

УДК 532.51

## ПАДЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В ШЛЕЙФЕ МЕЛКИХ ПУЗЫРЬКОВ И ПОВЕДЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВ В ОКРЕСТНОСТИ ЧАСТИЦЫ

© 2021 г. К. Takamura<sup>a,\*</sup>, Y. Kawasaki<sup>b</sup>, T. Degawa<sup>a</sup>, T. Uchiyama<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

<sup>b</sup> Japan Tobacco Inc. 4-1-1, Toranomon, Minato-ku, Tokyo, 105-6927, Japan

\*E-mail: kotaro.takamura@imass.nagoya-u.ac.jp

Поступила в редакцию 06.11.2020 г.

После доработки 24.12.2020 г.

Принята к публикации 25.12.2020 г.

Экспериментально исследовано взаимодействие твердой сферической частицы, погружающейся внутри шлейфа мелких пузырьков, и поведение пузырьков в окрестности частицы. Мелкие пузырьки, образующиеся при электролизе воды и имеющие средний диаметр 0.037 мм, поднимаются вверх под действием сил плавучести, образуя шлейф. Средняя скорость пузырьков в канале составляет 0.05 мм/с. Твердую сферическую частицу диаметром 11.1 мм и плотностью 1130 кг/м<sup>3</sup> погружают в полностью разившийся шлейф мелких пузырьков, где она опускается, совершая меандрирующее движение. Предельная скорость частицы, опускающейся внутри шлейфа, почти совпадает со скоростью падения частицы в спокойной воде. Пузырьки же, отрывающиеся от поверхности частицы, находятся в ее следе, образуя застойную зону. След за частицей расширяется, так что его диаметр увеличивается втрое по сравнению с его значением непосредственно за частицей.

*Ключевые слова:* течение трехфазной среды газ–жидкость–твердое тело, шлейф микропузырьков, твердая сферическая частица, след, метод трассерной визуализации (PIV)

DOI: 10.31857/S0568528121050133

Течение, в котором сосуществуют газовая, жидкая и твердая фазы, называют трехфазным. Подобные течения часто наблюдают в различных промышленных установках [1]. Имеется несколько экспериментальных работ, посвященных трехфазным течениям воды, воздуха и твердых сферических частиц в вертикальных трубах. В некоторых из этих экспериментов изучалось движение относительно малых частиц с диаметрами в диапазоне от 0.07 до 3.6 мм в трубах диаметром от 50 до 218 мм. В этих работах исследовались задержка газа и скорость жидкости [2], эффективная вязкость [3] и поведение пузырьков в общем потоке [4]. В работе [5] изучено влияние вязкости и поверхностного натяжения жидкости на поведение частицы в потоке. В [6] измерены характеристики массопереноса между твердой и жидкой фазами в трехфазном течении воды, воздуха и крупинок бензойной кислоты.

При использовании пневматических насосов для вертикальной транспортировки частиц вверх, также возникают ситуации, когда относительно крупные частицы диаметром 2–11 мм движутся в вертикальных трубах диаметром 19–50 мм. Так, в работах [7, 8] изучена производительность пневмонасосов в зависимости от таких параметров, как место впрыска газа, диаметр трубы и диаметр частицы. В работе [9] предложен метод расчета характеристик пневмонасоса, основанный на уравнении сохранения количества движения для трехфазных течений.

Также исследовались трехфазные течения, в которых принимали участие твердые сферические частицы и кавитационные пузырьки. В работе [10] исследовано влияние частиц на процесс схлопывания кавитационных пузырьков, образованных сфокусированным лазерным пучком. Показано, что существуют три характерных режима поведения частицы. В [11] также продемонстрировано влияние частиц на схлопывание кавитационных пузырьков между частицами и твердыми стенками.

Численное моделирование дисперсных трехфазных течений проводилось при помощи нескольких методов, таких как комбинация методов погруженных границ и отслеживания фронтов [12] и комбинация методов жидких объемов и дискретных элементов [13]. В этих работах диаметр пузырьков был менее 15 мм, а диаметр частиц менее 1 мм. Таким образом, объектом этих исследований были трехфазные течения с пузырьками крупнее твердых частиц.

Динамика пузырькового шлейфа для пузырьков различных размеров изучалась в связи с техническими приложениями в работах [14–16]. В частности, пузырьки диаметром менее 0.1 мм получили название мелких пузырьков. Детальное исследование характеристик течения с такими пузырьками было проведено в работе [17], где рассматривался нестационарный подъем пузырька в вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса. Скорость подъема мелких пузырьков меньше, чем у пузырьков с диаметрами, превосходящими 1 мм; следовательно, площадь поверхности контакта между воздухом и водой на единицу объема в первом случае больше. Во многих работах делались попытки применить результаты, полученные для движения мелких пузырьков, в медицинской, фармацевтической и технической отраслях [18]. Технология обработки отработанных и сточных вод с использованием мелких пузырьков была предложена в [19, 20]. В данных установках мелкие частицы, находящиеся в сточной воде, адсорбировались на мелких пузырьках, что приводило к их всплытию на поверхность резервуара. В работе [21] при помощи мелких пузырьков производилась сепарация частиц оксида железа диаметром менее 0.01 мм. Этот метод сепарации позволяет хорошо использовать преимущества, предоставляемые трехфазными течениями. Когда мелкие пузырьки находятся в ядерных реакторах и установках для очистки воды, трехфазное течение может содержать частицы, более крупные, чем пузырьки. Однако имеется мало работ, посвященных взаимодействию мелких пузырьков с относительно крупными твердыми частицами. Так, авторы работы [22] исследовали движение твердой сферической частицы диаметром 10 мм и плотностью  $1022 \text{ кг/м}^3$  в шлейфе мелких пузырьков; исследована динамика пузырьков в окрестности частицы. Мелкие пузырьки со средним диаметром 0.037 мм создавались в прямоугольном канале посредством электролиза воды и образовывали шлейф в канале. Твердая сферическая частица помещалась внутри шлейфа. Экспериментально изучено влияние объемного потока пузырьков на движение частицы. Исследованы также скорость пузырьков и их распределение вокруг частицы при падении, подъеме и неподвижном состоянии частицы. В экспериментах число Рейнольдса частицы  $Re_p$ , вычисленное по скорости частицы относительно пузырька, менялось в диапазоне  $146 \leq Re_p \leq 303$ . Когда сфера была фиксирована в равномерном однофазном потоке, поток отделялся с ее боковой поверхности при  $Re_p = 1000$  со срывом вихрей в нестационарный след [23]. Поэтому было бы весьма целесообразно изучить движение сферической частицы при  $Re_p \approx 1000$  в шлейфе мелких пузырьков, а также обтекание частицы.

