

УДК 621.1.016:536.42

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

И. А. Козулин, В. В. Кузнецов

Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mails: igornt@yandex.ru, vladkuz@itp.nsc.ru

Экспериментально исследована структура восходящего газожидкостного течения в вертикальном микроканале с поперечным размером $0,67 \times 2,00$ мм и длиной 0,5 м. Опыты проведены в диапазонах приведенных скоростей азота $0,04 \div 11,00$ м/с и воды $0,07 \div 0,41$ м/с. С использованием метода двухлучевого лазерного сканирования выделены основные режимы течения (снарядно-пузырьковый, снарядный, переходный, эмульсионный, кольцевой) и определены статистические характеристики двухфазного потока. Построена карта режимов течения, получена зависимость скорости движения снаряда от приведенной скорости смеси, измерен коэффициент сопротивления для восходящего газожидкостного течения в микроканале.

Ключевые слова: микроканал, газожидкостное течение, режимы течения, скорость снарядов, статистические характеристики потока.

Введение. Режим двухфазных течений в каналах с поперечным размером, не превышающим значения капиллярной постоянной (микроканалы), и теплообмен в них определяются главным образом влиянием капиллярных сил и эффектов стесненности. Такие течения встречаются в компактных массообменных аппаратах, компактных криогенных и энергетических устройствах, аппаратах, используемых в водородной энергетике. Кроме того, ведется работа по созданию микроканальных теплообменников для охлаждения компьютерных систем [1].

Обзор исследований адиабатного газожидкостного течения в микроканалах различного сечения проведен в работе [2]. В большинстве работ, посвященных изучению двухфазных течений в каналах малого размера, определяются режимы течения [3–6]. В случае двухфазного течения в микроканале большое значение имеет снарядный режим течения. Характеристики снарядного течения в трубах, диаметр которых существенно превышает капиллярную постоянную, исследованы в [7]. В [8, 9] определены статистические характеристики снарядного течения в таких трубах и их изменение по длине канала. В [10] с использованием метода двухлучевого лазерного сканирования получены частоты следования газовых снарядов в микроканале для двух хладагентов R-134a и R-245fa. Однако данные о статистических характеристиках газожидкостного снарядного течения в микроканале в литературе отсутствуют. В настоящей работе исследуются режимы течения и статистические характеристики вертикального газожидкостного течения в прямоугольном вертикальном микроканале, поперечный размер которого существенно меньше капиллярной постоянной.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 08-08-00953а).

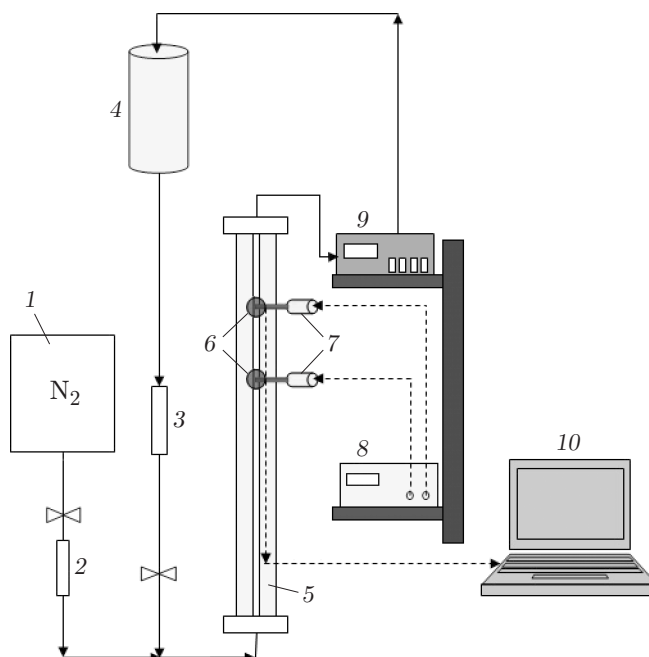


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — баллон с газом; 2 — расходомер газа; 3 — расходомер жидкости; 4 — бак; 5 — рабочий участок; 6 — фотодиоды; 7 — лазер; 8 — источник напряжения; 9 — жидкостный насос; 10 — компьютер

Экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки для исследования восходящего газожидкостного течения в прямоугольном канале малого размера приведена на рис. 1. Используемый в эксперименте газ (азот) поступал из баллона через регулировочный вентиль и расходомер газа в рабочий участок. Вода подавалась из бака через регулировочный вентиль расхода жидкости в ротаметр и затем в смеситель, расположенный в нижней части рабочего участка. Рабочий участок представлял собой прямоугольный микроканал размером $0,67 \times 2,00$ мм, состоящий из параллельных стеклянных пластин длиной 50 см, склеенных эпоксидным клеем. Гидравлический диаметр микроканала равен $D_h = 1,0$ мм, его ширина, составляющая 0,67 мм, существенно меньше капиллярной постоянной воды, равной 2,72 мм. На выходе из рабочего участка газожидкостная смесь откачивалась перистальтическим насосом в бак с водой, при этом газ уходил в атмосферу, а насыщенная азотом вода возвращалась в рабочий участок.

