис 2, б; 4, б).

Фаза 2. Удар о нижнюю и верхнюю стенки канала.

При взаимодействии со стенкой, параллельной оси потока, поступательная и вращательная скорости частицы изменяются скачком в соответствии с зависимостями [1, 9]

$$\begin{cases} u_p^* = \dfrac{5+2\cdot k_\tau}{7}\cdot u_p \pm \dfrac{k_\tau - 1}{7}\cdot \omega_p; \\ v_p^* = -k_n \cdot v_p; \\ \omega_p^* = \dfrac{5\cdot k_\tau + 2}{7}\omega_p \mp \dfrac{10\cdot(1-k_\tau)}{7\cdot d}\cdot v_p, \end{cases} \qquad (5)$$

где u_p^*, v_p^*, ω_p^* – продольная, поперечная и угловая скорости частицы после удара о стенку канала; k_n, k_τ – коэффициенты восстановления нормальной и тангенциальной составляющих скорости частицы, определяемые экспериментально в зависимости от вида материалов и характеристик поверхности частицы и стенок канала.

Нижний знак в формулах (5) соответствует соударению с нижней стенкой, а верхний – с верхней стенкой канала.

При неупругом ударе шероховатой частицы (k_n <1 и k_τ <1) скорость частицы при отражении от стенки канала будет меньше скорости перед моментом столкновения: нормальная и касательная составляющие скорости частицы уменьшатся по абсолютному значению, а нормальная составляющая ещё, кроме того, изменяет направление на противоположное.

Вследствие того, что удар нецентральный, частица начинает вращаться. После столкновения с нижней стенкой скорость вращения по часовой стрелке считается положительной. Потерянная после удара поступательная составляющая скорости частицы восстанавливается за счёт энергии несущего газа. При ударе о верхнюю стенку частица получает импульс вращения в противоположном предударному направлении, её угловая скорость значительно уменьшается, оставаясь положительной, либо вообще принимает отрицательное значение.

Фаза 3. Движение частицы в канале после ударов о нижнюю и верхнюю стенки.

После удара о нижнюю стенку силы Саффмена и Магнуса направлены вверх, а силы тяжести и вертикальная составляющая аэродинамического сопротивления – вниз. По абсолютному значению сила Саффмена возрастает у стенок канала (с ростом градиента скорости газа) и уменьшается вблизи оси канала. Что касается силы Магнуса, то она растёт с увеличением ω_p и скорости скольжения, а направление ее действия определяется знаками этих величин. Перед ударом о верхнюю стенку сила Саффмена тормозит движение частицы вверх, т. к. изменился знак градиента скорости потока. Таким образом, подъёму частицы способствует только сила Магнуса, а все остальные силы ему препятствуют. Возможна ситуация, когда частица может не долететь до верхней стенки и начинает двигаться вниз под действием силы тяжести, преодолевая аэродинамическое сопротивление.

После удара о верхнюю стенку изменяется скорость вращения частицы. Если она остается положительной, падение частицы замедляется, поскольку сила Магнуса действует вверх, при отрицательной скорости вращения скорость падения частицы увеличивается.

Рассмотренные фазы не исчерпывают всех возможных комбинаций сил, действующих на частицу при её миграции в канале, и справедливы для крупнодисперсных частиц, размеры которых превышают величину вязкого слоя. Средняя скорость обтекания таких частиц всегда больше скорости частицы.

Для мелкодисперсных частиц, размеры которых существенно меньше толщины пограничного слоя, движение их у нижней и верхней стенок имеет свои особенности. Эти особенности связаны с тем, что в условиях большого градиента скорости несущего газа вблизи стенки для частицы малого размера скорости скольжения могут изменять знак, что приводит к изменению направлений действия сил Магнуса и Саффмена в направлении, перпендикулярном течению несущего газового потока, и создает условия для неустойчивого соотношения действующих на частицу сил.

