

УДК 532.529.5

ОБТЕКАНИЕ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ С ПРИМЕСЯМИ

В.Л. Федяев, И.В. Моренко, Н.З. Серазетдинов
morenko@mail.knc.ru

Исследуется нестационарное поперечное обтекание кругового цилиндра потоком вязкой жидкостью с примесями. Анализируется влияние примесей на картину течения, приводятся значения коэффициента сопротивления, амплитуды подъемной силы, числа Струхала в зависимости от числа Стокса, других параметров.

Введение

Многофазные среды, характеризующиеся наличием в дисперсионной фазе дисперсных частиц, широко представлены в природе и технике. Дисперсионная (несущая) фаза является непрерывной средой, которая может быть несжимаемой (жидкость) либо сжимаемой (газ). Во многих случаях, если давление в этой среде велико, числа Маха малы ($<0,2$) газы можно считать несжимаемыми. Дисперсные частицы, твердые включения, имеют, как правило, разнообразную форму, размеры их не одинаковы, плотность обычно больше плотности несущей фазы. Среди многофазных сред наиболее распространенными являются суспензии, газовзвеси – смеси соответственно жидкости, газа с твердыми частицами; эмульсии – смеси жидкости с каплями другой жидкости; а также пузырьковые среды – жидкости, содержащие пузырьки газа и/или пара [1].

Течения жидких сред с примесями, включениями весьма распространены в растениях, организмах животных, людей. Океанические течения и морские течения, течение воды в реках, ручьях, других естественных руслах, водотоках; движение наносов, размывание почв и грунтов – примеры потоков суспензий в природе. Движение газовзвесей имеет место при вдыхании загрязненного воздуха, больших скоростях воздушных масс: песчаные бури, смерчи, тайфуны. Безусловно, интересно и полезно изучение воздействия

воздушных потоков с включениями на объекты живой и неживой природы, здания, сооружения, технические устройства и технологические установки. Нечто аналогичное наблюдается и при полете аппаратов космической и авиационной техники в атмосфере, содержащей твердые частицы; движении гидроаппаратов, других устройств в водной среде с примесями; течении рабочих сред в проточных частях паровых и газовых турбин, вентиляторов, винтов, водометных движителей, иных энергетических и силовых установок.

Практика показывает, что течения многофазных теплоносителей имеют место в большинстве теплообменных аппаратов контактного, рекуперативного и регенеративного типов, других теплообменных системах и теплотехнических установках [2].

В различных областях техники, в химических технологиях широко распространен гидро- и пневмотранспорт, когда твердые материалы перемещаются в трубопроводах потоками жидкости или газа. Основное преимущество его – возможность быстрого перемещения больших масс твердых зернистых материалов. Недостатки состоят в том, что происходит абразивный износ коммуникаций, истирание самих частиц, необходимы большие расходы транспортирующей среды, в ряде случаев специальные устройства для отделения частиц от несущей среды.

Трудно назвать отрасль промышленности, хозяйства, где бы ни стояла проблема разделения неоднородных смесей, очистки несущей среды от механических примесей. Наиболее распространенными способами разделения, в первую очередь, суспензий, газовзвесей являются отстаивание (гравитационное осаждение), инерционное осаждение, центрифугирование, электростатическое осаждение, фильтрование [3,4].

Обратными разделению смесей, в определенном смысле, являются процессы перемешивания включений, находящихся в жидких или газообразных средах. При этом основная цель заключается в получении однородных смесей, интенсификации химических реакций, теплообмена. Как известно, перемешивание осуществляется с помощью неподвижных устройств, возмущающих, турбулизирующих потоки жидкости или газа,

разнообразных мешалок, вдувания в жидкость газов (барботажное перемешивание), других способов.

Многие химические реакции, в частности, каталитические, процессы тепломассообмена, например, сжигания твердого кускового топлива реализуются в псевдооживленных (кипящих) слоях [2]. В этих слоях, состоящих из мелкодисперсных частиц, силы, действующие на частицы со стороны восходящих потоков жидкости или газа, уравнивают силы тяжести. Частицы пребывают, в основном, во взвешенном состоянии, не контактируют постоянно друг с другом, интенсивно перемешиваются. Отмечается, что представляет большой интерес изучение влияния на характеристики псевдооживленных слоев, соответственно, интенсивность протекающих в них процессов, перегородок, труб, других препятствий, находящихся в слоях. Так, согласно экспериментальным данным, коэффициент теплоотдачи к трубам, расположенным в псевдооживленном слое, может быть увеличен, по сравнению со случаем однородной среды, почти в 20 раз.

Наконец, можно выделить две группы технологий, в которых движение многофазных сред, газозвесей и суспензий, взаимодействие их с препятствиями является основным. Первая – технологии нанесения покрытий, напыления специальных материалов с целью придания поверхностям декоративных качеств, повышения износостойкости, защиты изделий от коррозии, воздействия высоких температур, других факторов.

Вторая – технологии, процессы, связанные с эрозией материалов, разрушением, уносом части его [5]. Это добыча гидравлическим способом золота, олова, железной руды, каменного угля, других полезных ископаемых; проходка нефтяных и газовых скважин, погружение различных конструкций в грунт, бурение отверстий для крепления кровли шахт. Тонкие струи воды, полимеров, подаваемые под большим давлением (~200 МПа), с успехом применяются для резки бумаги, картона, фибергласа, кожи, продуктов питания, льда и т.д., обеспечивая очень высокое качество реза, минимальные потери материала. Резание абразивами используется, в основном, при обработке изделий из камня.

Высоконапорные струи воды широко применяются для чистки строительных конструкций от ржавчины и старой краски; корпусов и палубных надстроек судов от обрастаний; емкостей, трубопроводов от остатков нефти и нефтепродуктов; рабочих поверхностей теплообменников, печного оборудования; при удалении окалина с поверхности стальных заготовок, во многих других случаях. Струи воды при сравнительно низком давлении (~10 МПа) используются для очистки отливок, заготовок после механической обработки; при извлечении со дна водоемов оборудования, орудий лова; чистке канализационных труб и сточных канав. В машиностроении, автомобилестроении, пищевой промышленности, других отраслях находит применение чистка поверхностей абразивами, газовыми струями, содержащими дробь, песок, стеклянные бусинки, измельченную скорлупу грецкого ореха и т.д. Путем дробеструйной обработки деталей могут быть повышены эксплуатационные характеристики их поверхностей.

Таким образом, потоки жидкости, газа с примесями имеют место, по сути, повсеместно. Моделирование их, определение воздействия на обтекаемые тела, препятствия необходимо для решения проблем экологии, ряда задач, связанных с безопасностью жизнедеятельности, в частности, полетов летательных аппаратов; при разработке, либо модернизации технологических установок, аппаратов, устройств.

Известно, что в случае обтекания кругового цилиндра потоком вязкой жидкости при умеренных числах Рейнольдса Re за телом формируется вихревая дорожка Кармана. Картина течения, гидродинамические характеристики могут существенно меняться, если среда переносит дисперсную примесь. К настоящему времени имеется ряд исследований потоков жидкости с примесями [1, 6–13]. Однако в большинстве из них обратное влияние примесей на несущий поток не учитывается.

В данной работе в случае поперечного обтекания монодисперсной смесью одиночного кругового цилиндра, находящегося как в безграничном потоке, так и в стесненной области, ограниченной с боков либо плоскостями симметрии потока, либо твердыми непроницаемыми стенками, исследуется влияние числа

Стокса, концентрации примеси, других параметров на характер вихревого течения за телом, на коэффициенты сопротивления, подъемной силы, число Струхала.

Определяющие соотношения

Моделирование движения среды с примесями можно осуществить с помощью различных подходов [1]. Так, при использовании Эйлера континуального подхода частицы по отдельности не рассматриваются, для каждой фазы записываются и решаются уравнения сохранения массы, количества движения и энергии. Существенное преимущество этого подхода состоит в использовании одностипных балансовых соотношений, единого алгоритма интегрирования соответствующих систем уравнений. Согласно Лагранжева подхода рассматривается течение жидкой несущей фазы, в которой движутся твердые частицы. В результате появляется возможность определить траектории отдельных частиц, выявить особенности их движения. В целом, Эйлеров и Лагранжев подходы дополняют друг друга, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки и, следовательно, свои области применения. Эйлеров подход используется в случае концентрированных дисперсных сред, содержащих мелкие малоинерционные частицы. Лагранжев подход применим для разреженных дисперсных сред, когда частицы крупные, велика их инерционность [1].

