

РАВНОВЕСНЫЕ ТРАЕКТОРИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Сузак Е.В.

*Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск*

Ключевые слова: двухфазные системы, аэрозоли, турбулентные потоки.

Аннотация. Построена модель движения аэрозольных частиц под действием внешних сил и сил, связанных с их обтеканием. Из анализа результатов расчета равновесных траекторий частиц следует, что в восходящем газодисперсном потоке частицы под действием градиента осевой скорости в целом перемещаются к оси канала, в нисходящем – к стенке канала. Полученные результаты подтверждаются данными экспериментальных исследований.

EQUILIBRIUM TRAJECTORIES OF AEROSOL PARTICLES IN TURBULENT FLOW

Sugak E.V.

*Siberian state university of science and technology
named after academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk*

Keywords: two-phase systems, aerosols, turbulent flows.

Abstract. A model of aerosol particles motion under the action of external forces and forces associated with their flow is constructed. From the analysis of the results of calculation of equilibrium trajectories of particles it follows that in the ascending gas – dispersed flow particles under the influence of the axial velocity gradient as a whole move to the channel axis, in the descending-to the channel wall. The results are supported by the data of experimental studies.

Для расчета многих технологических процессов и процессов очистки промышленных газовых выбросов в режимах с интенсивным взаимодействием фаз требуется создание математических моделей, учитывающих комплекс физических явлений межфазного взаимодействия [1, 2].

Для турбулентного течения газа характерны беспорядочные хаотические пульсации скорости во всех направлениях, придающие практически всем происходящим процессам стохастический характер и истинное значение любой характеристики газа в конкретной точке в конкретный момент времени представляет собой сумму величин, характеризующих основное и пульсационное течения. Соответственно, движение частиц в турбулентном потоке газа также отличается большей, чем в ламинарном, сложностью и интенсивностью межфазного взаимодействия. Это обусловлено, прежде всего, беспорядочными турбулентными пульсациями среды и связанными с ними колебательными движениями частиц, их турбулентной диффузией. Можно считать, что движение частиц в турбулентном газовом потоке складывается из поступательного движения под действием внешних сил и сил, связанных с их обтеканием, и хаотического движения под влиянием турбулентных пульсаций газа [1-3].

В восходящем или нисходящем потоке можно считать, что на частицу кроме силы сопротивления действует только сила тяжести и уравнение поступательного движения частицы при стоксовском режиме обтекания можно записать в виде [2, 4, 5]

$$\frac{du}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho}{\rho_d} \cdot \frac{\psi}{\delta} |w - u| (w - u) \pm g, \quad (1)$$

которое допускает аналитическое решение в виде [2, 5, 6]:

$$u = w \pm g\tau + C \cdot \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

где u - скорость частицы, $м/с$; w - скорость газа, $м/с$; $\tau = \delta^2 \rho_d / (18\mu)$ - время релаксации скорости частицы, $с$; C - константа интегрирования; δ - диаметр частицы, $м$; ρ_d и ρ - плотности частиц и газа, $кг/м^3$; g - ускорение свободного падения (знак «+» относится к нисходящему потоку, «-» – к восходящему), $м/с^2$; r - радиус-вектор (расстояние от оси канала), $м$.

Если при $t = 0$ $u = u_0$, то в уравнении (2) $C = u_0 - w \pm g\tau$, и тогда

$$u = w - (w - u_0) \exp(-t/\tau) \pm g\tau [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (3)$$

Легко видеть, что при $t \gg \tau$ скорость относительного движения $v = w - u$ принимает постоянное максимальное предельное значение $v = g\tau$ и в большинстве практически значимых случаев не превышает $0,1$ $м/с$, что значительно меньше обычных скоростей газа [6]. Поэтому для практических расчетов осевая скорость мелких аэрозольных частиц часто принимается равной скорости газа [3-7]. Кроме того, при $t \geq \tau$ можно считать движение частицы безинерционным и существенно упростить нестационарные модели за счет замены дифференциальных уравнений алгебраическими [3-7].

