

РАВНОВЕСНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ЧАСТИЦ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Сугак А.В.¹, Сугак Е.В.²

¹ Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия (150023, Ярославль, Московский проспект, 88)

² Сибирский государственный аэрокосмический университет, Красноярск, Россия (660014, Красноярск, проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31), e-mail: sugak@mail.ru

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. Из анализа результатов детерминированного расчета равновесных траекторий движения частиц следует, что в восходящем газодисперсном потоке частицы под действием градиента осевой скорости в целом перемещаются к оси канала, сначала осциллируют относительно оси, в нисходящем – к стенке канала. Относительная осевая скорость частиц быстро становится равной скорости седиментации. Подъемная сила Магнуса-Жуковского может оказывать существенное влияние на движение крупных частиц или капель диаметром более 50-100 мкм с небольшими начальными скоростями и практически только в пределах ламинарного пристенного и буферного слоя. Полученные результаты подтверждаются данными известных экспериментальных исследований.

Ключевые слова: аэродинамика, двухфазные системы, аэрозоли, процессы и аппараты, турбулентные потоки.

EQUILIBRIUM TRAJECTORIES OF PARTICLES IN TURBULENT GAS FLOW

Sugak A.V.¹, Sugak E.V.²

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia (150023, Yaroslavl, Moscow Av., 88)

² Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, Russia (660014, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy Av., 31), e-mail: sugak@mail.ru

The motion of particles in a turbulent gas stream consists of translational motion by the action of external forces and forces associated with the flow around them, and chaotic motion under the influence of the turbulent fluctuations of the gas. From the analysis results of a deterministic calculation of the equilibrium motion trajectories of the particles that stream in the upstream gas-dispersed particles under the effect of the axial velocity gradient on the whole are moved towards the axis of the channel, first oscillating about an axis in the downlink - the wall of the channel. Relative axial velocity of the particles quickly becomes equal to the rate of sedimentation. Magnus-Zhukovsky lift force can have a significant impact on the movement of large particles or droplets of diameter greater than 50-100 microns with small initial velocities and almost exclusively within the laminar boundary-layer and the buffer. The obtained results are supported by well-known experimental studies.

Keywords: aerodynamics, two-phase systems, aerosols, processes and devices, turbulence.

Для расчета многих современных технологических процессов и процессов очистки промышленных газовых выбросов в режимах с интенсивным взаимодействием фаз требуется создание математических моделей, учитывающих комплекс физических явлений межфазного обмена массой, импульсом и энергией [4-6].

Для турбулентного течения газа характерны беспорядочные хаотические пульсации скорости во всех направлениях, придающие практически всем происходящим процессам стохастический характер – отдельные объемы газа с определенной вероятностью могут перемещаться в любом направлении и истинное значение любой характеристики газа в конкретной точке в конкретный момент времени представляет собой сумму величин, характеризующих основное и пульсационное течения. Следствием хаотических пульсационных движений является беспорядочное интенсивное перемешивание и специфическая турбулентная

диффузия, турбулентная вязкость газа, более равномерное, чем при ламинарном течении, распределение осредненной скорости и резкое ее падение в пристенной области, увеличение потерь на трение и т.д.

Мгновенную скорость газа в любой точке потока в каждом направлении можно представить как сумму осредненной скорости и скорости пульсаций:

$$w_x = \bar{w}_x + w_x', \quad w_y = \bar{w}_y + w_y', \quad w_z = \bar{w}_z + w_z'. \quad (1)$$

Подстановка этих выражений в уравнения движения Навье-Стокса и усреднение по времени и пространству приводит к уравнениям движения Рейнольдса, в которые входят добавочные касательные напряжения, обуславливающие повышение вязкости и гидравлического сопротивления [5]. Для замыкания системы уравнений применяются статистические или полуэмпирические теории турбулентности, используется аналогия между турбулентными и молекулярными напряжениями, экспериментальные данные о статистических связях между пульсациями в пространстве и времени [3, 5, 6].

Однако использование статистической теории требует предварительных сведений о турбулентных характеристиках потока, поэтому наибольшее распространение получили статистико-феноменологические теории турбулентного переноса, в которых турбулентность характеризуется интенсивностью и масштабом или кинетической энергией пульсационного движения и скоростью ее диссипации [1, 2, 3].