В настоящей работе используется Лагранжев подход. Считается, что частицы составляют небольшую часть занимаемого смесью объема, менее 10%.

В декартовой прямоугольной системе координат x_1Ox_2 плоскопараллельное течение несущей среды, представляющей собой вязкую несжимаемую жидкость, описывается уравнениями:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\overline{f_{pi}}}{\rho}, \quad i=1,2. \quad (2)$$

Здесь t — время; u_i, u_j — компоненты вектора скорости $\vec{\mathbf{u}}$ ($i, j = 1, 2$); p — давление, ρ — плотность жидкости, ν — кинематическая вязкость жидкости, \bar{f}_{pi} — проекция на ось x_i осредненных по объему сил гидродинамического сопротивления частиц [7].

При рассмотрении движения частиц примесей предполагается, что концентрация их в несущем потоке мала, взаимное влияние частиц, вращение не учитывается. Считается, что частицы не деформируются, имеют сферическую форму одинакового радиуса r_p и плотность ρ_p .

Уравнение движения частицы, учитывающее силы гидродинамического сопротивления, действующие со стороны несущей среды на частицу, силы тяжести и Архимеда, представляется в виде

$$\frac{d\vec{\mathbf{u}}_p}{d\tau} = F_p (\vec{\mathbf{u}} - \vec{\mathbf{u}}_p) + \vec{\mathbf{g}} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right). \quad (3)$$

где τ — время, $\vec{\mathbf{u}}_p$ — вектор скорости частицы, $\vec{\mathbf{g}}$ — вектор ускорения свободного падения, $F_p = 3C_p \text{Re}_p \mu / 4\rho_p d_p^2$, $d_p = 2r_p$,

$\text{Re}_p = \rho d_p |\vec{\mathbf{u}}_p - \vec{\mathbf{u}}| / \mu$ — число Рейнольдса частицы,

$C_p = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}_p} + \frac{a_3}{\text{Re}_p^2}$ — коэффициент гидродинамического сопротив-

ления, a_1, a_2, a_3 — константы.

Согласно соотношению (3) сила гидродинамического сопротивления частицы

$$\vec{\mathbf{f}}_p = 0.25C_p \text{Re}_p r_p \mu (\vec{\mathbf{u}} - \vec{\mathbf{u}}_p) = 0.5\pi C_p r_p^2 \rho |\vec{\mathbf{u}} - \vec{\mathbf{u}}_p| (\vec{\mathbf{u}} - \vec{\mathbf{u}}_p). \quad (4)$$

Отсюда находятся осредненные по объему компоненты сил сопротивления \bar{f}_{pi} ($i = 1, 2$), входящие в уравнение (2).

Записанные таким образом уравнения (1)–(2) необходимо дополнить граничными и начальными условиями, а (3) — начальными.

Метод решения

Выберем расчетную область в форме прямоугольника. Начало системы координат x_1Ox_2 поместим в центре обтекаемого цилиндра с радиусом R . В случае безграничного потока размеры расчетной области и положение цилиндра в ней определим таким образом, чтобы влияние внешних границ на решение задачи об обтекании цилиндра однородной жидкостью было бы минимальным. Если поток ограничен, расстояние от внешних боковых границ его до цилиндра равняется R .

Во входном сечении, перпендикулярном оси Ox_1 , примем: $u_1 = u_\infty = \text{const}$, $u_2 = 0$; операционное давление $p_0 = 0,1$ МПа.

На выходе из расчетной области воспользуемся «мягкими» граничными условиями: $\partial u_1 / \partial x_1 = 0$, $\partial u_2 / \partial x_1 = 0$, $\partial p / \partial x_1 = 0$, что означает выравнивание гидродинамических характеристик потока несущей среды.

На боковых границах положим, когда поток считается безграничным либо ограничен плоскостями симметрии, $\partial u_1 / \partial x_2 = 0$, $u_2 = 0$, $\partial p / \partial x_2 = 0$; если ограничен твердыми стенками, $\mathbf{u} = 0$.

На поверхности обтекаемого цилиндра реализуются условия прилипания несущей среды $\mathbf{u} = 0$. В начальный момент времени $t = 0$ среда мгновенно начинает двигаться, $u_1 = u_\infty$, $u_2 = 0$, $p = p_0$.

При расчете движения частиц примеси начало локальной системы координат xOy помещается в точку вбрасывания частиц в несущую среду. Точки эти располагаются вдоль входного сечения, ось Ox направляется параллельно оси Ox_1 . В начальный момент времени $\tau = 0$: $u_{px} = u_\infty$, $u_{py} = 0$. Помимо скорости частиц в месте вбрасывания задаются также радиус, плотность частиц, массовый расход G_p , от которого зависит число частиц, поступающих в расчетную область в единицу времени.

Если по ходу движения частица покидает расчетную область, то обратно в нее она не возвращается. При контакте с поверхностью обтекаемого тела частицы отражаются с соответствующими коэффициентами нормальной и касательной компонент их скоростей.

Решение задачи осуществляется с помощью программного комплекса Fluent (лицензия КГТУ им. А.Н. Туполева) с неявным решателем второго порядка точности. Используется процедура коррекции давления SIMPLEC, нерегулярные треугольные сетки с существенным сгущением узлов в окрестности обтекаемого тела. Общее число узлов расчетных сеток составляет около 30000, на поверхности цилиндра — 200. Критерий сходимости по всем искомым параметрам принимается равным 10^{-8} . Количество итераций на каждом временном шаге не превышает 30.

Результаты численных экспериментов

В ходе выполнения расчетов на начальном этапе примеси в несущую среду не вбрасываются, она остается однородной. После установления автоколебательного режима течения частицы подаются в поток.

Безграничный поток

В случае, когда поток жидкости безграничный, в качестве входных параметров несущей среды принимаются следующие: скорость набегающего потока $u_\infty = 100$ м/с, плотность $\rho = 0,00855$ кг/м³, коэффициент динамической вязкости $\mu = 1,71 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), число Рейнольдса $Re = 100$, диаметр цилиндра $D = 0,002$ м.

При нестационарном обтекании тел жидкостью основными расчетными величинами являются коэффициент сопротивления $C_D = F_{x1}/0.5\rho u_\infty^2 D$, коэффициент подъемной силы $C_L = F_{x2}/0.5\rho u_\infty^2 D$ и числа Струхала $St = \omega D/u_\infty$. Здесь F_{x1} , F_{x2} — проекции на оси Ox_1 , Ox_2 силы гидродинамического сопротивления, ω — частота схода вихрей с поверхности обтекаемого цилиндра.

Из результатов расчета обтекания цилиндра однородным потоком следует, что осредненное по времени значение коэффициента сопротивления $\overline{C_D}$ равно 1,38, амплитуда подъемной силы $\Delta C_L = 0,34$, число Струхала $St = 0,169$. В целом полученные данные удовлетворительно согласуются с имеющимися в литературе [6, 7, 14].

Основные параметры вбрасываемых в поток частиц следующие: радиус варьируется от $r_p = 2 \cdot 10^{-7}$ м до $r_p = 2 \cdot 10^{-6}$ м, материал — корунд, плотность $\rho_p = 3950$ кг/м³, число Стокса $Stk = d_p^2 u_\infty \rho_p / 18 \mu D$ изменяется от 0,1 до 10, объемная концентрация — от 0 до $3 \cdot 10^{-6}$, массовая концентрация — от 0 до 59%, $\varepsilon = \rho_p / \rho = 4,6 \cdot 10^5$.

Предварительно рассмотрим влияние условий подачи частиц во входном сечении на картину движения дисперсионной и дисперсной сред. Если подача частиц осуществляется в узкой области ($H = D$), где располагаются равномерно 50 источников, каждый с массовым расходом $G_p = 10^{-5}$ кг/с, то в следе за телом формируются четко выраженные структуры (кластеры), характеризующиеся повышенной концентрацией частиц (рис. 1а). При $H = 10D$, когда область вбрасывания достаточно широкая, количество источников с таким же единичным расходом равно 500, подобные структуры не наблюдаются (рис. 1б). Ориентировочно, при $Stk \geq 0,35$ в следе за цилиндром появляются периодические области, в которых отсутствуют частицы. Причем, чем частицы крупнее, число их меньше, тем размеры участков больше (рис. 1в). Когда массовая концентрация достаточно велика, наблюдается подавление дорожки Кармана (рис. 1г).

