

Влияние поверхностно-активных веществ в малых концентрациях на размеры газовых пузырей в наклонном канале*

А.О. Кархов^{1,2}, А.Е. Гореликова^{1,2}, М.А. Воробьев^{1,2}

¹*Новосибирский государственный университет*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: m.vorobev1@g.nsu.ru

Представлены результаты экспериментального исследования влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) на распределения пузырьков газа по размерам в наклонной трубе. Измерения проводились в круглой трубе внутренним диаметром 32 мм при расходах газа 3,3, 5, 8 мл/мин и углах наклона трубы $30 \div 60^\circ$. Диаметры газовых пузырьков измерялись по теневым фотографиям пузырькового течения. Распределения пузырьков по размерам и значения среднего диаметра пузырьков были получены в зависимости от угла наклона трубы и расстояния от места ввода газовой фазы до точки измерения. Добавление ПАВ привело к уменьшению отрывного диаметра пузырей и существенному подавлению их коалесценции.

Ключевые слова: наклонная труба, пузыри, коалесценция, поверхностно-активные вещества.

Введение

Пузырьковые течения находят применение в различных технических сферах и отличаются множеством уникальных характеристик, которые отсутствуют в однофазных потоках. Введение газовых пузырей в жидкость изменяет гидродинамические свойства потока и существенно влияет на процессы тепло- и массообмена. При этом воздействие газовой фазы на параметры течения зависит от множества факторов, включая расход фаз, ориентацию и геометрию канала, направление потока жидкости, а также физические свойства и дисперсность газовой фазы. Надежная экспериментальная информация о характеристиках двухфазных течений, в том числе таких, как дисперсность газовой фазы и значения компонент скорости пузырей, необходима для моделирования течений, увеличения надежности оборудования и предотвращения внештатных ситуаций.

В настоящее время восходящие пузырьковые потоки в каналах простой геометрии хорошо изучены [1–3]. В последнее время появилось много работ по спутным опускающим

* Исследование выполнено за счет Российского научного фонда (грант № 24-21-20023, <https://www.rscf.ru/project/24-21-20023/>) и финансовой поддержке Правительства Новосибирской области (соглашение № р-90 от 22.03.2024).

пузырьковым течениям [4–8]. Но несмотря на то, что угол наклона канала может оказывать существенное влияние на характеристики газожидкостных течений [9], количество работ, посвященных исследованию двухфазных потоков в таких условиях, весьма ограничено. Основная часть работ посвящена исследованию движения крупных пузырей (сопоставимых с характерными размерами канала) [10] или снарядов [11–14]. Мелкодисперсным пузырьковым потокам уделено значительно меньше внимания [15–17]. В то же время именно небольшие добавки газа (около 1,5–2 %) могут оказывать значительное влияние на структуру течения [18] и теплообмен [19]. В исследовании [20] экспериментально показано, что при углах наклона 30–45° наблюдается максимум теплообмена при пузырьковом течении в наклонном канале. Эти результаты подтверждаются также численным моделированием в работе [21].

Контроль размера пузырей в наклонной геометрии за счет изменения режимных параметров (расходной скорости жидкости и газа [22]) затруднен из-за наличия коалесценции пузырей по пути следования вдоль наклонной плоскости [23], так как слияние пузырей может привести к стремительному переходу от мелкодисперсного пузырькового режима течения к снарядному. Известно, что даже малые концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ) могут оказывать значительное влияние на отрывной диаметр пузырей, на скорость всплытия пузырьковых кластеров [24], на взаимодействие отдельных пузырей в потоке [25], например, препятствуя их коалесценции. Согласно [26], отрывной диаметр пузыря от капилляра в покоящейся жидкости зависит от коэффициента поверхностного натяжения $d_b \sim \sigma^{1/3}$. Таким образом, добавление ПАВ позволяет газожидкостному течению в наклонном рабочем участке оставаться в пузырьковом режиме и не переходить в снарядный в более широком диапазоне режимных параметров.

Целью настоящей работы было изучение влияния поверхностно-активных веществ на распределение пузырьков по размерам при инъекции газа в покоящуюся жидкость из одиночного капилляра при различных расходах газа и углах наклона рабочего канала. Контроль дисперсности газовой фазы производился на различных расстояниях от капилляра.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Газ (воздух) от компрессора 1 подавался в жидкость через одиночный капилляр 2 с внутренним диаметром

$d_0 = 0,2$ мм. Расход газа определялся по перепаду давления на капилляре внутренним диаметром 0,16 мм. Перепад давления измерялся дифференциальным датчиком МРХ5100DP. Рабочим участком 3 служила оптически прозрачная оргстеклянная труба общей длиной 1,2 м и внутренним диаметром $d_{ch} = 32$ мм. В качестве рабочей жидкости выступал водяной раствор этилового спирта, массовая

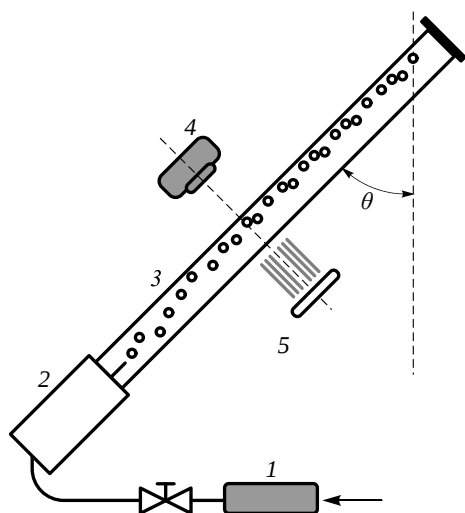


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — система подачи газа, 2 — капилляр,
3 — рабочий участок, 4 — камера, 5 — LED-матрица.

доля которого составляла 1 %. Согласно работе [27], коэффициент поверхностного натяжения σ в таком растворе равен примерно 67 мН/м (для чистой воды — 72 мН/м).

Съемка пузырей производилась в проходящем свете LED-матрицы 5 на системную камеру 4 Nikon Zfc с частотой кадров 120 Гц. Перед началом измерений производилась калибровочная съемка, позволяющая вычислить количество пикселей изображения на линейный размер. Полученные теневые изображения пузырькового течения обрабатывались автоматически. С использованием языка программирования C++ и библиотеки OpenCV был разработан алгоритм для распознавания пузырей в видеопотоке. Диаметр пузыря d_b определялся как диаметр окружности, эквивалентной площади изображения объекта $d_b = \sqrt{4S/\pi}$. Точность определения границы пузыря составляла ± 1 точка. Для изображений, полученных на фотоаппарат Nikon Zfc при разрешении 1920×1080 точек по калибровочным кадрам, размер 1 мм соответствовал 22 точкам.

Относительная погрешность вычислялась по формуле

$$\Delta D = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial S} \Delta S\right)^2} = \frac{\partial \left(\sqrt{\frac{4S}{\pi}}\right)}{\partial S} \Delta S = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4}{\pi S}} \Delta S = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{D}} \Delta S,$$

$$\Delta D = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{D}} \Delta S.$$

Таким образом, при размере пузырей в диапазоне $1 \div 3$ мм относительная погрешность определения диаметра составляла $0,04 \div 0,07$. Значение расхода газа, полученное при численной обработке изображений, сходилось со значениями системы измерения расхода газа с точностью до 0,05.

Расстояние от места ввода газа в жидкость до точки наблюдения пузырей и получения снимков варьировалось в диапазоне $L = 100 \div 600$ мм. Угол наклона трубы отсчитывался от вертикального положения ($\theta = 0^\circ$) и изменялся в диапазоне $\theta = 30 \div 60^\circ$, так как в этом диапазоне углов наклона рабочего участка наблюдались максимальные значения относительного трения и теплообмена в пузырьковом газожидкостном потоке [19]. Эксперименты проводились при расходе газа $Q_g = 3,3, 5, 8$ мл/мин и температуре 25°C .

Результаты экспериментов

На рис. 2 приведено сравнение результатов, полученных при расходе газа 3,3 мл/мин в 1%-ом спиртовом растворе с данными для воды из работы [23]. Видно, что наличие ПАВ приводит к уменьшению отрывного диаметра пузырей (первый пик на гистограмме), что качественно согласуется с соотношением $d_b \sim \sigma^{1/3}$ из [26]. При этом с увеличением угла наклона канала влияние ПАВ на размер первичных пузырей ослабевает. Так, при угле наклона 50° разница отрывных диаметров составляет менее 0,7 % (см. рис. 2с). Наличие ПАВ существенно снижает вероятность коалесценции пузырей как вблизи капилляра, так и по пути следования вдоль наклонной поверхности. В обоих случаях при увеличении угла наклона канала пузыри активно группируются. При использовании в качестве рабочей жидкости дистиллята это приводит к активному объединению пузырей и увеличению их размера, что на диаграмме выражено ростом числа и размера вторичных пиков. В случае использования раствора ПАВ доля вторичных пиков по отношению к общему объему пузырей меньше из-за подавления коалесценции. При $\theta = 60^\circ$

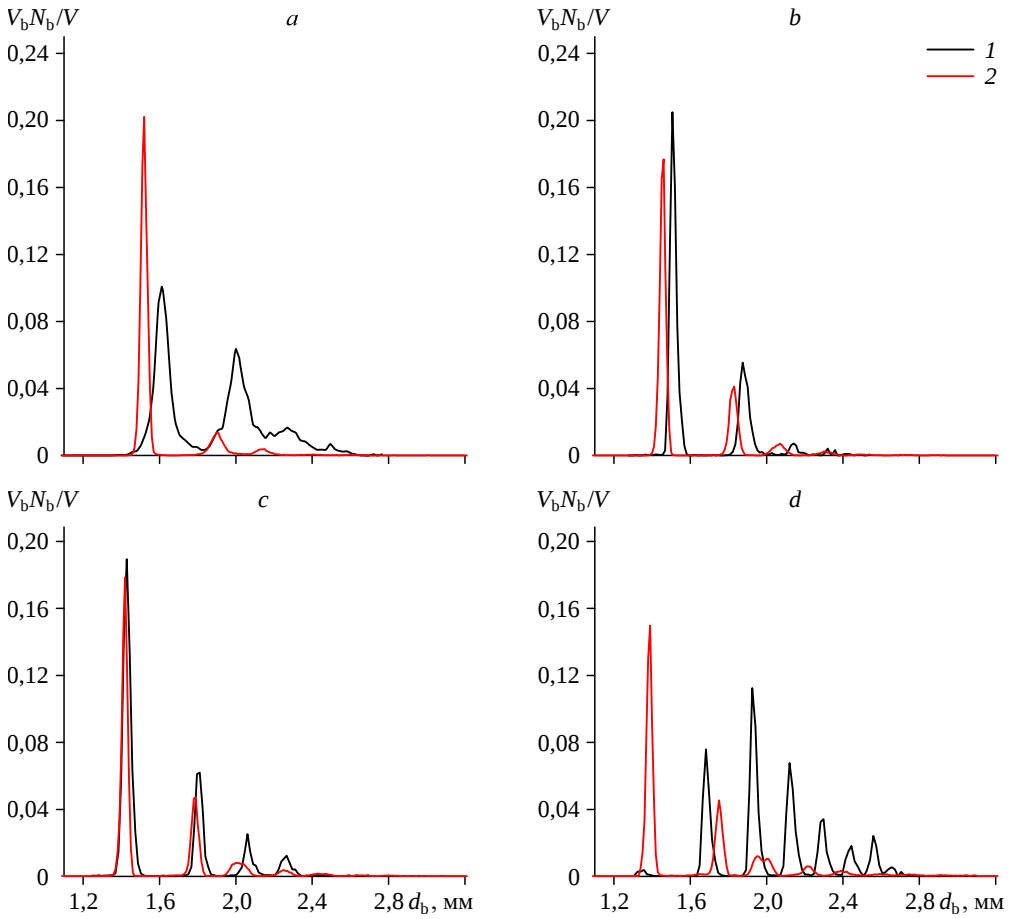


Рис. 2. Влияние ПАВ на распределение пузырьков по размерам и сравнение с результатами на воде [23].

Угол наклона канала $\theta = 30^\circ$ (a), 40° (b), 50° (c), 60° (d);
1 — вода, $L = 200$ мм [23], 2 — 1 %-ый спиртовой раствор, $L = 300$ мм; $Q_g = 3,3$ мл/мин.

этот эффект выражен наиболее сильно: для воды пик, соответствующий отрывному размеру пузырей, незначителен, при этом при использовании ПАВ основная доля пузырей имеет отрывной размер (см. рис. 2с). Для всех исследуемых углов наклона рабочего

канала в эксперименте с ПАВ доля объема газа во вторичных пиках по отношению к полному объему пузырей меньше, чем в случае с водой [23] (рис. 3).

Распределения пузырьков по размерам в 1%-ом спиртовом растворе при $L = 300$ мм, различных углах наклона канала θ и расходах газа $Q_g = 3,3, 5, 8$ мл/мин приведены на рис. 4. Видно, что изменение Q_g в исследуемом диапазоне приводит к небольшому увеличению размера

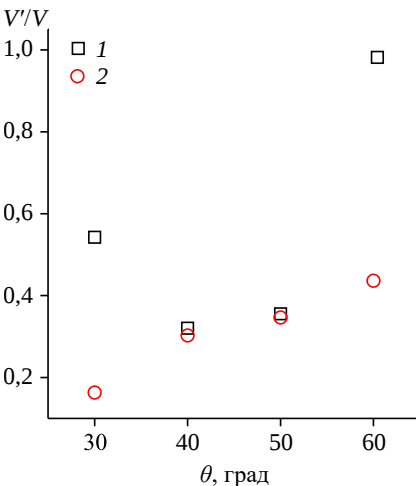


Рис. 3. Доля объема вторичных пузырей при расходе газа $Q_g = 3,3$ мл/мин.

1 — вода, $L = 200$ мм [23], 2 — 1 %-ый спиртовой раствор, $L = 300$ мм.

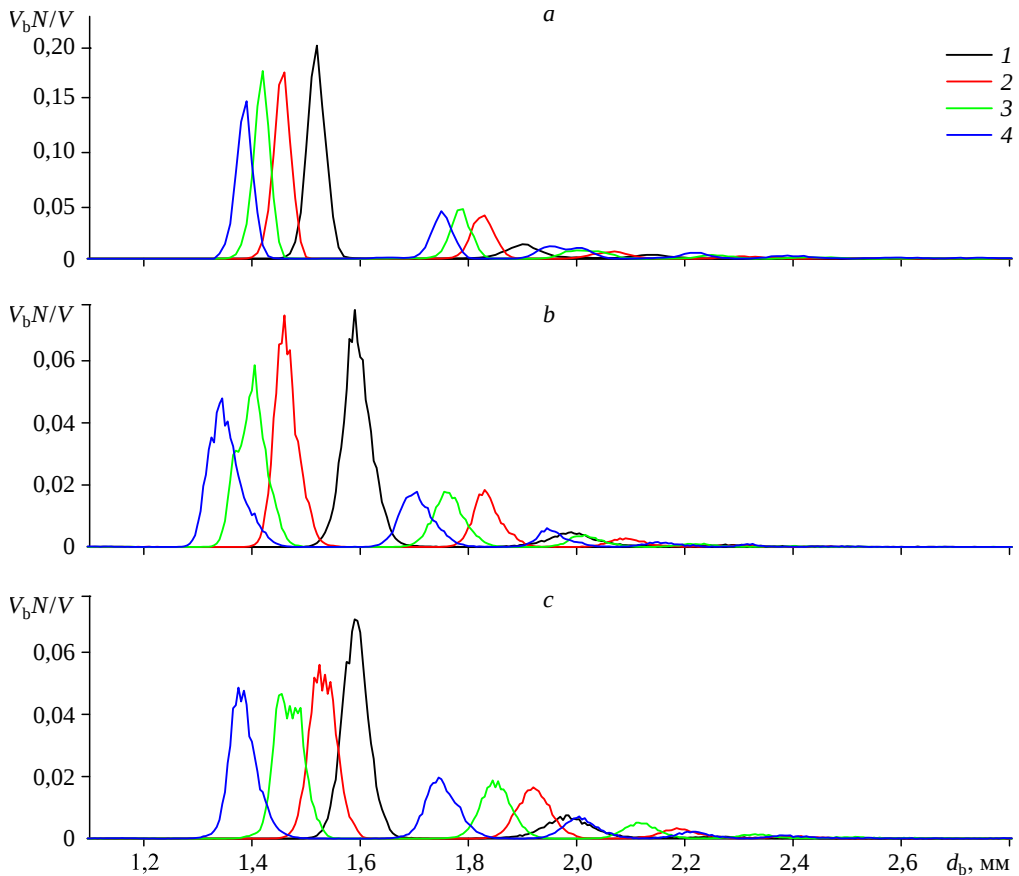


Рис. 4. Распределение пузырей по размерам при разных расходах газа Q_g для $L = 300$ мм.

$Q_g = 3,3$ (a), 5 (b), 8 (c) мл/мин, $\theta = 30^\circ$ (1), 40° (2), 50° (3), 60° (4).

вторичных пиков на гистограмме, но качественно не влияет на форму распределения. Также на рис. 4 видно, что увеличение расхода газа (от 3,3 до 5 мл/мин) при угле наклона канала 30° приводит к незначительному увеличению размеров пузырей, при этом при наклоне канала 60° , наоборот, наблюдается уменьшение их размеров. Согласно работе [28], при формировании пузырька на одиночном капилляре в покоящейся жидкости переход от режима одиночного отрыва к режиму отрыва со сливанием пузырей вблизи капилляра происходит при расходе газа больше, чем $Q_{cr} = \pi(16/3g)^{1/6}(\sigma d_0/2\rho_L)^{5/6}$. Для исследуемых условий $Q_{cr} \approx 18$ мл/мин, а первый пик на гистограммах соответствует пузырям, сформированным в режиме одиночного отрыва. В данном режиме, согласно [29], увеличение расхода газа приводит к незначительному росту размеров пузырей и в большей степени сказывается на частоте их отрыва. Это объясняет слабое влияние увеличения расхода газа на рост размера пузырька. В то же время, как показано, например, в работе [30], при расчете отрывного диаметра пузырька исходя из баланса сил необходимо учитывать силу, связанную с импульсом, который вдуваемый через капилляр поток газа передает пузырьку. Такая сила тем больше, чем больше расход газа. Следовательно, отрывной диаметр пузырьков будет определяться также этими двумя конкурирующими эффектами, относительный вклад которых будет различен для разных углов наклона канала и расходов газа.