Результаты расчетов. Система уравнений (4) решалась методом Рунге–Кутта для одиночной частицы при следующих начальных условиях: $\overline{x}_p = 0$; $\overline{y}_p = 0{,}5$; $\overline{u}_p = \overline{v}_p = \overline{\omega}_p = 0$.

Параметры газового (воздушного) потока имели следующие значения: $u_{\text{ср}}$ = 15 м/с; 7 м/с; h = 0,05 м; плотность и динамическая вязкость газа ρ = 1,2 кг/м^3; μ =18,2·10^{-6} Па·с.

В качестве дисперсной фазы использованы угольные частицы d =3000 мкм и 300 мкм; плотность ρ_p =1400 кг/м^3; коэффициенты восстановления нормальной и тангенциальной составляющих скорости при соударении частицы со стенкой канала k_n =0,45, k_τ =0,85 [10].

Результаты расчетов для крупнодисперсной частицы диаметром 3000 мкм представлены на рис. 2. На рис. 2, а – 2, в приведены результаты для средней скорости несущего газа $u_{\text{ср}}$ = 15 м/с, а на рис. 2, г – 2, е – для $u_{\text{ср}}$ = 7 м/с. Силы Магнуса и Саффмена отнесены к силе тяжести, действующей на частицу.

Приведенные данные показывают, что при $u_{\text{ср}}$ = 15 м/с только после первого удара частицы о нижнюю стенку частица не долетает до верхней стенки канала (рис. 2, а), поскольку вертикальная составляющая силы Магнуса недостаточна для преодоления силы тяжести (угловая скорость вращения частицы незначительна из-за низкой скорости первого удара о нижнюю стенку (рис. 2, б). Однако при всех последующих ударах о нижнюю стенку частица достигает верхней стенки и скачкообразный режим движения частицы стабилизируется по всем параметрам. Это обусловлено периодическим изменением силы Магнуса, связанной с ударными взаимодействиями со стенками канала. Данная сила имеет определяющее значение для траектории движения частицы. Максимальное значение силы примерно вдвое превышает силу тяжести, в то время как сила Саффмена не превышает нескольких процентов от силы тяжести. В этих условиях продольная скорость частицы асимптотически стремится к величине примерно 0,6$u_{\text{ср}}$ (рис. 2, в).

Совершенно другим является поведение этой же частицы при $u_{\text{ср}}$ = 7 м/с.