Наличие градиента осевой скорости газа в турбулентном потоке приводит к появлению специфической формы продольного движения частиц, в результате чего их относительная скорость меняет по сечению канала не только свое значение, но и направление. В общем случае в ядре потока скорости частиц могут быть выше скорости газа, а в периферийной области – ниже, причем средняя по сечению скорость частиц может отличаться от средней скорости газа для высокодисперсных частиц на $1,5-2$ $м/с$, для крупных - на $8-10$ $м/с$ [3, 4, 6]. Отставание частиц дисперсной фазы от сплошной не всегда удается объяснить влиянием силы тяжести, так как, во-первых, оно характерно и для высокодисперсных частиц и, во-вторых, наблюдается и в горизонтальных каналах [8]. Определенное влияние на величину продольного скольжения частиц оказывают и взаимодействие частиц друг с другом и со стенками канала, однако основную роль, видимо, играют процессы, связанные с перераспределением частиц с разной скоростью по сечению канала – турбулентная диффузия, подъемная и турбулентная поперечная миграция [1, 3-7].

Градиент продольной скорости газа приводит к вращению частицы вокруг своей оси и ее поперечному движению, причиной которого является сила Магнуса-Жуковского, направленная перпендикулярно вектору относительной скорости в сторону максимального значения суммы тангенциальных составляющих скоростей обтекания и вращения (рис. 1) [1, 2, 6]:

$$\mathbf{F}_Ж = \frac{\pi}{8} \rho d^3 [\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}], \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\Omega}$ - угловая скорость вращения частицы, с⁻¹; $\mathbf{v}$ - вектор скорости относительного движения частицы, м/с.

Тогда на частицу кроме сил, связанных с ее обтеканием, силы тяжести и силы Архимеда), действует поперечная сила Магнуса-Жуковского, и уравнение движения в векторной форме можно записать в виде [2, 6]:

$$m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{F}_Ж + \mathbf{F}_C + \mathbf{G} + \mathbf{F}_A, \quad (5)$$

где $\mathbf{u}$ - вектор скорости частицы, $\mathbf{F}_Ж$, $\mathbf{F}_C$, $\mathbf{G}$ и $\mathbf{F}_A$ - векторы сил Магнуса-Жуковского, сопротивления, тяжести и Архимеда.