Экспериментальное исследование режимов течения газожидкостного потока в прямоугольном микроканале проведено с помощью оптической визуализации малых движущихся объектов. Для регистрации режимов течения использовались двухлучевое лазерное сканирование потока и высокоскоростная видеосъемка. Применение двухлучевого лазерного сканирования структуры потока позволило определить режимы течения в микроканале и получить статистические характеристики снарядного течения.

Два лазера располагались таким образом, чтобы лазерные лучи освещали одну из сторон прямоугольного канала. Для уменьшения диаметра светового пучка лазера использовалась диафрагма. Расстояние между лучами составляло 57 мм. Питание лазеров осуществлялось с помощью источника напряжения ТЕС-42. Интенсивность прошедшего через канал света измерялась с помощью двух фотодиодов, расположенных на противоположной стороне канала. Сигналы, поступающие с фотодиодов, регистрировались с помощью высокоскоростной платы аналого-цифрового преобразователя Lcard L-264 с максимальной

частотой опроса по всем каналам 200 кГц и обрабатывались на компьютере. Оцифровка сигнала осуществлялась с частотой 5 кГц в интервале времени от 1 до 5 мин. Снаружи канала с помощью цифровой видеокамеры WebCam Pro Ex и цифрового фотоаппарата Olympus E330 проводилась регистрация течения.

В экспериментах расход газа изменялся в диапазоне приведенных скоростей $J_g = 0,04 \div 11,00$ м/с, расход жидкости — в диапазоне $J_l = 0,07 \div 0,41$ м/с, давление на выходе из канала было равно атмосферному.

Результаты экспериментов. Особенности газожидкостного течения в прямоугольном микроканале являются существенная пространственная неоднородность течения и периодическое чередование областей с жидкой и газовой фазами, разделенных межфазными менисками. В результате проведенных экспериментов выделены следующие режимы течения: снарядно-пузырьковый, снарядный, эмульсионный, кольцевой. На рис. 2, а, б приведена зависимость напряжения на фотодиоде от времени для снарядно-пузырькового и снарядного режимов течения, полученные на расстоянии от входа в канал (первый оптический канал) $x_1/D_h = 199$. Видно, что максимальная амплитуда сигнала близка к величине сигнала в затопленном канале, а минимальная — к величине сигнала в пустом канале. Резкое уменьшение амплитуды сигнала с фотодиода соответствует прохождению головной части газового снаряда, а ее рост — прохождению жидкой перемычки. Снарядно-пузырьковый режим течения, наблюдающийся в микроканале в диапазонах приведенных скоростей и чисел Рейнольдса для жидкости $J_l = 0,110 \div 0,407$ м/с ($Re_l = \rho_l J_l D_h / \mu_l = 106 \div 393$; μ_l — динамическая вязкость жидкости) и газа $J_g = 0,04 \div 0,31$ м/с ($Re_g = \rho_g J_g D_h / \mu_g = 3 \div 21$; μ_g — динамическая вязкость газа), определен как режим, в котором средняя длина жидкой перемычки больше средней длины газового снаряда (см. рис. 2, а).

При увеличении приведенных скоростей в диапазонах $J_l = 0,066 \div 0,407$ м/с ($Re_l = 64 \div 393$), $J_g = 0,51 \div 2,35$ м/с ($Re_g = 33 \div 154$) наблюдается переход к снарядному режиму течения (см. рис. 2, б). Снарядный режим определен как режим течения, в котором длина жидкой перемычки меньше или равна длине газового снаряда. Пульсации сигнала в области жидкой перемычки свидетельствуют о наличии мелких пузырьков. Снарядное течение в микроканале характеризуется периодичностью и наличием мелких пузырьков в жидкой перемычке.

В диапазонах $J_l = 0,066 \div 0,407$ м/с ($Re_l = 64 \div 393$), $J_g = 1,25 \div 3,76$ м/с ($Re_g = 82 \div 245$) наблюдался режим перехода от снарядного режима течения к эмульсионному (переходный режим), характеризующийся хаотическим изменением сигнала, обусловленным разрушением хвостовой части снаряда при больших скоростях течения и образованием мелких пузырьков. С увеличением приведенной скорости газа этот режим переходит в эмульсионный (рис. 2, в). В этом режиме целые снаряды наблюдались очень редко вследствие их разрушения в потоке, жидкие перемычки и снаряды были насыщены газом и каплями жидкости. Эмульсионный режим течения наблюдался в диапазонах приведенных скоростей жидкости и газа $J_l = 0,11 \div 0,30$ м/с ($Re_l = 106 \div 290$), $J_g = 2,23 \div 7,17$ м/с ($Re_g = 146 \div 470$). На рис. 2, в видно, что периодическая структура, имеющая место в снарядном режиме, в эмульсионном режиме выражена менее четко.