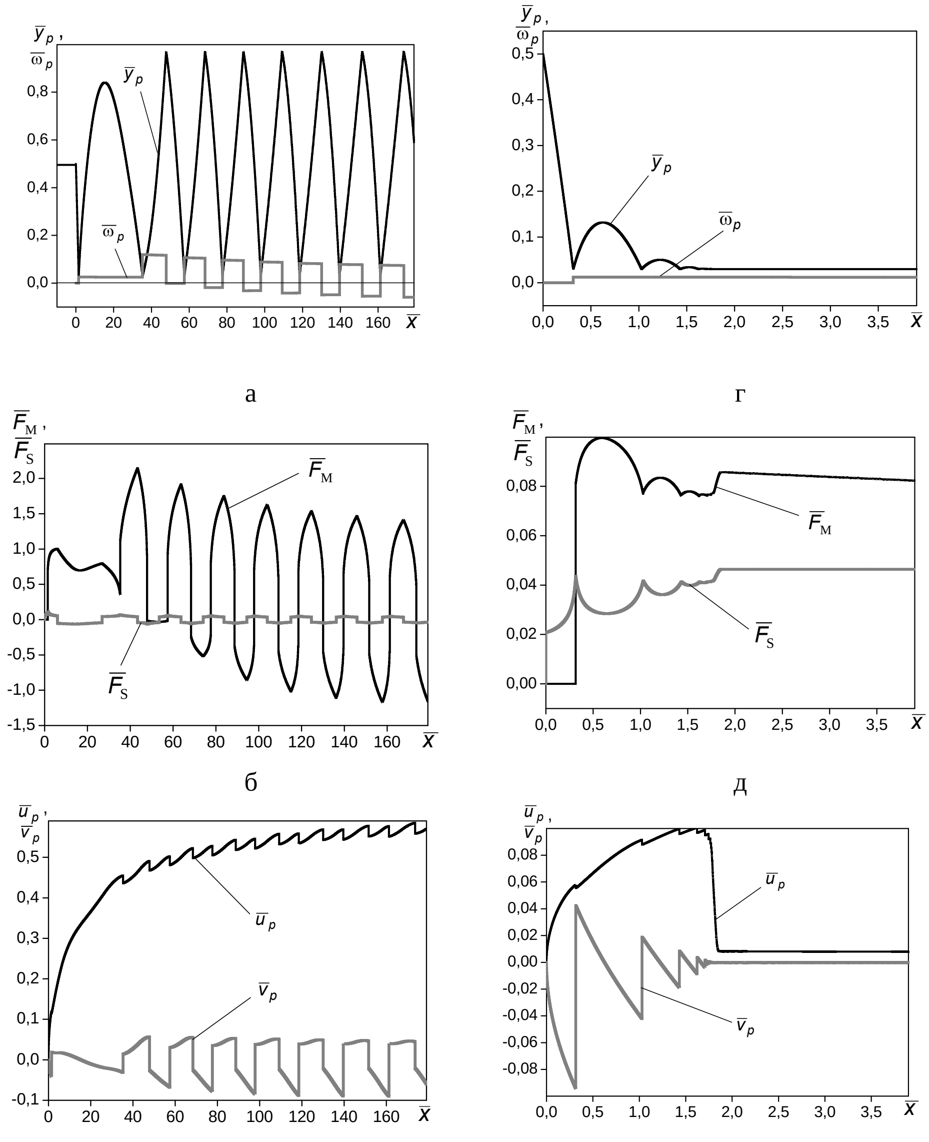
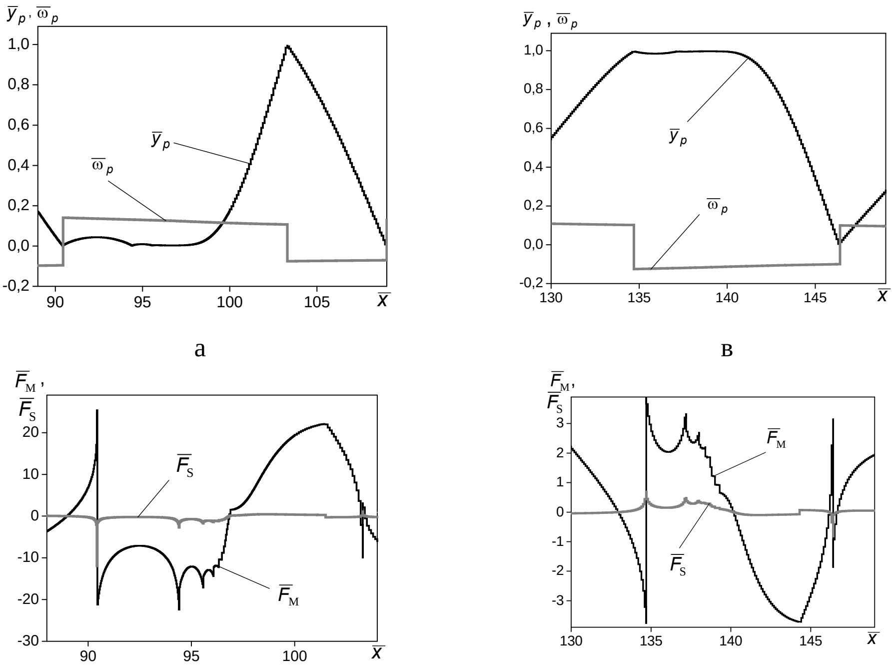