Типичную динамику изменения коэффициентов C_D , C_L с течением времени при ширине области подачи частиц $H = 10D$ и расходе на одну струйку $G_p = 10^{-5}$ кг/с иллюстрируют рис. 2 а, б.

В соответствии с этими результатами в зависимости от времени можно выделить следующие режимы обтекания цилиндра. В начале, когда однородная жидкость мгновенно приходит в движение, происходит своего рода гидравлический удар, характеризующийся большими значениями коэффициента сопротивления C_D . Затем C_D уменьшается, ориентировочно, до момента безразмерного времени 40, которое рассчитывается по скорости набегающего потока и радиусу цилиндра. С ростом застойной области за телом C_D увеличивается ($t = 40 \div 100$). Далее вихревая область теряет устойчивость, наблюдается автоколебательный режим течения, сопровождающийся осцилляциями C_D и C_L , среднее по времени

значение коэффициента сопротивления $\overline{C}_D=1,38$, амплитуда подъемной силы $\Delta C_L=0,34$. После установления автоколебательного режима течения частицы подаются в поток. В момент времени $t = 280$ частицы достигают поверхности цилиндра, это приводит к скачкообразному увеличению \overline{C}_D и уменьшению амплитуды ΔC_L , после чего значения \overline{C}_D , ΔC_L вновь стабилизируются.

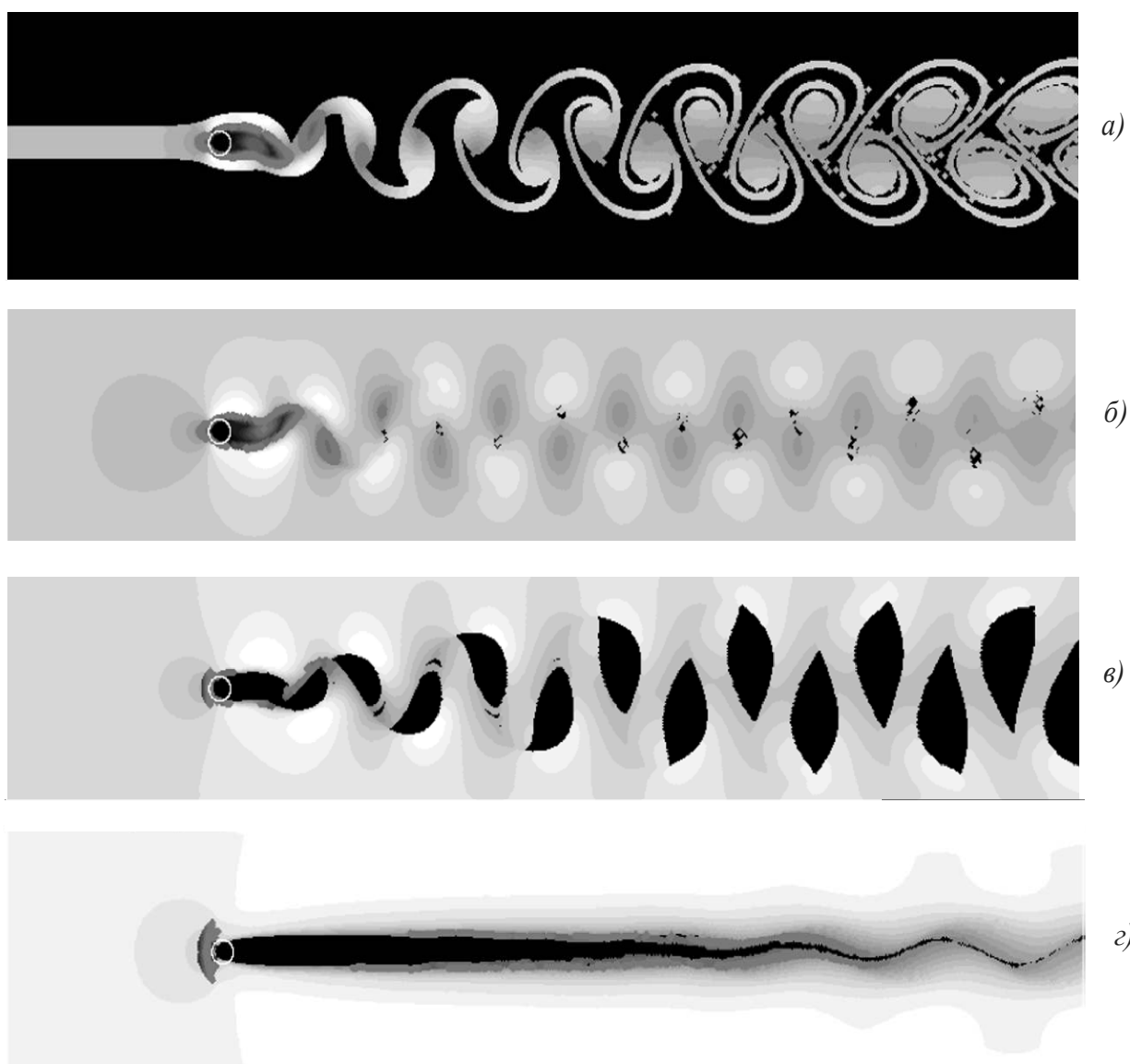


Рис. 1. Модуль скорости частиц примеси: а) $H = D$, $Stk = 0.1$, $G_p = 10^{-5}$ кг/с; б) $H = 10D$, $Stk = 0.1$, $G_p = 10^{-5}$ кг/с; в) $H = 10D$, $Stk = 1.0$, $G_p = 10^{-5}$ кг/с; г) $H = 10D$, $Stk = 2$, $G_p = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/с

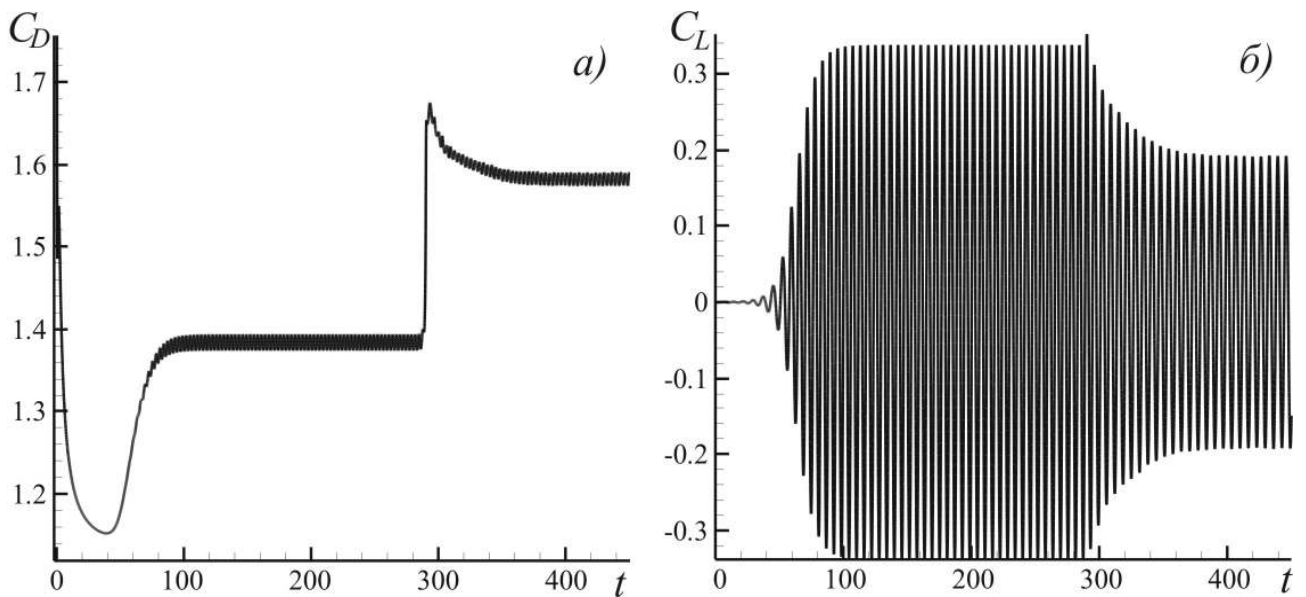


Рис. 2. Гидродинамические характеристики цилиндра:

a – коэффициент сопротивления C_D , *б* – коэффициент подъемной силы C_L

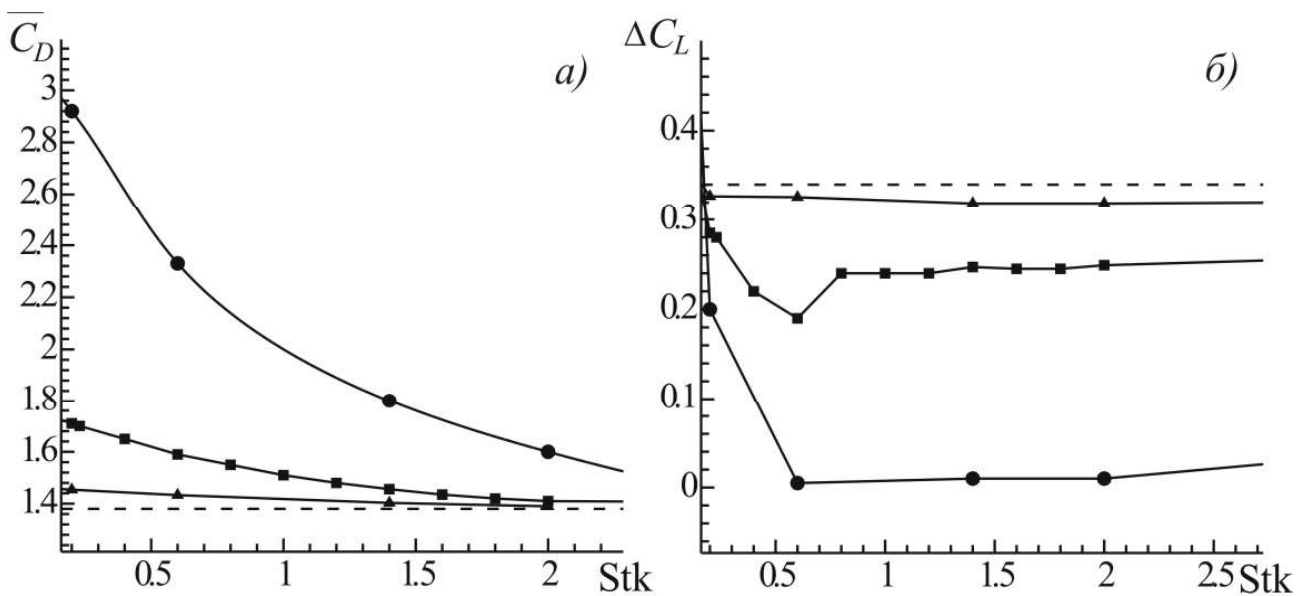


Рис. 3. Средний коэффициент сопротивления (*a*) и амплитуда подъемной силы (*б*): $G_p = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/с (●), 10^{-5} кг/с (■), $0.2 \cdot 10^{-5}$ кг/с (▲), пунктирная линия — $G_p = 0$ кг/с

Следует заметить, что если среду считать гомогенной, вязкость смеси можно определить по формуле Эйнштейна [1]

$$\mu_{CM} = \mu(1 + 5/2\beta_p),$$

а плотность с помощью соотношения

$$\rho_{CM} = \rho_p \beta_p + \rho(1 - \beta_p).$$

Здесь β_p — объемная концентрация примеси в среде. В случае расхода на один источник $G_p = 10^{-5}$ кг/с имеем $\beta_p = 6,5 \cdot 10^{-7}$, $\mu_{CM} \approx \mu$, $\rho_{CM} = 0,011$. Следовательно, число Рейнольдса смеси будет $Re_{CM} = \rho_{CM} \cdot u_\infty \cdot D / \mu_{CM} = 129$, что больше числа Рейнольдса среды без примесей. По данным работы [15] коэффициент сопротивления кругового цилиндра при этом значении числа Рейнольдса равен 1,40.

Как отмечалось выше, один из основных определяющих параметров рассматриваемой задачи — число Стокса. Наибольший интерес представляют течения монодисперсной смеси, когда числа Стокса порядка единицы. Ниже приводятся результаты расчета характеристик потока при изменении числа Стокса от 0,1 до 10,0.

При проведении данных экспериментов число Рейнольдса $Re = 100$, ширина участка подачи частиц $H = 10D$, количество точек вбрасывания, их положение, плотность материала частиц остаются постоянными. Поэтому, если расход G_p фиксируется, изменение числа Стокса означает изменение размеров частиц, их количества в расчетной области.

В ходе расчетов было также установлено, что наличие примесей в жидкости ведет к изменению, главным образом, коэффициента давления с наветренной стороны тела. Коэффициент трения меняется незначительно (не более чем на 5%).

Изменение среднего значения коэффициента гидродинамического сопротивления цилиндра, амплитуды коэффициента подъемной силы в зависимости от числа Стокса, расхода G_p показывается на рис. 3. Здесь штриховая линия соответствует значениям $\overline{C_D}$, ΔC_L при обтекании цилиндра однородной жидкостью без примесей ($G_p = 0$ кг/с).

Анализируя эти результаты, можно отметить следующее. С ростом числа Стокса средний коэффициент сопротивления монотонно убывает, стремясь к значению $\overline{C_D}$ цилиндра в однородной жидкости. При больших Stk , а значит больших размерах частиц, их

сравнительно малом количестве в области течения, влияние частиц на коэффициент сопротивления мало.

По-иному ведет себя амплитуда подъемной силы. Во-первых, ΔC_L при обтекании цилиндра монодисперсной смесью меньше, чем ΔC_L цилиндра в жидкости без примесей. Во-вторых, характер изменения ΔC_L при увеличении Stk существенно зависит от расхода G_p . При малых расходах амплитуды ΔC_L цилиндра в смеси и в однородной жидкости близки. Если расход частиц большой, то на участке $0,1 \leq Stk \leq 0,6$ при увеличении Stk ΔC_L вначале уменьшается, затем возрастает. Интересно, что в интервале $0,6 < Stk < 0,8$ при $G_p = 10^{-5}$ кг/с этот рост достаточно резкий, тогда как при $G_p = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/с увеличение ΔC_L выражено слабо. Разница в поведении ΔC_L при $G_p = 10^{-5}$ и $5 \cdot 10^{-5}$ кг/с объясняется тем, что в последнем случае дорожка Кармана за обтекаемым телом подавляется, в результате уменьшается амплитуда коэффициента подъемной силы, изменение ΔC_L в зависимости от Stk становится более монотонным.

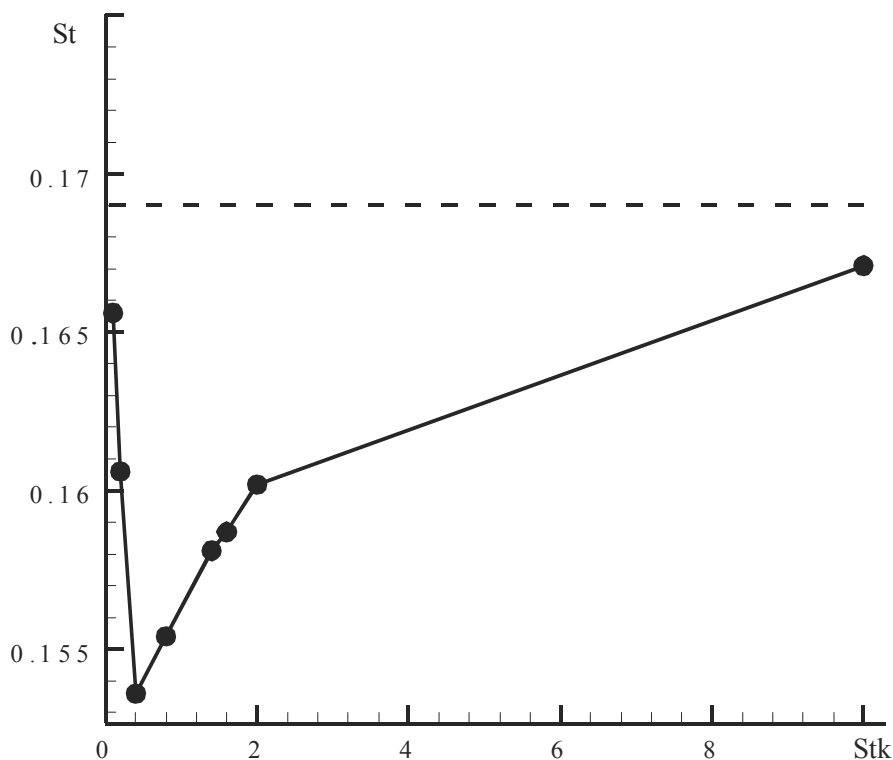


Рис. 4. Числа Струхалия ($G_p = 10^{-5}$ кг/с)

По всей видимости, существует некий интервал изменения расходов G_p , когда при Stk , равном приблизительно 0,6, ΔC_L имеет минимум. Соответственно, вблизи $Stk=0,6$ число Струхалия также минимально (рис. 4), частота схода вихрей с поверхности цилиндра мала.