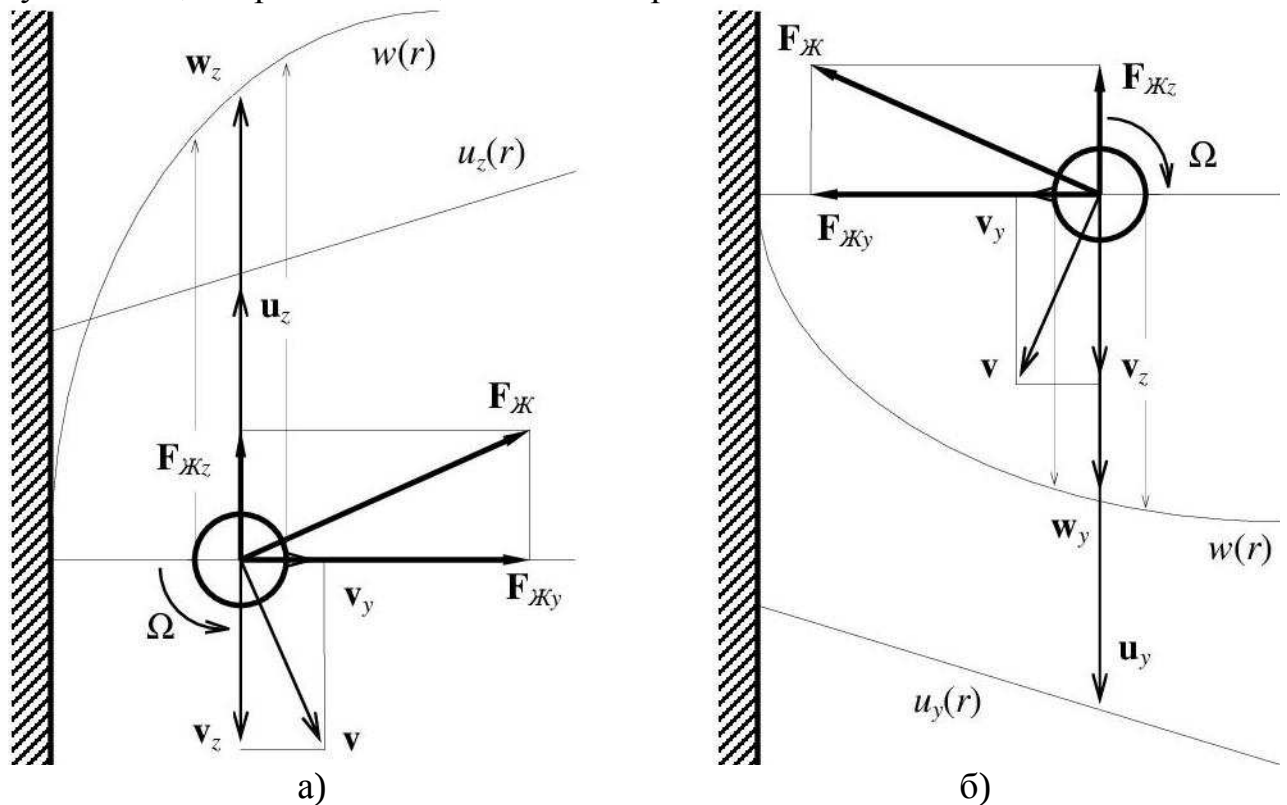


Рис. 1. Схема возникновения подъемной силы в восходящем (а) и нисходящем (б) потоках

При анализе движения частиц в осесимметричном канале можно сделать следующие допущения: течение газа установившееся адиабатическое, радиальная составляющая скорости газа отсутствует, частицы имеют сферическую форму и взаимодействие между частицами отсутствует.

Тогда система уравнений двумерного нисходящего или восходящего движения частицы в газовом потоке в проекциях на оси координат (ось z направлена по оси канала) может быть записана в виде [2, 6]:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_d} \right) = \frac{\rho}{\rho_d} \frac{dw}{dr} \frac{dr}{dt} - \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_d} \frac{\psi}{\delta} \left(\frac{dz}{dt} - w \right) \sqrt{\left(\frac{dz}{dt} - w \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2} \pm \left(1 - \frac{\rho}{\rho_d} \right) g, \quad (6)$$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_d} \right) = \frac{\rho}{\rho_d} \left(w - \frac{dz}{dt} \right) \frac{dw}{dr} - \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_d} \frac{\psi}{\delta} \frac{dr}{dt} \sqrt{\left(\frac{dz}{dt} - w \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2}. \quad (7)$$

Левые части уравнений (6) и (7) отражают влияние сил инерции частиц и эффект «присоединенной массы» (силу Тейлора) – влияние сил инерции массы газа, двигающейся вместе с частицей [1, 5]. В правых частях уравнений первые слагаемые отражают влияние силы Магнуса-Жуковского, вторые – силу лобового аэродинамического сопротивления, третье слагаемое в уравнении (6) отражает совместное влияние сил тяжести и Архимеда.

Для расчета скорости газа можно воспользоваться результатами моделирования турбулентных потоков газа [4, 9, 10].

На рисунках 2 и 3 представлены некоторые результаты численного решения системы дифференциальных уравнений (6)–(7) для восходящего и нисходящего двухфазных потоков.

