

УДК 621.1.016:536.42

Статистические характеристики газожидкостного потока в вертикальном миниканале

Козулин И.А.^{1,2}, Кузнецов В.В.^{1,2}

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет*

E-mail: igorn@yandex.ru, vladkuz@itp.nsc.ru

Исследованы режимы восходящего газожидкостного течения в прямоугольном миниканале размером 1,75×3,8 мм и длиной 0,7 м. Опыты проведены в диапазоне приведенных скоростей газа от 0,1 до 10 м/с и жидкости от 0,07 до 0,7 м/с для спутного потока H₂O/CO₂ в условиях насыщения. Отработана методика двухлучевого лазерного сканирования структуры и определения статистических характеристик двухфазного потока. Выделены снарядно-пузырьковый, снарядный, переходный, вспененный, кольцевой режимы течения. Впервые получены статистические характеристики движения жидкой и газовой фаз в миниканале, в том числе и скорости движения фаз.

Ключевые слова: миниканал, газожидкостные течения, статистический анализ, режимы течения, снарядное течение.

ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные течения в каналах с поперечным размером порядка и меньше капиллярной постоянной (миниканалы) характеризуются определяющим влиянием капиллярных сил и эффектов стесненности на режим течения и теплообмена. Такие течения встречаются в компактных массообменных аппаратах химической технологии, компактных криогенных и энергетических устройствах, аппаратах водородной энергетики, активно развивается направление по созданию микроканальных теплообменников для охлаждения компьютерных систем [1].

Основная часть работ по исследованию газожидкостных течений в каналах малого размера посвящена определению режимов течения [2–6]. Проведенные исследования показали, что в таких каналах основным является снарядный режим течения, один из наиболее сложных в силу своей нестационарности. Характеристики снарядного течения в трубах диаметром порядка сантиметра, более хорошо изучены, например, в работе [7]. В работах [8, 9] получены статистические характеристики снарядного течения в таких трубах и их развитие по длине канала. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование вертикального газожидкостного течения и его статистических характеристик в прямоугольном канале с поперечным размером меньше капиллярной постоянной. Определены

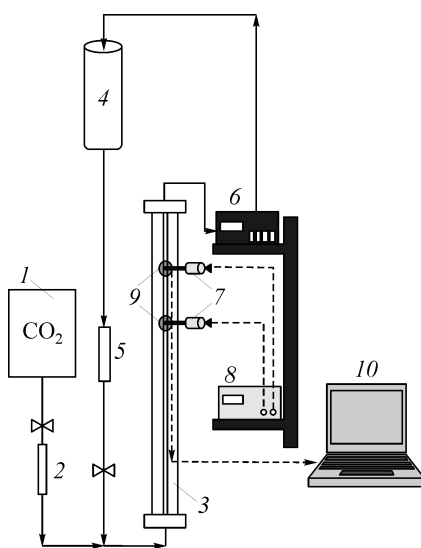
статистические параметры потока, такие как скорость снарядов, зависимость длины поверхности пузыря от скорости движения двухфазного потока и др.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки для определения параметров двухфазного потока в прямоугольном канале малого размера приведена на рис. 1. Сжатый углекислый газ поступает из баллона 1 через регулировочный вентиль и расходомер газа 2 в экспериментальный участок 3. Вода поступает из бака 4, расположенного на высоте примерно 2 м, далее через регулировочный вентиль расхода жидкости, в ротаметр 5 и далее в смеситель, расположенный внизу перед экспериментальным участком. Экспериментальный участок представляет собой прямоугольный миниканал размером $1,75 \times 3,8$ мм, собранный из четырех параллельных стеклянных пластин длиной $L = 70$ см, склеенных эпоксидным клеем. Гидравлический диаметр миниканала $D_h = 2,4$ мм меньше капиллярной постоянной воды $b = 2,72$ мм. На выходе из экспериментального участка газожидкостная смесь откачивалась перистальтическим насосом 6 в открытый бак с водой 4, при этом углекислый газ уходил в атмосферу, а насыщенная вода возвращалась в экспериментальный участок.