Рис. 2

Частица, после падения на нижнюю стенку канала, приобретает некоторую угловую скорость вращения. Однако подъемная составляющая силы Магнуса оказывается недостаточной для движения частицы вверх от нижней стенки. Небольшие подскоки частицы повышают скорость ее вращения, однако параллельное уменьшение скорости скольжения сохраняет подъемную составляющую силы Магнуса на том же низком уровне (рис. 2, д). Таким образом, частица практически скользит по нижней стенке канала со скоростью, не превышающей 1,5 % от средней скорости газа (рис. 2, е). Данный расчет раскрывает механизм такого свойства газодисперсных потоков, как наличие некоторой минимальной скорости, называемой критической, ниже которой эффективность транспорта частиц газовым потоком практически исчезает. Полученные результаты показывают, что величина критической скорости для данных частиц превышает 7 м/с и может быть конкретизирована изложенным выше методом. Сопоставление с экспериментальными данными для критических скоростей при пневмотранспорте подобных частиц показывает, что они находятся в диапазоне 9 – 11 м/с [11]. Расчеты показывают, что при средней скорости газа более 10 м/с имеет место устойчивый скачкообразный режим движения частицы.

Результаты параметрических расчетов движения мелкодисперсных частиц в градиентном газовом потоке с учетом столкновений частиц со стенками канала показывают, что характер движения мелкодисперсных частиц существенно отличается от движения крупнодисперсных частиц. Это связано с тем, что мелкие частицы при попадании в вязкую пристеночную область могут иметь скорость, существенно большую скорости газа в этой области. Для частиц, размеры которых меньше толщины пристеночной области газового потока, влияние градиента скорости и скорости скольжения на величину и направления сил Сафмена и Магнуса усиливается. Характер изменения траектории $\overline{y}_p(x)$, угловой скорости вращения частиц $\overline{\omega}_p$ и действующих на частицы диаметром 300 мкм сил Сафмена и Магнуса, отнесенных к силе тяжести, на этапе одного столкновения с нижней и верхней стенками представлен на рис. 3, а; 3, б и 3, в; 3, г соответственно.



а　в

б　г

Рис. 3

Из приведенных данных следует, что отрицательная скорость скольжения частицы перед ударом о нижнюю стенку приводит к тому, что силы Саффмена и Магнуса (при вращении частицы в положительном направлении) ускоряют движение частицы к стенке канала. В послеударные моменты времени направления указанных сил сохраняются. Характерным для такого взаимодействия является небольшой подскок частицы за счет инерции и повторные соударения частицы со стенкой при одновременном движении частицы вдоль стенки (рис. 3, а – 3, б). При каждом взаимодействии со стенкой продольная скорость уменьшается. Подскакивающее движение частицы вдоль нижней стенки продолжатся до смены знака скорости скольжения. После этого силы Магнуса и Саффмена меняют свое направление и способствуют движению частицы вверх из пограничного слоя. Очевидно, что с уменьшением размера частицы «глубина погружения» центра тяжести частицы в пограничный слой в направлении стенки увеличивается, скорость скольжения частицы на большом отрезке пути вертикального движения частицы остается отрицательной, силы Магнуса и Саффмена препятствует подъему частицы от стенки. При этом время нахождения частицы в зоне малых скоростей газа (в пограничном слое) увеличивается.

У верхней стенки, если силы инерции и Магнуса на входе в пограничный слой, действующие вверх, оказываются больше сил тяжести и Саффмена, действующих вниз, то частица столкнется с верхней стенкой. В зависимости от скорости столкновения угловая скорость вращения частицы в результате удара может либо уменьшиться, либо даже изменить направление. В первом случае, при сохранении положительного направления вращения при отрицательной скорости скольжения, сила Магнуса совпадает по направлению с силой тяжести и силой инерции, в результате чего частица выходит из зоны пограничного слоя, в которой скорость скольжения отрицательна, в зону положительных значений скорости скольжения.