Из анализа результатов расчетов в широких интервалах изменения основных параметров можно сделать следующие выводы:

- в восходящем потоке частицы под действием градиента осевой скорости газа в целом перемещаются к оси канала, в нисходящем – к стенке;

- при обычных значениях основных параметров относительная осевая скорость частиц быстро становится равной скорости седиментации и для оценочных расчетов при нисходящем и восходящем течении можно, соответственно, принимать $u_z \approx w \pm v_s$;

- подъемная сила Магнуса-Жуковского при обычных значениях основных параметров потока может оказывать существенное влияние на движение только достаточно крупных частиц с размерами более 50÷100 мкм и только в пределах ламинарного пристенного и буферного слоя.

Как уже отмечалось, в реальных условиях поведение дисперсных систем при турбулентном режиме отличается от идеального. Отклонения траекторий частиц от расчетных (равновесных) могут быть вызваны, в первую очередь, турбулентными пульсациями газа и, кроме того, регенерацией свободной поверхности частиц или капель за счет их взаимодействия с поверхностью канала (осаждение и унос) или между собой (коагуляция), а также дробления [2-4]. Поэтому расчетные зависимости и траектории частиц в турбулентном газодисперсном потоке можно рассматривать только как осредненные или как тенденции поведения частиц. В турбулентных потоках, в которых траектории частиц определяются не только детерминированными силами, но и случайными воздействиями турбулентных пульсаций газа, это явление проявляется только как общая тенденция в виде перераспределения частиц по сечению канала и изменения профиля концентрации дисперсной фазы по длине канала [4, 6, 11].

Полученные результаты расчетов и выводы подтверждаются данными экспериментальных исследований и могут использоваться для моделирования турбулентных газодисперсных потоков, расчета концентраций дисперсной фазы и эффективности процессов и аппаратов химической технологии и очистки отходящих промышленных газов [2, 11].

