

УДК 532.529.5

DOI: 10.15372/PMTF202215078

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ПУЗЫРЕЙ В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ОТ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ГАЗА И ДИАМЕТРА ПУЗЫРЕЙ

А. Е. Гореликова^{*,**}, В. В. Рандин^{*,**}, А. В. Чинак^{*}

^{*} Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

^{**} Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mails: gorelikova.a@gmail.com, randin@itp.nsc.ru, chinak@mail.ru

Исследована скорость пузырьков в полидисперсном пузырьковом потоке в наклонном плоском канале при различных значениях числа Рейнольдса ($4500 \div 22\,700$) и объемной доли газа. Исследование диаметров газовых пузырьков проводилось с использованием метода теневой фотографии. Показано, что при малых значениях числа Рейнольдса относительная скорость пузырьков выше. При небольших значениях объемной доли газа существенное количество пузырьков имеет малый диаметр (1 мм), при больших значениях расхода газа диаметр пузырька увеличивается до $3 \div 5$ мм.

Ключевые слова: плоский канал, газожидкостный поток, пузыри, объемная доля газа, скорость жидкости

Введение. Экспериментальным исследованиям газожидкостных течений в вертикальных трубах и каналах посвящено множество работ. В работе [1] показано, что в случае восходящего газожидкостного потока в вертикальных трубах распределение газовой фазы происходит за счет циркуляции жидкости вокруг пузыря, обусловленной градиентом скорости жидкости. В работе [2] представлен и апробирован метод экспериментального определения концентрации газовой фазы с помощью ультразвукового расходомера с целью уменьшения коэффициента прозрачности среды для ультразвуковых импульсов. Метод применим для измерения в потоке жидкости объемной доли газа, не превышающей 30 %. В [3] представлены результаты прямого численного моделирования нисходящего течения двухфазного потока при $Re = 6300$ и объемной доле газа 0,5; 2,5; 10,0 %, полученные с учетом деформации пузырька, поверхностного натяжения и неоднородности свойств материала на границе. Показано, что группирование пузырьков не зависит от объемной доли газа, максимальная плотность распределения наблюдается на расстоянии порядка $2,2R$ (R — радиус пузырька). В работе [4] рассмотрено снарядное течение в вертикальном канале с прямоугольным сечением размером $3,25 \times 43,00$ мм. Проведено сравнение с расчетными данными, полученными по имеющимся в литературе моделям, и показано, что течение в представленном канале отличается от течений в каналах с большой глубиной. Показано, что при малой глубине канала большая часть тейлоровских пузырей имеет деформированную форму.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теплофизики СО РАН по программе № 121032200034-4.

© Гореликова А. Е., Рандин В. В., Чинак А. В., 2023

Значительно менее распространены исследования пузырьковых течений в горизонтальных и наклонных каналах, хотя ориентация канала оказывает значительное влияние на характер течения. Влияние угла наклона плоского канала на динамику пузырькового газожидкостного потока изучалось в работе [5]. В [6] показано значительное влияние угла наклона на теплопередачу от стенки в пузырьковом потоке в наклонном плоском канале: увеличение коэффициента теплопередачи было отмечено даже при значениях объемной доли газа $\beta \leq 1\%$.

В работе [7] изучалась интенсификация массообмена на стенке за счет введения в поток жидкости газовой фазы. Показано, что в двухфазном потоке абсолютная величина массопереноса незначительно увеличивается с увеличением скорости жидкости. Дисперсность газовой фазы оказывает существенное влияние на массоперенос, скорость которого увеличивается с уменьшением размера пузырьков. Быстрый рост скорости массопереноса на стенке происходит при малом значении объемной доли газа (менее 5 %), после чего наблюдается монотонный медленный рост с дальнейшим увеличением расхода газа. С уменьшением скорости жидкости влияние газовой фазы на массообмен возрастает. При величине угла наклона $30 \div 50^\circ$ достигается максимальное значение скорости массопереноса.

В работе [8] путем прямого численного моделирования показано, что величина угла наклона прямоугольного канала оказывает существенное влияние на гидродинамику потока и теплообмен при малых значениях числа Рейнольдса. В наклонном канале пузырьки мигрируют к верхней стенке канала, увеличивая интенсивность перемешивания в пристенном слое, но уменьшая скорость жидкости по сравнению со скоростью в однофазном потоке. Коэффициент теплопередачи на верхней стенке канала достигает максимального значения при углах наклона $30 \div 60^\circ$.

Целью настоящей работы является изучение влияния пузырьков газа и угла наклона на динамику двухфазного восходящего потока в наклонном плоском канале.

Методика измерений и экспериментальная установка. Для проведения измерений была модернизирована установка, описанная в работе [6]. Рабочая жидкость (раствор ферри- (0,16 %) и ферроцианида (0,21 %) калия и карбоната натрия (2,55 %) в дистиллированной воде) в установке движется по замкнутому циркуляционному контуру (рис. 1). Из резервуара 1 с помощью центробежного насоса 2 рабочая жидкость перекачивается в рабочую секцию. Расход потока жидкости контролировался с помощью ротаметра 4 РМ2.5-ЖУЗ (верхний предел измерений $2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, погрешность $\pm 0,06 \text{ м}^3/\text{ч}$). Для уменьшения неоднородности скорости по поперечному сечению канала на входе в рабочую секцию была установлена форкамера 5 с конфузоре и сеткой. В качестве рабочей секции использовался канал из оргстекла длиной 1,7 м с поперечным сечением размером $10 \times 100 \text{ мм}$, состоящий из нескольких секций 6–10, соединенных фланцами. После прохождения газожидкостной смеси через рабочую зону смесь подавалась в бак-сепаратор 11, где жидкость отделялась от газа и вновь подавалась в основной резервуар 1. В качестве рабочего газа использовался атмосферный воздух. Расход газа, подаваемого с помощью компрессора, определялся с помощью регуляторов расхода FMA5518 OMEGA Engineering, Inc. (верхний предел измерений 5 л/мин, погрешность $\pm 0,05 \text{ л/мин}$). Для ввода газа в поток жидкости использовался генератор пузырей, состоящий из 41 капилляра с внутренним диаметром 0,4 мм, которые были вклеены в секцию из оргстекла, расположенную на верхней стенке канала. Пузырьки газа образовывались при отделении газа от концов капилляров, которые выступали на 5 мм от верхней стенки канала. Диаметры пузырьков были измерены на расстоянии 470 мм от точки впрыска газа. С использованием системы термостатирования температура испытываемой жидкости автоматически поддерживалась на уровне 25°C , величина угла наклона канала во время измерений составляла 45° .

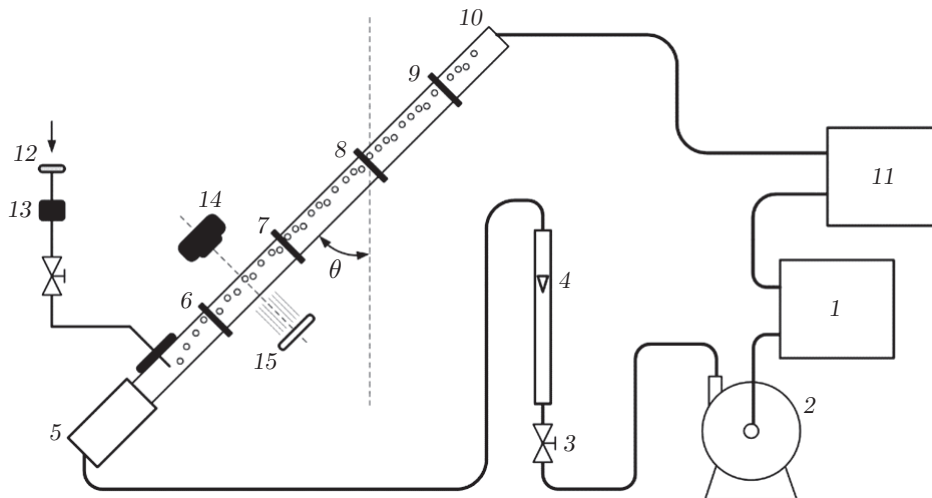


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — основной бак, 2 — центробежный насос, 3 — регулятор расхода жидкости, 4 — ротаметр, 5 — конфузор с сетками, 6–10 — секции трубы или плоского канала, 11 — бак-сепаратор, 12 — область забора газа из атмосферы, 13 — измеритель-регулятор расхода газа, 14 — камера, 15 — светодиодная матрица

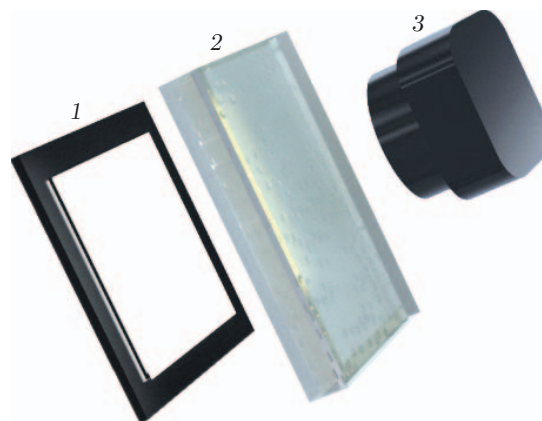


Рис. 2. Блок для исследования диаметра газовых пузырей:

1 — оптическая секция, 2 — камера, 3 — LED-матрица

В качестве линейного масштаба для определения числа Рейнольдса Re использовался эквивалентный гидравлический диаметр канала, составляющий 20 мм. В ходе экспериментов значения числа Рейнольдса варьировались в диапазоне $4500 \div 22\,700$, значение объемной доли газа — в диапазоне $1 \div 5\%$, для всех комбинаций режимных параметров течение оставалось пузырьковым.

Исследование диаметров газовых пузырьков проводилось с помощью метода теневой фотографии (рис. 2). Изображения пузырьков регистрировались камерой Nikon J4 через оптическую секцию. Скорость съемки составляла 120 кадр/с при разрешении 1280×720 пикселей. Для обеспечения равномерного светового поля подсветка потока проводилась светодиодной матрицей размером 150×150 мм. Полученные изображения были обработаны с использованием метода, аналогичного описанному в работе [9]. Диаметр газовых пузырей вычислялся по площади пузыря на снимке по формуле $D = \sqrt{4S/\pi}$.

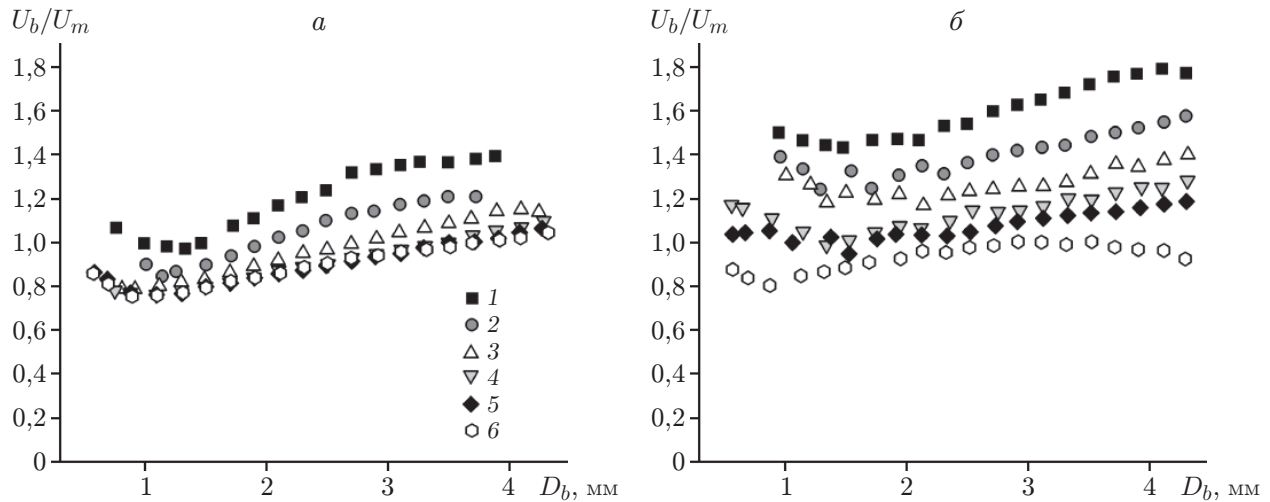


Рис. 3. Зависимость скорости пузырьков от их диаметра при $\beta = 1\%$ (а) и $\beta = 5\%$ (б) и различных значениях числа Рейнольдса:
 1 — $Re = 6100$, 2 — $Re = 8100$, 3 — $Re = 11\,300$, 4 — $Re = 14\,800$, 5 — $Re = 18\,400$,
 6 — $Re = 22\,700$

Погрешность определения границы пузыря составляла ± 1 пиксел. Согласно калибровочным кадрам 1 мм соответствует 48 пикселям, погрешность определения диаметра для пузырей диаметром $0,3 \div 7,0$ мм составляет $0,01 \div 0,10$.

Результаты измерений. Были измерены скорости пузырьков разного диаметра в полидисперсном пузырьковом потоке в наклонном плоском канале при различных значениях числа Рейнольдса и объемной доли газа β .

Зависимость относительной скорости пузырька от диаметра для различных значений числа Рейнольдса представлена на рис. 3 (U_b — скорость пузырька, U_m — скорость смеси, D_b — средний диаметр пузырька). Кривые, соответствующие большим числам Рейнольдса ($Re = 22\,700$, $18\,400$, $14\,800$), расположены достаточно близко друг к другу. По мере уменьшения числа Рейнольдса относительная скорость увеличивается. Это обусловлено тем, что при больших значениях числа Рейнольдса собственная скорость пузырьков значительно меньше скорости потока жидкости и не оказывает существенного влияния на результирующую скорость пузырьков. При малых числах Рейнольдса движение пузырька за счет плавучести вносит значительный вклад в результирующую скорость.

Даже при больших числах Рейнольдса, когда вклад плавучести пузырька в результирующую скорость становится менее существенным, зависимость скорости пузырька от его диаметра сохраняется. Вероятно, это обусловлено тем, что при малых значениях объемной доли газа в наклонном канале пузырьки движутся вблизи его верхней стенки. Мелкие пузырьки ($D_b = 0,5 \div 0,7$ мм) находятся в пристенной области потока, где скорость жидкости меньше среднерасходной скорости жидкости, а крупные пузырьки ($D_b = 3 \div 4$ мм) перемещаются в ядре потока, где скорость жидкости превышает среднерасходную скорость жидкости.

Результаты измерений показывают, что по мере увеличения объемной доли газа скорость пузырьков U_b также увеличивается, вероятно вследствие того, что увеличение объемной доли газа приводит к увеличению пульсаций в пристенной области и “размыванию” пузырькового слоя по поперечному сечению канала в направлении ядра потока.

На рис. 4 приведены зависимости относительной скорости пузырьков от их диаметра при различных значениях расхода жидкости и газа. Видно, что при $Re = 6100$ объемная

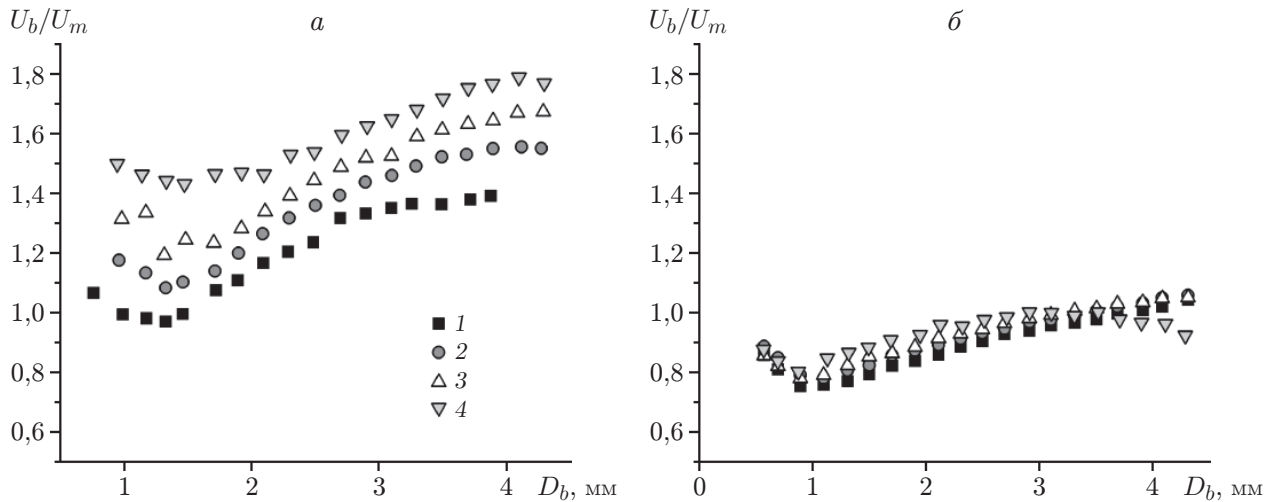


Рис. 4. Зависимость скорости пузырьков от их диаметра при $Re = 6100$ (а) и $Re = 22000$ (б) и различных значениях объемной доли газа:
1 — $\beta = 1\%$, 2 — $\beta = 2\%$, 3 — $\beta = 3\%$, 4 — $\beta = 5\%$