В том случае, когда направление вращения частицы после удара изменяется на противоположное, при отрицательной скорости скольжения частица может повторно столкнуться с верхней стенкой (даже несколько раз), пока скорость скольжения не станет положительной и сила Магнуса, действующая в этом случае вниз, совместно с силой тяжести не обеспечит движение ее вниз. Эти эффекты имеют место при небольшой скорости несущего газа (рис. 3, в – 3, г).

На рис. 4 представлены результаты расчета для частицы диаметром 300 мкм в переходном и стационарном режимах с учетом описанных выше эффектов взаимодействия со стенками канала. На рис. 4, а – 4, б результаты соответствуют средней скорости несущего газа $u_{ср}$ =15 м/с, а на рис. 4, в – 4, г – $u_{ср}$ =7 м/с.

Приведенные данные демонстрируют описанные характерные особенности движения мелкодисперсной частицы в горизонтальном канале. При средней скорости газового потока $u_{ср}$ =15 м/с третье, пятое, седьмое и т. д. соударения с нижней стенкой приводят к подскакивающему движению частицы вдоль нижней стенки до смены знака скорости скольжения, а следовательно, и к снижению горизонтальной скорости частицы (рис. 4, а; 4, б). В установившемся режиме величина скорости движения частицы носит колебательный характер вокруг значения средней скорости частицы, равной примерно 80 % от средней скорости газа, с амплитудой $\pm$20 %. При средней скорости газового потока $u_{ср}$ = 7 м/с имеет место подскакивающее движение частицы не только вдоль нижней стенки, но и вдоль верхней (рис. 4, в; 4, г). Установившийся режим движения частицы наступает после достаточно продолжительного переходного процесса. Средняя скорость частицы составляет примерно 85 % от средней скорости газа с амплитудой колебаний $\pm$15 %.

Результаты параметрических расчетов показывают, что характер стационарного режима движения частиц не зависит от координат ввода частиц в газовый поток и сказывается только на временах установления данного режима.