Рассмотрим далее влияние концентрации примеси на характеристики потока, учитывая, что объемная β_∞ и массовая γ_∞ концентрации в начале расчетной области связаны соотношением

$$\beta_\infty = 1 / \left(1 - \xi + \left(\frac{\xi}{\gamma_\infty} \right) \right). \quad (5)$$

На рис.5 приводятся средние значения коэффициента сопротивления и амплитуды коэффициента подъемной силы, полученные в данной работе и представленные в [7]. Наблюдается качественное согласие результатов. Увеличение массовой концентрации примеси приводит к увеличению коэффициента сопротивления цилиндра и уменьшению подъемной силы вследствие подавления дорожки Кармана. Количественное же различие объясняется разными числами Стокса, условиями подачи частиц в поток: равномерное распределение 500 источников частиц в настоящей работе и неравномерное распределение со сгущением в средней части потока в статье [7], а так же тем, что коэффициент C_D в (1.5) в работе [7] рассчитывался по аппроксимационной формуле Хендерсона.

Анализ зависимостей $\overline{C_D}(\beta_\infty)$, $\Delta C_L(\beta_\infty)$ показал, что при малом β_∞ ($0 \leq \beta_\infty \leq 3 \cdot 10^{-6}$) они близки к линейным. Так при $Stk=1$ их можно записать в виде

$$C_D = \overline{C_{D0}} + \chi_1 \beta_\infty, \quad \Delta C_L = \Delta C_{L0} + \chi_2 \beta_\infty, \quad (6)$$

где $\overline{C_{D0}}$, ΔC_{L0} – значения параметров $\overline{C_D}$, ΔC_L при обтекании цилиндра однородной жидкостью ($\beta_\infty = 0$); $\chi_1 = 2 \cdot 10^5$, $\chi_2 = -1,6 \cdot 10^5$.

Учитывая (5), из (6) получим формулу для расчета $\overline{C_D}$, ΔC_L в зависимости от массовой концентрации γ_∞ , отношения плотностей ε ($0 \leq \gamma_\infty \leq 0,6$, $10^4 \leq \varepsilon \leq 10^6$).

Поскольку коэффициент $\overline{C_D}$, амплитуда ΔC_L зависят от числа Стокса Stk , в соотношениях (6) положим $\chi_i = \chi_i(Stk)$, $i=1,2$. Из

результатов вычислительных экспериментов следуют аппроксимации $\chi_1 = 1,5 \cdot 10^5 (1 - 0,01/Stk)$, $\chi_2 = 1,8 \cdot 10^5 (1 - 0,1 \cdot Stk)$, справедливые при $0,5 < Stk < 50$.

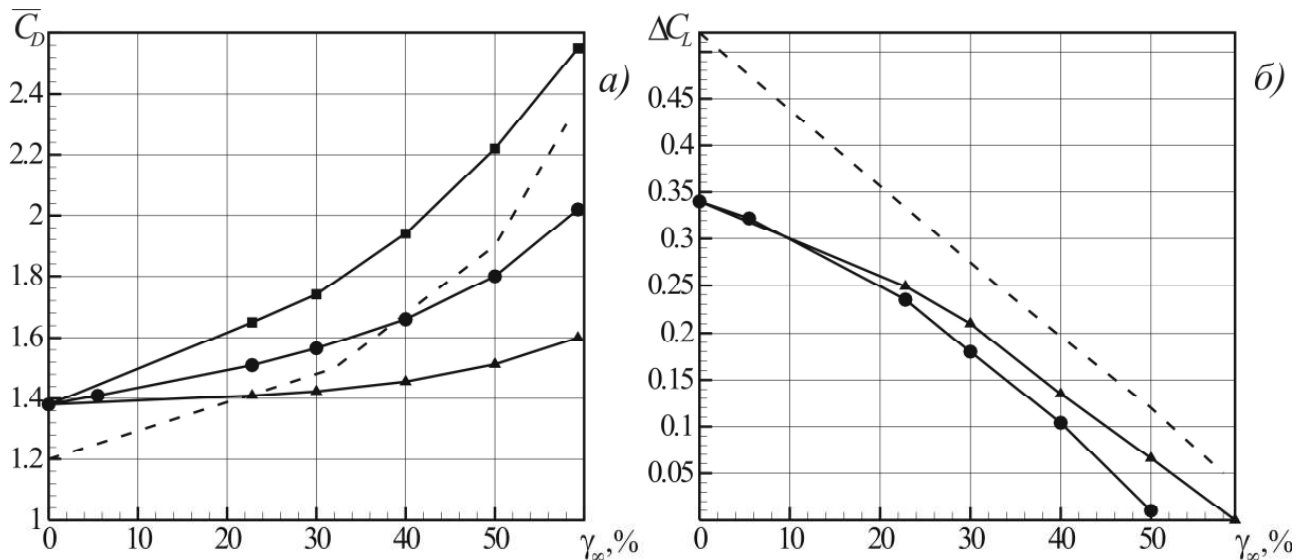


Рис. 5. Средние во времени коэффициент сопротивления (а) и амплитуда подъемной силы (б) цилиндра: сплошная линия – результаты настоящей работы ($Stk = 1$), пунктирная – данные [7] ($Stk = 0,0023$)

Стесненная область

Далее рассмотрим потоки вязкой жидкости с примесью в стесненных областях, при этом скорость набегающего потока $u_\infty = 0,1$ м/с, плотность $\rho = 998,2$ кг/м³, коэффициент динамической вязкости $\mu = 0,001003$ кг/(м·с), число Рейнольдса $Re = 100$, диаметр цилиндра $D = 0,001$ м, ширина канала $H = 2D$.

Основные параметры вбрасываемых в поток частиц следующие: радиус $r_p = 10^{-4}$ м, плотность материала варьируется от $\rho_p = 70$ кг/м³ до $\rho_p = 3500$ кг/м³, соответственно, $\varepsilon \cong 0,1 \div 3,5$, расход $G_p = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/с, ширина участка подачи частиц H , на нем равномерно распределено 8 источников частиц, $Stk = 0,0039 \div 0,1939$.

К моменту установления в канале, на боковых границах которого задаются условия симметрии потока, автоколебательного режима изобары, изолинии скоростей показываются на рис.6. Наблюдается поджатие потока перед цилиндром, формирование за ним вихревых структур. Вброс частиц в расчетную область не

оказывает существенного влияния на характер течения в силу того, что плотность частиц мало отличается от плотности несущей среды. Вместе с тем, изменение плотности частиц значительно влияет на распределение их в следе за телом (рис.7). При $\epsilon < 1$, когда плотность частиц меньше плотности несущей среды, в области вихревых структур концентрация частиц увеличивается (рис. 7а). Наоборот, если плотность частиц больше плотности среды ($\epsilon > 1$), частицы концентрируются, в основном, вблизи границ вихрей, в области вихревых структур они практически отсутствуют (рис. 7б).