В настоящей работе экспериментально исследовано движение твердой сферической частицы, опускающейся внутри шлейфа мелких пузырьков при числах Рейнольдса  $Re_p \approx 1000$ , а также характеристики потока пузырьков, обтекающего частицу. Мелкие пузырьки образуются при электролизе воды в прямоугольном канале. При всплытии пузырьков в канале образуется их шлейф. С верхней границы канала твердую сферическую частицу диаметром 11.1 мм и плотностью  $1130 \text{ кг/м}^3$  погружают в полностью развитый пузырьковый шлейф. Поведение мелких пузырьков и движение твердой сферической частицы исследуется при  $1166 \leq Re_p \leq 1536$ .

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

### 1.1. Экспериментальная установка

Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рис. 1а. Она состоит из прозрачного акрилового резервуара (0.44 м в ширину и длину и 0.59 м в высоту), предназначенного для визуализации течения. Уровень воды составляет 0.5 м. В воду добавляется хлористый натрий (NaCl) с массовой концентрацией 1.3%. На дне резервуара размещаются два параллельных углеродных стержня. При пропускании постоянного тока между стержнями на аноде и катоде образуются, соответственно, мелкие пузырьки кислорода и водорода.

Внутри акрилового резервуара, непосредственно над углеродным катодом установлен прямолинейный канал с прямоугольным поперечным сечением. Верх канала погружен в воду, которая может втекать и вытекать из него. Вблизи дна канала через все его поперечное сечение натягивается сетка. Под действием силы плавучести мелкие пузырьки водовода, выделившиеся на катоде, поднимаются вверх. Пройдя сквозь сетку, эти пузырьки поднимаются в канале, возбуждая

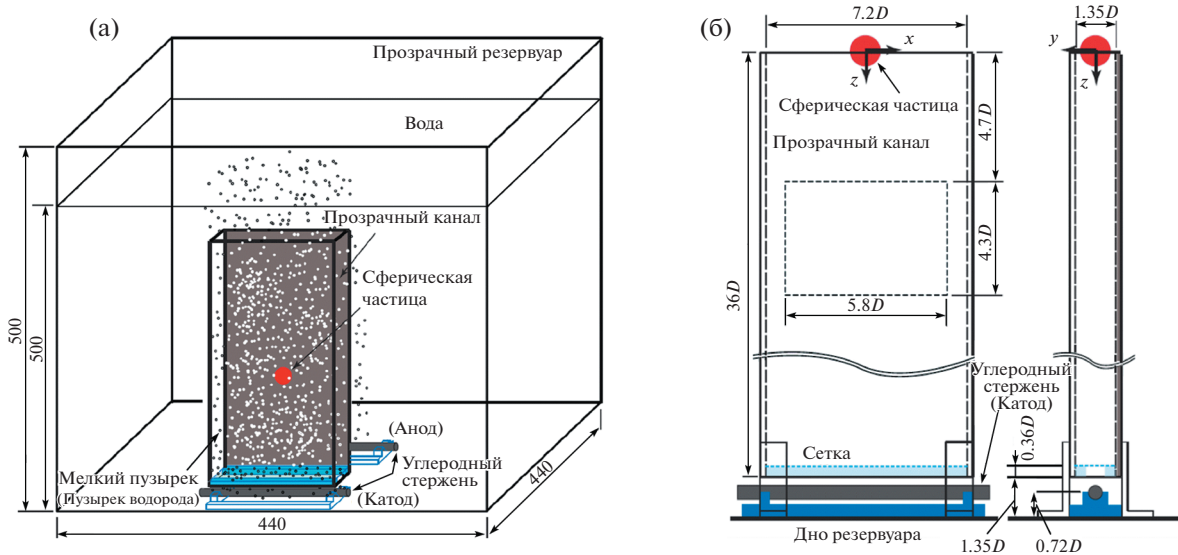


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки (а). Сферическая частица и прямоугольный канал (б).

восходящий поток воды. Большинство пузырьков в канале имеют приблизительно один и тот же диаметр около 0.037 мм. Таким образом, в канале возникает шлейф мелких пузырьков. В полностью развитый пузырьковый шлейф бросают твердую сферическую частицу плотностью 1130 кг/м<sup>3</sup> и диаметром  $D = 11.1$  мм. Проводится наблюдение над движением частицы и поведением пузырьков, окружающих падающую частицу. За каналом размещается черная пластина с целью как можно более отчетливо проследить за процессом. На рис. 1б изображены катодный стержень и прямоугольный канал. Размеры горизонтального сечения канала равны  $7.2D \times 1.35D$ , а его высота –  $36D$ . Начало координат находится в центре верхней границы канала. Плоскость  $x$ – $y$  горизонтальная, а ось  $z$  направлена вертикально. Дно канала находится на расстоянии  $1.35D$  над дном резервуара, а расстояние между сеткой и катодным стержнем равно  $0.99D$ . Проволочная сетка имеет отверстия размером 760 мкм при диаметре проволоки 200 мкм. При  $t = 0$  твердую сферическую частицу бросают из начала координат в шлейф мелких пузырьков.

## 1.2. Метод и условия эксперимента

Просвет между стенкой канала и частицей в направлении  $y$  составляет  $0.175D$  (см. рис. 1б). Следовательно, перемещения частицы в этом направлении можно пренебречь по сравнению с ее движением в плоскости  $x$ – $z$ . Разумно предположить, что движение частицы имеет двумерный характер. В работе визуализация твердой сферической частицы и мелких пузырьков в центральном вертикальном сечении канала проводилась с использованием лазерного светового ножа толщиной 1 мм с длиной волны 532 нм при мощности 0.5 Вт. Полученные изображения фиксировались высокоскоростной видеокамерой. Скорости пузырьков в центральном вертикальном сечении измерялись методом трассерной визуализации (PIV). При измерении скоростей пузырьков в качестве трассирующих частиц использовались сами пузырьки. Скорость съемки составляла 200 кадров в секунду.