Для описания процессов турбулентного переноса наряду с уравнениями осредненного турбулентного потока применяются уравнения баланса пульсационной энергии, для замыкания системы уравнений принимаются дополнительные гипотезы [5, 6]. Однако полученные таким образом модели громоздки и содержат эмпирические константы, универсальность которых строго не доказана. Поэтому для инженерных расчетов обычно используются феноменологические теории и полуэмпирические методы расчета [4-7].

Движение твердых или жидких частиц в турбулентном потоке газа 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 [5-9]. 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 [5, 6]

$$\frac{du}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho}{\rho_d} \cdot \frac{\Psi}{\delta} |w - u| (w - u) \pm g, \quad (2)$$

которое допускает аналитическое решение в виде [5, 6]

$$u = w \pm g\tau + C \cdot \exp(-t/\tau), \quad (3)$$

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 (3) $C = u_0 - w \pm g\tau$, тогда

$$u = w - (w - u_0) \exp(-t/\tau) \pm g\tau \cdot [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (4)$$

Легко видеть, что при $t \gg \tau$ (реально при $t > 5\tau$) скорость относительного движения $v = w - u$ принимает постоянное максимальное предельное значение $v = g\tau$ (для восходящего потока $u = w - g\tau$, для нисходящего $u = w + g\tau$). Обычные значения времени релаксации частиц диаметром от 0,1 до 100 $мкм$ лежат в пределах от 10^{-8} до 10^{-2} $с$, значение предельной скорости относительного движения частиц в осевом направлении – в пределах от 10^{-7} до 0,1 $м/с$, что значительно меньше обычных скоростей газа, поэтому осевая скорость мелких частиц часто принимается равной скорости газа [1-3]. Кроме того, в большинстве практически значимых случаев с некоторой погрешностью при $t \geq \tau$ можно считать движение частицы безинерционным и существенно упростить нестационарные модели за счет замены дифференциальных уравнений алгебраическими [1-6].

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 локальные скорости частиц могут быть выше скорости газа, а в периферийной области – ниже, причем средняя по сечению скорость частиц может быть меньше средней скорости газа на 1,5–2 $м/с$ для высокодисперсных и на 8–10 $м/с$ для крупных частиц [5]. 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, аналогичная картина наблюдается при течении двухфазных систем в горизонтальных каналах [10]. 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].

Градиент продольной скорости газа приводит к вращению частицы вокруг своей оси и ее поперечному движению, причиной которого является сила Магнуса-Жуковского, направ-

ленная перпендикулярно вектору относительной скорости в сторону максимального значения суммы тангенциальных составляющих скоростей обтекания и вращения (рис. 1) [2]:

$$\mathbf{F}_{Ж} = \frac{\pi}{8} \rho d^3 [\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}], \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\Omega}$ – угловая скорость вращения частицы, c^{-1} ; \mathbf{v} – вектор скорости относительного движения частицы, m/c .

Тогда на частицу кроме сил, связанных с ее обтеканием, и силы тяжести (с учетом силы Архимеда) действует поперечная сила Магнуса-Жуковского, возникающая при вращении частицы вокруг собственной оси из-за градиента скорости газа, и уравнение ее движения в векторной форме можно записать в виде [5,6]:

$$m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{Ж} + \mathbf{F}_C + \mathbf{G} + \mathbf{F}_A, \quad (6)$$

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.

При анализе движения частиц в осесимметричном канале сделаем следующие допущения: течение газа установившееся адиабатическое; радиальная составляющая скорости газа отсутствует; частицы сохраняют сферическую форму; взаимодействие между частицами отсутствует. Тогда система уравнений двухмерного нисходящего или восходящего движения частицы в газовом потоке в проекциях на оси координат (ось z направлена по оси канала) может быть записана в виде [5, 6]:

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

$$\frac{d^2 r}{dt^2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_d}\right) = \frac{\rho}{\rho_d} \left(w - \frac{dz}{dt}\right) \frac{dw}{dr} - \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_d} \frac{\psi}{\delta} \frac{dr}{dt} \sqrt{\left(\frac{dz}{dt} - w\right)^2 + \left(\frac{dr}{dt}\right)^2}. \quad (8)$$

