УДК 532.529.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЗЫРЕЙ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

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

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

Работа проведена при поддержке гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук МК-5147.2012.8.

АННОТАЦИЯ

Получены зависимости отрывного диаметра пузырей от скорости жидкости и расхода газа через капилляр, находящийся в потоке жидкости в канале с поперечным сечением 10x10 мм. Произведена оценка частоты отрыва пузырей от капилляра. Обсуждается влияние режимов отрыва пузырей на распределение размеров пузырей в течении.

ВВЕДЕНИЕ

Пузырьковые газо-жидкостные течения широко используются в различных технических приложениях. Изменяя размеры пузырей в потоке можно управлять тепло и массообменными характеристиками аппаратов, т.к. при этом меняются важнейшие параметры двухфазного течения (площадь межфазной границы, относительная скорость скольжения, распределение газовой фазы в сечении канала и др.). Поэтому исследование процесса генерации пузырей важно для предсказания рабочих характеристик оборудования.

В литературе имеется большое количество работ, посвященных динамике отдельных пузырей и пузырьковых смесей. Обзоры по данной проблеме приведены, например, в [1]. Детально изучен вопрос об отрыве одиночного пузыря от отверстия в неподвижной жидкости. При этом наблюдается слабая зависимость отрывного диаметра пузыря от размера отверстия (степенная с показателем 1/3). Таким образом, изменение размеров пузырей путем уменьшения диаметра отверстия является неэффективным. Для получения двухфазной смеси с пузырями малых размеров необходимо производить отрыв пузырей в потоке жидкости. Описаны различные способы генерации пузырей, например [2 - 4]. Для получения однородной смеси пузырей малого размера используются устройства с фокусировкой потока [5]. Использование таких устройств эффективно для получения микропузырей, при этом невозможно получить большое значение объемного газосодержания в двухфазном течении.

Имеется ряд теоретических работ, посвященных рассмотрению отрыва газового пузыря от капилляра, находящегося в потоке жидкости [6 - 8]. Однако практически отсутствуют систематические экспериментальные исследования данного процесса.

Целью данной работы является исследование закономерностей отрыва пузырей от одиночного капилляра, находящегося в потоке жидкости.

СХЕМА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый по жидкости контур. Рабочая жидкость при помощи центробежного насоса подавалась в прозрачный вертикальный канал из оргстекла с квадратным поперечным сечением. Ширина канала b=10 мм. Длина канала 600 мм, точка ввода газа расположена на расстоянии 300 мм от входа.

В центральной части канала в стенку вклеен горизонтальный капилляр из нержавеющей стали, через который в поток жидкости вводился газ. Внутренний диаметр капилляра 0.14 мм, внешний 0.3 мм, полная длина 40 мм. Рабочий торец капилляра аккуратно зашлифован. Использовались две конфигурации расположения отверстия, через которое производился ввод газа в поток в канале. В первой отверстие капилляра располагалось заподлицо с одной из стенок канала (рис.1, а), а во второй оно было расположено в центре канала (рис.1, б). Эксперименты проводились в восходящем и опускном режимах течения жидкости.

Ввод газа осуществлялся при помощи контроллеров обеспечивающих расход газа Q_g в диапазоне 0÷1.67 мл/с. Расход жидкости контролировался посредством ротаметра и расходомерной диафрагмы. Перепад давления на диафрагме измерялся дифференциальным преобразователем давления Метран 100 ДД. Предварительная калибровка расходомерной диафрагмы осуществлялась весовым методом.

Газожидкостная смесь с выхода канала через гибкую пластиковую трубку подавалась в бак-сепаратор, где происходило разделение газа и жидкости. Далее жидкость сливалась в основной бак по возвратной трубе.

В ходе проведения экспериментов контроль температуры рабочей жидкости осуществлялся при помощи системы термостабилизации в пределах 25±0.2 °C.

Для определения отрывного диаметра пузыря съемка потока проводилась при помощи видеокамеры Canon XL1 и оптической системы увеличения изображения. Камера была смещена на 3 см по вертикали от места ввода газа в сторону течения. Выдержка во время съемок равнялась 1/16000 с, частота кадров 25 Гц. Для определения особенностей отрыва пузырей производилась скоростная видеосъемка на камеру Red Lake Motion Pro 2000. Частота кадров во время съемки составляла 2000 Гц, выдержка 1/40000 с.

Размер пузырьков газа определялся по видеоизображениям. 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. 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.

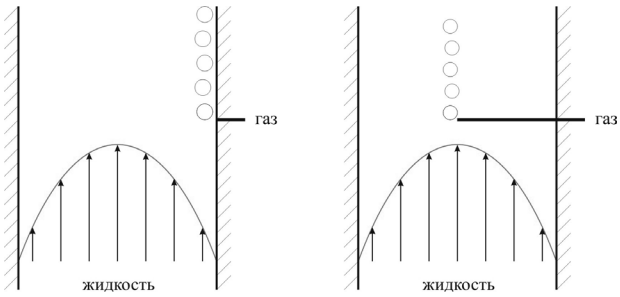

Рис.1 Схема формирования пузырей газа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрим данные, полученные при отрыве пузырей от капилляра, расположенного на стенке канала (рис.2.). Схема расположения ввода газа в поток соответствует рис.1, а. Зависимость среднего размера пузырей от расходных параметров жидкости и газа в восходящем потоке приведена на рисунке в виде символов. Аналогичные результаты для опускного режима течения приведены в виде линий.

Изменение расхода газа при постоянном расходе жидкости приводит к увеличению отрывного диаметра пузыря d_0. Нужно отметить, что пятикратное увеличение Q_g по сравнению с минимальным из измеренных приводит к увеличению отрывного диаметра пузыря на 10÷20 %. Это должно существенным образом сказываться на частоте отрыва пузырей от капилляра.

При постоянном расходе газа наблюдается следующая зависимость отрывного диаметра пузыря от скорости жидкости U_l. При малых U_l наблюдается наиболее крупный размер пузы-

рей. При увеличении U_l от 0.2 до 0.95 м/с отрывной диаметр пузыря значительно снижается. Влияние скорости жидкости на d_0 наиболее выражено при малых скоростях жидкости. При U_l выше 0.6 м/с наблюдается слабая зависимость отрывного диаметра пузырей от скорости жидкости при всех исследованных Q_g.

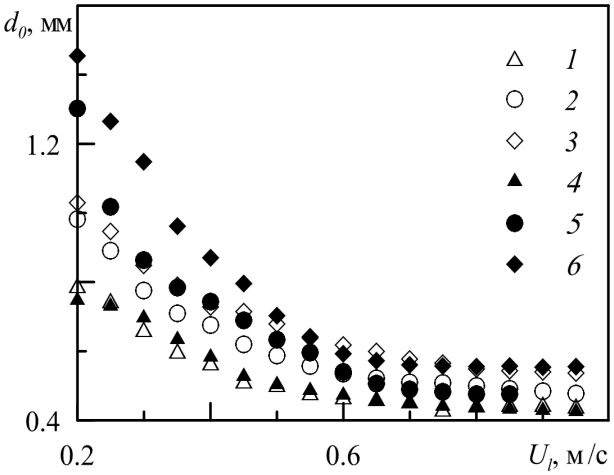

Рис.2 Зависимость отрывного диаметра пузыря от расходной скорости жидкости. Капилляр на стенке канала: 1,4 – Qg = 0.033 мл/мин; 2,5 – 0.083 мл/мин; 3,6 – 0.167 мл/с.

Заметно, что при малых скоростях жидкости отрывной размер пузырей выше в опускном режиме течения, чем в восходящем. Это вызвано тем, что в опускном течении векторы скорости жидкости и силы Архимеда направлены в противоположные стороны, а в восходящем потоке данные векторы направлены в одну сторону. Это приводит к замедлению уноса пузырька от отверстия капилляра в опускном течении и увеличению его размера. Увеличение U_l приводит к выравниванию размеров пузырей для обоих случаев.

Ранее было показано, что влияние направления потока на процесс генерации пузырей при вводе газа вблизи стенки канала заметно при малых скоростях жидкости. Для среза капилляра в центральной части канала место отрыва пузырей совпадает с расположением линии максимальной скорости жидкости (рис.1 б). Поэтому результаты измерений для восходящего и опускного потоков жидкости совпадают.

Результаты измерений d_0 в восходящем потоке приведены на рис.3. Как и в предыдущем случае, наблюдается существенная зависимость размера пузыря от расходов газа и жидкости. Отрывной размер пузыря уменьшается с увеличением средней скорости жидкости и снижением расходного газосодержания. При малых U_l наблюдается существенное влияние скорости жидкости на d_0. С увеличением U_l отмечено снижение влияния скорости жидкости на d_0. В отличие от случая, когда газа вводился в поток на стенке канала, установление постоянного d_0 не происходит и увеличение скорости жидкости приводит к снижению диаметра пузырей.

В конфигурации рис.1, б, при Q_g 0.167 мл/с и высоких U_l отмечается формирование пузырей с большим разбросом по размеру. Можно отметить две группы значений d_0, которые приведены на рисунке, что свидетельствует об отсутствии однозначной зависимости $d_0(U_l)$. Причиной такого распределения размеров пузырей является переход от режима дискретного отрыва к режимам, характеризующимся частичным слиянием пузырей. Некоторые особенности таких режимов приведены ниже.

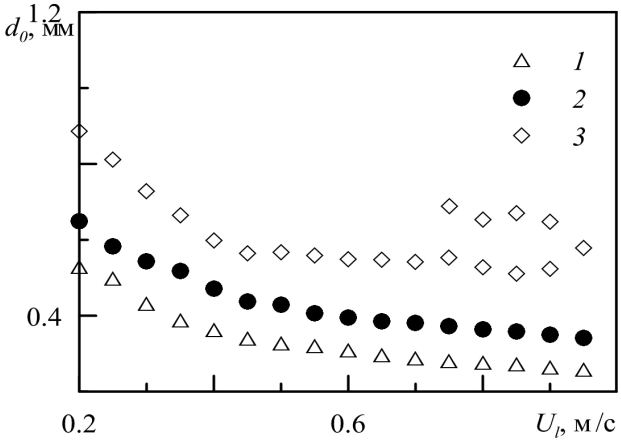

Рис.3 Зависимость отрывного диаметра пузыря от скорости жидкости. Капилляр в центре канала. 1 – Qg = 0.033 мл/мин; 2 – 0.083 мл/мин; 3 – 0.167 мл/с.

Мелкие пузырьки газа в жидкости обладают формой, незначительно отличающейся от сферической. Зная d_0 и Q_g можно оценить частоту отрыва пузырей от капилляра $f_0=Q_g/V_b$, где $V_b=(1/6)*\pi*d_0^3$ – объем пузыря. Зависимости $f_0(U_l)$ для восходящего режима течения приведены на рис.4. Для среза капилляра на стенке канала с увеличением U_l частота отрыва пузырей от капилляра возрастает до максимального значения f_0=2 кГц. При расположении капилляра в центре канала наблюдается плавный рост частоты отрыва пузырей от капилляра с увеличением скорости жидкости. Максимальная частота f_0>4 кГц. Оценка справедлива для режимов от-

рыва, при которых наблюдается небольшой разброс размеров пузырей, поэтому на графике наблюдается излом для режима с Q_g=0.167 мл/с.

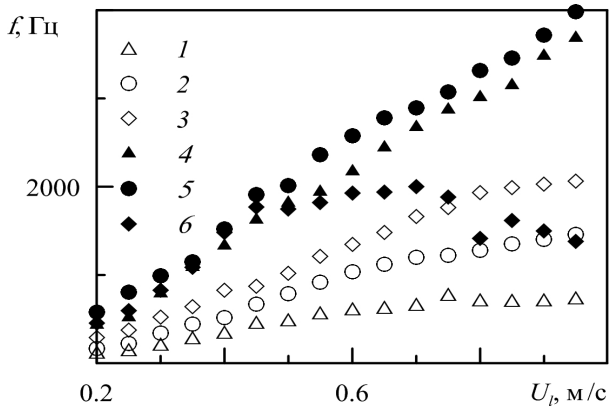

Рис.4 Зависимость оценочной частоты отрыва пузыря от скорости жидкости. 1,4 – Q_g = 2 мл/мин; 2,5 – 5 мл/мин; 3,6 – 10 мл/мин.

На рисунке 5 приведены результаты эксперимента в котором средняя скорость жидкости в канале оставалась постоянной (U_l=0.5м/с), а расход газа через капилляр менялся в диапазоне Q_g=0.03-0.18 мл/с. Срез капилляра располагался в центре канала. Капилляр был ориентирован перпендикулярно потоку жидкости. На рисунке черными круглыми символами изображены средние значения диаметра пузырей, образовавшихся за капилляром. Однако, в данном случае средний размер пузырей недостаточно полно описывает исследуемый процесс. Для трех расходов газа приведены гистограммы распределения пузырей по размерам, на которых можно видеть до трех отчетливых пиков. На рисунке размеры пузырей, соответствующие пикам на гистограммах, обозначены незаполненными окружностями.

Видно, что при расходах газа до 1 мл/мин средний диаметр пузырей остается практически постоянным и гистограмма распределения пузырей по размерам содержит только один пик. Вероятно, в этом режиме диаметр пузырей соответствует «отрывному диаметру». То есть, отрыв пузыря происходит в момент достижения баланса между силами поверхностного натяжения и силами, действующими на пузырь со стороны потока и силой Архимеда. При увеличении расхода газа частота отрыва пузырей увеличивается, а расстояние между пузырями уменьшается, что приводит к слиянию некоторых пузырей.

На графике черной сплошной горизонтальной линией обозначен средний диаметр пузырей, образующихся при малых расходах газа (до 1 мл/мин). Горизонтальной черной пунктирной линией обозначен диаметр пузырей объем которых в два раза больше, чем объем пузырей с отрывным диаметром.

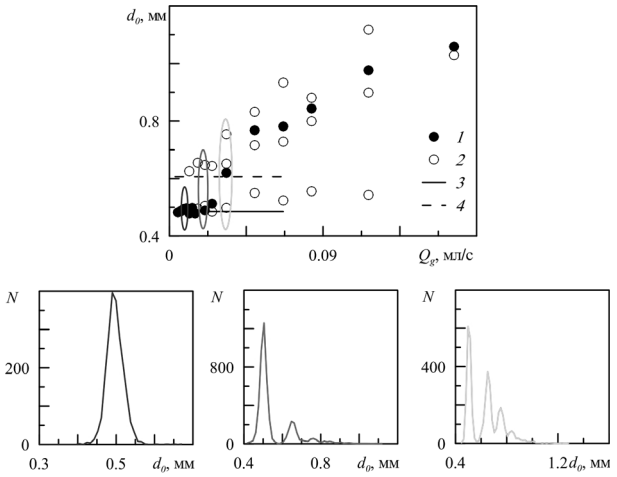

Рис.5 Зависимость отрывного диаметра пузыря от расхода газа.

Одним из признаков слияния пузырей является появление на гистограмме второго пика. Видно, что диаметры пузырей второго пика лежат вблизи горизонтальной пунктирной линии.

При дальнейшем увеличении расхода газа (до 2 мл/мин) в некоторых случаях появляется третий пик, а в некоторых гистограмма становится размытой и ярко выраженные пики исчезают. В этих режимах сложно говорить об отрывном диаметре пузыря, поскольку истечение газа из капилляра имеет ярко выраженный струйный характер и размеры пузыря определяются уже не балансом сил, а временем нахождения пузыря вблизи капилляра, в течение которого струя газа продолжает увеличивать объем пузыря.

Фотографии процесса отрыва пузырей, полученные при помощи высокоскоростной видеосъемки приведены на рисунке 6. Съемка проводилась с частотой 2000 Гц. В правом нижнем углу фотографий находится торец капилляра, от которого происходит отрыв пузырей. На рисунке 5 а приведена последовательность образования пузырей с одинаковым отрывным диаметром. При появлении нового пузыря имеется достаточный зазор с предыдущим, происходит рост пузыря до определенного размера, его отрыв и отход от капилляра. Далее начинается форми-

рование нового пузыря и процесс повторяется. Это приводит к появлению цепочки пузырей с одинаковым размером.

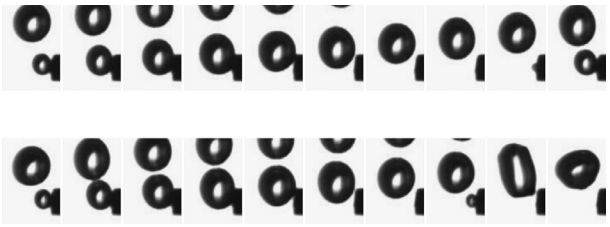

Рис.6 Последовательность кадров при формировании пузырей.

На рисунке 5 б приведена последовательность образования пузырей с разными отрывными диаметрами. При формировании пузыря расстояние между ним и предыдущим недостаточно и на втором кадре серии происходит взаимодействие пузырей, которое приводит к задержке пузыря у капилляра. В итоге в конце серии кадров наблюдается слияние пузырей. Также возможно слияние пузырей на некотором расстоянии от капилляра. При дискретном отрыве пузырей от капилляра это происходит довольно редко, пузырьки с большим диаметром составляют 10-20% от общего количества.

При больших расходах газа реализуется струйный режим отрыва пузырей, который характеризуется непрерывной хаотической коалесценцией пузырей вблизи капилляра. Размеры пузырей в этом режиме имеют большой разброс.

ВЫВОДЫ

Экспериментально изучено влияние расходных характеристик жидкости и газа на отрыв пузырей от капилляра, находящегося в потоке жидкости. В результате компьютерной обработки видеоизображений получены распределения пузырей по размерам в различных режимах.

Установлено, что при одинаковых расходных параметрах жидкости и газа средний диаметр пузырей меньше в случае отрыва от капилляра, расположенного в центральной области канала, чем при отрыве на стенке. Это вызвано тем, что скорость жидкости в центральной части канала существенно выше, чем вблизи его стенки.

Показано, что форма гистограммы распределения пузырей по размерам качественно изменяется при превышении некоторой критической частоты отрыва. Это связано с уменьшением расстояния между пузырями и взаимодействию пузырей друг с другом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидравлика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976, 296 с.
2. Kracht W., Gomez C.O., Finch J.A. Controlling bubble size using a frit and sleeve sparger // Minerals Engineering. 2008. V. 21. P. 660-663.
3. Fujilawa S., Zhang R., Hayama S., Peng G. The control of micro-air-bubble generation by a rotational porous plate // Int. J. Multiphase Flow. 2003. V. 29 P. 1221-1236.
4. Sadatomi M., Kawahara A., Kamo K., Ohtomo A. Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube // Exp. Thermal and Fluid Science. 2005. V. 29. P. 615-623.
5. Lorenceau E., Cheung Sang Y.Y., Hohler R., Cohen-Addad S. A high rate flow focusing foam generator // Phys. Fluids. 2006. V. 18. № 9. Paper 097103, 5 p.
6. Mikielewicz D., Ways J. A model of bubble motion in the vicinity of the wall. Proc. 6th Imt. Conf. on Multiphase Flow, ICMF 2007, Leipzig, Germany, July 9-13, 2007< Paper PS1_7, 9 p.
7. Tan R.B.H., Chen W.B., Tan K.H. A non-spherical model for bubble formation with liquid cross-flow // Chem. Eng. Science. 2000. V. 55, P. 6259-6267.
8. Sullivan S.L., Hardy B.W., Holland C.D. Formation of air bubbles at orifices submerged beneath liquids // A.I.Ch.E. Journal. 1964. V. 10. № 6. P. 848-854.