Количество пузырьков водорода, выделяющихся в единицу времени на катоде, определяется током  $I$ . В данной работе объемный расход, определяемый по опускному перемещению воды, определялся при  $I = 0.5$  А. Температура воды в акриловом резервуаре была примерно 298 К, а атмосферное давление во время эксперимента составляло приблизительно 1012 гПа. Средняя скорость пузырьков по площади горизонтального поперечного сечения канала ( $7.2D \times 1.35D$ ) равна 0.05 мм/с. Этот результат хорошо согласуется со значением, вычисленным по закону электролиза Фарадея.

### 1.3. Предельная скорость сферической частицы

Когда частица диаметром  $D$  и плотностью  $\rho_p$  опускается в неограниченном объеме покоящейся жидкости плотностью  $\rho_f$ , ее предельная скорость  $U_{t\infty}$  определяется следующей формулой [24, 25]

$$U_{t\infty} = \left[ \frac{4gD(\rho_p - \rho_f)}{3C_D\rho_f} \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения. Коэффициент сопротивления  $C_D$  определяется уравнением [26]

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}}(1 + 0.173 \text{Re}^{0.657}) + \frac{0.413}{1 - \text{Re}^{-1.09}} \quad (1.2)$$

где  $\text{Re} (= U_{t\infty}D/\nu) < 2 \times 10^5$ . Применяя уравнения (1.1), (1.2) к рассматриваемой сферической частице, получим, что  $U_{t\infty}$  и  $\text{Re}$  равны 0.23 м/с и 2533 соответственно.

При падении частицы вблизи стенки последняя оказывает влияние на предельную скорость частицы. В работе [25] выведена следующая формула для предельной скорости  $U_t$  частицы, падающей в круглой трубе диаметром  $D_c$

$$\frac{U_t}{U_{t\infty}} = (1 - 1.12\lambda^{1.26})^{0.7} \quad (1.3)$$

где  $\lambda = D/D_c$ . Уравнение (1.3) получено эмпирически, в результате наблюдений, выполненных при  $0.0032 < \lambda < 0.873$  и  $53 \leq \text{Re} \leq 15100$ .

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 2.1. Характеристики шлейфа мелких пузырьков

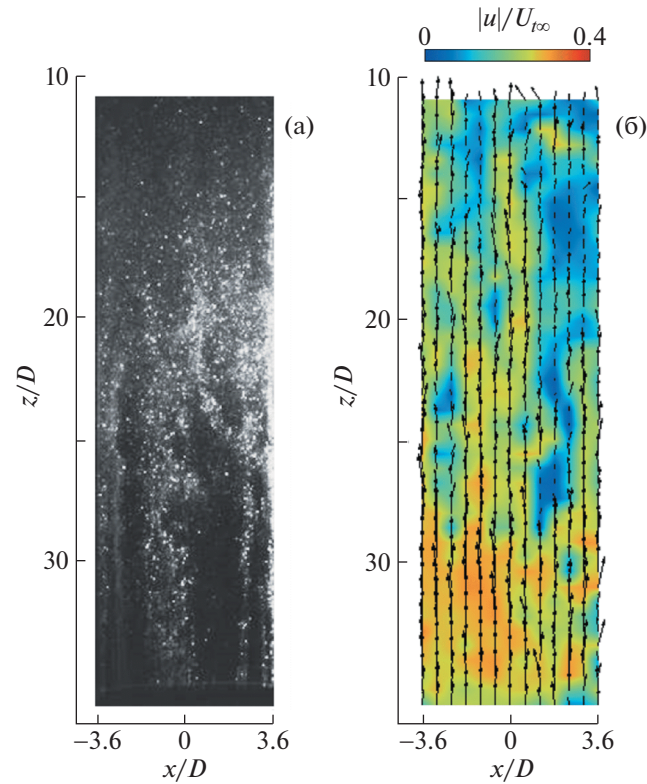
Изображение полностью развитого шлейфа мелких пузырьков, полученное в центральной плоскости  $x-z$  канала, представлено на рис. 2а. Луч лазера сильно отражается пузырьками у правой стенки канала. Это обусловлено не скоплением пузырьков в этой области, а прохождением луча сквозь стенку. Кроме того, поскольку пузырьки не всегда равномерно выделяются на поверхности углеродного стержня, они образуют локальные скопления, растягивающиеся в направлении  $z$ .

На рис. 2б представлено распределение скоростей пузырьков ( $u_x, u_z$ ) в центральной плоскости  $x-z$  канала. Результаты, представленные на рис. 2б, получены в тот же момент времени, что и на рис. 2а. Скорости представлены в безразмерном виде (отнесены к  $U_{t\infty}$ ). В канале возникает поток жидкости, направленный вертикально вверх. Скорость около дна чрезвычайно велика, так как поток возбуждается поднимающимися пузырьками. Однако у верхней границы канала восходящий поток воды замедляется. Это связано с тем, что углеродный катодный стержень расположен непосредственно под центральной линией ( $y = 0$ ) входа в канал, как показано на рис. 1б. Мелкие пузырьки, выделившиеся на углеродном стержне, поднимаются вверх ко входу в канал в центре вертикального сечения ( $y = 0$ ), возбуждая быстрый поток воды, направленный вертикально вверх. Однако по мере подъема пузырьков в канале они рассеиваются в направлении  $y$ . Поэтому скорость потока воды, индуцированного пузырьками, уменьшается в центральном вертикальном сечении в верхней части канала.