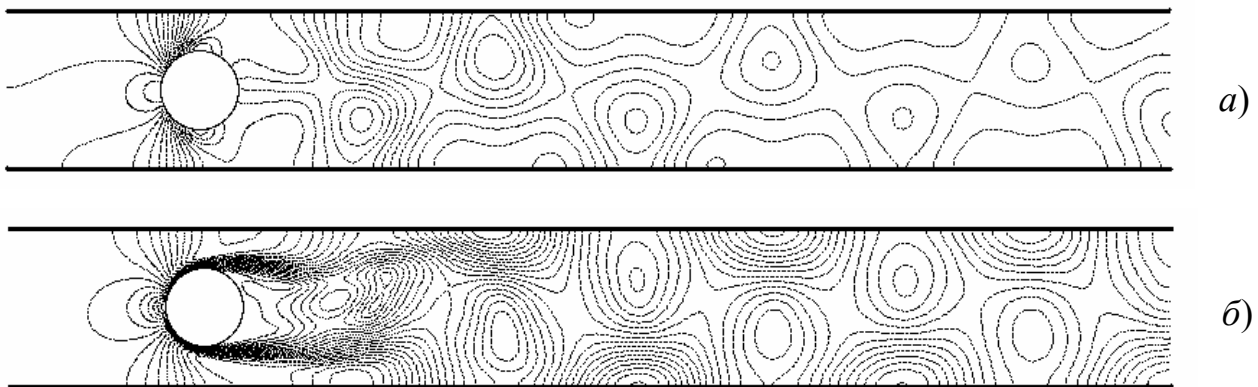


Рис. 6. Изобары (а), линии постоянных скоростей (б) в ограниченном потоке

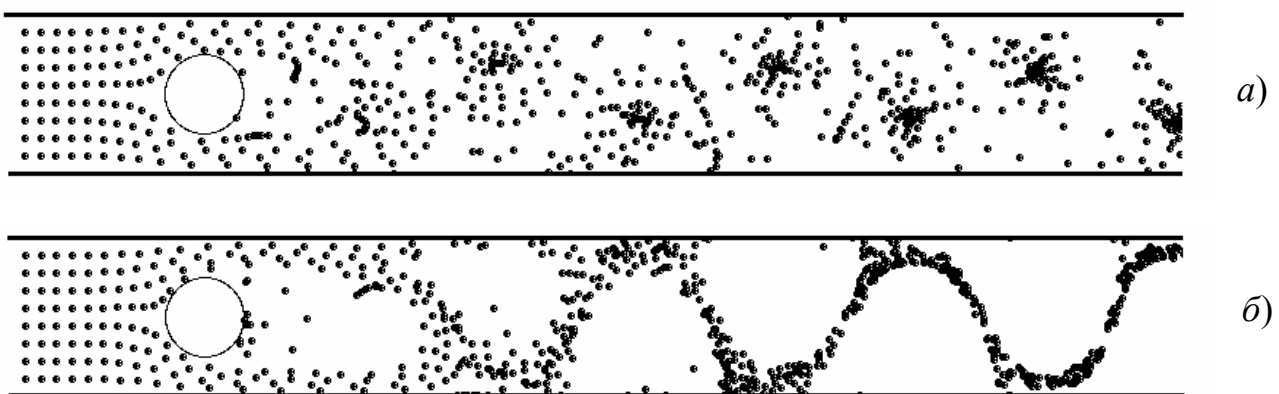


Рис.7. Распределение твердых частиц в потоке жидкости:
 а – $\epsilon = 0,1$, $Stk = 0,0039$; б – $\epsilon = 3,5$, $Stk = 0,1939$.

Если боковые стенки канала – твердые непроницаемые, то при рассматриваемых параметрах потока характер течения его, особенно

за телом, существенно отличается от показанного выше. Вихри за цилиндром подавляются, течение напоминает установившееся с образованием за цилиндром застойной области (рис. 8), что качественно согласуется с представленными в литературе данными [16] и экспериментальными результатами [17]. Как следствие, меняется и поведение частиц в потоке (рис. 9). При плотности частиц меньше плотности жидкости, частицы, огибая цилиндр, на удалении от него располагаются в потоке достаточно равномерно (рис. 9а). Когда плотность частиц больше плотности жидкости они движутся в потоке в виде двух струй, средняя часть потока остается свободной (рис. 9б).

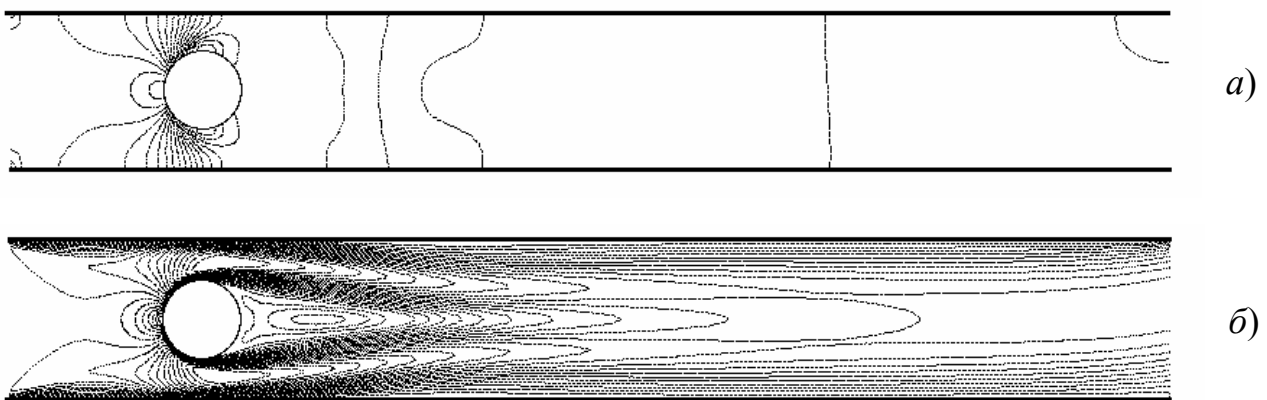


Рис. 8. Изобары (а), линии постоянных скоростей (б) в канале

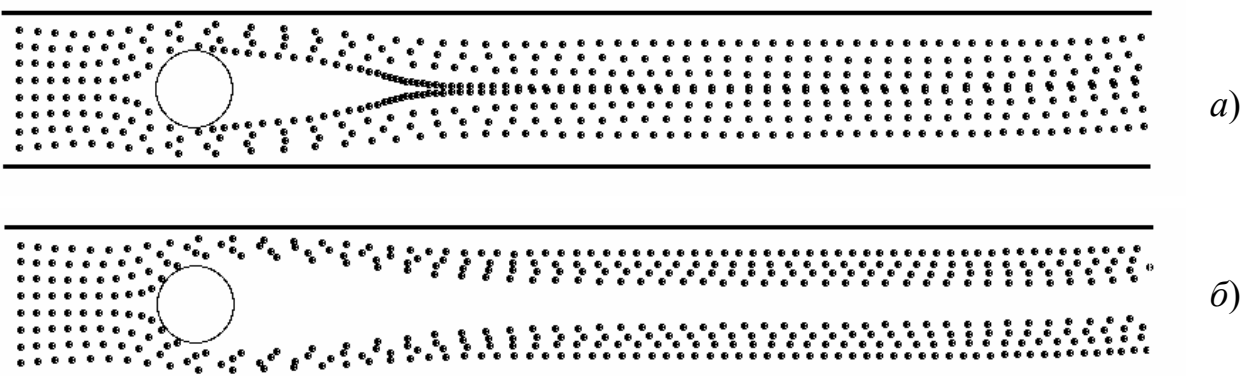


Рис. 9. Распределение твердых частиц в канале:
 $a - \varepsilon = 0,1, Stk = 0,0039$; $b - \varepsilon = 3,5, Stk = 0,1939$.

Для сравнения на рис. 10, 11 приводится распределение давления, скоростей, примесей в полосе безграничного потока. Видно, что характер течения жидкости, движения частиц в этом случае и при обтекании цилиндра стесненным потоком, когда на боковых границах его записываются условия симметрии, близки. Тем не менее, в безграничном потоке дорожка Кармана более выражена, частицы в следе размыты по потоку сильнее.

