

УДК 532.529.5

М. А. Воробьев, О. Н. Кашинский, П. Д. Лобанов, А. В. Чинак

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

meat_ne@mail.ru, kashinsky@itp.nsc.ru, lobanov@itp.nsc.ru, chinak@itp.nsc.ru

РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПУЗЫРЕЙ В ПОТОКЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ *

Представлены данные экспериментального исследования процессов, возникающих при вдуве газа через капилляр в поток жидкости. Исследованы характерные режимы формирования пузырьковой смеси, показано влияние коалесценции пузырей вблизи торца капилляра. В качестве рабочей жидкости применялся глицерин. Для изменения физических свойств рабочей жидкости производился ее нагрев.

Ключевые слова: двухфазные потоки, пузырьковые течения, режимы генерации пузырей.

Введение

При движении двухфазных газожидкостных смесей в трубах и каналах реализуются различные режимы течений, одним из наиболее интересных и практически важных является пузырьковый режим. Исследование пузырьковых течений актуально для химической и атомной промышленности, металлургии, оксигенации и отчистки воды. Создание микропузырей является важной областью исследований в материаловедении и пищевой индустрии. Пузыри микронного размера используются в медицинских целях для разрушения тромбов или доставки лекарств. Поэтому важно детальное изучение данной проблемы.

Большое количество работ посвящено исследованию паро- и газожидкостных пузырьковых потоков в трубах и каналах. Присутствие газовых включений в жидко-

сти не только значительно увеличивает площадь межфазной границы, но и может привести к изменению свойств и структуры течения. Результатом внесения пузырей в поток может быть изменение турбулентных характеристик потока, коэффициентов теплообмена и гидравлического сопротивления. Показано, что при одинаковых расходных параметрах жидкости и газа в пузырьковых течениях существенное влияние на тепло- и массообменные процессы в потоке оказывает размер газовых включений [1]. Таким образом, существует возможность управления процессами переноса в энергетических и технологических приложениях, путем изменения размеров пузырей, вводимых в поток. Соответственно возникает задача о создании аппарата для генерации пузырей заданного объема в широком диапазоне размеров, но с минимальным разбросом. Для достижения этой цели необходимо по-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-38-21040 мол_а_вед.).

нимание процессов, происходящих при формировании пузыря, и поиск определяющих их параметров.

В литературе представлен ряд работ, посвященных непосредственно исследованию процесса отрыва пузыря от отверстия или капилляра, погруженного в покоящуюся жидкость. Экспериментальное исследование процесса проведено в [2]. Показано, что на поведение пузыря в жидкости оказывают влияние не только свойства сред и расход газа, но и способ ввода газа в жидкость.

Изменение размеров пузырей путем уменьшения диаметра отверстия капилляра неэффективно по причине слабой зависимости отрывного радиуса пузыря от внутреннего диаметра капилляра. Согласно Кутателадзе, Стырикович [3], наблюдается слабая зависимость (степенная с показателем $1/3$) отрывного диаметра пузыря от размера отверстия. Таким образом, для генерации пузырей в широком диапазоне размеров необходимо проводить отрыв пузырей в потоке жидкости.

Существует ряд работ посвященных теоретическому исследованию отрыва газового пузыря от капилляра, находящегося в потоке жидкости [4; 5]. Физическое описание процесса отрыва в данных работах, как правило, основано на рассмотрении баланса сил, действующих на пузырь.

Решение проблемы моделирования процесса отрыва пузыря представляется весьма сложной задачей по причине большого количества различных эмпирических параметров. Поэтому в большинстве статей посвященных моделированию отрыва пузыря процесс описывается с помощью нескольких основных сил, остальными пренебрегают по причине их малости. Одна из наиболее известных моделей формирования и отрыва пузырька – модель Маршалла [5]. В рамках этой модели наиболее существенными приняты силы поверхностного натяжения и лобового сопротивления. Также в работе приведено довольно подробное исследование процесса формирования пузырей в потоке жидкости через отверстие в стенке канала.

Работы [6; 7] – одни из немногих, где проводятся экспериментальные исследования отрыва пузыря в потоке. В статье [6] с помощью теневой PIV / PTV (particle image velocimetry / particle tracking velocimetry) при различных расходах жидкости и газа

были получены зависимости размера пузырей и разброса по размерам от положения капилляра в потоке. Показан эффект появления «вторичных» пузырей при отдалении капилляра от стенки канала. Для каждого случая были определены скорости пузырей и профили скоростей для потока жидкости. Предложена модель, предсказывающая размер пузыря в зависимости от расходных параметров с учетом коалесценции пузырей. В работе [7] экспериментально показано влияние как расходных параметров жидкости и газа, так и размера капилляра на отрывной диаметр пузыря от отверстия в стенке канала в условиях пониженной гравитации.

К сожалению, количество экспериментальных работ в данной области ограничено. Поэтому возникает задача систематического экспериментального исследования процесса отрыва пузыря от одиночного капилляра в потоке жидкости. Целью данной работы является проведение исследования влияния расходных параметров течения на процесс формирования пузырей в вязких жидкостях с разными физическими свойствами.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый по жидкости контур (рис. 1, а). Рабочая жидкость (нагретый глицерин) при помощи центробежного насоса 1 из бака 2 подавалась в прозрачный вертикальный канал из стекла, представляющий собой стеклянную трубу с внутренним диаметром 15 мм и длиной 800 мм. В центральной части канала в стенку вставлен горизонтальный капилляр из нержавеющей стали 4, через который в поток жидкости вводился газ (атмосферный воздух). Капилляр находился на расстоянии 550 мм от входа в трубу. Внутренний диаметр капилляра – 0,5 мм. Рабочий торец капилляра был аккуратно зашлифован. Капилляр располагался таким образом, чтобы кромка была расположена в центре канала. Эксперименты проводились в опускном режиме течения жидкости. Выбор конфигурации был осуществлен на основании работ [6; 8]. Ввод газа осуществлялся при помощи контроллера Bronkhorst 5, обеспечивающего расход газа Q_g в диапазоне 0,033–1,67 мл/с. Расход жидкости контроли-

ровался посредством ротаметра 6. Предварительная калибровка ротаметра осуществлялась весовым методом. Газожидкостная смесь с выхода канала через гибкую пластиковую трубку сливалась в основной бак по возвратной трубе. В ходе проведения экспериментов нагрев и контроль температуры рабочей жидкости осуществлялся при помощи системы термостабилизации в пределах $\pm 0,2$ °С. Во время эксперимента происходило принудительное перемешивание рабочей жидкости в баке.

При помощи видеокамеры были получены теневые изображения пузырькового течения, при обработке которых измерялись размеры пузырей. Выдержка во время съемок варьировалась в пределах 1/16 000–1/3 200 с, частота кадров 60 Гц. Перед началом измерений производилась калибровочная съемка, позволяющая вычислить количество пикселей изображения на линейный размер. Обработка полученных в ходе эксперимента изображений производилась в автоматическом режиме с использованием калибровочных данных. В каждом режиме обрабатывалось не менее 1 000 кадров, что обеспечивало достаточную статистику. Использовались стандартные средства обработки изображений пакета Matlab. Опреде-

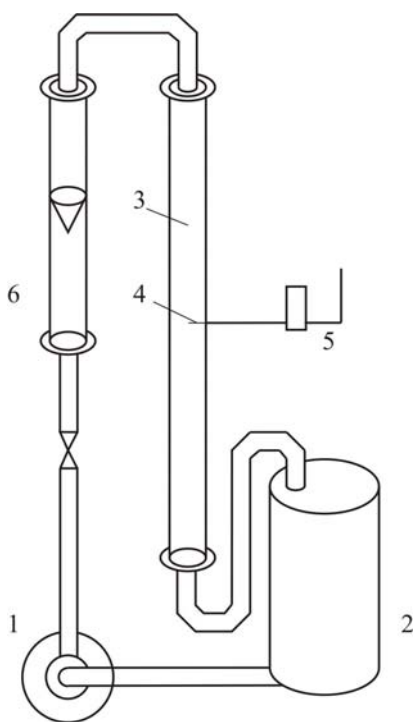


Рис. 1. Схема установки

лялась площадь проекции пузырей на фронтальную плоскость видеокамеры. Диаметр пузыря d_0 определялся как диаметр окружности, эквивалентной по площади изображению объекта. При обработке данных проводилась фильтрация по верхнему порогу эксцентриситета эллиптических объектов 0.3. Эксцентриситет определялся как отношение расстояния между фокусами эллипса и длины большой оси. Кроме того, отбрасывались изображения, не являющиеся выпуклыми, что позволило исключить из рассмотрения пузыри в момент их коалесценции и наложения изображений разных пузырей.

Погрешность измерения расходов газа и жидкости составляли 1,5 и 2 % соответственно. Оценочная погрешность определения размеров пузырей составляла от 5 % для маленьких пузырей, до 2 % для больших, так как отношение длины окружности межфазной границы к площади теневого изображения, определяющее величину погрешности убывает с увеличением размера пузыря.

Результаты экспериментов

Взаимосвязь размера пузыря со скоростью жидкости ведет себя предсказуемо только для маленьких расходов газа (когда реализуется режим дискретного отрыва), при увеличении этого параметра зависимость становится более сложной [8]. Рассмотрим изображения, полученные в процессе эксперимента, и режимы течения, соответствующие им, чтобы объяснить этот эффект.

При расходах газа от 2 до 12 мл/мин реализуется режим одиночного отрыва, когда пузырь, оторвавшийся от капилляра, слабо влияет на отрыв последующего. Для такого режима отрыва характерен один ярко выраженный пик на гистограмме размеров (рис. 2, б). Последовательности кадров, соответствующие таким режимам, представлены на рис. 2, а.

При малых расходах газа (примерно от 2 до 6 мл/мин) можно наблюдать импульсный режим отрыва пузыря (рис. 3, а), когда цепочка пузырей периодически прерывается и возобновляется. При таком режиме, который является частным случаем одиночного отрыва, наблюдается лишь один пик на гистограмме размеров (рис. 3, б).

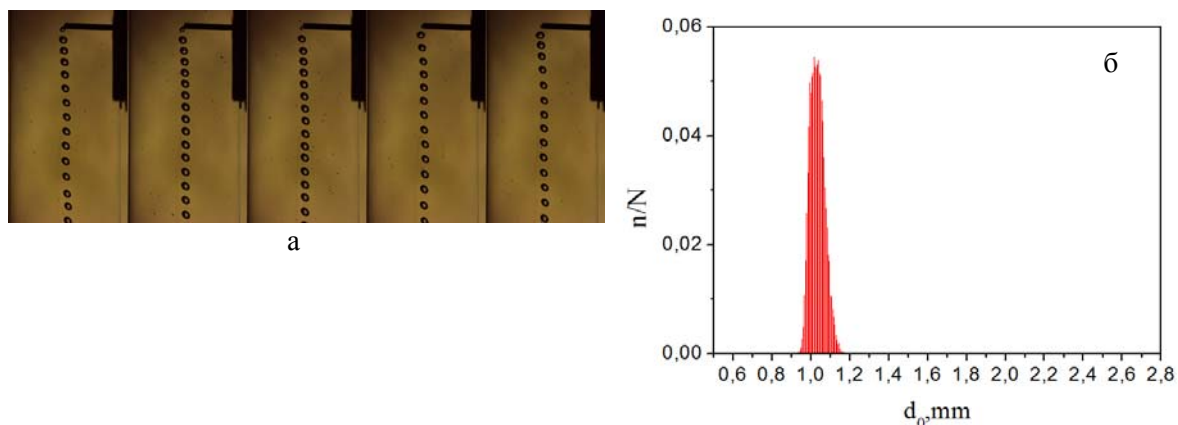


Рис. 2. Изображение пяти последовательных кадров, соответствующих режиму одиночного отрыва пузыря (а); распределение пузырей по размерам для этого режима (б). Параметры течения: $d = 0,5$ мм, $T = 90$ °С, $U_1 = 0,33$ м/с, $Q_g = 8$ мл/мин

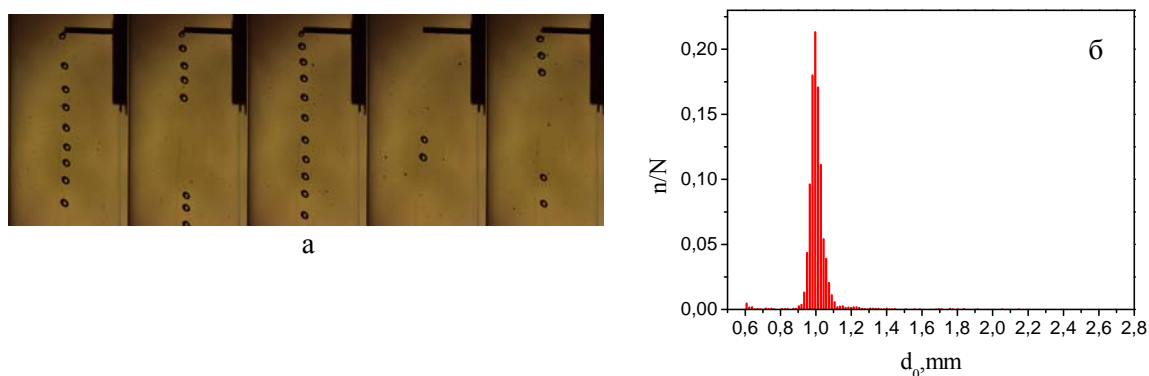


Рис. 3. Изображение пяти последовательных кадров соответствующих режиму импульсного отрыва пузыря (а); распределение пузырей по размерам для этого режима (б). Параметры течения: $T = 90$ °С, $U_1 = 0,33$ м/с, $Q_g = 4$ мл/мин

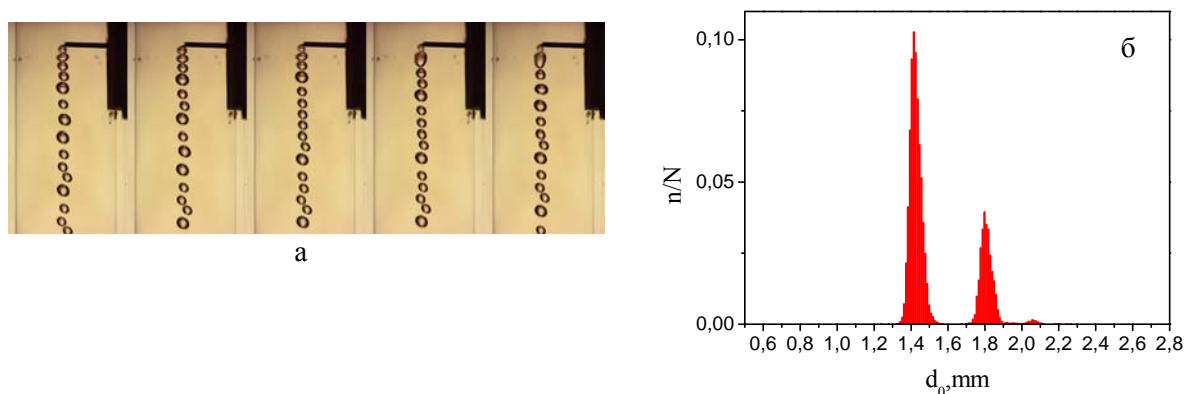


Рис. 4. Изображение пяти последовательных кадров для режима с двумя характерными размерами пузырей (а); распределение пузырей по размерам для этого режима (б). Параметры течения: $T = 70$ °С, $U_1 = 0,26$ м/с, $Q_g = 25$ мл/мин

Характерное поведение пузырькового течения при увеличении расхода газа – это переход от режима одиночного отрыва к режиму, для которого свойственны два ярко выраженных пика на гистограмме размеров

(рис. 4). На гистограмме видно, что дополнительный пик соответствует пузырям вдвое большего объема, чем пузыри, относящиеся к основному пику. Это дает основание утверждать, что большие пузыри

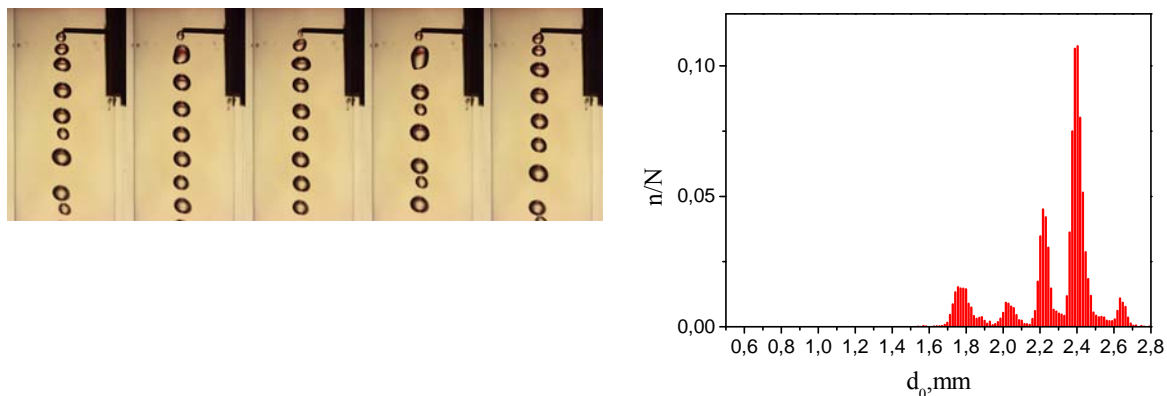


Рис. 5. Изображение пяти последовательных кадров для режима отрыва более чем с двумя характерными размерами (а); распределение пузырей по размерам для этого режима (б). Параметры течения: $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_1 = 0,26\text{ м/с}$, $Q_g = 40\text{ мл/мин}$

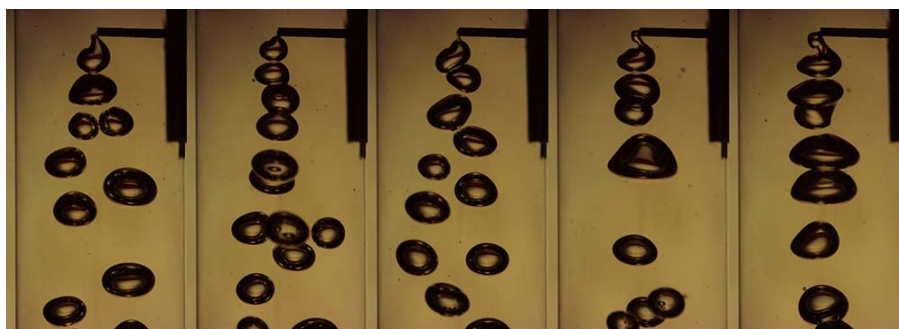


Рис. 6. Фотографии струйного режима течения
Параметры течения: $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_1 = 0,25\text{ м/с}$, $Q_g = 100\text{ мл/мин}$

возникают в результате коалесценции маленьких (соответствующих одиночному отрыву) вблизи капилляра.

При дальнейшем повышении расхода газа наблюдались более сложные режимы отрыва. На гистограмме размеров пузырей в таких режимах можно обнаружить более двух ярко выраженных пиков. Примеры таких режимов и распределения пузырей по размерам, соответствующие им, представлены на рис. 5.

При некоторых параметрах реализовались неустойчивые режимы отрыва, когда несколько различных видов течений беспорядочно сменяли друг друга. Для таких режимов также характерно более двух пиков на гистограмме размеров.

При расходе газа порядка 100 мл/мин можно наблюдать переход отрыва пузыря к струйному режиму, для которого характерен большой разброс пузырей по размерам, а также сильное отклонение формы пузыря

от сферической. Примеры таких течений представлены на рис. 6. Из-за сложной трехмерной формы пузырей и перекрытия их изображений такие режимы не поддаются компьютерной обработке.

Выводы

Проведено исследование процесса формирования газовых пузырей в потоке вязкой жидкости при вводе газа в центр канала через капилляр. Визуальные наблюдения показали, что существует несколько режимов отрыва пузыря, сменяющих друг друга при изменении расходных параметров. Для определения характерных размеров пузырей, соответствующих разным режимам отрыва, проведена компьютерная обработка изображений. Полученные данные приведены в виде гистограмм распределения пузырей. Показано, что при постоянном расходе жидкости, повышение расхода газа приводит

к появлению режимов, для которых характерно более одного пика на гистограмме размеров. При этом пики соответствуют пузырям кратного размера. Это говорит о том, что разброс размеров вызван слиянием части пузырей вблизи торца капилляра.

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации технических процессов, связанных с введением в поток дисперсной фазы и создания генераторов пузырей с заданными размерами.

Список литературы

1. *Jiacai Lu, Gretar Tryggvason*. Effect of bubble deformability in turbulent bubbly upflow in a vertical channel // *Physics of Fluids*. 2008. № 20. P. 040701.

2. *Liu Liu, Hongjie Yan, Guojian Zhao*. Experimental studies on the shape and motion of air bubbles in viscous liquids // *Experimental Thermal and Fluid Science* 2015. № 62. P. 109–121.

3. *Кутателадзе С. С., Стырикович М. А.* Гидравлика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976. 296 с.

4. *Hua Bai, Brian G. Thomas*. Bubble formation during horizontal gas injection into downward-flowing liquid // *Metallurgical and materials transactions B*. 2001. Vol. 32B.

5. *Marshall S. H., Chudachek M. W.* A Model for bubble formation from an orifice with liquid cross-flow // *Chemical Engineering Science*. 1993. Vol. 48. No. 11. P. 2049–2059.

6. *Sina Ghaemi, Payam Rahim, David S. Nobes*. The effect of gas-injector location on bubble formation in liquid cross flow // *Physics of Fluids*. 2010. № 22. P. 043305.

7. *Henry K. Nahra, Y. Kamotani*. Bubble formation from wall orifice in liquid cross-flow under low gravity // *Chemical Engineering Science*. 2000. № 55. P. 4653–4665.

8. *Воробьев М. А., Кашинский О. Н., Лобанов П. Д., Чинак А. В.* Формирование мелкодисперсной газовой фазы в восходящем и опускном потоке жидкости // *МЖГ*. 2012. Т. 4. С. 75–81.

Материал поступил в редколлегию 24.06.2015

M. A. Vorobyev, O. N. Kashinsky, P. D. Lobanov, A. V. Chinak

*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Institute of Thermophysics of SB RAS
1 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

meat_ne@mail.ru, kashinsky@itp.nsc.ru, lobanov@itp.nsc.ru, chinak@itp.nsc.ru

REGIMES OF BUBBLE GENERATION IN THE FLOW OF VISCOUS LIQUID

Data of experimental study of the processes arising at gas injection through a capillary in to the liquid flow are presented. The characteristic modes of gas-liquid bubble mixture formation are investigated. Bubble coalescence near the capillary edge was shown to produce different modes. Glycerol was applied as working liquid. Its heating was made to change physical properties of working liquid.

Keywords: two-phase flow, bubbly flow, bubble generation modes.