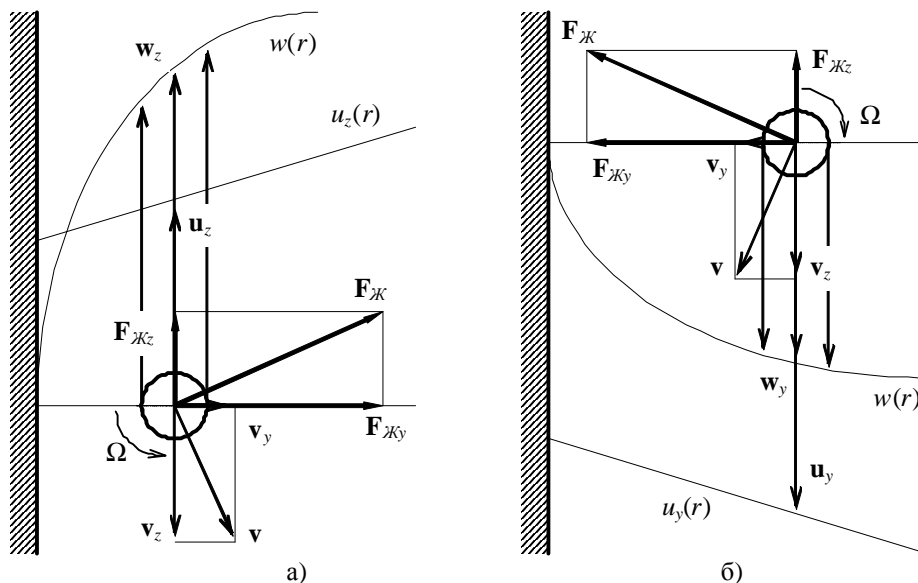


Рис. 1. Схема возникновения подъемной силы в восходящем (а) и нисходящем (б) потоках

Левые части уравнений (7) и (8) отражают влияние сил инерции частиц и эффект «присоединенной массы» (силу Тейлора) – влияние сил инерции массы газа, двигающейся вместе с частицей [1-3]. В правых частях уравнений первые слагаемые отражают влияние силы Магнуса-Жуковского, вторые – силу лобового аэродинамического сопротивления, третье слагаемое в уравнении (7) отражает совместное влияние сил тяжести и Архимеда.

Система дифференциальных уравнений (7)–(8) в общем виде при заданных начальных условиях в общем виде может быть решена только численными методами. На рисунках 2 и 3 представлены некоторые результаты численного решения для восходящего и нисходящего двухфазных потоков.

Из анализа результатов расчетов в широких интервалах изменения основных параметров можно сделать следующие выводы [5, 6]:

- в восходящем потоке частицы под действием градиента осевой скорости 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 с небольшими начальными скоростями и в пределах ламинарного пристенного и буферного слоя.

Полученные результаты расчетов подтверждаются данными экспериментальных исследований [5-7]. Отклонения траекторий частиц от расчетных (равновесных) в реальных условиях 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 [5, 6]. 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 и только на больших расстояниях от входа.

Разработанная методика и результаты расчетов могут использоваться для моделирования турбулентных газодисперсных потоков, расчета концентраций дисперсной фазы в потоке, технологической и социально-экологической эффективности процессов очистки отходящих промышленных газов от пыли [4-9].