Для исследования режимов газожидкостного течения использовался метод двойного лазерного сканирования. Два лазера 7 располагались таким образом, что лазерные лучи освещали короткую сторону прямоугольного канала диаметром светового пятна порядка размера канала. Расстояние между лучами равнялось 35 мм. Питание лазеров осуществлялось с помощью источника напряжения ТЕС-42 8. Интенсивность прошедшего света измерялась с помощью фотодиодов 9, расположенных на противоположной стороне канала. Сигналы с фотодиодов регистрировались высокоскоростной платой АЦП (Lcard L-264) с максимальной частотой опроса по всем каналам 200 кГц, и обрабатывались на компьютере 10. Оцифровка сигнала осуществлялась с частотой $\nu = 2$ кГц в течение времени от 60 до 120 секунд. С лицевой стороны канала при помощи цифровой видеокамеры (WebCam Pro Ex) и цифрового фотоаппарата (OLIMPUS E330) проводилась регистрация режима течения.

В процессе опытов расход жидкости и газа изменялся в диапазоне приведенных скоростей газа 0,07–10 м/с и жидкости 0,07–0,64 м/с, давление на выходе канала равнялось атмосферному.



РЕЗУЛЬТАТЫ

Режим течения определялся по данным визуализации и по характеру спектра сигнала со светочувствительных элементов. В результате проведенных экспериментов выделены следующие режимы течения: снарядопузырьковый, снарядный, переходный, вспененный, кольцевой. Режим с дискретными пузырьками в канале не наблюдался. Во всех режимах в канале наблюдался снарядопузырьковый режим с размерами снарядов порядка размеров канала и многочисленными короткими

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

жидкими перемычками, насыщенными пузырьками. Снарядопузырьковый режим течения наблюдался в диапазоне приведенных скоростей жидкости $J_{\text{liq}} = 0,51 \div 0,64$ м/с и газа $J_{\text{gas}} = 0,07 \div 0,9$ м/с ($Re_{\text{liq}} = 1222 \div 1534$, $Re_{\text{gas}} = 21 \div 272$). Согласно классификации [10] опыты проведены в условиях преобладания турбулентного течения по жидкости и ламинарного — по газу.

На рис. 2, *a* показана временная развертка во времени сигналов с фотодиодов первого и второго канала для снарядопузырькового режима течения, а на рис. 2, *b* приведена детализация сигнала для второго канала и характерная фотография структуры потока. Особенностью газожидкостного течения в прямоугольном миниканале является существенная пространственная неоднородность течения и чередование областей с жидкой и газовой фазами, разделенных межфазными менисками. Резкое падение амплитуды сигнала фотодиода соответствует прохождению головки снаряда, а ее рост — жидкой пробке. Пульсации сигнала в области жидкой перемычки показывают наличие мелких пузырьков. Относительная калибровка сигналов с датчиков проведена для пустого и затопленного каналов. Максимальная амплитуда сигнала на рис. 2, *a, b* близка к величине сигнала в затопленном канале, а минимальная — к величине сигнала в пустом канале.

При увеличении приведенной скорости в диапазоне $J_{\text{liq}} = 0,07 \div 0,38$ м/с $J_{\text{gas}} = 0,12 \div 1,57$ м/с ($Re_{\text{liq}} = 168 \div 910$, $Re_{\text{gas}} = 37 \div 474$), что соответствует ламинарной области по жидкости и по газу, наблюдался снарядный режим течения. Характерный вид сигнала показан на рис. 2, *c, d*. Снарядный режим течения отличается тем, что наблюдаются длинные снаряды, разделенные короткой жидкой перемычкой. В каналах малого размера снарядное течение характеризуется периодичностью и отсутствием значительного количества пузырей за снарядом.