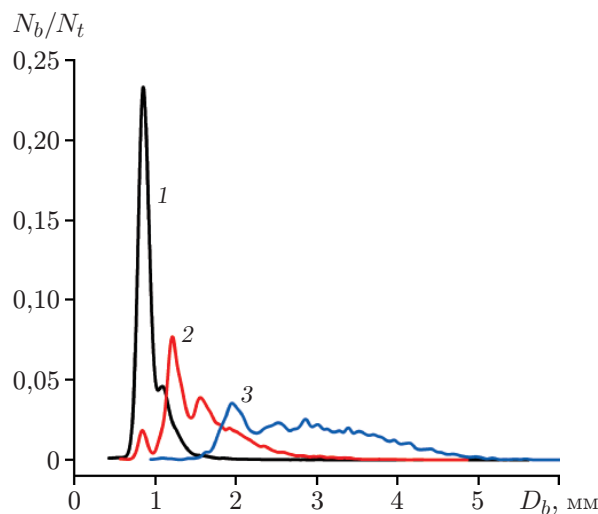


Рис. 5. Зависимость количества пузырьков от их диаметра при $Re = 12400$ и различных значениях объемной доли газа:
1 — $\beta = 1\%$, 2 — $\beta = 5\%$, 3 — $\beta = 10\%$

доля газа оказывает большее влияние на зависимость относительной скорости от диаметра пузырька, чем при $Re = 22700$. При больших числах Рейнольдса возмущения, вносимые газовой фазой, становятся менее заметными на фоне турбулентных пульсаций.

На рис. 5 представлена зависимость количества пузырей от их диаметра при $Re = 12400$ и различных значениях объемной доли газа (N_b — количество пузырьков определенного диаметра, N_t — общее количество пузырьков). Видно, что при небольших значениях объемной доли газа ($\beta = 1\%$) существенное количество пузырьков имеет малый (приблизительно 1 мм) диаметр. При больших значениях объемной доли газа диаметр пузырьков увеличивается до $3 \div 5$ мм. По мере увеличения расхода газа скорость коалесценции пузырьков возрастает, и зависимости существенно различаются при различных значениях объемной доли газа. При этом во всех случаях диапазон размеров содержащих-

ся в потоке пузырьков широк. Следовательно, при больших числах Рейнольдса и $\beta < 5\%$ дисперсный состав потока незначительно влияет на скорость скольжения пузырьков.

Выводы. Результаты выполненных в работе измерений позволяют сделать следующие выводы.

Скорость пузырьков растет с увеличением их диаметра. При малых числах Рейнольдса относительная скорость пузырьков больше.

Увеличение объемной доли газа в наклонном канале приводит к увеличению скорости пузырьков.

По мере увеличения числа Рейнольдса влияние объемной доли газа на скорость пузырей уменьшается. При больших числах Рейнольдса и объемной доле газа менее 5 % дисперсный состав потока оказывает незначительное влияние на скорость скольжения пузырьков.

При небольших значениях объемной доли газа существенное количество пузырьков имеет малый (порядка 1 мм) диаметр. При больших значениях расхода газа диаметр пузырьков увеличивается до 3 ÷ 5 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zun I.** The transverse migration of bubbles influenced by walls in vertical bubbly flow // Intern. J. Multiphase Flow. 1980. V. 6, N 6. P. 583–588.
2. **Мамонов В. Н., Серов А. Ф.** Экспериментальное определение объемной концентрации газовой фазы в газожидкостном потоке // ПМТФ. 2021. Т. 62, № 1. С. 63–69.
3. **Cifani P., Kuerten J. G. M., Geurts B. J.** Flow and bubble statistics of turbulent bubble-laden downflow channel // Intern. J. Multiphase Flow. 2020. V. 126. 103244.
4. **Wang Y., Yan C., Sun L., Yan C.** Characteristics of slug flow in a vertical narrow rectangular channel // Experiment. Thermal Fluid Sci. 2014. V. 53. P. 1–16.
5. **Кашинский О. Н., Чинак А. В., Каипова Е. В.** Пузырьковое газожидкостное течение в наклонном прямоугольном канале // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 1. С. 63–69.
6. **Kashinsky O. N., Randin V. V., Chinak A. V.** Heat transfer and shear stress in a gas-liquid flow in an inclined flat channel // J. Engng Thermophys. 2014. V. 23, N 1. P. 39–46.
7. **Kashinskii O. N., Chinak A. V., Smirnov B. N., Uspenskii M. S.** Mass transfer from a wall to a gas-liquid flow in an inclined flat channel // J. Engng Phys. Thermophys. 1993. V. 64, N 5. P. 422–426.
8. **Piedra S., Lu J., Ramos E., Tryggvason G.** Numerical study of the flow and heat transfer of bubbly flows in inclined channels // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2015. V. 56. P. 43–50.
9. **Fu Y., Liu Y.** Development of a robust image processing technique for bubbly flow measurement in a narrow rectangular channel // Intern. J. Multiphase Flow. 2016. V. 84. P. 217–228.

*Поступила в редакцию 14/II 2022 г.,
после доработки — 6/VI 2022 г.
Принята к публикации 27/VI 2022 г.*