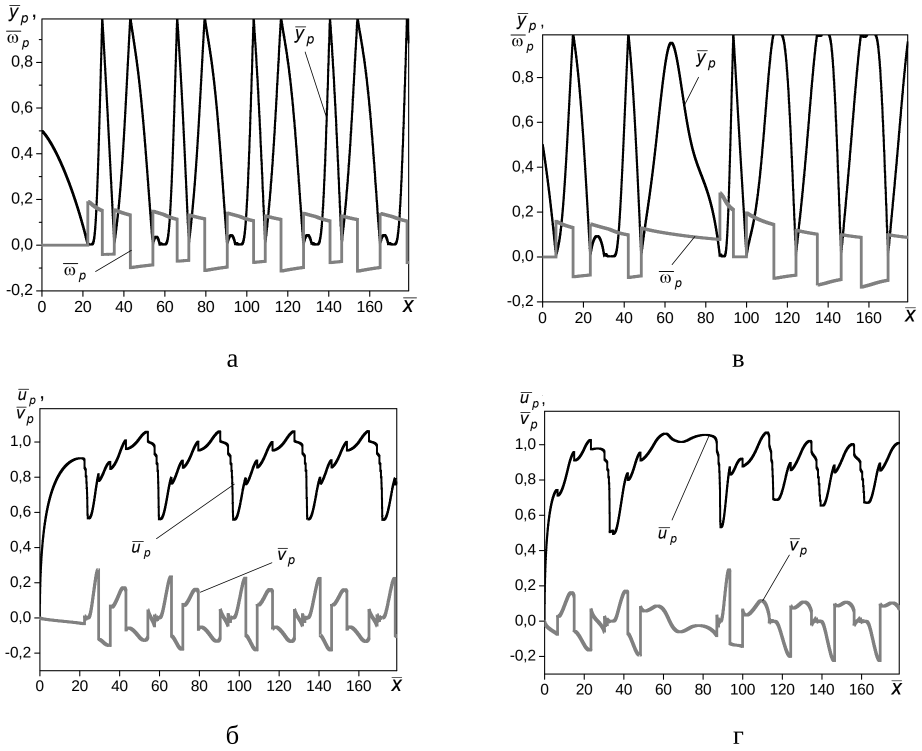


Рис. 4

Выводы. Анализ взаимодействия частиц газодисперсного потока со стенками канала показывает, что возникающие ударные силовые факторы оказывают существенное влияние на характер аэродинамического обтекания и систему сил, действующих на частицу, что определяет траекторные параметры движущихся частиц.

Для крупнодисперсных частиц скачкообразный характер их движения в канале является ярко выраженным, что связанно с однозначным определением силовых факторов при ударном взаимодействии со стенками канала. Для мелкодисперсных частиц при взаимодействии со стенками канала определяющее влияние на характер их движения играет сила Магнуса, направление действия которой зависит от знака скорости скольжения и направления вращения частицы, которые нестабильны в области пограничного слоя. Это приводит к тому, что траектории движения частицы вблизи стенок канала характеризуются многократными подскоками небольшой амплитуды, а продольная скорость частицы после выхода на стационарный режим колеблется с амплитудой 15 – 20 % относительно среднего значения.

Представленный механизм взаимодействия частиц со стенками канала может быть использован в качестве одного из элементов математических моделей для расчета интегральных характеристик газодисперсных потоков, включая обратное влияние частиц на параметры несущего газа.

1. *Шрайбер А. А.* Гидромеханика двухкомпонетных потоков с твёрдым полидисперсным веществом / *А. А. Шрайбер, В. Н. Милютин, В. П. Яценко.* – Киев : Наукова думка. 1980. – 252 с.

2.*Зуев Ф. Г.* Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях / *Ф. Г. Зуев* // М. : Колос, 1976. – 559 с.
3. *Sommerfeld M.* Analysis of collision effects for turbulent gas–particle flow in a horizontal channel: Part I. Particle transport / *M. Sommerfeld* // International Journal of Multiphase Flow. – 2003. – № 29. – P. 675 – 699.
4. *Вараксин А. Ю*. Турбулентные течения газа с- твёрдыми частицами / *А. Ю. Вараксин*. – М. : Фзматлит. 2003. – 192 с.
5. *Хинце И. О.* Турбулентность, ее механизмы и теория / *И. О. Хинце.* – М. : Гос. изд. физико-математ. литер., 1963. – 680 с.
6. *Кесова Л. А.* Система подачи угольной пыли с высокой концентрацией пыли для котла, сжигающего низкореакционные топлива / *Л. А. Кесова* // Промышленная теплоэнергетика. – 1992. – Т.14, № 1 – 3. – С. 79 – 81.
7. *Шуваева Н. М.* Повышение эффективности подготовки к факельному сжиганию низкореакционных углей Украины / *Н. М. Шуваева, О. М. Борисенко, О. А. Борисенко* // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2005. – № 6. – С. 124 – 129.
8. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя / *Г. Шлихтинг* – М. : Наука. 1969. – 742 с.
9. *Наумов Ю. А.* Динамика частицы в вязкой среде / *Ю. А. Наумов* // Математическое моделирование. – 2006. – Т.18, № 5. – С. 27 – 36.
10. *Кривощеков В. И.* Ударное взаимодействие твердой частицы с шероховатой поверхностью стенки / *В. И. Кривощеков, Л. А. Новиков* // Збагачення корисних копалин : Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 38 (79). – С. 78 – 86.
11. *Сакс С. Е.* Определение скорости взвесенесущего потока / *С. Е. Сакс* // Инж.-физический журнал. – 1970. – Т. 28, № 5. – С. 832 – 837.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепр

Получено 03.10.2016,
в окончательном варианте 10.10.2016