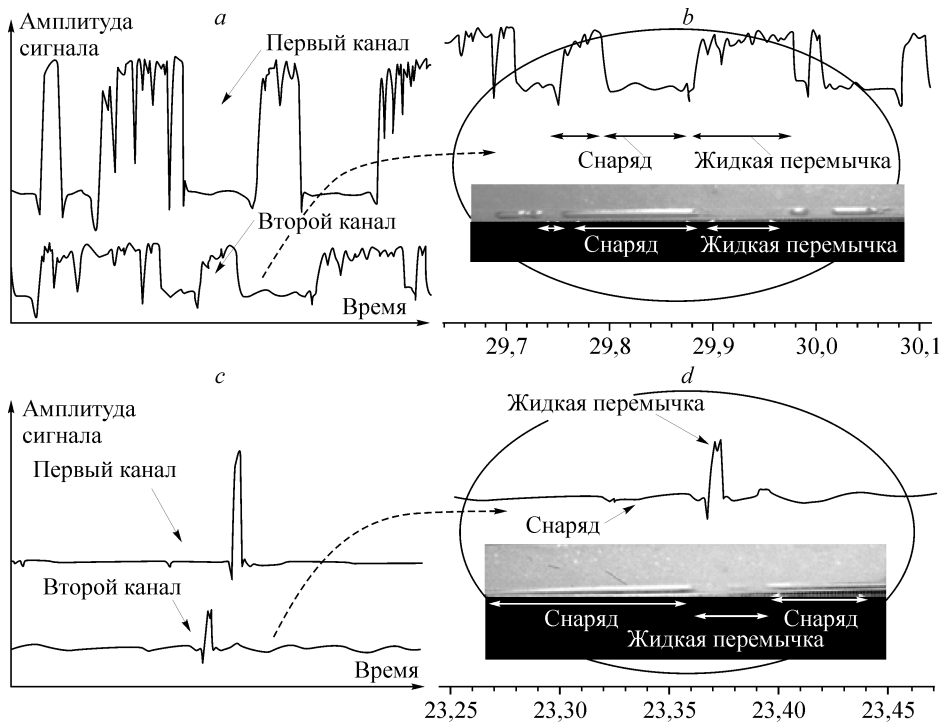


Рис. 2. Оптические сигналы при снарядно-пузырьковом (*a, b*) и снарядном (*c, d*) режиме течения при $J_{\text{liq}} = 0,64$ м/с, $J_{\text{gas}} = 0,07$ м/с (*a, b*), $J_{\text{liq}} = 0,12$ м/с, $J_{\text{gas}} = 1,18$ м/с (*c, d*): сигналы с первого и второго фотодиода (*a, c*), детализация сигнала (*b, d*).

В диапазоне $J_{\text{liq}} = 0,08 \div 0,29$ м/с $J_{\text{gas}} = 1,81 \div 2,83$ м/с ($Re_{\text{liq}} = 191 \div 700$, $Re_{\text{gas}} = 547 \div 860$) наблюдался переходный режим от снарядного к эмульсионному режиму, это выражалось в том, что непосредственно за снарядом наблюдалось хаотическое поведение сигнала меньшей амплитуды. Это объясняется тем, что при больших скоростях наблюдается разрушение хвоста снаряда. С увеличением скорости переходный режим постепенно становится эмульсионным, при котором целые снаряды наблюдаются очень редко, здесь и сам снаряд разрушается и появляется нестабильное поведение жидкости, — диапазон приведенных скоростей газа и жидкости в эмульсионном режиме течения $J_{\text{liq}} = 0,07 \div 0,17$ м/с, $J_{\text{gas}} = 2,08 \div 6,31$ м/с ($Re_{\text{liq}} = 168 \div 408$, $Re_{\text{gas}} = 628 \div 1907$). В области эмульсионного режима течения перемычки насыщены газом и каплями жидкости. Поведение сигнала в эмульсионном режиме показано на рис. 3, *a, b*.

При увеличении приведенных скоростей наблюдается переход к кольцевому режиму (рис. 3, *c, d*), этот режим отличался от других хаотическими всплесками амплитуды.

СКОРОСТИ СНАРЯДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИВЕДЕННОЙ СКОРОСТИ СМЕСИ

Использование двухлучевого метода лазерного сканирования потока позволило измерить скорость перемещения снарядов в двухфазном потоке. Нижний уровень сигнала на рис. 2 соответствует сухому каналу, а верхний — затопленному. Разница между газовым снарядом и жидкой пробкой хорошо заметна на оптическом сигнале. Газовый снаряд характеризуется большим временем существования газовой фазы, а жидкая пробка — частым переходом жидкости в газ и газа