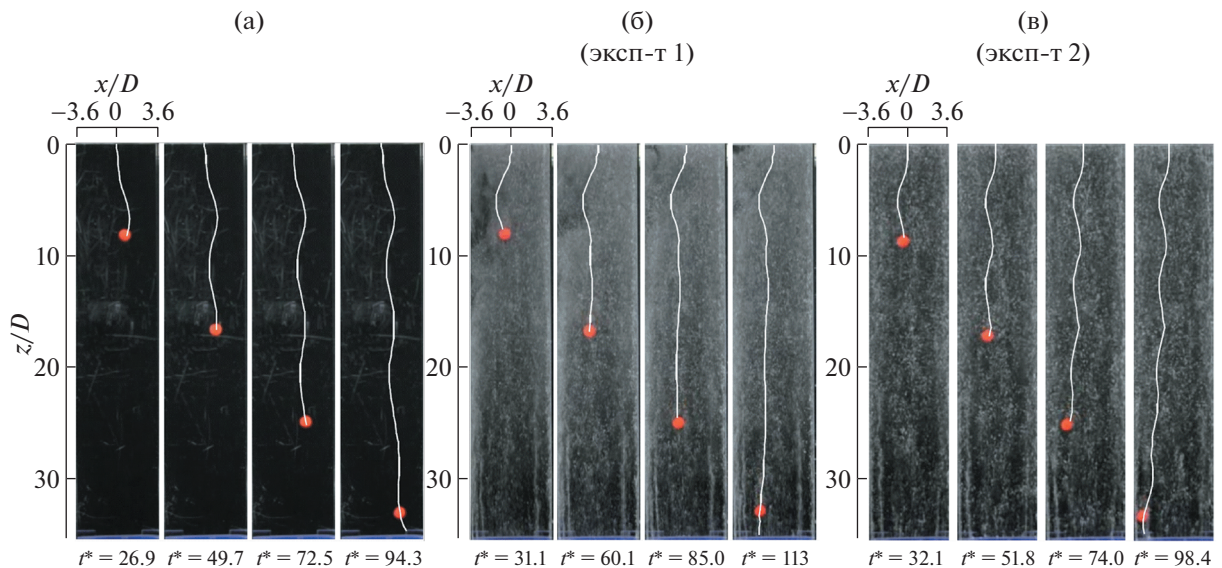
### 2.2. Падение сферической частицы

Предварительно исследовано поведение частицы, опускающейся в спокойной воде. Фотографии такой частицы приведены на рис. 3а. На изображения в центральном вертикальном сечении (плоскости  $x-z$ ) канала в четыре момента безразмерного времени  $t^* = U_{t\infty}t/D$  наложены траектории частиц. Опускающаяся частица находится в меандрирующем движении в горизонтальном направлении  $x$ . Меандрирование обусловлено отрывом потока с поверхности частицы и образованием следа за частицей, что будет рассмотрено ниже.

Для уяснения поведения частицы, опускающейся в шлейфе мелких пузырьков, были выполнены два эксперимента, в дальнейшем обозначаемые как эксперимент 1 и эксперимент 2. На

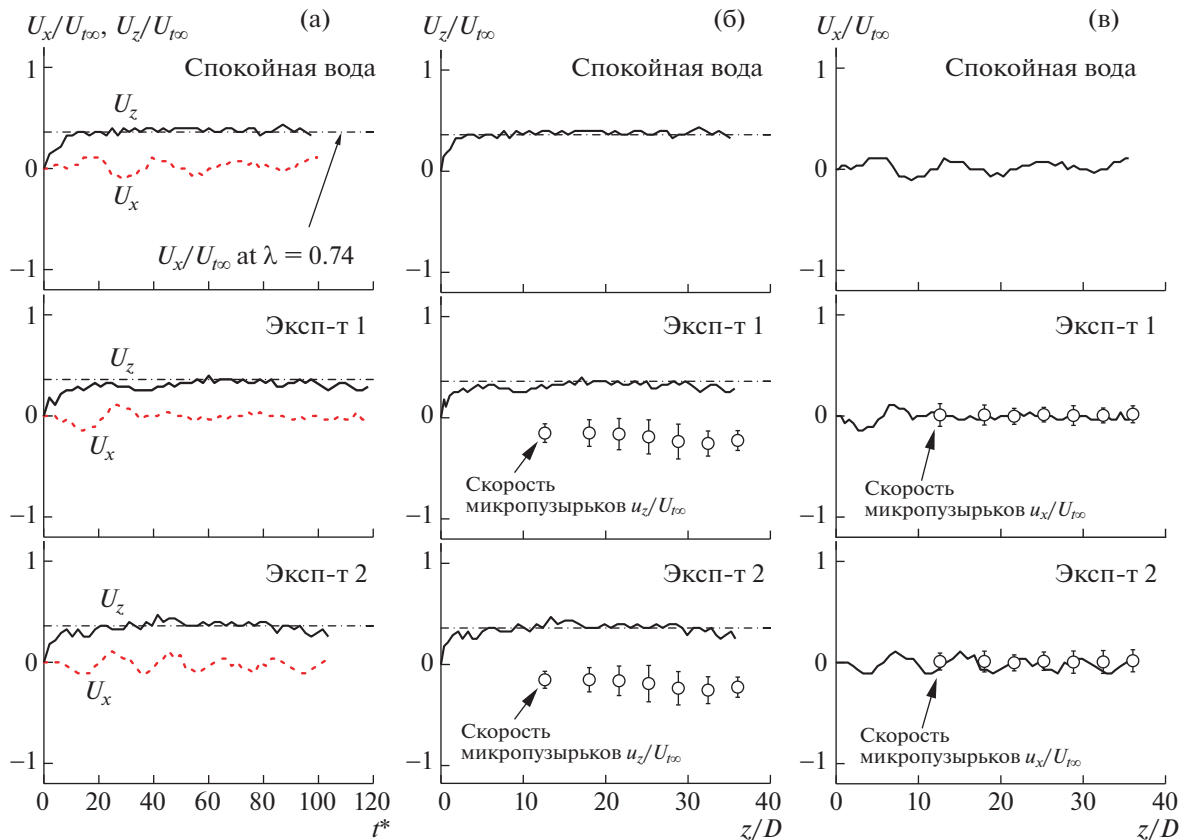


**Рис. 2.** Полностью развитый шлейф мелких пузырьков. Один из кадров, фиксирующих пузырьковый шлейф (а); распределение скоростей пузырьков в центральной вертикальной плоскости прямоугольного канала (б).



**Рис. 3.** Траектории твердой сферической частицы в спокойной воде (а) и пузырьковом шлейфе (б) в эксперименте 1 и в пузырьковом шлейфе в эксперименте 2 (в).