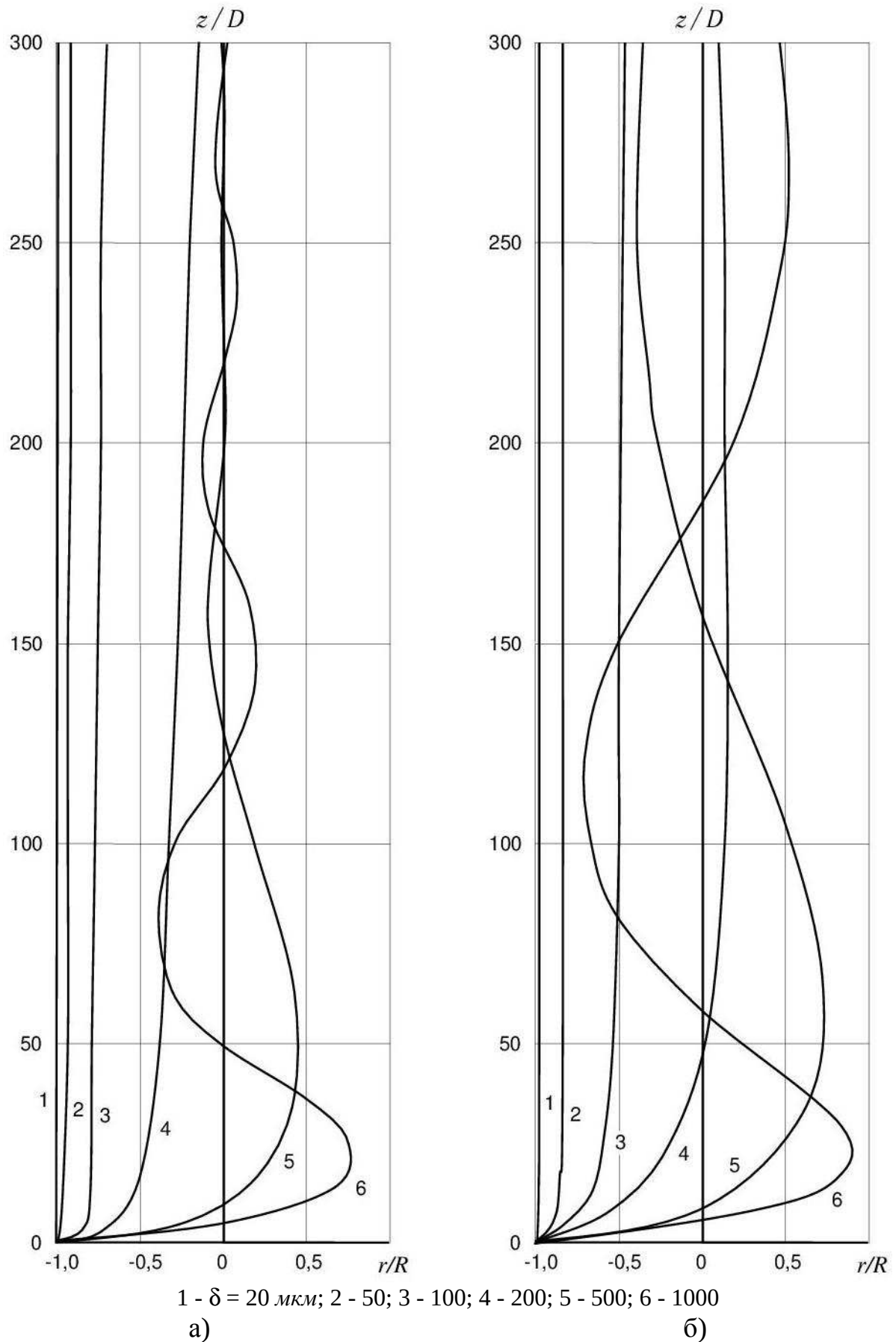


Рис. 2. Равновесные траектории частиц в вертикальном восходящем потоке при скорости газа 10 м/с (а) и 50 м/с (б); $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $\rho_d = 1000 \text{ кг/м}^3$, $R = 25 \text{ мм}$; начальные условия: при $t = 0$ $z = 0$, $y_0 = 0$, $r = r_0$, $u_0 = 0$, $dz/dt = u_{z0}$, $dr/dt = u_{r0}$