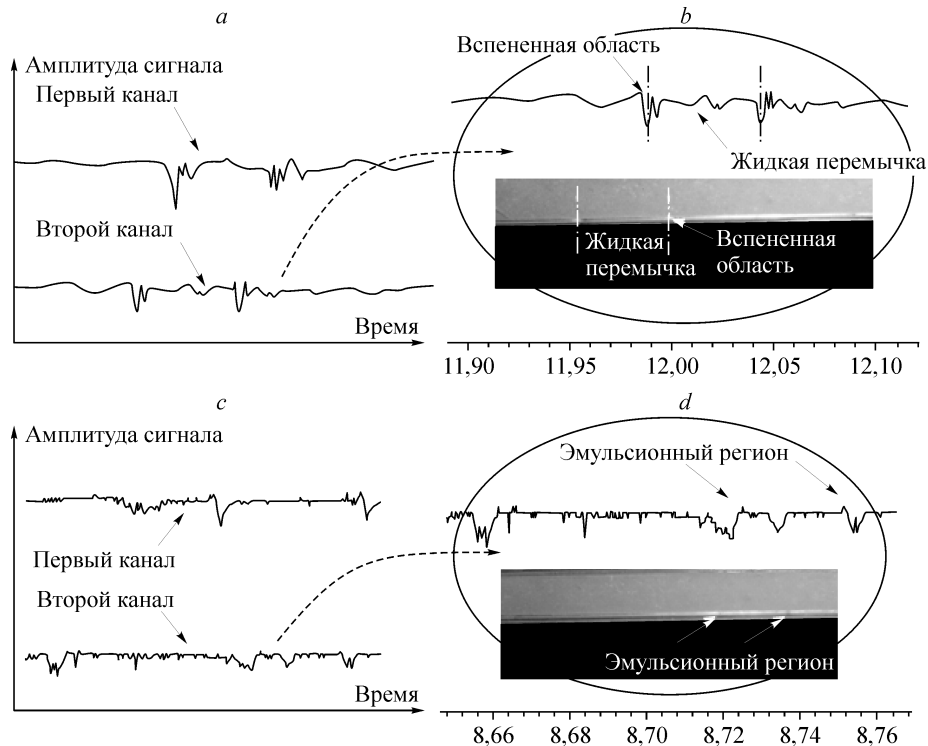
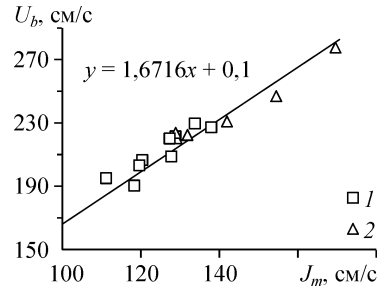


Рис. 3. Оптический сигнал для эмульсионного (*a, b*) и кольцевого (*c, d*) режимов течения при $J_{\text{liq}} = 0,074$ м/с, $J_{\text{gas}} = 3,05$ м/с (*a, b*), $J_{\text{liq}} = 0,11$ м/с, $J_{\text{gas}} = 7,19$ м/с (*c, d*): сигналы с первого и второго фотодиода (*a, c*), детализация сигнала (*b, d*).

Рис. 4. Скорость снаряда от приведенной скорости смеси при снарядном режиме течения в прямоугольном миниканале 1,75×3,8 мм (H₂O/CO₂).
Снарядный режим (□), переходной режим (Δ).



в жидкость, что показывает наличие малых пузырьков, которые распределены в пробке. Из-за различных масштабов временных отрезков для малых диспергированных пузырьков в пробках и газовых снарядах, в оптическом сигнале может быть задан порог для исключения малых пузырьков из жидких снарядов. Это позволяет выделять головки снарядов и их хвосты для двух оптических датчиков и определять как скорость перемещения снарядов, так и их длину.

Согласно дрейфовой модели [11], скорость движения снаряда определяется приведенной скоростью смеси $J_m = J_{\text{gas}} + J_{\text{liq}}$, параметром распределения C_0 и скоростью всплытия пузыря в канале для неподвижной жидкости U_b^{free} следующим образом:

$$U_b = C_0 \cdot J_m + U_b^{\text{free}}. \quad (1)$$

В работе [12] получено, что параметр распределения равен 1,2 для турбулентного течения и 1,4 для ламинарного. Параметр распределения C_0 для прямоугольных каналов определялся в работе [13] как

$$C_0 = 1,35 - 0,35\sqrt{\rho_G/\rho_L} = 1,33. \quad (2)$$

Обработка данных в виде $U_b = C \cdot J_m + U_b^{\text{free}}$ для снарядного и переходного режимов течения, представленная на рис. 4, показала, что скорость снарядов хорошо описывается зависимостью

$$U_b = 1,67 \cdot J_m + U_b^{\text{free}}. \quad (3)$$

Измерения скорости всплытия пузыря при неподвижной жидкости в канале показали, что средняя скорость всплытия одиночного снаряда близка к 1 мм/с. Величина коэффициента $C_0 = 1,67$ существенно отличается от данных для труб большого диаметра.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В настоящей работе получены статистические характеристики движения жидкой и газовой фаз в мини-канале на двух расстояниях от входа: при $x_1/D = 167$ (первый оптический канал) и $x_2/D = 183$ (второй оптический канал). Статистическая обработка данных по скорости всплытия снарядов и их длине проводилась для снарядопузырькового и снарядного режимов течения. Длина снаряда определялась как разность сигнала по временной координате между передней и задней границей газового снаряда, умноженная на его усредненную скорость. В результате обработки сигналов с первого и второго оптических каналов построены гistogramмы распределения по длинам снарядов.

На рис. 5 показана вероятность попадания длины снаряда, нормированной на гидравлический диаметр канала, в интервал гistogramмы при $J_{\text{liq}} = 0,091$ м/с и $J_{\text{gas}} = 1,19$ м/с. Вероятности приведены для сигналов с первого и второго оптических каналов. В предположении, что длины снарядов соответствуют

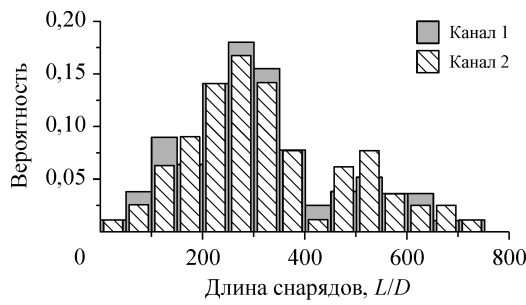


Рис. 5. Вероятность попадания длины снаряда, нормированной на гидравлический диаметр канала, в интервал гистограммы при $J_{\text{liq}} = 0,091$ м/с, $J_{\text{gas}} = 1,19$ м/с.

Среднее значение 1 = 230, $\sigma_1 = 0,68$, $\chi_1^2 = 20,64$, среднее значение 2 = 255, $\sigma_2 = 0,6$, $\chi_2^2 = 16,34$.

логнормальному распределению с плотностью вероятности, имеющей вид

$$f\left(\frac{l_b}{D_h}, \sigma\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left(\frac{l_b}{D_h}\right)^{-1} \exp\left[-\frac{(\ln(l_b/D_h) - x_c)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

где l_b/D_h и $\sigma > 0$, определены средние величины и дисперсии для первого и второго оптических каналов. Параметры функции распределения определялись из условия соответствия функции распределения экспериментальным данным. Для оценки согласования данных с логнормальным распределением использовался критерий согласия Пирсона (критерий χ^2) [14]. Рассчитанные значения параметров χ_1^2 и χ_2^2 , характеризующие степень отклонения экспериментального и логнормального распределений для первого и второго оптических каналов, приведены на рис. 5. Для распределений, приведенных на рис. 5, степень свободы равна 13 и значение параметра $\chi_{\text{crit}}^2 = 15,1$ дает уровень значимости 0,3 [15]. Изменение параметров функции распределения между оптическими каналами по длине рабочего участка несущественно и наблюдается самоподобие картины потока, поэтому в дальнейшем приведены распределения для одного оптического канала.

На рис. 6 показаны вероятности попадания скоростей и длин снарядов в интервал гистограммы для различных скоростей газа и жидкости. Статистические