рис. 3б и 3в представлены частица и ее траектории в этих экспериментах. Частица опускается, меандрируя, как и в спокойной воде. Траектории частицы в двух экспериментах не совпадают. Это связано с тем, что поднимающиеся пузырьки образуют скопления и, соответственно, поток воды, индуцированный пузырьками, является нестационарным, а скорости распределены не-



**Рис. 4.** Распределения скоростей твердой сферической частицы и микропузырьков. Зависимость скорости твердой сферической частицы от времени (а); изменение вертикальной скорости частицы в зависимости от расстояния от верха канала (б); изменение горизонтальной скорости частицы в зависимости от расстояния от верха канала (в).

равномерно. На движение частицы также оказывают влияние отрыв пузырьков с поверхности частицы и образующийся след.

### 2.3. Скорость падающей сферической частицы

На рис. 4а показано изменение скорости частицы ( $U_x$ ,  $U_z$ ) во времени. Безразмерная скорость (отнесена к  $U_{\infty}$ ) представлена как функция безразмерного времени  $t^*$ . Результаты для спокойной воды, соответствующие рис. 3а, показаны в верхней части рис. 4а. Вертикальная скорость  $U_z$  представлена сплошной линией. После того как частица отпущена, она движется вниз ( $z$ ) с ускорением при  $t^* \leq 16$ . После этого периода ускорения она продолжает двигаться с почти постоянной скоростью. Горизонтальная скорость  $U_x$  изображена штриховой линией; ее величина существенно меньше, чем  $U_z$ . Флуктуации  $U_x$  имеют примерно тот же порядок, что и  $U_z$ . Скорости частицы в экспериментах 1 и 2 приведены в средней и нижней частях рис. 4а соответственно. Период ускорения частицы в пузырьковом шлейфе длится несколько дольше, чем в спокойной воде, так как поднимающиеся пузырьки индуцируют восходящее течение воды. В эксперименте 1 период ускорения  $t^* \leq 41$ , а в эксперименте 2  $t^* \leq 23$ . В пузырьковом шлейфе частице требуется больше времени, чтобы достичь дна канала. Величина  $U_x$  весьма мала.

Отношение диаметра частицы  $D$  к ширине канала  $1.35D$  равно  $0.74$ . Рассчитывая предельную скорость частицы, падающей в круглой трубе с  $\lambda = 0.74$  по уравнению (1.3), получим  $U_t = 0.36U_{\infty}$ . Это соотношение нанесено на рис. 4а в виде пунктирной линии. Для рассматриваемой частицы в спокойной воде среднее значение величины  $U_z/U_{\infty}$  при  $t^* \geq 16$  равно  $0.371$ , что практически совпадает с результатом для частицы в соответствующей круглой трубе. Значение  $U_z/U_{\infty}$  для ча-

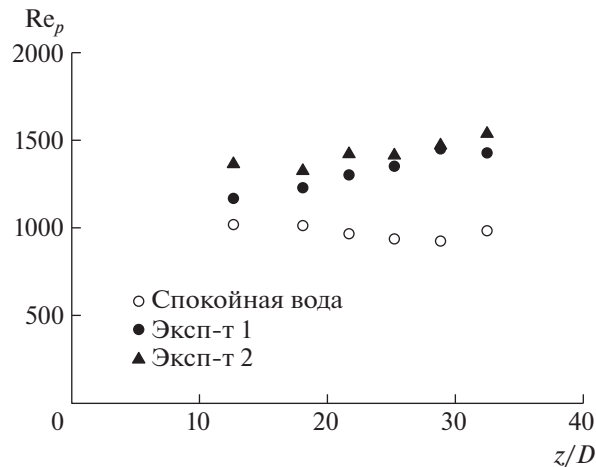


Рис. 5. Изменение числа Рейнольдса частицы в зависимости от расстояния от верха канала.

стицы, опускающейся в пузырьковом шлейфе, также незначительно флуктуирует вокруг величины  $U_z/U_{\infty} = 0.36$ , соответствуя, таким образом, результату для спокойной воды. Эта общность результатов обусловлена тем фактом, что инерция частицы настолько велика, что пузырьки и индуцируемый ими поток воды не могут оказать существенного влияния на скорость падающей частицы.

Изменение вертикальной скорости частицы  $U_z$  с расстоянием  $z$  показано на рис. 4б. Скорости пузырьков в экспериментах 1 и 2 показаны светлыми кружками. Это средние по поперечному сечению скорости, а стандартные отклонения в распределениях по сечению обозначены черточками. Средний диаметр пузырька настолько мал, что скорость пузырька предполагается совпадающей со скоростью воды. Абсолютная величина  $u_z$  несколько возрастает вблизи дна канала при  $z/D = 36$ , поскольку здесь пузырьки плотно поднимаются вдоль центрального вертикального сечения канала и, соответственно, скорость восходящего потока воды на дне канала велика. Таким образом, разность скоростей частицы и пузырьков возрастает при падении частицы. На рис. 4в приведена зависимость горизонтальной скорости частицы  $U_x$  от расстояния  $z$ . Абсолютные величины  $U_x$  в экспериментах 1 и 2 весьма малы. Скорость пузырька в этом направлении также почти нулевая. Это показывает, что пузырьковый шлейф практически не индуцирует горизонтального течения.

Число Рейнольдса частицы  $Re_p$  приведено на рис. 5. В спокойной воде и пузырьковом шлейфе  $Re_p$  определяется следующим образом

$$Re_p = \begin{cases} |U| D/\nu \\ |U - u| D/\nu \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $U$  — скорость частицы,  $u$  — скорость пузырька,  $\nu$  — кинематическая вязкость воды, а верхняя и нижняя строки в формуле соответствуют спокойной воде и пузырьковому шлейфу. От частицы, находящейся в равномерном потоке, поток отрывается при  $Re_p \approx 1000$  с образованием следа в виде кармановской дорожки. Как показано в настоящей работе, при падении частицы в спокойной воде величина  $Re_p$  находится в интервале от 926 до 1019 при  $z/D \geq 12.6$ . Следовательно, меандрирующее движение частицы, показанное на рис. 3а, вероятно, обусловлено вихрем Кармана. В экспериментах 1 и 2  $Re_p$  увеличивается с ростом  $z$ , поскольку скорость подъема пузырьков выше у дна канала. При  $z/D = 32.4$   $Re_p$  в пузырьковом шлейфе выше, чем в спокойной воде. Если обозначить значения  $Re_p$  в экспериментах 1 и 2 как  $Re_{p1}$  и  $Re_{p2}$  соответственно, то относительная разность  $|Re_{p1} - Re_{p2}|/Re_{p2}$  равна 0.12. Это значение относительно мало, хотя имеется большое расхождение в траекториях частицы в этих экспериментах, как показано на рис. 3б и 3в. Это согласование указывает на высокую воспроизводимость результатов в данных экспериментах.