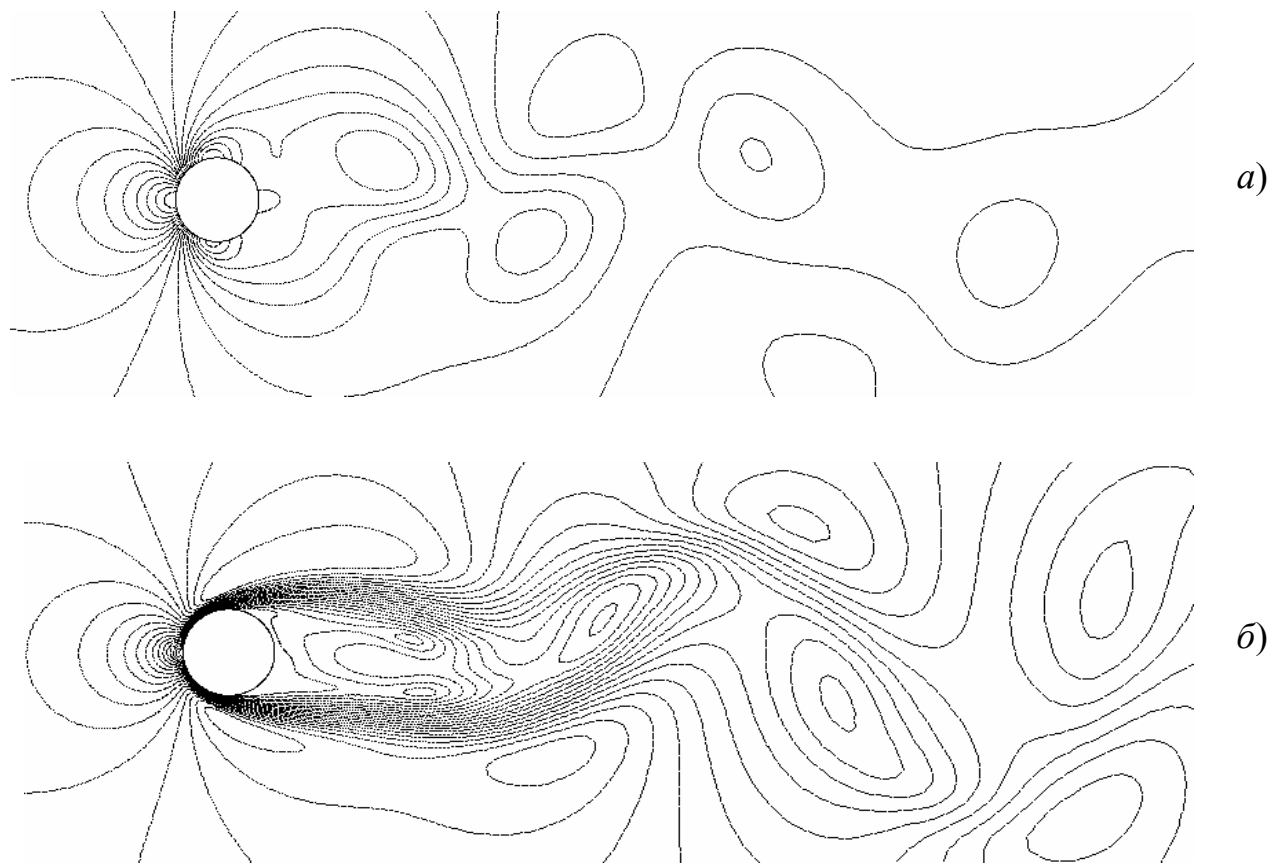


Рис. 10. Изобары (а), линии постоянных скоростей (б) в безграничном потоке

Изменение коэффициента сопротивления цилиндра C_D в зависимости от безразмерного времени для каждого из рассмотренных случаев иллюстрирует рис. 12. Вначале имеет место своего рода гидравлические удар, как и в предыдущих экспериментах, затем значения C_D стабилизируются. Вбрасывание в поток частиц не оказывает существенного влияния на коэффициент C_D , хотя в момент, когда частицы достигают цилиндра ($t = 72$),

небольшой скачок C_D наблюдается. Объясняется это тем, что плотность частиц и несущей фазы различаются мало.

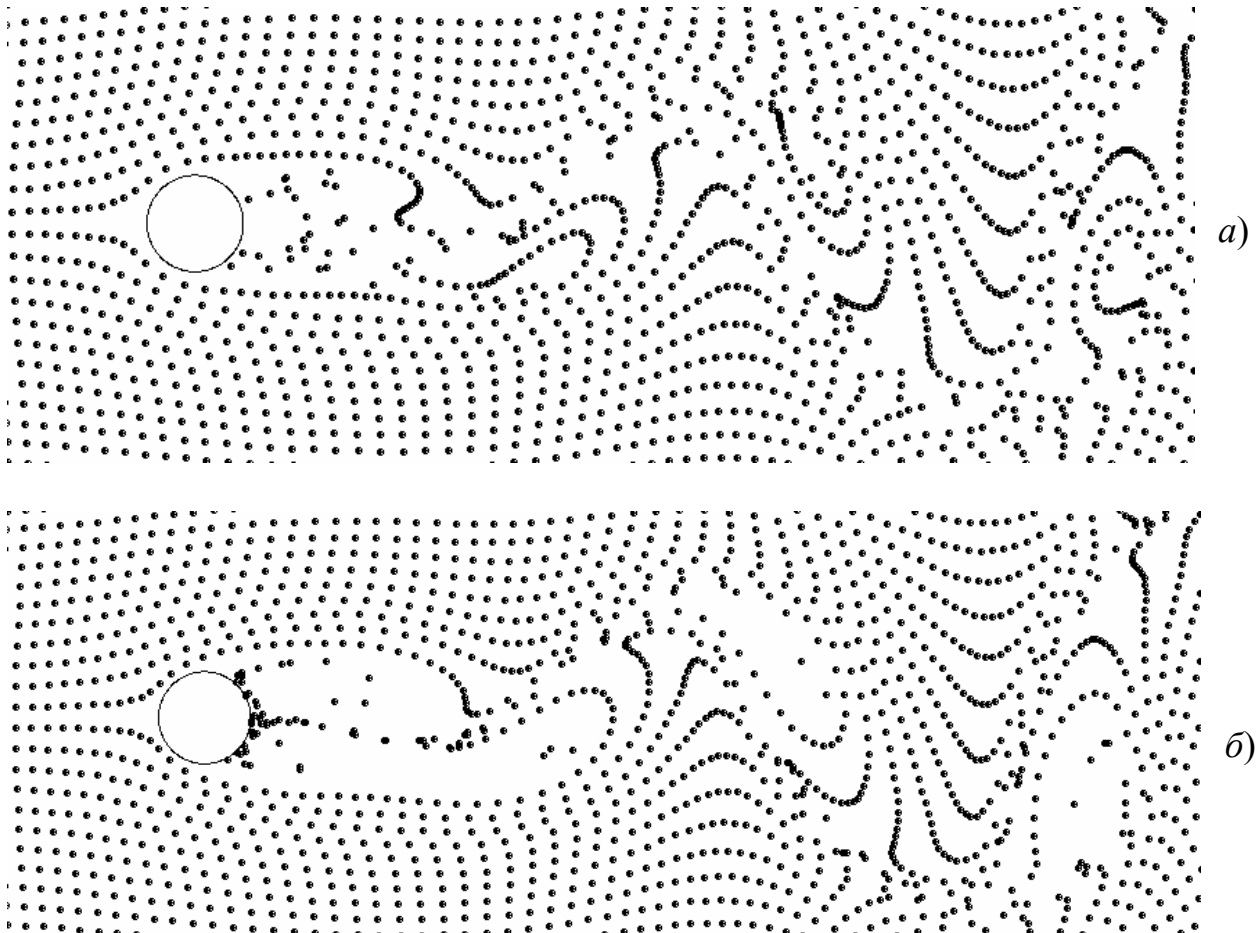


Рис. 11. Распределение твердых частиц в безграничном потоке:
 $a - \varepsilon = 0,1, Stk = 0,0039$; $б - \varepsilon = 3,5, Stk = 0,1939$.

