

М. А. Воробьев¹✉, А. О. Кархов^{1,2}

Влияние поверхностно-активных веществ на скорости всплытия пузырей в наклонном канале

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Аннотация. Исследование посвящено анализу воздействия поверхностно-активных веществ (ПАВ) на размеры пузырьков газа и скорость их подъема в наклонном трубопроводе. Эксперименты проводились в трубе диаметром 32 мм при расходе газа 3 мл/мин и угле наклона 50°. Параметры пузырьков, включая их распределение по размерам и скорость движения, определялись методом теневой фотосъемки с последующей автоматической обработкой изображений. Изучались растворы с концентрацией этанола 0%, 1% и 3%. Результаты показали, что введение ПАВ снижает диаметр отрыва пузырей от капилляра и значительно уменьшает частоту их слияния в потоке.

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

М. А. Vorobyev¹✉, А. О. Karhov^{1,2}

Effect of surfactants on bubble rise velocities in an inclined channel

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Abstract. This study investigates the effects of surfactants on gas bubble size distribution and ascent velocity in an inclined tube. Experiments were conducted in a 32 mm diameter tube at a gas flow rate of 3 mL/min and an inclination angle of 50°. Bubble parameters, including size distribution and velocity, were analyzed using shadow photography combined with automated image processing. Ethanol solutions with concentrations of 0%, 1%, and 3% were tested. The results demonstrate that surfactant addition reduces the capillary detachment diameter of bubbles and significantly suppresses coalescence frequency in the flow.

Keywords: inclined tube, bubbles, coalescence, surfactants

Введение

Пузырьковые течения широко применяются в технике благодаря уникальным свойствам, отсутствующим в однофазных потоках. Добавление газа в жидкость изменяет ее гидродинамику, например, усиливая тепло- и массообмен. Влияние газовой фазы зависит от комплекса факторов: расхода фаз, геометрии канала, направления потока и дисперсности пузырей. Точные данные о параметрах таких течений критичны для моделирования и повышения безопасности систем. Несмотря на обширные исследования восходящих и опускающих потоков в

прямых каналах, работы по наклонным системам остаются редкими. Особенно мало изучены мелкодисперсные течения, хотя даже 1,5-2% газа способны значительно менять структуру потока и теплообмен. Эксперименты выявили пик теплопередачи при углах $30\text{--}45^\circ$ [1], что подтверждено также численными моделями [2]. Контроль размера пузырей в наклонных каналах осложняется их слиянием, ведущим к переходу в снарядный режим. Решение этой проблемы связано с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые подавляют коалесценцию [3] и стабилизируют пузырьковый режим. ПАВ могут влиять на диаметр отрыва пузырей [4] и их динамику, расширяя диапазон рабочих параметров, соответствующих пузырьковому режиму течения. Цель исследования – анализ воздействия ПАВ на распределение пузырей по размерам и скоростям при инжекции газа через капилляр в наклонном канале. Эксперименты проводились при вариациях расхода газа, угла наклона и расстояния от точки инжекции, что позволило оценить динамику дисперсности газовой фазы.

Методы и материалы

Экспериментальная установка (рис. 1) включала компрессор 1, подающий воздух через капилляр 2 (внутренний диаметр 0,2 мм) в жидкость. Расход газа измерялся и регулировался газовым контроллером Bronkhorst.

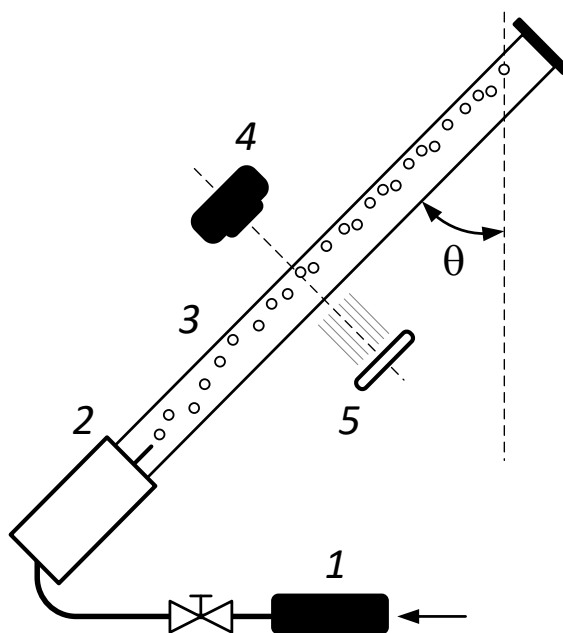


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – система подачи газа; 2 – капилляр; 3 – рабочий участок; 4 – камера; 5 – LED-матрица.

Рабочий участок 3 представлял собой прозрачную трубу из оргстекла длиной 1,2 м и диаметром 32 мм. В качестве жидкости использовался водный раствор этанола. Съемка пузырей осуществлялась камерой Nikon Zfc (120 кадр/с) с подсветкой LED-матрицей. Изображения обрабатывались алгоритмом на базе OpenCV, определяющим диаметр пузыря через эквивалентную площадь и ско-

рость при сравнении последовательных кадров. Расстояние от точки ввода газа до зоны съемки составляло $L = 400$ мм, угол наклона трубы от вертикали $\theta = 50^\circ$, расход газа $Q_g = 3$ мл/мин. Эксперимент проводился при массовых концентрациях этилового спирта 0, 1, 3%. Температура рабочей жидкости поддерживалась равной 25°C .

Результаты

На рис. 2 приведено сравнение результатов, полученных при расходе газа 3 мл/мин в чистой воде, в 1% и 3% спиртовом растворе, измерения проводились на расстоянии 400 мм вдоль канала от точки ввода газа. По вертикальной оси отложено отношение объема пузырей из выборки в заданном диапазоне размеров к полному объему газа в выборке. Видно, что наличие ПАВ приводит к уменьшению отрывного диаметра пузырей, что качественно согласуется с соотношением $d_b \sim \sigma^{1/3}$ из [4], где d_b – диаметр пузыря, σ – коэффициент поверхностного натяжения. Также, наличие поверхностно-активного вещества существенно снижает вероятность коалесценции пузырей по пути следования вдоль наклонной поверхности. При использовании в качестве рабочей жидкости дистиллята наблюдается активное объединение пузырей, что приводит к полному исчезновению первичного пика на гистограмме, соответствующему пузырькам отрывного диаметра. В случае использования раствора ПАВ (и 1%, и 3%), как видно на гистограмме, наибольшая часть объема воздуха транспортируется пузырями отрывного диаметра.

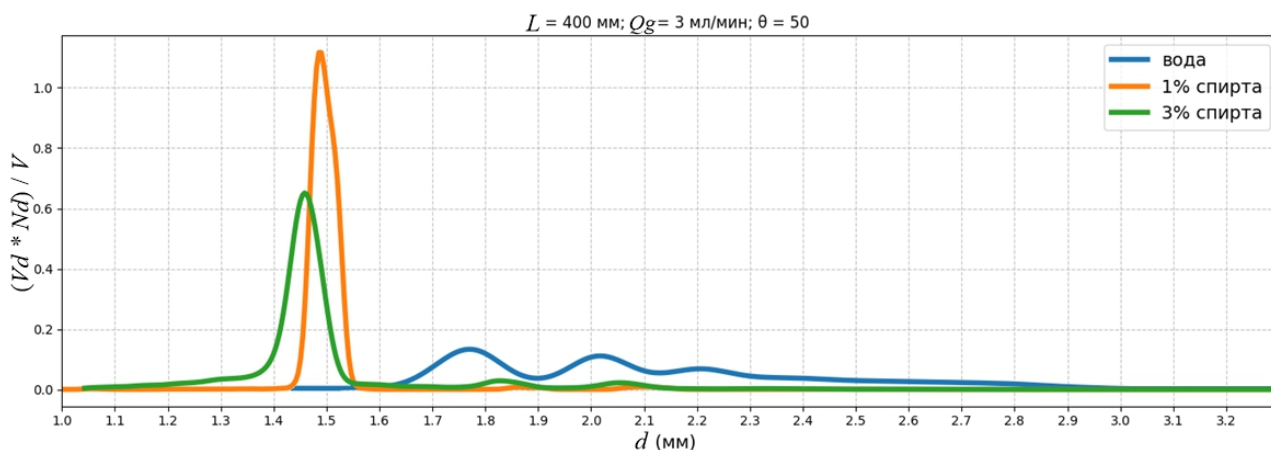


Рис. 2. Распределение пузырей по размерам

На рис. 3 представлены распределения пузырей по скоростям в зависимости от диаметра. Видно, что, когда в качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода, наблюдается полидисперсное течение – спектр по размерам пузырей практически непрерывен. При этом средняя скорость пузырей монотонно возрастает от 0,15 до 0,2 м/с при увеличении размера пузыря. При добавлении ПАВ большая часть газа концентрируется в пузырях нескольких раз-

меров – отрывного диаметра, двойного и тройного объемов. Можно заметить существенной разброс по скоростям всплытия в случае 3% спирта и для пузырей отрывного диаметра для 1% спирта. Также, в отличие от случая чистой воды, при добавлении ПАВ не наблюдается явной тенденции к росту скорости всплытия пузырей с увеличением их размеров. Это связано с тем, что пузыри большего объема догоняют кластеры из маленьких пузырей, из-за добавления ПАВ это не приводит к их коалесценции, крупные пузыри упираются в мелкие и всплывают со скоростью, определяемой скоростью всплытия пузырькового кластера.

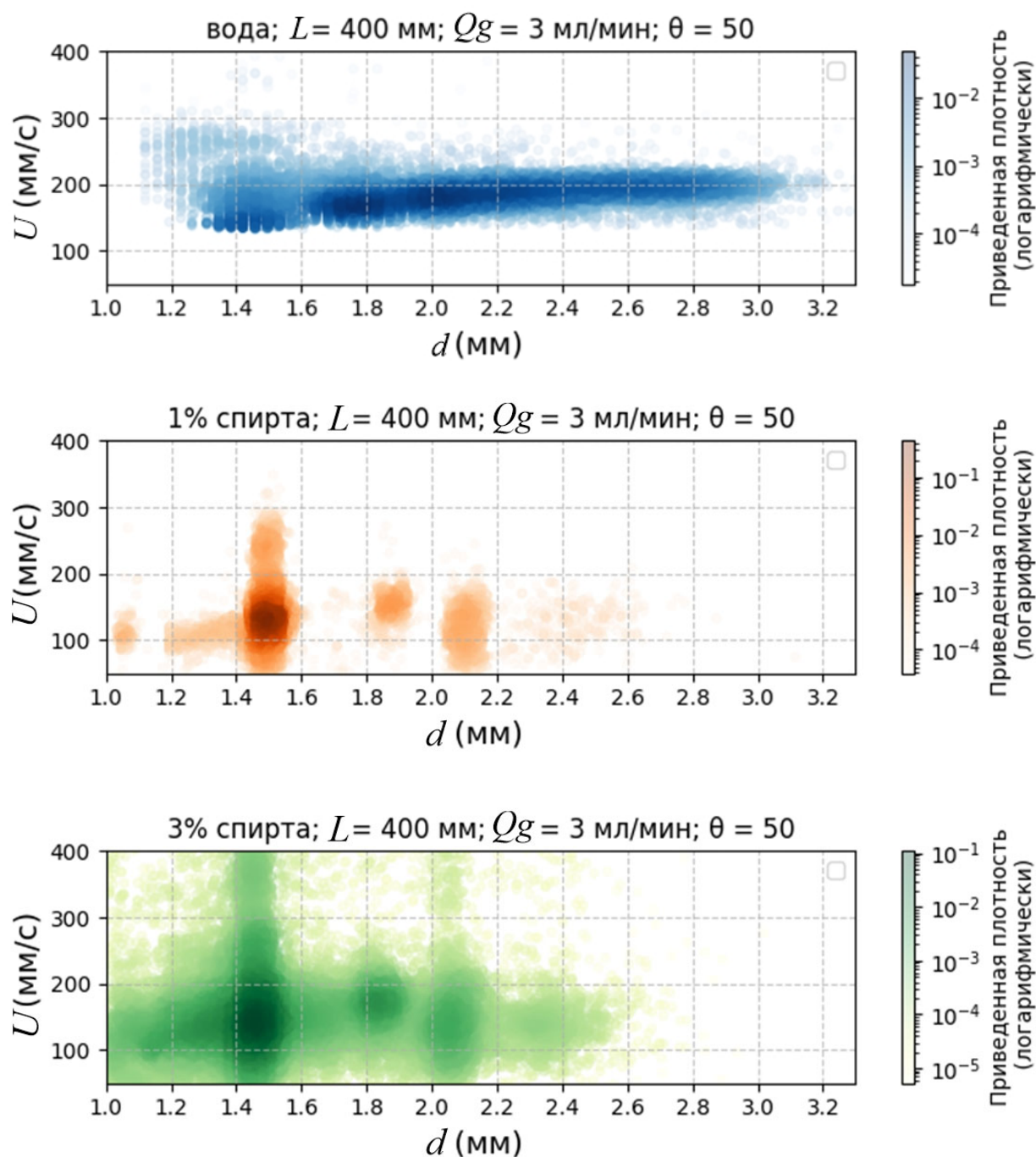


Рис. 3. Распределение пузырей по скоростям

Заключение

Было проведено экспериментальное исследование распределений по размерам и скоростям всплытия пузырей, формирующихся на одиночном капилляре в покоящейся жидкости с содержанием поверхностно-активных веществ в наклонном канале. Показано, что добавление в воду спирта в качестве поверхностно-активного вещества существенно изменяет дисперсный состав газожидкостной смеси. Обнаружено значительное подавление процесса коалесценции пузырей по пути следования вдоль наклонной поверхности. Добавление ПАВ приводит к тому, что скорость всплытия отдельный пузырей перестает расти с увеличением их размеров, а определяется скоростью всплытия пузырькового кластера, подавляющую часть которого составляют пузырьки отрывного диаметра.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания для Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A.V. Chinak, A.E. Gorelikova, O.N. Kashinsky, M.A. Pakhomov, V.V. Randin, V.I. Terekhov, Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow, *Int. J. Heat Mass Transf.* 118 (2018) 785–801. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.022>.
2. S. Khodadadi, M.H. Taleghani, D. Domiri Ganji, M. Gorji-Bandpy, Heat transfer enhancement via bubble dynamics along an inclined wall, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 145 (2023) 106829. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106829>.
3. Q. Xu, M. Nakajima, S. Ichikawa, N. Nakamura, P. Roy, H. Okadome, T. Shiina, Effects of surfactant and electrolyte concentrations on bubble formation and stabilization, *J. Colloid Interface Sci.* 332 (2009) 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.12.044>.
4. M. Jamialahmadi, H. Miiller-Steinhagen, Effect of alcohol, organic acid and potassium chloride concentration bubble size, bubble rise velocity and gas hold-up in bubble columns, 1992.

© М. А. Воробьев, А. О. Кархов, 2025