На рис. 5 приведены зависимости распределений пузырей по размерам от угла наклона рабочего канала при $Q_g = 8$ мл/мин. Во всех случаях при увеличении угла наклона

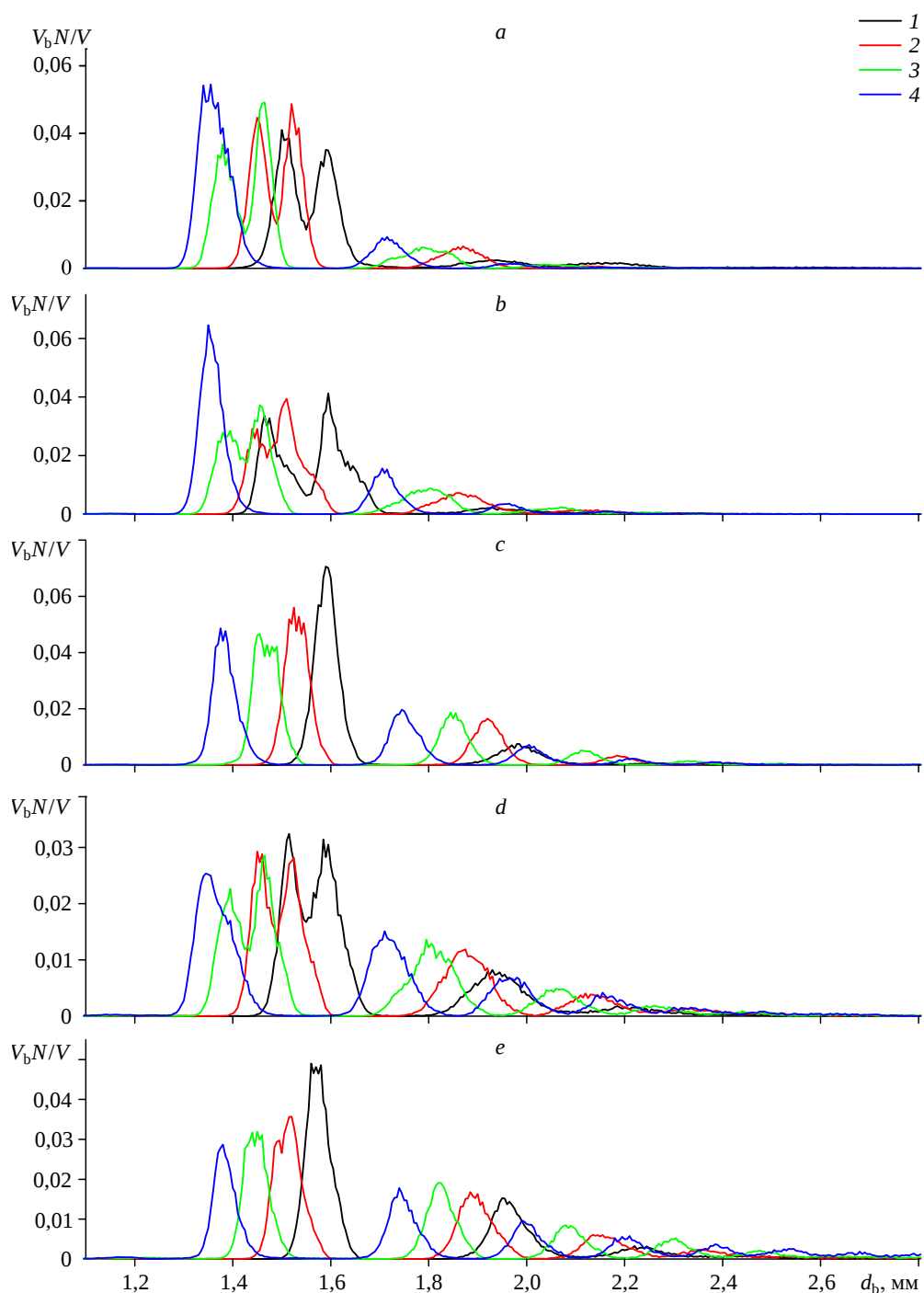


Рис. 5. Распределение пузырей по размерам на разных расстояниях L от точки ввода газа при $Q_g = 8$ мл/мин.

$L = 100$ (a), 200 (b), 300 (c), 400 (d), 600 (e) мм, $\theta = 30^\circ$ (1), 40° (2), 50° (3), 60° (4).

наблюдается уменьшение отрывного диаметра пузырьков. На гистограммах это выражается в их сдвиге в сторону меньших диаметров. Уменьшение отрывного диаметра пузырьков в первую очередь связано с условиями отрыва от капилляра. В работе [22] показано, что при отрыве пузыря от горизонтально ориентированного капилляра получаются

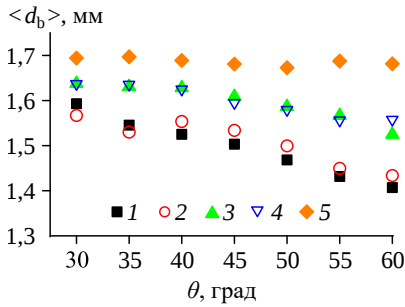


Рис. 6. Зависимость среднего размера пузыря от угла наклона канала при $Q_g = 8$ мл/мин.

$L = 100$ (1), 200 (2), 300 (3), 400 (4), 600 (5) мм.

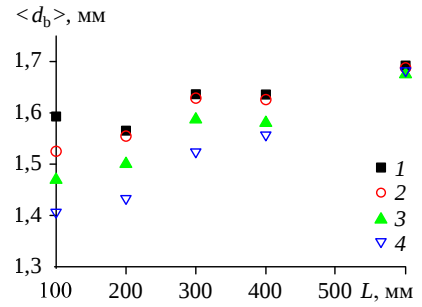


Рис. 7. Зависимость среднего размера пузыря от расстояния L до точки ввода пузырей при $Q_g = 8$ мл/мин.

$\theta = 30^\circ$ (1), 40° (2), 50° (3), 60° (4).

пузыри значительно меньшего размера, чем в случае вертикально ориентированного капилляра. С одной стороны, уменьшение отрывного диаметра связано с тем, что при наклоне капилляра проекция силы поверхностного натяжения (которая препятствует отрыву пузыря от капилляра) на вертикальную ось уменьшается. С другой стороны, этот эффект связан с тем, что в случае поперечного расположения капилляра время, которое пузырек прикреплен к нему, существенно меньше, чем в случае продольного, и шейка, соединяющая пузырек и капилляр, может значительно растягиваться, при этом не разрываясь. В работе [31] показано, что во время асимметричной стадии роста пузырька на наклонном капилляре тройная контактная линия отрывается от нижней стороны кончика капилляра и втягивается в него. Шейка пузырька сжимается по направлению к верхней стороне кромки капилляра и разрывается при контакте с кромкой. Это приводит к уменьшению отрывного диаметра пузыря при увеличении угла наклона капилляра. Примечательно, что в случае отрыва пузырька не от капилляра, а от отверстия в пластине наблюдается обратный эффект — рост отрывного диаметра при увеличении угла наклона, как показано в работе [32]. В то же время увеличение угла наклона приводит к росту частоты коалесценции пузырей и, соответственно, увеличению числа и размера вторичных пиков на гистограммах. Таким образом, при увеличении θ средний диаметр пузыря в потоке определяется двумя конкурирующими процессами — уменьшением отрывного диаметра и возрастанием числа пузырей кратных объемов. Зависимость среднего размера пузырей $\langle d_b \rangle$ от угла наклона приведена на рис. 6. В эксперименте на воде [23] было показано, что на расстояниях $L = 200$ мм и более и углах $\theta > 50^\circ$ процесс слияния пузырей превалирует и наблюдается рост среднего размера пузырька. Из настоящего же эксперимента следует, что ПАВ существенно снижает вероятность коалесценции пузырей и при всех исследуемых режимных параметрах наблюдается монотонное уменьшение среднего диаметра при увеличении угла наклона канала. Влияние расстояния L на средний диаметр пузырей показано на рис. 7. В отличие от данных для воды из [23], в присутствии ПАВ с увеличением L влияние угла наклона на средний диаметр пузырьков уменьшается, и при $L = 600$ мм диаметр $\langle d_b \rangle$ одинаков для всех углов наклона канала.

Заключение

Было проведено экспериментальное исследование распределений по размерам пузырей, формирующихся на одиночном капилляре в покоящейся жидкости с содержанием поверхностно-активных веществ в наклонном канале. Показано, что добавление

в воду 1 % массовой доли спирта в качестве ПАВ существенно изменяет дисперсный состав газожидкостной смеси. Наблюдается уменьшение отрывного диаметра пузырьков, что в большей степени проявляется при угле наклона 30°.

Обнаружено значительное подавление процесса коалесценции пузырей по пути следования вдоль наклонной поверхности. Сильнее этот эффект выражен при угле наклона канала 60°, где из-за трения пузыри активно группируются, но при использовании раствора ПАВ такого слияния пузырей, как в дистиллированной воде, не происходит.

Изменение расхода газа в пределах режима одиночного отрыва не приводит к качественным изменениям структуры распределения газовых включений по размерам. В присутствии ПАВ увеличение угла наклона канала приводит к монотонному уменьшению среднего размера пузыря на всех участках канала, чего не наблюдалось в аналогичных экспериментах с водой.

Список обозначений

d_b — эквивалентный диаметр пузыря, мм,	V — суммарный объем пузырей в выборке, мм ³ ,
$\langle d_b \rangle$ — усредненный по объему диаметр пузырьков, мм,	V' — суммарный объем вторичных пузырей в выборке, мм ³ ,
d_{ch} — диаметр канала, мм,	N — число пузырей в выборке в заданном диапазоне размеров,
d_0 — диаметр капилляра, мм,	θ — угол наклона рабочего канала, град,
L — расстояние между точкой подачи газа и областью съемки, мм,	σ — коэффициент поверхностного натяжения рабочей жидкости, мН/м,
Q_g — расход газа, мл/мин,	ρ_L — плотность рабочей жидкости, кг/м ³ ,
Q_{cr} — критический расход газа, мл/мин,	Re_b — число Рейнольдса.
V_b — объем пузыря, мм ³ ,	

Список литературы

1. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Бобков В.П., Тычинский Н.А. Структура турбулентного газо-водяного потока в каналах // Докл. АН СССР. 1971. Т. 197, № 1. С. 52–55.
2. Inoue A., Aoki S., Koga T., Yaegashi H. Void fraction, bubble and liquid velocity profiles of two-phase bubble flow in a vertical pipe // Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu. 1976. Vol. 42, No. 360. P. 2521–2531.
3. Бурдуков А.П., Козьменко Б.К., Накоряков В.Е. Распределение профилей скорости жидкой фазы в газожидкостном потоке при малых газосодержаниях // Прикл. механика и техн. физика. 1975. № 6. С. 29–32.
4. Hibiki T., Goda H., Kim S., Ishii M., Uhle J. Structure of vertical downward bubbly flow // Intern. J. Heat Mass Transf. 2004. Vol. 47, No. 8–9. P. 1847–1862.
5. Lokanathan M., Hibiki T. Flow regime, void fraction and interfacial area transport and characteristics of co-current downward two-phase flow // Nucl. Eng. Des. 2016. Vol. 307. P. 39–63.
6. Peddu A., Chakraborty S., Kr. Das P. Visualization and flow regime identification of downward air–water flow through a 12 mm diameter vertical tube using image analysis // Intern. J. Multiph. Flow. 2018. Vol. 100. P. 1–15.
7. Evdokimenko I.A., Lobanov P.D., Pakhomov M.A., Terekhov V.I., Das P.K. The effect of gas bubbles on the flow structure and turbulence in a downward two-phase flow in a vertical pipe // J. Eng. Thermophys. 2020. Vol. 29, No. 3. P. 414–423.
8. Vorobyev M.A., Kashinsky O.N. Specific features of downward bubbly flow near the vanishing gas flow regime // Interfacial Phenom. Heat Transf. 2023. Vol. 11, No. 1. P. 11–19.
9. Barnea D., Shoham O., Taitel Y., Dukler A.E. Gas-liquid flow in inclined tubes: Flow pattern transitions for upward flow // Chem. Eng. Sci. 1985. Vol. 40, No. 1. P. 131–136.
10. Ezeji K., Tihon J. Near-wall flow response to large air bubbles rising in inclined water channels // Chem. Eng. Sci. 2022. Vol. 247. P. 116914–1–116914–15.
11. Cheng T.-W., Lin T.-L. Characteristics of gas–liquid two-phase flow in small diameter inclined tubes // Chem. Eng. Sci. 2001. Vol. 56, No. 21–22. P. 6393–6398.
12. Покусаев Б.Г., Казенин Д.А., Карлов С.П., Ермолаев В.С. Скорость движения газового снаряда в наклонных трубах // Теорет. основы хим. технологии. 2011. Т. 45, № 5. С. 550–556.

13. de Azevedo M.B., Faccini J.L.H., Su J. Experimental study of single Taylor bubbles rising in vertical and slightly deviated circular tubes // Exp. Therm. Fluid Sci. 2020. Vol. 116. P. 110109-1–110109-17.
14. Jin G., Mao T., Zhao K., Wang R., Bai J. Characteristics of bubbles swimming in different liquid regions of the slug flow in vertical and inclined rectangular channel // Prog. Nucl. Energy. 2023. Vol. 160. P. 104693-1–104693-12.
15. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Чинак А.В. Влияние ориентации канала на теплообмен и трение в пузырьковом течении // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 4. С. 401–408.
16. Zenit R., Tsang Y.H., Koch D.L., Sangani A.S. Shear flow of a suspension of bubbles rising in an inclined channel // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 515. P. 261–292.
17. Гореликова А.Е., Рандин В.В., Чинак А.В. Изменение диаметров пузырей по длине газожидкостного течения в плоском канале при различных углах наклона // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 5. С. 807–813.
18. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Burdukov A.P., Odnoral V.P. Local characteristics of upward gas-liquid flows // Intern. J. Multiph. Flow. 1981. Vol. 7, No. 1. P. 63–81.
19. Воробьев М.А. Теплообмен в восходящем пузырьковом течении в вертикальной сборке стержней // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 2. С. 247–253.
20. Chinak A.V., Gorelikova A.E., Kashinsky O.N., Pakhomov M.A., Randin V.V., Terekhov V.I. Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow // Intern. J. Heat Mass Transf. 2018. Vol. 118. P. 785–801.
21. Khodadadi S., Taleghani M.H., Domiri Ganji D., Gorji-Bandpy M. Heat transfer enhancement via bubble dynamics along an inclined wall // Intern. Commun. Heat Mass Transfer. 2023. Vol. 145, Part A. P. 106829-1–106829-15.
22. Vorobyev M., Lobanov P., Chinak A., Kashinsky O. Effect of flow direction and capillary orientation on the bubble detachment diameter in liquid cross-flow // Exp. Comput. Multiph. Flow. 2025. (accepted for publication). doi: 10.1007/s42757-024-0209-y.
23. Gorelikova A.E., Randin V.V., Chinak A.V. Effect of the angle of pipe inclination on average size and size distribution of gas bubbles injecting from a capillary to liquid // Interfacial Phenom. Heat Transfer. 2023. Vol. 11, No. 1. P. 21–30.
24. Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А. Закономерности всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости в присутствии поверхностно-активного вещества // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 6. С. 1121–1134.
25. Xu Q., Nakajima M., Ichikawa S., Nakamura N., Roy P., Okadome H., Shiina T. Effects of surfactant and electrolyte concentrations on bubble formation and stabilization // J. Colloid Interface Sci. 2009. Vol. 332, No. 1. P. 208–214.
26. Jamialahmadi M., Müller-Steinhagen H. Effect of alcohol, organic acid and potassium chloride concentration bubble size, bubble rise velocity and gas hold-up in bubble columns // Chem. Eng. J. 1992. Vol. 50. P. 47–56.
27. Strey R., Viisanen Y., Aratono M., Kratochvil J.P., Yin Q., Friberg S.E. On the necessity of using activities in the Gibbs equation // J. Phys. Chem. B. 1999. Vol. 103, No. 43. P. 9112–9116.
28. Leibson I., Holcomb E.G., Cacoso A.G., Jacmic J.J. Rate of flow and mechanics of bubble formation from single submerged orifices. I. Rate of flow studies // AIChE J. 1956. Vol. 2, No. 3. P. 296–300.
29. Oguz H.N., Prosperetti A. Dynamics of bubble growth and detachment from a needle // J. Fluid Mech. 1993. Vol. 257. P. 111–145.
30. Liu C., Liang B., Tang S., Zhang H., Min E. A theoretical model for the size prediction of single bubbles formed under liquid cross-flow // Chinese J. Chem. Eng. 2010. Vol. 18, No. 5. P. 770–776.
31. Liao Q., Zhu X., Wang H., Bao L.J., Xie J., Lin C.X. Visual experiments of bubble growth and departure at the tip of inclined capillary tubes in a stagnant liquid // J. Supercond. Nov. Magn. 2010. Vol. 23, No. 6. P. 1147–1150.
32. Lebon M., Sebilleau J., Colin C. Dynamics of growth and detachment of an isolated bubble on an inclined surface // Phys. Rev. Fluids. 2018. Vol. 3, No. 7. P. 073602-1–073602-16.

*Статья поступила в редакцию 5 августа 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*