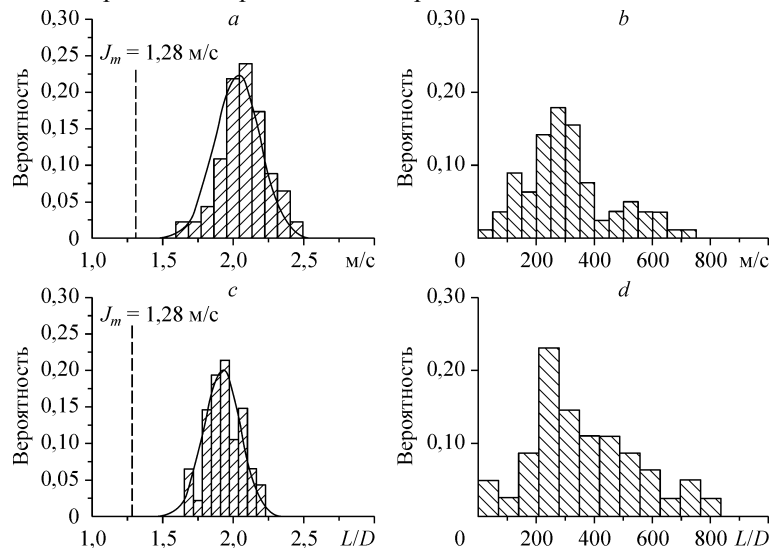
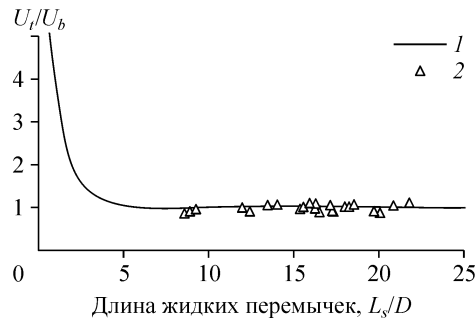


Рис. 6. Вероятности попадания скорости снаряда и его длины в интервал гистограммы при скоростях потока $J_{\text{liq}} = 0,091$ м/с и $J_{\text{gas}} = 1,19$ м/с (a, b) и $J_{\text{liq}} = 0,074$ м/с и $J_{\text{gas}} = 1,04$ м/с (c, d), вероятность скорости снаряда (a, c), вероятность длины снаряда, нормированной на диаметр канала (b, d).

a — среднее значение = 2,03, $\sigma = 16$, $\chi^2 = 6,19$; b — среднее значение = 230, $\sigma = 0,68$, $\chi^2 = 20,64$;
c — среднее значение = 0,13, $\sigma = 1,93$, $\chi^2 = 5,79$; d — среднее значение = 270, $\sigma = 0,7$, $\chi^2 = 23,9$.

Рис. 7. Зависимость скорости снаряда от длины жидкой перемычки $J_{\text{лиq}} = 0,074$ м/с, $J_{\text{газ}} = 1,04$ м/с, $D_h = 2,4$ мм.
1 — [16], 2 — выбранные события.



параметры функции распределения скорости определялись для тех снарядов, длины которых между оптическими каналами изменялись не более чем на 5 %. В противном случае событие считалось неблагоприятным, поскольку снаряд менял свою длину в результате объединения с предыдущим, либо событие относилось к другому промежутку времени и поэтому отбрасывалось. Аппроксимация функции распределения скорости снарядов производилась нормальным распределением с плотностью вероятности вида

$$f(x, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (5)$$

На рис. 6, а, с показаны вероятности попадания скорости снаряда в интервал гистограммы и параметры нормального распределения для различных расходов жидкости и газа. При скоростях потока $J_{\text{лиq}} = 0,091, 0,074$ м/с, $J_{\text{газ}} = 1,19, 1,04$ м/с соответственно можно говорить о соответствии распределений снарядов нормальному распределению с уровнем значимости не менее 0,5 [15]. Сплошной линией на рис. 6, а, с показана плотность вероятности этих распределений, умноженная на длину интервала скорости на гистограмме.

Пунктирной чертой показаны приведенные скорости смеси J_m . Видно, что скорость движения снарядов существенно превышает суммарную скорость потока.

На рис. 6, b, d показана вероятность попадания длины снаряда, нормированной на гидравлический диаметр канала, в интервал гистограммы для различных параметров потока снарядного режима течения. Аппроксимация вероятности длины снаряда производилась логнормальным распределением. Параметры аппроксимации указаны в подписи к рисунку.