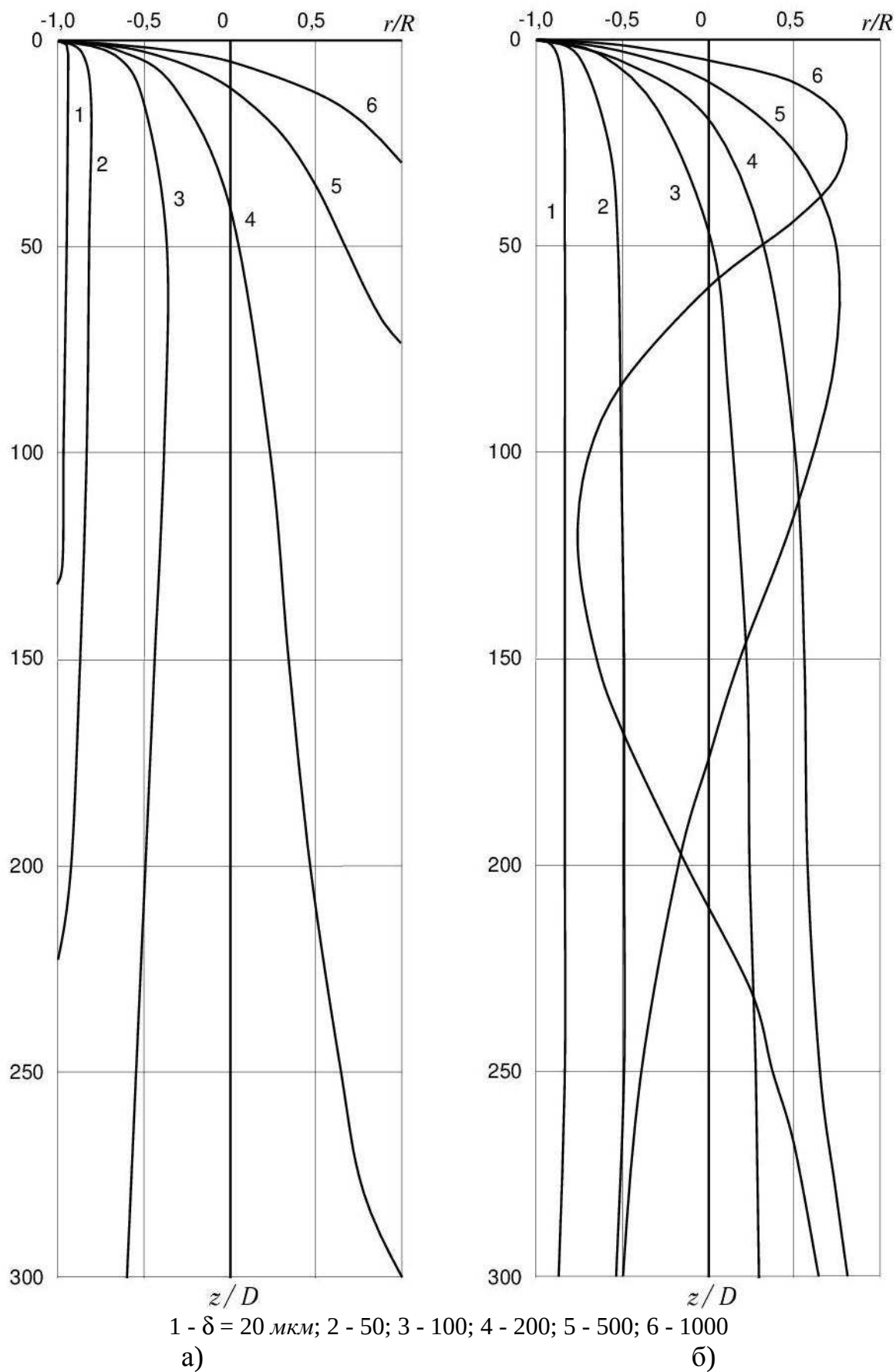


Рис. 3. Равновесные траектории частиц в вертикальном нисходящем потоке при скорости газа 10 м/с (а) и 50 м/с (б); $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $\rho_d = 1000 \text{ кг/м}^3$, $R = 25 \text{ мм}$; начальные условия: при $t = 0$ $z = 0$, $y_0 = 0$, $r = r_0$, $u_0 = 0$, $dz/dt = u_{z0}$, $dr/dt = u_{r0}$

Список литературы

1. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
2. Сугак Е.В., Войнов Н.А., Николаев Н.А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. 2-е изд. – Казань: Отечество, 2009. – 224 с.
3. Сугак Е.В., Сугак А.В. Моделирование турбулентных газодисперсных потоков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. С. 1-11.
4. Сугак Е.В. Методика моделирования турбулентных газодисперсных потоков // Фундаментальные основы механики. 2016. №1. С. 93-97.
5. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. – М.: Мир, 1975. – 378 с.
6. Сугак А.В., Сугак Е.В. Равновесные траектории аэрозольных частиц в турбулентном потоке // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С.1-8.
7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1,2. – М.: Наука, 1987. – 464 с., 360 с.
8. Munakata T., Matsuda A., Hirai N., To N., Kakihara R. Velocity of solid particles entrained with reduced pressure air flow in horizontal duct // J. of Chemical Engineering of Japan, 1977, v.10, №5, p.355-360.
9. Сугак А.В., Сугак Е.В. Расчет профиля скорости газа в турбулентном потоке // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С.1-6.
10. Сугак Е.В. Имитационное моделирование турбулентных закрученных потоков газа // Фундаментальные основы механики. 2018. № 3. С.78-83.
11. Сугак Е.В. Моделирование и интенсификация процессов очистки промышленных газовых выбросов в турбулентных газодисперсных потоках. Дисс. ... докт. техн. наук. – Красноярск, 1999. – 320 с.

Сведения об авторе:

Сугак Евгений Викторович – д.т.н., профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности», СибГУ им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск.