УДК 532.529.5

РЕЖИМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЗЫРЕЙ В ОПУСКНОМ ПОТОКЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

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

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-38-21040 мол_а_вед

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена экспериментальному исследованию процесса отрыва пузыря от одиночного капилляра в опускном потоке жидкости. В качестве рабочей жидкости применялся глицерин. Для изменения физических свойств рабочей жидкости производился ее нагрев. Эксперимент проводился в диапазоне чисел Рейнольдса 80 – 300, чисел Бонда 0.04 – 1.7, чисел Мортона 9 10-4 – 1.7 10-6. При помощи видеокамеры были получены теневые изображения течения. С использованием программного пакета Matlab проведена обработка видеоизображений процесса формирования и отрыва пузыря. Представлены зависимости среднего диаметра пузыря от расхода газа, а так же от скорости и вязкости жидкости. Исследованы характерные режимы формирования пузырьковой смеси. Показано, что коалесценция пузырей вблизи капилляра является процессом определяющим вид распределения пузырей по размерам. Показаны режимы наиболее пригодные для получения как монодисперсных, так и бидисперсных газожидкостных пузырьковых смесей.

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 для разрушения тромбов или доставки лекарств в медицинских целях. Поэтому важно детальное изучение данной проблемы.

Большое количество работ посвящено исследованию паро- и газожидкостных пузырьковых потоков в трубах и каналах. Присутствие газовых включений в жидкости 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 понимание 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 за счет 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. Так же 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. Соответственно 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 жидкостях с разными физическими свойствами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый по жидкости контур (рис. 1). Рабочая жидкость (нагретый глицерин) при помощи центробежного насоса 1 из бака 2 подавалась в прозрачный вертикальный канал представляющим 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 – 0.16 мм. Рабочий торец капилляра был аккуратно зашлифован. Ввод газа осуществлялся при помощи контроллера Bronkhorst 5, обеспечивающего расход газа Q_g в диапазоне 0.033–1.67 мл/с. Расход жидкости контролировался посредством ротаметра 6. Предварительная калибровка ротаметра осуществлялась весовым методом. Газожидкостная смесь с выхода канала через гибкую пластиковую трубку сливалась в основной бак. В ходе проведения экспериментов нагрев и контроль температуры рабочей жидкости осуществлялся при помощи системы термостабилизации в пределах ± 0.2°C. 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 1/16000-1/3200 с, частота кадров была 60 Гц.

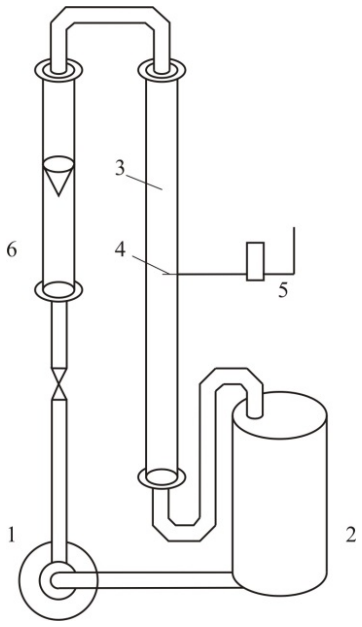

Рис. 1 Схема установки

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 1000 кадров, что обеспечивало достаточную статистику. Использовались стандартные средства обработки изображений пакета Matlab. Определялась 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 процента соответственно. Оценочная погрешность определения размеров пузырей составляла от 5% для маленьких пузырей, до 2% для больших, т.к. отношение длины окружности межфазной границы к площади теневого изображения, определяющее величину погрешности убывает с увеличением размера пузыря.

ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ ПУЗЫРЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ

Эксперимент проводился в опускном течении, при таком расположении капилляра, когда его кромка находится в центре канала. В работах [6, 8] было показано, что при такой конфигурации реализуются наиболее интересные режимы формирования пузырей, требующие более детального изучения. Рабочей жидкостью выступал глицерин, разогретый до температуры 70^0C, 90^0C, что соответствует вязкости 0.059 и 0.021 Па·с соответственно. При установленной температуре жидкости и ее расходе, производилась съемка течений с различными расходами газа.

Зависимости среднего диаметра пузырей d_0 от расхода газа Q_g при четырех различных среднерасходных скоростях U_l и температуре жидкости 70^0C и 90^0C представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

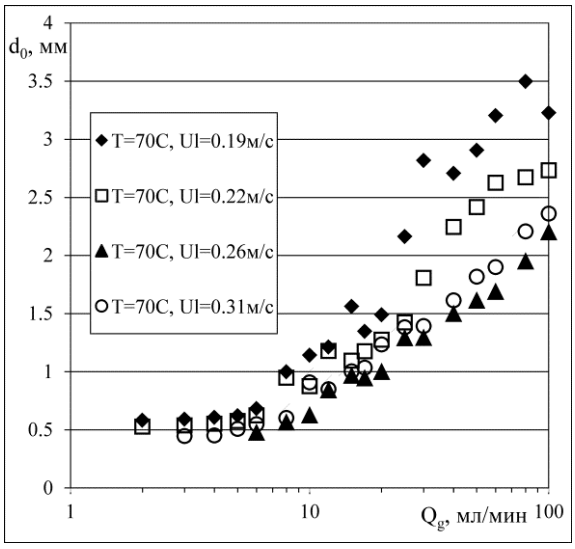

Рис. 2 зависимость среднего диаметра пузыря от расхода газа, при температуре $T=70^0$C

Снижение расхода газа приводит к уменьшению размера генерируемых пузырей, но при достаточно малых расходах газа зависимость ослабевает и выходит на постоянное значение, соответствующее диаметру пузыря примерно 0.5мм. Дальнейшее уменьшение расхода газа сказывается на частоте отрыва, а не на размере генерируемых пузырей. Так же в области малых расходов газа, когда реализуется одиночный режим отрыва пузыря и именно баланс сил является фактором, определяющим его отрывной диаметр, наблюдается тенденция к увеличению среднего размера пузырей с уменьшением температуры и скорости жидкости. При больших расходах газа реализуются более сложные режимы отрыва и такой тенденции в явном виде не наблюдается.

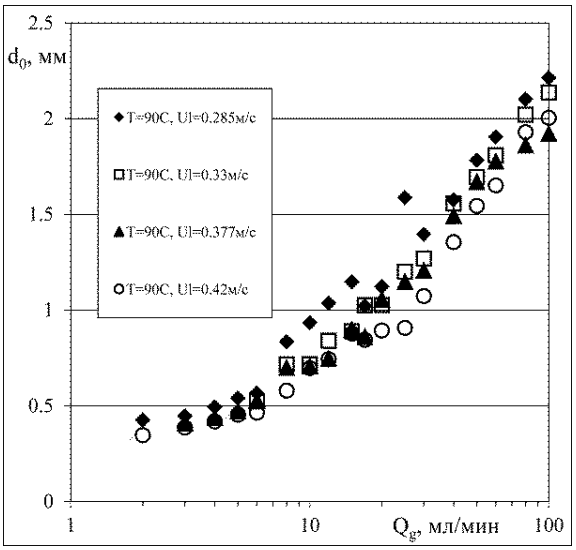

Рис. 3 зависимость среднего диаметра пузыря от расхода газа, при температуре $T=90^0$C

РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПУЗЫРЕЙ

Как было показано выше, взаимосвязь размера пузырей со скоростью и температурой жидкости ведет себя предсказуемо только для маленьких расходов газа. Рассмотрим изображения, полученные в процессе эксперимента и соответствующие им режимы отрыва, что бы понять причину такого эффекта.

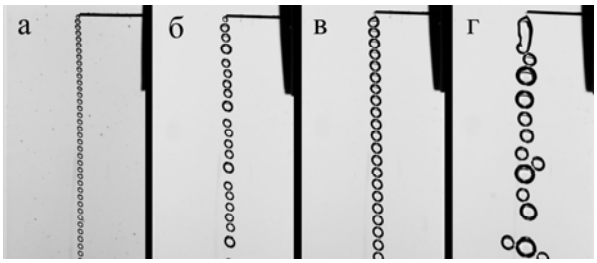

Рис. 4 Изображения пузырьковых течений при различных параметрах; а) $T=90^0C$, $U_l=0.285$м/с, $Q_g=4$мл/мин; б) $T=70^0C$, $U_l=0.22$м/с, $Q_g=10$мл/мин; в) $T=70^0C$, $U_l=0.22$м/с, $Q_g=15$мл/мин; г) $T=70^0C$, $U_l=0.19$м/с, Qg=20мл/мин

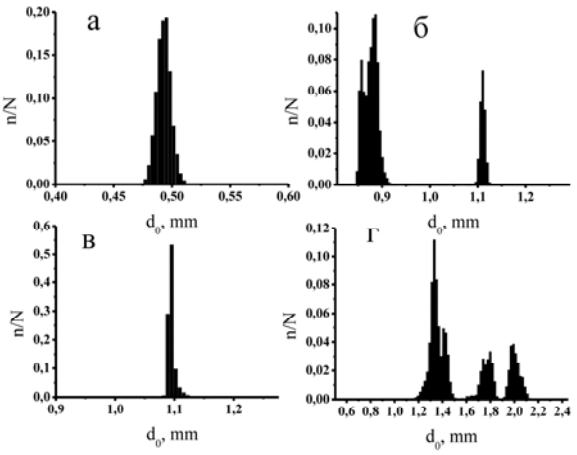

Рис. 5 Распределения размеров пузырей соответствующих режимов; а) $T=90^0C$, $U_l=0.285$м/с, $Q_g=4$мл/мин; б) $T=70^0C$, $U_l=0.22$м/с, $Q_g=10$мл/мин; в) $T=70^0C$, $U_l=0.22$м/с, $Q_g=15$мл/мин; г) $T=70^0C$, $U_l=0.19$м/с, Qg=20мл/мин

При достаточно маленьких расходах газа (2 – 6 мл/мин) реализуется одиночный режим отрыва, когда пузырь, оторвавшийся от капилляра, слабо влияет на отрыв последующего (рис. 4 а). Для такого режима характерен один ярко выраженный пик на гистограмме размеров (рис. 5 а). Такие режимы наиболее пригодны для получения монодисперсных газожидкостных смесей.

При увеличении расхода газа в потоке появляются пузыри двух различных размеров (рис. 5 б). На рис. 5 б видно, что дополнительный пик соответствует пузырям вдвое большего объема. Это дает основания утверждать, что большие пузыри возникают в результате коалесценции маленьких вблизи капилляра.

При дальнейшем увеличении расхода газа доля крупных пузырей будет расти и в некоторых случаях течение может перейти опять в режим, для которого характерен только один ярко выраженный пик на гистограмме размеров (рис. 5 в). Но в этом случае, генерируемые пузыри будут не результатом одиночного отрыва, а продуктом коалесценции вблизи капилляра. При дальнейшем увеличении расхода газа, можно наблюдать более сложные режимы отрыва (рис. 4 г). На гистограмме размеров пузырей в таких режимах можно обнаружить более двух ярко выраженных максимумов (рис. 5 г).

ВЫВОДЫ

Проведено исследование процесса формирования газовых пузырей в потоке вязкой жидкости при вводе газа в центр канала через капилляр.

- Получены зависимости среднего диаметра пузырей от температуры и скорости жидкости, а так же от расхода газа
- Показано, что в режимах течения соответствующих одиночному отрыву пузыря уменьшение скорости и температуры жидкости приводит к увеличению объема пузырей.
- Показано, что форма гистограммы распределения пузырей по размерам качественно меняется после превышения некоторой величины расхода газа. Это связано с взаимодействием пузырей друг с другом
- Обнаружен ряд различных режимов отрыва пузыря. Найдены режимы наиболее пригодные для создания монодисперсной газожидкостной смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jiacai Lu, Gretar Tryggvason. Effect of bubble deformability in turbulent bubbly upflow in a vertical channel. // Physics of Fluids 20. 040701 (2008).

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 62 (2015) 109–121
3. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидравлика газожидкостных систем. // М.: Энергия, 1976, 296 с.

   S.S. Kutateladze and M.A. Styrikovich, Hydraulics of gas-liquid systems. Energiya, Moscow, 1976.
4. Hua Bai, Brian G. Thomas. Bubble formation during horizontal gas injection into downward-flowing liquid // Metallurgical and materials transactions B, Volume 32B, December 2001-1159
5. Marshall S.H., Chudachek M.W.; A Model for bubble formation from an orifice with liquid cross-flow.// Chemical Engineering Science, Voi. 48, No. 11, pp. 2049-2059, 1993.
6. Sina Ghaemi, Payam Rahim, David S. Nobes. The effect of gas-injector location on bubble formation in liquid cross flow. Physics of Fluids 22, 043305 (2010).
7. Henry K. Nahra, Y. Kamotani. Bubble formation from wall orifice in liquid cross-flow under low gravity // Chemical Engineering Science 55 (2000) 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. 75-81

   Vorobyev M.A., Kashinskiy O.N., Lobanov P.D., Chinak A.V., Formation of the finely dispersed gas phase in upward and downward fluid flow. // Mekhanika Zhidkosti I Gasa 2012, Vol. 47, No. 4, pp. 75-81.