На рис. 7 представлена зависимость скорости снаряда от длины жидкой перемычки, где точками отмечены те длины жидких перемычек, для которых определялась скорость снаряда U_i непосредственно за ними. Линией на рис. 6, b, d показан расчет по [16]

$$U_i = U_b \left[1 + 8 \exp\left(-1,06 \frac{l_s}{D}\right) \right]. \quad (6)$$

Видно, что минимальная длина жидкой перемычки, на которой сказывается эффект возрастания скорости снаряда с ростом размера жидкой перемычки, составляет $5D$, и в наших опытах эта зависимость не наблюдалась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование структуры адиабатического газожидкостного потока в вертикальном прямоугольном миниканале. С использованием метода лазерного сканирования и высокоскоростной фото- и видеосъемки получены основные режимы восходящего адиабатного газожидкостного потока в вертикальном миниканале — снарядопузырьковый, переходный, вспененный, кольцевой. Показано, что особенностью двухфазного течения в прямоугольном

миниканале является существенная пространственная неоднородность течения и чередование областей с жидкой и газовой фазами, разделенных межфазными менисками. Отработана методика двухлучевого лазерного сканирования структуры и определения статистических характеристик двухфазного потока. Выделены снарядопузырьковый, снарядный, переходный, вспененный, кольцевой режимы течения. Впервые получены статистические характеристики движения жидкой и газовой фаз в миниканале, в том числе и движения скорости фаз.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

g — ускорение свободного течения,	C_0 — параметр распределения,
J — приведенная скорость,	J_m — приведенная скорость смеси,
D_h — гидравлический диаметр,	x_1, x_2 — координаты положений фотодиодов,
$b = \sqrt{\sigma/g(\rho_{\text{liq}} - \rho_{\text{gas}})}$ — капиллярная постоянная (постоянная Лапласа),	l_b — длина газового снаряда,
$Re = UD/\nu$ — число Рейнольдса,	l_s — длина жидкой перемычки,
	U_b — средняя скорость снарядов в миниканале,
	x_c — среднее значение.

ГРЕЧЕСКИЕ СИМВОЛЫ

ρ — плотность,	$\Delta\rho$ — разность между плотностями жидкости,
σ — дисперсия,	χ^2 — хи-квадрат.

ИНДЕКСЫ

liq — жидкость,	gas — газ.
-----------------	------------

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kandlikar S.G., Grande, W.J.** Evolution of microchannel flow passages — thermo hydraulic performance and fabrication technology // Heat Transfer Engng., 2003. Vol. 24, No. 1, P. 3–17.
- Coleman J.W., Garimella S.** Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes // Inter. J. of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol. 42, No. 15. P. 2869–2881.
- Suo M., P. Griffith P.** Two-phase flow in capillary tubes // J. Basic Engng., 1984. P. 576–582.
- Barnea D., Luninsky Y., Taitel Y.** Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes // Can. J. Chem. Engng., 1983. Vol. 61. P. 617–620.
- Conrad K., Kohn R.E., Mishima K., Hibiki T.** Some Characteristics of air-water two-phase Flow in small diameter vertical tubes // Inter. J. Multiphase Flow. 1996. Vol. 22, No. 4. P.703–712.
- Akbar M.K., Plummer D.A., Ghiaasiaan S.M.** On gas-liquid two-phase flow regimes in micro-channels // Inter. J. Multiphase Flow. 2003. Vol. 29. P. 855–865.
- Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Рандин В.В.** Трение на стенке в восходящем снарядном течении в вертикальной трубе // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 3. С. 411–416.
- Barnea D., Shemer L.** Void fraction measurements in vertical slug flow: applications to slug characteristics and transition // Inter. J. Multiphase Flows. 1989. Vol. 15. P. 495–504.
- Van Hout R., Barneer D., Shemer L.** Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes // Inter. J. of Multiphase Flow. 2001. Vol. 27, No. 9. P. 1579–1602.
- Chisholm D.** A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow // Inter. J. Heat Mass Transfer. 1967. Vol. 10. P. 1767–1778.
- Jones, O.C., Zuber, N.** Slug-annular transition with particular reference to narrow rectangular ducts // Two-phase Momentum, Heat and Mass Transfer in Chemical, Process and Energy Engng Systems. 1979. Vol. 1. P. 345–355.
- Nicklin D.J., Wilkes J.F.** Two-phase flow in vertical tubes // Trans. Inst. Chem. Engng. 1962. Vol. 40, P. 61–68.
- Mishima K, Hibiki T, Nishihara H.** Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts // Inter. J. Multiphase Flow. 1993. Vol. 19. P. 115–124.
- Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977. С. 630–638.
- Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. С. 74–75.
- Moissis R., Griffith P.** Entrance effects in two-phase slug flow // J. Heat Transfer. 1962. Vol. 84. P. 29–39.

Статья поступила в редакцию 24 июля 2009 г.