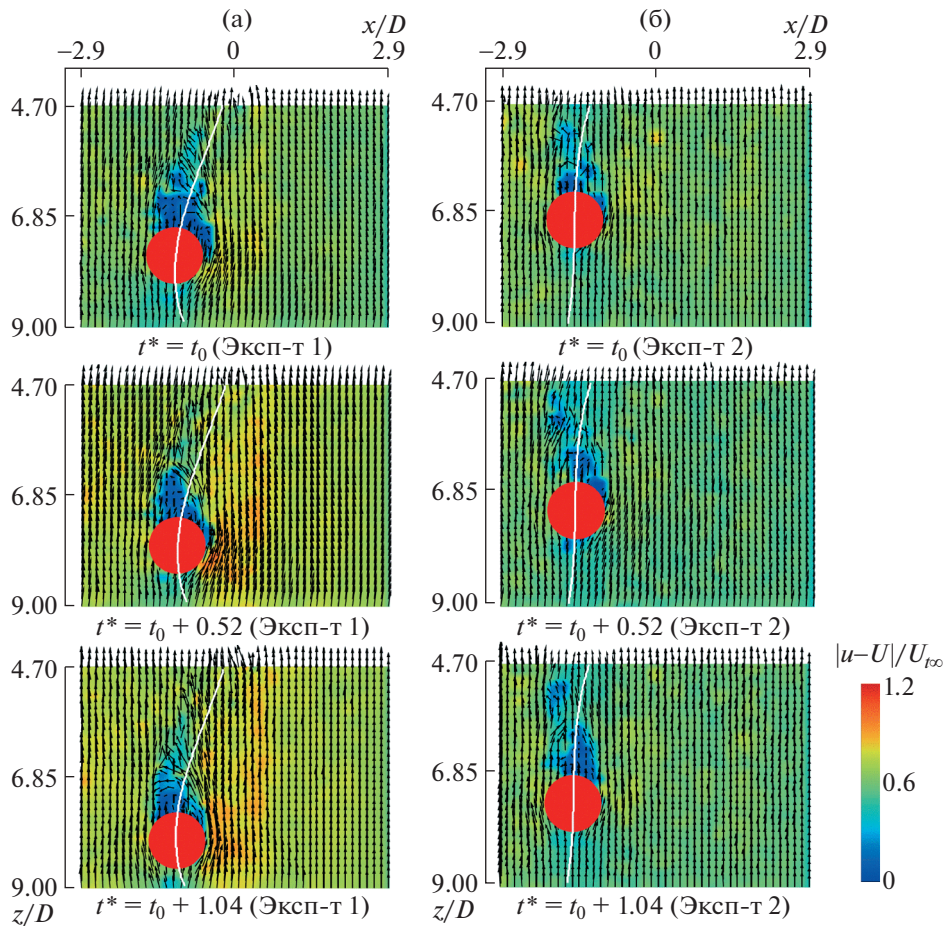


Рис. 6. Распределения скорости пузырьков относительно опускающейся частицы в экспериментах 1 (а) и 2 (б).

#### 2.4. Распределение скоростей мелких пузырьков, обтекающих частицу

Исследовалось поведение мелких пузырьков в вертикальном сечении (плоскость  $x-z$ ), проходящем через центр частицы. Распределение скоростей пузырьков  $u = (u_x, u_z)$  в прямоугольной области  $-2.9 \leq x/D \leq 2.9$ ,  $4.7 \leq z/D \leq 9$ , показанной на рис. 1б, измерялось системой PIV. Распределения скорости пузырька относительно частицы  $|u - U|/U_{\infty}$ , измеренные в эксперименте 1, приведены на рис. 6а. Эти распределения представлены для трех моментов времени вместе с траекторией частицы. Вдали от падающей частицы относительная скорость распределена почти равномерно. Это означает, что частица не оказывает влияния на движение пузырьков вдали от нее. Пузырьки отрываются от поверхности частицы, а за частицей скорость пузырьков чрезвычайно мала. Эта застойная зона практически исчезает на расстоянии  $2D$  за частицей. Однако скорость не восстанавливается полностью даже на расстоянии  $3D$  за частицей, так что влияние опускающейся частицы заметно на больших расстояниях за ней. Распределение скорости в эксперименте 2 показано на рис. 6б. Образовавшийся след подобен следу на рис. 6а.

На рис. 7а приведена осредненная по времени скорость пузырьков, обтекающих частицу; там же представлена скорость относительно частицы. Начало местной системы координат  $(\xi, \eta)$  находится в центре частицы, падающей в области  $-2.9 \leq x/D \leq 2.9$ ,  $4.7 \leq z/D \leq 9$ , а осредненная скорость рассчитывалась в области  $-1.25 \leq \xi/D \leq 1.25$ ,  $1.25 \leq \eta/D \leq 2.75$ . В эксперименте 1 скорость ниже у переднего края частицы, что указывает на торможение в этой области. Пузырьки отрываются с боковой поверхности частицы, образуя за ней (при  $\eta/D = 0.8$ ) застойную зону с весьма малой скоростью. За этой областью при  $\xi/D = 0$  возникает след, который продолжает существовать даже при  $\eta/D = 2.75$ . В эксперименте 2 распределение скоростей сходно с экспериментом 1.



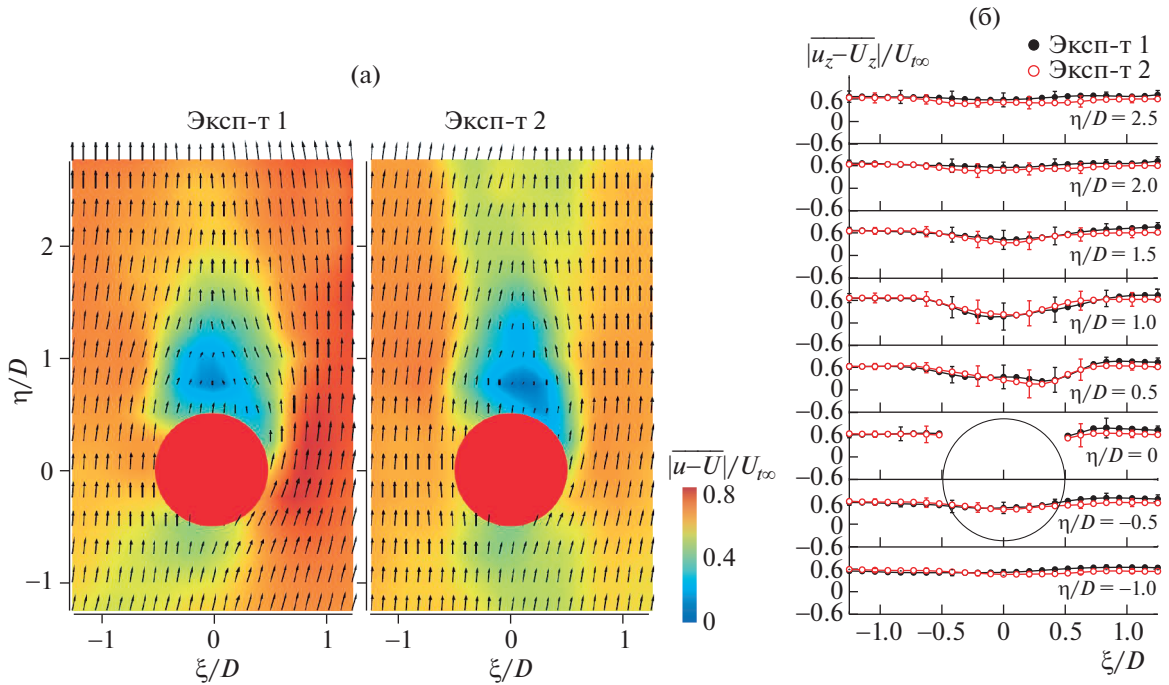


Рис. 7. Осредненная во времени скорость пузырьков относительно частицы; распределения скорости, направления которой указаны стрелками (а); распределения осредненной во времени скорости пузырьков.

Распределение осредненной по времени скорости пузырьков, обтекающих частицу, представлено на рис. 7б. Черточки обозначают стандартные отклонения флуктуаций скорости пузырьков во времени. Представлены вертикальные компоненты относительной скорости  $(u_z - U_z)/U_{\infty}$  в восьми горизонтальных сечениях. В сечении  $\eta/D = -1$ , находящемся вверх по потоку от частицы, распределение почти равномерное, т.е. пузырьки не испытывают влияния частицы. В сечении  $\eta/D = -0.5$ , проходящем через передний край частицы, скорость уменьшается около  $\xi/D = 0$ , что указывает на торможение потока. И в сечении  $\eta/D = 0.5$ , проходящем через задний край частицы, и в сечении  $\eta/D = 1$ , находящемся вниз по потоку от частицы, скорость в окрестности  $\xi/D = 0$  крайне мала. Это указывает на существование застойной зоны непосредственно за частицей. В сечении  $\eta/D = 1.5$  наблюдается аналогичный дефицит скорости, что вновь подтверждает существование следа. Даже в сечении  $\eta/D = 2.5$  еще наблюдается влияние частицы.

При использовании метода водородных пузырьков известно, что поведение водорода и жидкости подобно, когда диаметры мелких пузырьков не превосходят 0.1 мм [27]. Поскольку в данной работе диаметр пузырьков водорода составляет 0.037 мм, можно ожидать, что скорость пузырьков и скорость жидкости подобны. Основываясь на этом предположении, можно оценить число Рейнольдса частицы  $Re_p$  по диаметру частицы, кинематической вязкости воды и скорости пузырьков в сечении  $\xi/D = -1$ . Значения  $Re_p$  в экспериментах 1 и 2 равны 1437 и 1358 соответственно. Когда неподвижная сфера находится в равномерном однофазном потоке, последний отрывается от поверхности сферы при  $Re = 1000$ . Происходит срыв вихрей и образование нестационарного следа [23]. В настоящей работе показано, что за частицей, опускающейся в шлейфе мелких пузырьков, образуется след, подобный следу за частицей, обтекаемой равномерным однофазным потоком при  $Re \approx 1000$ , и при том же значении  $Re_p$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен шлейф всплывающих мелких пузырьков, образованных электролизом воды и имеющих средний диаметр 0.037 мм. Средняя скорость пузырьков в канале 0.05 мм/с. В полностью развитый пузырьковый шлейф опускают твердую сферическую частицу диаметром 11.1 мм и плотностью 1130 кг/м<sup>3</sup>. Экспериментально исследовано взаимодействие между частицей, опус-

кающейся в шлейфе мелких пузырьков, и самими пузырьками, обтекающими частицу. Полученные результаты сводятся к следующему.

(1) При падении частицы в спокойной воде внутри канала ее предельная скорость  $U_l$  меньше, чем  $U_{\infty}$ , что указывает на влияние стенки канала на движение частицы. Скорость  $U_l$  имеет почти ту же величину, что и скорость, следующая из эмпирической формулы для частицы, опускающейся в спокойной воде внутри вертикальной круглой трубки.

(2) Как и в спокойной воде, опускающаяся частица совершает меандрирующее движение. Время, за которое частица достигает предельной скорости, в пузырьковом шлейфе несколько дольше, так как частица подвергается воздействию восходящего потока воды, индуцированного пузырьками. Предельная скорость имеет почти то же значение, что и в спокойной воде, так как инерция частицы относительно велика.

(3) Число Рейнольдса частицы  $Re_p$ , вычисленное по разности скоростей между пузырьками и частицей, больше, чем у частицы, падающей в спокойной воде. Оно находится в диапазоне от 1166 до 1536.