На рис. 2, г показан сигнал с фотоприемника для кольцевого режима течения, который наблюдался в диапазонах приведенных скоростей жидкости и газа $J_l = 0,066 \div 0,190$ м/с ($Re_l = 64 \div 183$), $J_g = 4,08 \div 11,09$ м/с ($Re_g = 268 \div 727$). Этот режим, возникающий при больших расходах газа, характеризуется хаотическим изменением амплитуды интенсивности сигнала в первом и втором оптических каналах.

На основе данных лазерного сканирования потока построена карта режимов восходящего течения в микроканале (рис. 3). Проведено сравнение полученных границ режимов течений с результатами расчета по модели [11]. В работе [11] граница перехода от снаряд-

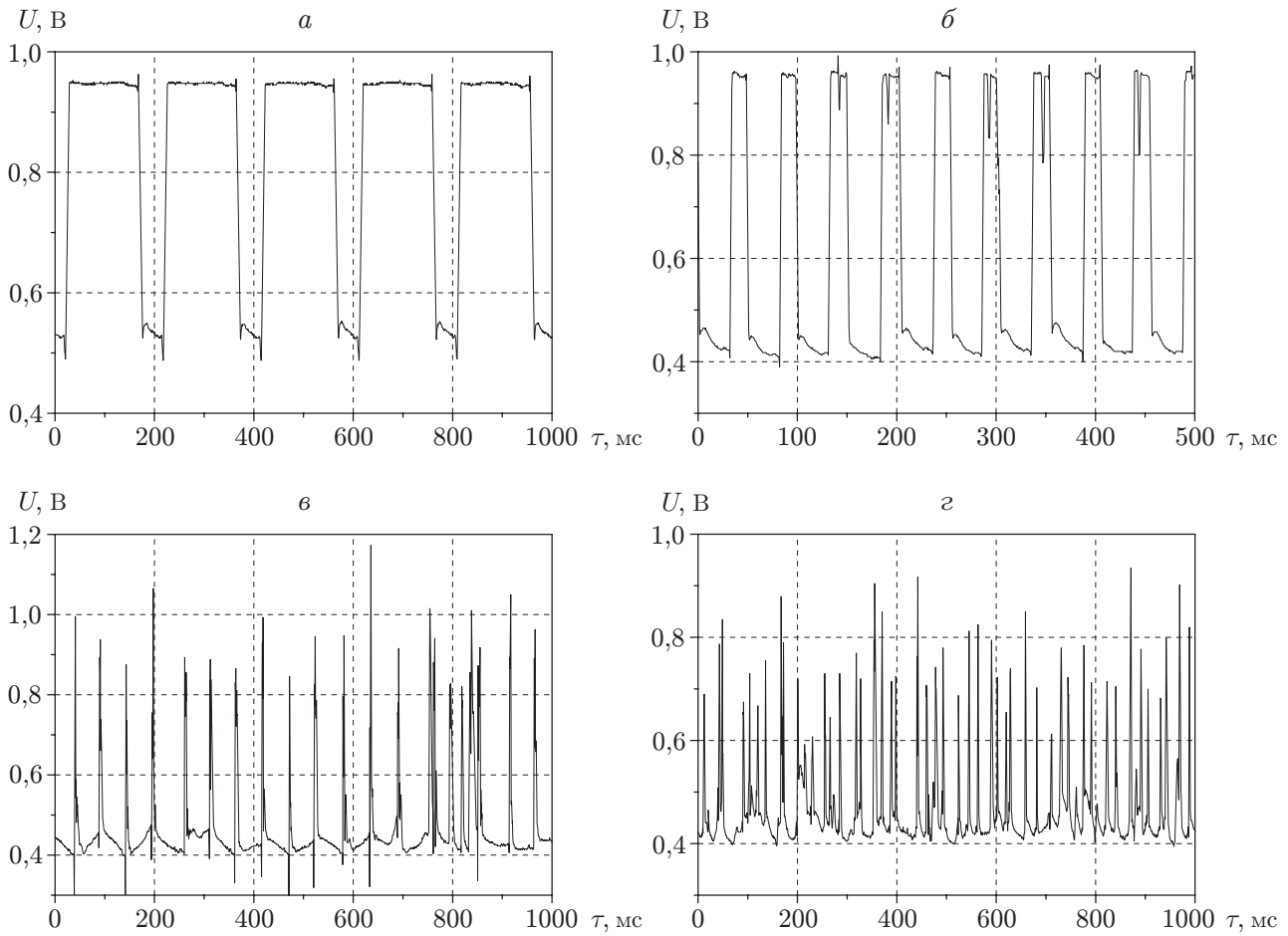


Рис. 2. Зависимость напряжения на фотодиоде от времени:

a — снарядно-пузырьковый режим течения ($J_l = 0,17$ м/с, $J_g = 0,16$ м/с); *б* — снарядный режим течения ($J_l = 0,27$ м/с, $J_g = 0,61$ м/с); *в* — эмульсионный режим течения ($J_l = 0,27$ м/с, $J_g = 4,0$ м/с); *з* — кольцевой режим течения ($J_l = 0,074$ м/с, $J_g = 10,58$ м/с)

ного режима течения к эмульсионному режиму определяется из условия

$$\alpha_{sl} \geq \alpha_m,$$

где α_m — средняя объемная доля газа в снарядном режиме течения:

$$\alpha_m = 1 - 0,813 \left(\frac{(C_0 - 1)J_m + 0,35\sqrt{\Delta\rho g D_h / \rho_l}}{J_m + 0,75\sqrt{\Delta\rho g D_h / \rho_l} (\Delta\rho g D_h^3 / (\rho_l \nu_l^2))^{1/18}} \right)^{0,75},$$

α_{sl} — объемная доля газа в снарядном режиме течения, полученная с помощью модели дрейфа [12]:

$$\alpha_{sl} = J_g / (C_0 J_m + 0,35\sqrt{\Delta\rho g D_h / \rho_l}), \quad (1)$$

C_0 — параметр распределения скорости газовых снарядов; $J_m = J_g + J_l$ — приведенная скорость смеси; g — ускорение свободного падения; ρ_l — плотность жидкости; $\Delta\rho$ — разность плотностей жидкости и газа; ν_l — кинематическая вязкость жидкости.

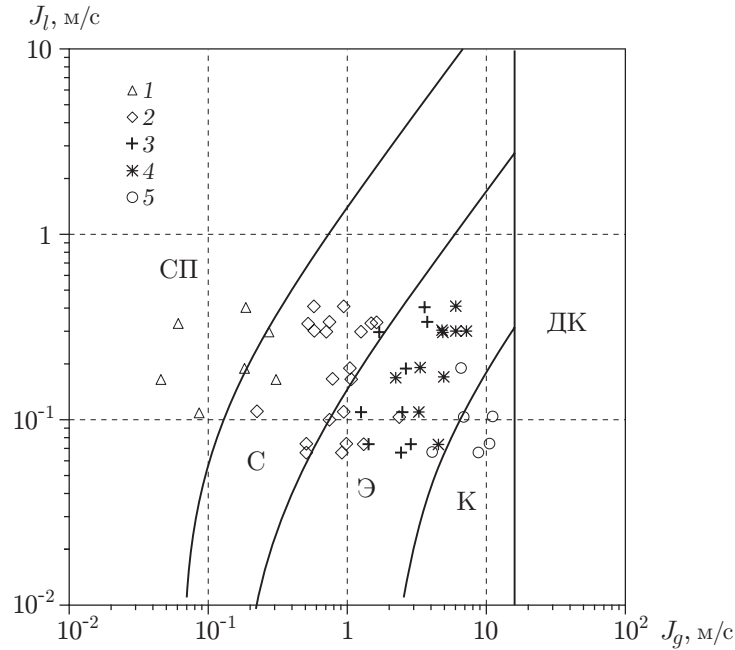


Рис. 3. Карта режимов течения для канала размером $0,67 \times 2,00$ мм: СП — снарядно-пузырьковый, С — снарядный, Э — эмульсионный, К — кольцевой, ДК — дисперсно-кольцевой; сплошные линии — границы между режимами течения, определенные по модели [11], точки — экспериментальные данные, полученные в настоящей работе (1 — снарядно-пузырьковый режим, 2 — снарядный режим, 3 — переходный режим, 4 — эмульсионный режим, 5 — кольцевой режим)

Для определения границ кольцевого режима течения в [11] использовались формула для объемной доли газа в кольцевом режиме течения α_{an} , полученной по модели дрейфа [12]:

$$\frac{J_g}{\alpha_{an}} - J_m = \frac{1 - \alpha_{an}}{\alpha_{an} + \{[(1 + 75(1 - \alpha_{an}))/\sqrt{\alpha_{an}}]\sqrt{\rho_g/\rho_l}\}^{1/2}} \times (J_m + \sqrt{\Delta\rho g D_h(1 - \alpha_{an})/(0,015\rho_l)}), \quad (2)$$

и условие поворота потока в снаряде, покрытом жидкой пленкой, при переходе к кольцевому режиму течения, что дает $J_l = 0$ в (2). При выполнении этого достаточно жесткого условия получаются завышенные по сравнению с определенными в экспериментах значения приведенной скорости газа, при которой происходит переход к кольцевому режиму течения. Поскольку расчет параметров эмульсионного режима в микроканале основан на расчете параметров кольцевого режима течения, предположим, что переход к кольцевому режиму течения происходит, когда объемная доля газа в кольцевом режиме течения, полученная из выражения (2), превышает среднюю объемную долю газа в снарядном режиме течения, вычисленную по формуле (1). В этом случае условие перехода к кольцевому режиму течения имеет вид

$$\alpha_{an} \geq \alpha_m. \quad (3)$$

Неравенство (3) определяет линию, являющуюся границей перехода от эмульсионного режима течения к кольцевому (см. рис. 3). Границы режимов течения в микроканале, определенные в эксперименте, хорошо согласуются с результатами расчета.

Зависимость скорости снаряда от приведенной скорости смеси. Использование метода двухлучевого лазерного сканирования потока позволило измерить скорость

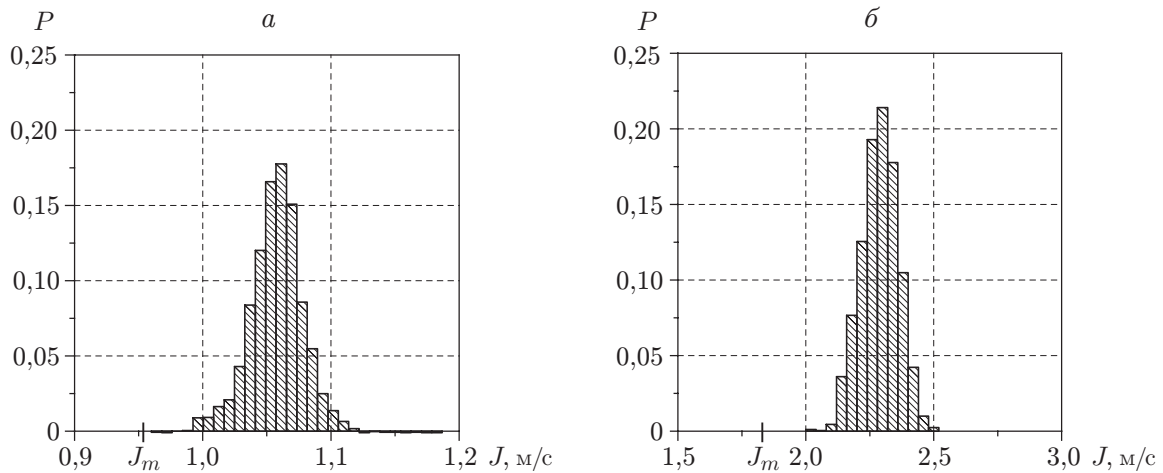


Рис. 4. Вероятность попадания скоростей снарядов в интервал гистограммы: *a* — снарядный режим течения ($J_l = 0,17$ м/с, $J_g = 0,79$ м/с, $J_m = 0,96$ м/с); *б* — переходный режим течения ($J_l = 0,33$ м/с, $J_g = 1,5$ м/с, $J_m = 1,83$ м/с)

движения снарядов в двухфазном потоке. Газовый снаряд характеризуется большим временем существования газовой фазы, а жидкая перемычка — частой сменой фаз жидкость — газ и газ — жидкость, что свидетельствует о наличии в перемычке пузырьков малых размеров. Вследствие различия времени существования малых диспергированных пузырьков в перемычках и газовых снарядах для сигнала с фотодиода может быть задан порог, чтобы исключить регистрацию таких малых пузырьков в жидких снарядах. Это позволяет выделить головные и хвостовые части снарядов, регистрируемые двумя оптическими датчиками, и определить скорость перемещения снарядов и их длину.

На рис. 4 приведены вероятности попадания скоростей снарядов J в интервал гистограммы $\Delta x = (x_{\max} - x_{\min})/m$ (x — величина, откладываемая на оси абсцисс; m — количество бинов гистограммы) для снарядного и переходного режимов течения. Статистические параметры функции распределения скорости определялись для тех снарядов, длины которых при прохождении между оптическими каналами изменялись не более чем на 5%. В противном случае событие считалось неблагоприятным (длина снаряда изменялась в результате его объединения с предыдущим снарядом либо событие соответствовало другому интервалу времени) и поэтому отбрасывалось. Распределение скорости снарядов аппроксимировалось функцией нормального распределения с плотностью вероятности вида

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

где σ — дисперсия; \bar{x} — среднее значение. На рис. 4 видно, что скорость движения снарядов существенно превышает суммарную скорость потока.