Заключение

Проведены расчеты нестационарного обтекания кругового цилиндра вязкой несжимаемой жидкостью с примесью при $Re = 100$. Рассмотрено влияние условий вбрасывания частиц на картину распределения частиц за телом. Установлено, что наличие в безграничном потоке небольшой объемной концентрации примеси ($3 \cdot 10^{-6}$) с плотностью много больше плотности несущей среды влияет на основные гидродинамические характеристики в окрестности обтекаемого тела: увеличивается гидродинамическое сопротивление; уменьшается амплитуда подъемной силы, число Струхала. Заметное влияние на поведение частиц примеси вблизи

цилиндра и в следе за ним на гидродинамические характеристики цилиндра оказывает число Стокса. В частности, с ростом числа Стокса коэффициент со-

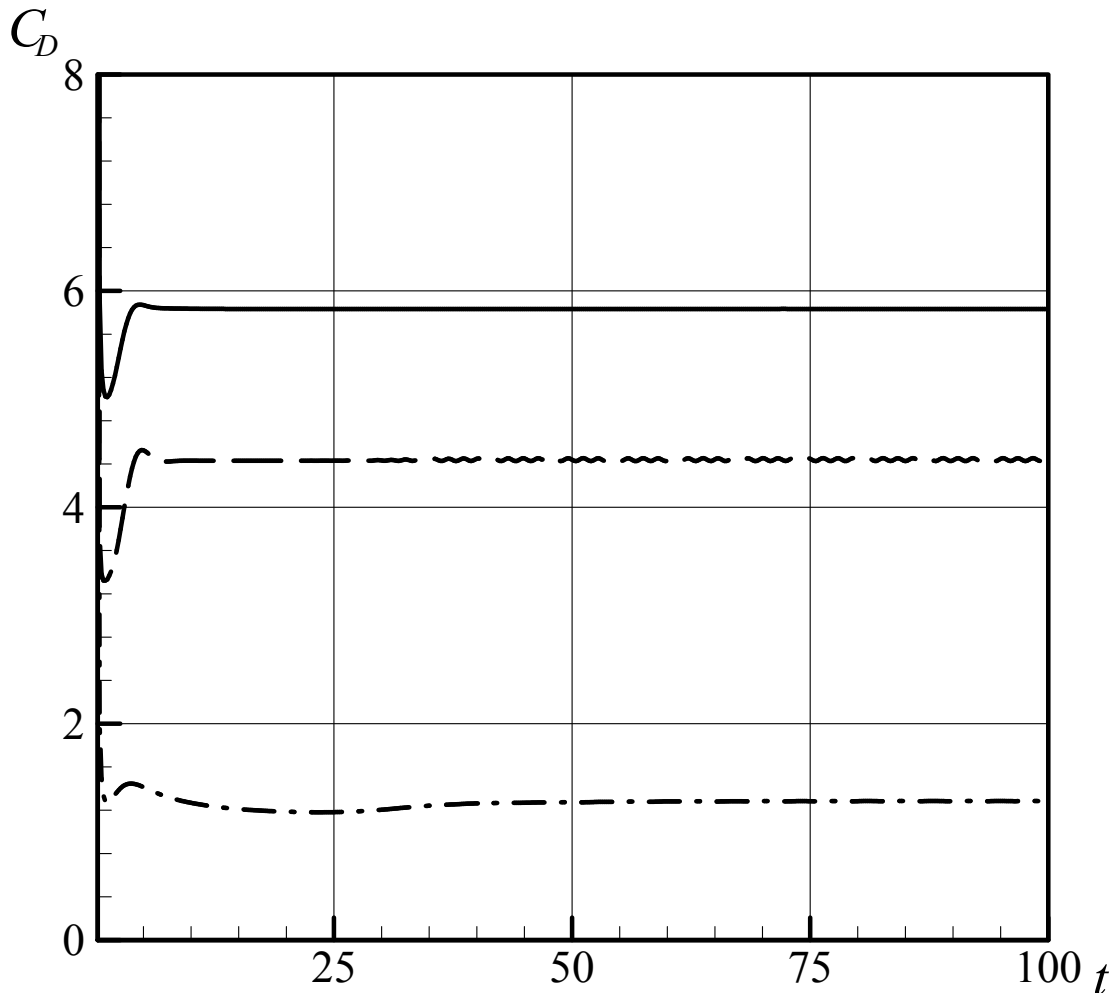


Рис. 12. Коэффициент сопротивления цилиндра:
 — — симметрия потока на боковых границах;
 — прилипание к боковым стенкам;
 — · — безграничный поток.

противления монотонно стремится к коэффициенту сопротивления цилиндра в однородном потоке. Зависимость амплитуды коэффициента подъемной силы от числа Стокса является нелинейной, на характер изменения ее существенно влияет расход примесей, подаваемых в расчетную область.

Исследованы также потоки жидкости и частиц в стесненных областях. Показано, что в случае выполнения условий симметрии

потока на боковых границах завихренность его уменьшается, частицы, плотность которых меньше плотности жидкости, концентрируются в вихревых структурах; при большей плотности располагаются, в основном, на периферии вихрей. При движении среды в канале с твердыми непроницаемыми стенками вихревые структуры подавляются, легкие частицы на удалении от цилиндра располагаются равномерно; из частиц с плотностью, превышающей плотность жидкости, наоборот, формируются струи. В обоих случаях коэффициент сопротивления цилиндра превышает коэффициент сопротивления цилиндра, обтекаемого безграничным потоком.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука. 1987. 464 с.
2. Справочник по теплообменникам. Т.1/ Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат. 1987. 560 с.
3. *Коган В.Б.* Теоретические основы типовых процессов химической технологии. Л.: Химия. 1977. 592 с.
4. *Лантев А.Г., Фарахов М.И.* Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике. Казань: Изд-во Казанск. Гос. Уп-ва. 2008. 729 с.
5. Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир. 1982. 464 с.
6. *Yao J., Zhao Y., Hu G., Fan J., Cen K.* Numerical Simulation of Particle Dispersion in the Wake of a Circular Cylinder // *Aerosol Science and Technology*. 2009. No. 43. P. 174 - 187.
7. *Волков А.Н., Циркунов Ю.М.* Влияние дисперсной примеси на структуру нестационарного двухфазного следа за поперечно обтекаемым цилиндром при умеренных числах Рейнольдса // *Математическое моделирование*. 2003. Т. 15. №7. С. 98 - 110.
8. *Liu L., Ji F., Fan J., Cen K.* Direct numerical simulation of particle dispersion in the flow around a circular cylinder // *Journal of thermal science*. 2004. Vol. 13. No. 4. P. 344 - 349.
9. *Brandon D.J., Aggarwal S.K.* A Numerical Investigation of Particle Deposition on a Square Cylinder Placed in a Channel Flow // *Aerosol Science and Technology*. 2001. No. 34. P. 340 - 352.

10. *Aggarwal S.K., Yapo J.B., Grinstein F.F., Kailasanath K.* Numerical simulation of particle transport in planar shear layers // *Computers & Fluids*. 1996. Vol. 25. No. 1. P. 39 - 59.
11. *Зиганшин М.Г., Зиганшин А.М.* Полуэмпирическая модель образования автослоя на тканых фильтрационных материалах. Часть 1. Исследование взаимодействия взвешенных частиц и препятствия в потоке // *Известия КазГАСУ*. 2009. Т. 11. №1. С. 181 - 185.
12. *Moshfegh A., Farhadi M.* Numerical simulation of particles dispersion and deposition in channel flow over two square cylinders in tandem // *FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical Engineering*. 2008. Vol. 6. No. 1. P. 13 - 24.
13. *Tian Z.F., Inthavong K, Tu J.Y., Yeoh G.* Numerical simulation of gas-particle flows over an in-line tube bank // *ANZIAM J.* 2007. No. 48. P. 509 - 526.
14. *Young D.L., Huang J.L., Eldho T.I.* Simulation of laminar vortex shedding flow past cylinders using a coupled BEM and FEM model // *Comput. Methods appl. Mech. Eng.* 2001. No. 190. P. 5975 - 5998.
15. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
16. *Sintu Singha, K.P. Sinhamahapatra.* Flow past a circular cylinder between parallel walls at low Reynolds numbers // *Ocean Engineering*. 2010. Vol. 37. No. 8-9. P. 757 - 769.
17. *F. Rehim, F. Aloui, S. Ben Nasrallah, L. Doubriez and J. Legrand,* Experimental investigation of a confined flow downstream of a circular cylinder centred between two parallel walls // *Journal of Fluids and Structures*. No. 24. 2008. P. 855 - 882.