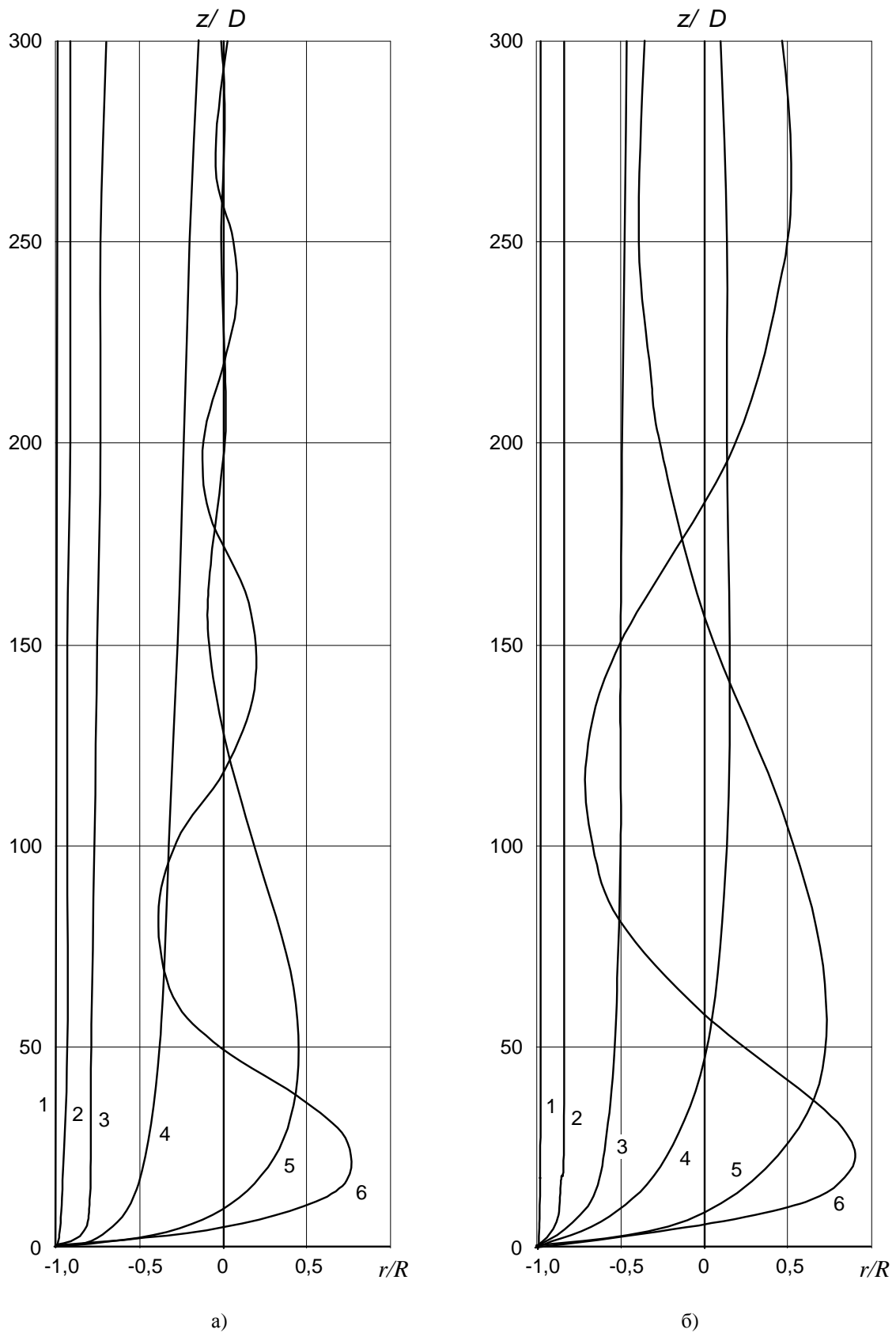


Рис. 2. Равновесные траектории частиц (капель воды) в вертикальном восходящем потоке при скорости газа 10 м/с (а) и 50 м/с (б):

1 – $\delta = 20 \text{ мкм}$; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 500; 6 – 1000;
 $D = 50 \text{ мм}$, при $t = 0$ $z = 0$, $y_0 = 0$, $r = r_0$, $u_0 = 0$, $dz/dt = u_{z0}$, $dr/dt = u_{r0}$.