Согласно модели потока дрейфа [12] скорость движения снаряда определяется приведенной скоростью смеси J_m , параметром распределения C_0 и скоростью всплытия пузырька в неподвижной жидкости в канале U_f :

$$U_b = C_0 J_m + U_f.$$

Параметр распределения C_0 для прямоугольных каналов вычисляется по формуле [12]

$$C_0 = 1,35 - 0,35\sqrt{\rho_g/\rho_l}$$

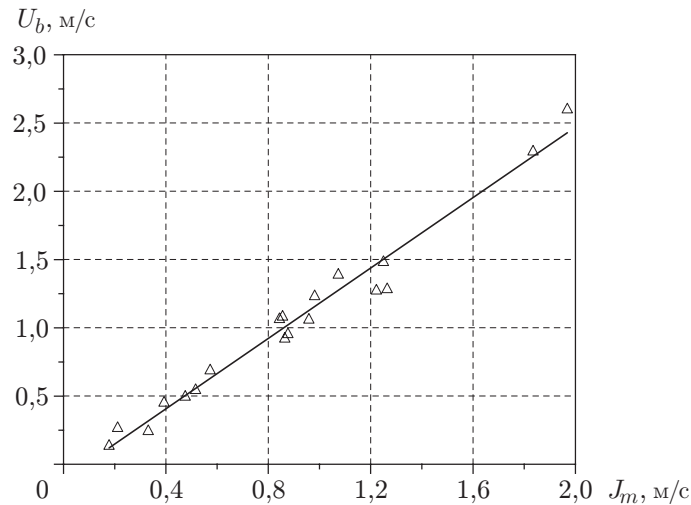


Рис. 5. Зависимость скорости снаряда от приведенной скорости смеси для снарядного режима течения в прямоугольном микроканале размером $0,67 \times 2,00$ мм: точки — экспериментальные данные; линия — результаты аппроксимации экспериментальных данных по формуле (4)

и для течения смеси воды и азота равен 1,33. В работе [13], в которой исследовалось течение спутного потока воздуха и воды в прямоугольном микроканале, установлено, что для канала диаметром $D_h = 2,23 \cdot 10^{-3}$ м параметр распределения равен $C_0 = 1,23$, для канала диаметром $D_h = 1,25 \cdot 10^{-3}$ м — $C_0 = 1,27$.

На рис. 5 представлены результаты обработки экспериментальных данных для снарядного и переходного режимов течения. Видно, что средняя скорость снарядов в микроканале достаточно точно определяется зависимостью

$$U_b = 1,26J_m + 0,001. \quad (4)$$

Результаты измерений показывают, что средняя скорость всплытия одиночного пузырька в неподвижной жидкости в микроканале приблизительно равна 1 мм/с, поэтому в формуле (4) ее можно не учитывать.

Статистическая обработка экспериментальных данных. Статистическая обработка данных о скорости всплытия снарядов и их длине проводилась для снарядно-пузырькового, снарядного и переходного режимов течения. Длины снаряда и жидкой перемычки определялись как произведение разности сигналов во времени между передней и задней границами газового снаряда или перемычки соответственно и усредненной скорости снарядов. После обработки сигналов с первого и второго фотодиодов построены гистограммы распределения вероятности по длинам снарядов и жидких перемычек. Статистические характеристики движения жидкой и газовой фаз в микроканале получены для двух расстояний от входа в камеру смешивания — $x_1/D_h = 199$ (первый оптический канал), $x_2/D_h = 256$ (второй оптический канал).

На рис. 6 показана вероятность попадания длины L газового снаряда и жидкой перемычки, нормированной на гидравлический диаметр канала, в интервал гистограммы для снарядного режима течения. Вероятности приведены для сигналов, полученных для первого оптического канала в предположении, что длины снарядов L соответствуют логнормальному распределению с плотностью вероятности, определенной по формуле

$$f\left(\frac{L}{D_h}, \sigma\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left(\frac{L}{D_h}\right)^{-1} \exp\left(-\frac{(\ln(L/D_h) - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right),$$

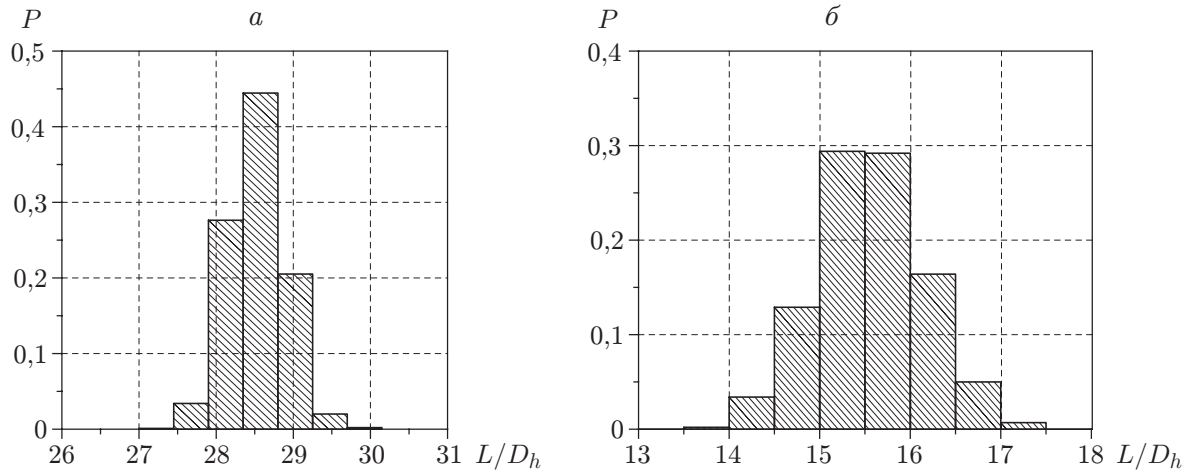


Рис. 6. Вероятность попадания в интервал гистограммы длины газовых снарядов (а) и жидких перемычек (б) для снарядного режима течения ($J_l = 0,27$ м/с, $J_g = 0,61$ м/с)

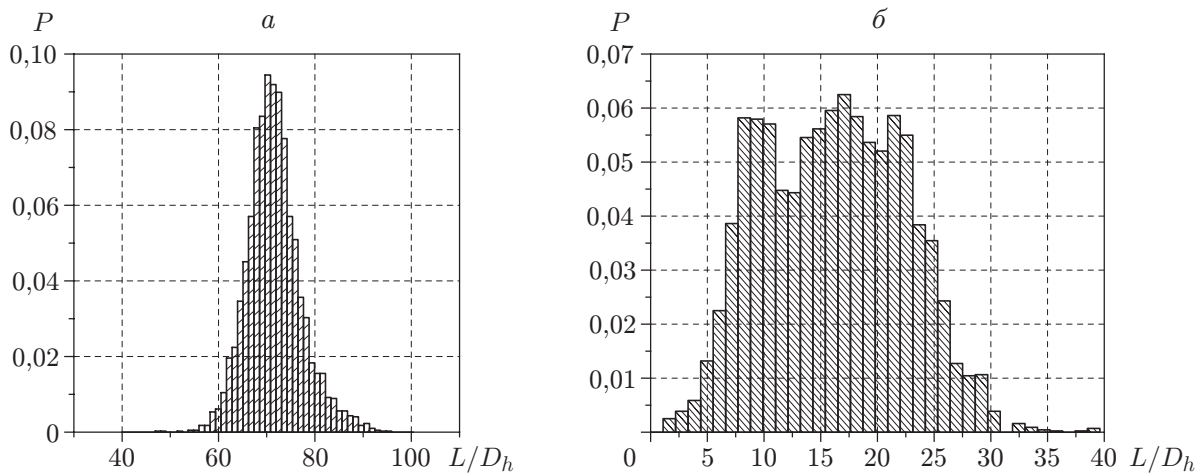


Рис. 7. Вероятность попадания в интервал гистограммы длины газовых снарядов (а) и жидкой перемычки (б) для переходного режима течения ($J_l = 0,33$ м/с, $J_g = 1,5$ м/с)

где $L/D_h > 0$; $\sigma > 0$. Определены дисперсии σ и средние величины \bar{x} для первого оптического канала. Для снарядов $\sigma = 3,52$, $\bar{x} = 27,97$, для жидких перемычек $\sigma = 1,56$, $\bar{x} = 15,24$. На рис. 6 видно, что в снарядном режиме течения стандартное отклонение длины как снарядов, так и жидких перемычек от среднего значения незначительно.

На рис. 7 показана вероятность попадания длины газового снаряда и жидкой перемычки, нормированной на гидравлический диаметр канала, в интервал гистограммы для переходного режима течения. В области перехода к эмульсионному режиму течения значительно увеличивается ширина распределений длин снарядов и жидких перемычек и возрастают их стандартные отклонения от среднего значения. С использованием полученных гистограмм можно определить характерные длины газовых снарядов и жидких перемычек в восходящем спутном газожидкостном течении в микроканале.

Перепад давления. В экспериментах проведено измерение перепада давления для однофазных потоков газа и жидкости и двухфазного потока в микроканале. Для опреде-

ления перепада давления был изготовлен микроканал размером $1,50 \times 0,72$ мм, гидравлический диаметр которого $D_h = 1$ мм приблизительно равен гидравлическому диаметру микроканала размером $0,67 \times 2,00$ мм. Градиент давления для восходящего течения в трубе определяется по формуле $Dp = Dp_f + Dp_M + Dp_g$, где Dp_f , Dp_M , Dp_g — составляющие градиента давления, обусловленные соответственно трением, изменением количества движения и силой тяжести. Основной вклад в перепад давления Dp вносят перепады давления, обусловленные трением (Dp_f) и силой тяжести (Dp_g).