(4) Скорость пузырьков относительно частицы мала у переднего края частицы; поток пузырьков здесь тормозится. Пузырьки срываются с боковой поверхности частицы, образуя за частицей застойную зону с крайне малой скоростью. След за частицей простирается на расстояние, равное трем диаметрам частицы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang G.Q., Du B., Fan L.S. Bubble formation and dynamics in gas-liquid-solid fluidization. A review // Chem. Eng. Sci. 2007. V. 62. P. 2–27.
2. Lu W.J., Hwang S.J., Chang C.M. Liquid velocity and gas holdup in three-phase internal loop airlift reactors with low-density particles // Chem. Eng. Sci. 1995. V. 50. № 8. P. 1301–1310.
3. Tsuchiya K., Furumoto A., Fan L.S., Zhang J. Suspension viscosity and bubble rise velocity in liquid-solid fluidized beds // Chem. Eng. Sci. 1997. V. 52. № 18. P. 3053–3066.
4. Tsuchiya K., Furumoto A. Tortuosity of bubble rise path in a liquid-solid fluidized bed: Effect of particle shape // AIChE J. 1995. V. 41. № 6. P. 1368–1374.
5. Pandit A.B., Joshi J.B. Effect of physical properties on the suspension of solid particles in three-phase sparged reactors // Int. J. Multiphase Flow. 1987. V. 13. № 3. P. 415–427.
6. David C., Fan L.S. Solid-liquid mass transfer in a gas-liquid fluidized bed // Chem. Eng. Sci. 1986. V. 41. P. 107–115.
7. Yoshinaga T., Sato Y. Performance of an air-lift pump for conveying coarse particles // Int. J. Multiphase Flow. 1996. V. 22. № 2. P. 223–238.
8. Fujimoto H., Ogawa S., Takuda H., Hatta N. Operation performance of a small air-lift pump for conveying solid particles // Trans. ASME. J. Energy Resources Tech. 2003. V. 125. № 1. P. 17–25.
9. Kassab S.Z., Kandil H.A., Warda H.A., Ahmed W.H. Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow // Chem. Eng. Sci. 2007. V. 131. № 1–3. P. 273–281.
10. Zhang Y., Chen F., Zhang Y., Du X. Experimental investigations of interactions between a laser-induced cavitation bubble and a spherical particle // Exp. Therm. Fluid Sci. 2018. V. 98. P. 645–661.
11. Zhang Y., Xie X., Zhang Y., Du X. Experimental study of influences of a particle on the collapsing dynamics of a laser-induced cavitation bubble near a solid wall // Exp. Therm. Fluid Sci. 2019. V. 105. P. 289–306.
12. Baltussen M.W., Seelen L.J.H., Kuipers J.A.M., Deen N.G. Direct numerical simulation of gas-liquid-solid three phase flows // Chem. Eng. Sci. 2013. V. 100. P. 293–299.
13. Li Y., Zhang J., Fan L.S. Numerical simulation of gas-liquid-solid fluidization systems using a combined CFD-VOF-DPM method: Bubble wake behavior // Chem. Eng. Sci. 1999. V. 54. № 21. P. 5101–5107.
14. Абрамова О.А., Ахатов И.С., Гумеров Н.А., Питюк Ю.А., Саметов С.П. Численно-экспериментальное изучение динамики пузырьков в контакте с твердой поверхностью // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 3. С. 3–13.
15. Козелков А.С., Куркин А.А., Курулин В.В., Лашкин С.В., Тарасова Н.В., Тятюшкина Е.С. Численное моделирование свободного всплытия пузырьков воздуха // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 6. С. 3–14.
16. Воробьев М.А., Кашинский О.Н., Рандин В.В. Опускное пузырьковое течение в трубе при докритических числах Рейнольдса // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 2. С. 119–125.
17. Архипов В.А., Васенин И.М., Ткаченко А.С., Усанина А.С. О нестационарном всплытии пузырька в вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 1. С. 86–94.
18. Rodríguez-Rodríguez J., Sevilla A., Martínez-Bazán C., Gordillo J.M. Generation of fine-bubbles with applications to industry and medicine // Annu. Rev. Fluid Mech. 2015. V. 47. P. 405–429.

19. *Ahmadi R., Khodadadi D.A., Abdollahy M., Fan M.* Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopyrite particles // *Int. J. Mining Sci. Technol.* 2014. V. 24. № 4. P. 559–566.
20. *Temesgen T., Bui T.T., Han M., Kim T.I., Park H.* Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review // *Adv. Colloid and Interface Sci.* 2017. V. 246. P. 40–51.
21. *Terasaka K., Aoki S., Kobayashi D.* Recovery of fine iron oxide particulates from waste water using fine-bubble flotation / *Proc. 19th Int. Symp. Transport Phenomena.* Reykjavik, August 17–21, 2008.
22. *Uchiyama T., Kawasaki Y., Degawa T., Takamura K.* Motion of a spherical particle in a fine-bubble plume and the behavior of fine-bubbles around the particle // *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.* 2020. V. 234. № 7. P. 1340–10350.
23. *Mimeau C., Cottet G.H., Mortazavi I.* Direct numerical simulation of three-dimensional flows past obstacles with a vortex penalization method // *Computers Fluids.* 2016. V. 136. P. 331–347.
24. *Flemmer R.L., Banks C.L.* On the drag coefficient of a sphere // *Powder Technol.* 1986. V. 48. № 3. P. 217–221.
25. *Arsenijević Z.L., Grbavčić Ž.B., Garić-Grulović R.V., Bošković-Vragolović N.M.* Wall effects on the velocities of a single sphere settling in a stagnant and counter-current fluid and rising in a co-current fluid // *Powder Technol.* 2010. V. 203. № 2. P. 237–242.
26. *Turton R., Levenspiel O.* A short note on the drag correlation for spheres // *Powder Technol.* 1986. V. 47. № 1. P. 83–86.
27. *Clayton B.R., Massey B.S.* Flow visualization in water: a review of techniques // *J. Sci. Instrum.* 1967. V. 44. № 1. P. 2–11.

*Перевод с англ. М.Г. Лебедева*