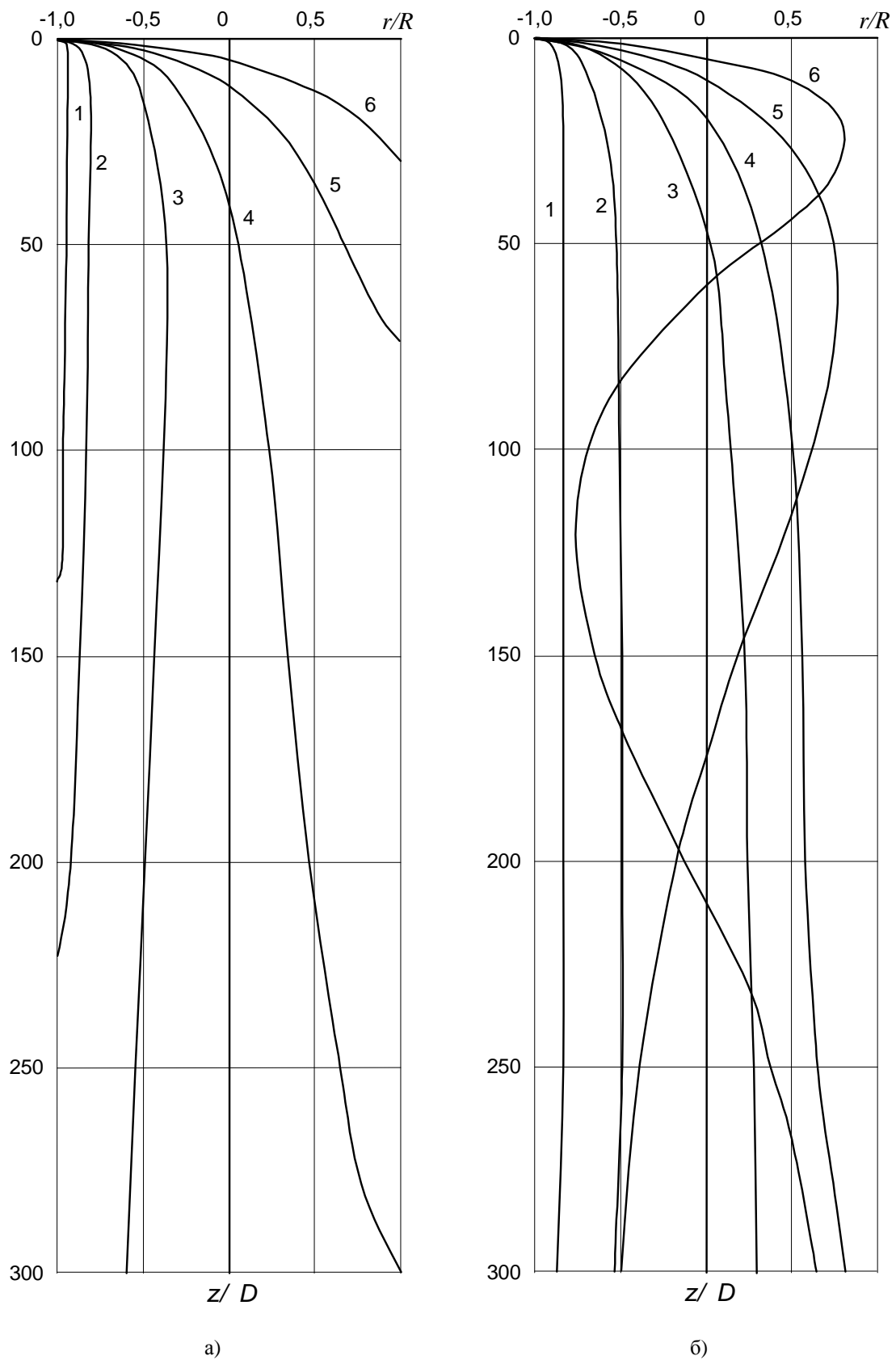


Рис. 3. Равновесные траектории частиц (капель воды) в вертикальном нисходящем потоке при скорости газа 10 м/с (а) и 50 м/с (б):

1 – $\delta = 50$ мкм; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 500; 6 – 1000;
 воздух–вода, $D = 50$ мм, при $t = 0$ $z = 0$, $y_0 = 0$, $r = r_0$, $u_0 = 0$, $dz/dt = u_{z0}$, $dr/dt = u_{r0}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (про-

Список литературы

1. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. – М.: Мир, 1975. – 378 с.
2. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1,2. – М.: Наука, 1987. – 464 с., 360 с.
4. Сугак А., Сугак Е. Центробежные пылеуловители и классификаторы. Моделирование, расчет, проектирование.– ИД «LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co», 2012. – 226 с.
5. Сугак Е.В. Моделирование и интенсификация процессов очистки промышленных газовых выбросов в турбулентных газодисперсных потоках. Дисс....докт.техн.наук. – Красноярск: Сибирский государственный технологический университет, 1999. – 320 с.
6. Сугак Е.В. Процессы очистки газов в турбулентных газодисперсных потоках. Моделирование и интенсификация. – ИД «LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co», 2011. – 308 с.
7. Сугак Е.В., Сугак А.В. Моделирование закрученных турбулентных газодисперсных потоков.- Современные проблемы науки и образования. – 2013. - № 2. – С. 1-8. – URL: <http://www.science-education.ru/108-8819>.
8. Сугак Е.В., Сугак А.В. Моделирование турбулентных газодисперсных потоков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. - № 6. – С. 1-11. – URL: www.science-education.ru/106-8076.
9. Сугак Е.В., Сугак А.В. Моделирование турбулентных закрученных потоков.- Современные проблемы науки и образования. – 2013. - № 1 – С. 1-8. – URL: <http://www.science-education.ru/107-8312>.
10. 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.

Рецензенты:

Чекалов Л.В., д.т.н., генеральный директор ЗАО «Кондор-Эко», Ярославская область, п. Семibrатово.

Войнов Н.А., д.т.н., профессор, Сибирский государственный технологический университет, г. Красноярск.