Проведено сравнение результатов эксперимента в случае двухфазного течения с результатами расчета по гомогенной модели течения. Эта модель достаточно точно описывает перепад давления в микроканалах шириной от 200 мкм до 3 мм [14, 15]. В гомогенной модели перепад давления, обусловленный трением, рассчитывается по формуле

$$\left(\frac{dp}{dZ}\right)_f = f \frac{1}{D_h} \frac{G^2}{2\rho},$$

где G — массовая скорость смеси; f — коэффициент силы трения; ρ — гомогенная плотность смеси, определяемая через расходную массовую долю газа x :

$$1/\rho = x/\rho_g + (1-x)/\rho_l.$$

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента сопротивления f от числа Рейнольдса для однофазных течений жидкости и газа и двухфазного газожидкостного течения. Согласно гомогенной теории число Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = GD_h/\mu,$$

где $\mu = (J_l/J_m)\mu_l + (J_g/J_m)\mu_g$ — гомогенная вязкость смеси [16]. На рис. 8 видно, что в случае однофазного потока экспериментальные данные хорошо согласуются с резуль-

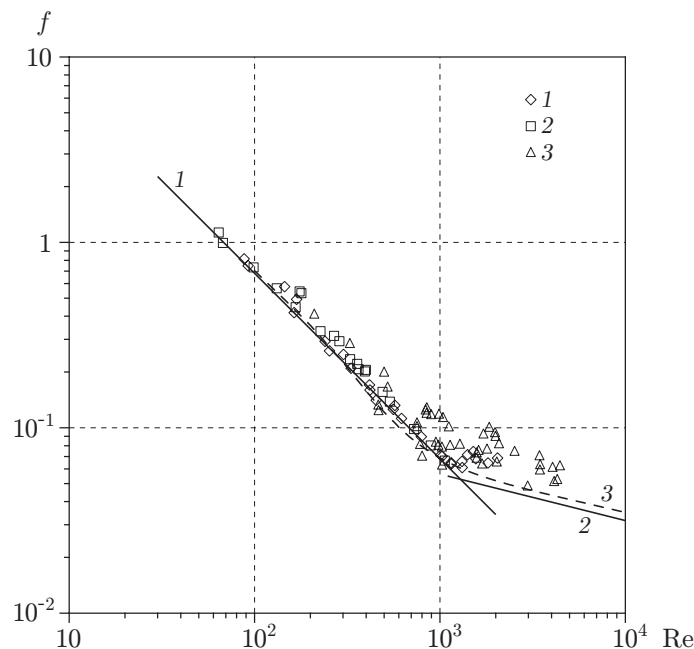


Рис. 8. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для однофазного и двухфазного режимов течения в микроканале размером $1,50 \times 0,72$ мм: линии 1–3 — результаты расчета (1 — расчет по формуле $f = 69,88/Re$, 2 — расчет по формуле $f = 0,316/Re^{0,25}$, 3 — расчет по модели [17]); точки 1–3 — экспериментальные данные (1 — жидкость, 2 — газ, 3 — двухфазный поток)

татами расчета по известным соотношениям (для ламинарного режима течения) и модели [17]. В области ламинарно-турбулентного перехода коэффициент сопротивления для однофазного потока в прямоугольном микроканале больше соответствующего значения f , вычисленного по зависимости Блазиуса $f = 0,316/Re^{0,25}$. В случае двухфазного ламинарного течения результаты расчета по гомогенной модели хорошо согласуются с результатами измерения коэффициента сопротивления при $Re < 800$. При $Re > 800$ и в области ламинарно-турбулентного перехода экспериментальные точки для двухфазного течения (точки 3) лежат несколько выше экспериментальных точек для однофазного течения (точки 1, 2) и существенно выше кривой зависимости Блазиуса (линия 2).

Заключение. В работе проведено экспериментальное исследование структуры газожидкостного потока в вертикальном прямоугольном микроканале. Выделены основные режимы восходящего адиабатного газожидкостного потока (снарядно-пузырьковый, снарядный, переходный, эмульсионный, кольцевой). Показано, что особенностями газожидкостного течения в прямоугольном микроканале являются существенная пространственная неоднородность течения и чередование областей с жидкой и газовой фазами, разделенных межфазными менисками. Применение метода двухлучевого лазерного сканирования позволило получить статистические характеристики движения жидкой и газовой фаз в микроканале, в частности скорости движения фаз, длины газовых и жидких перемычек, а также более точно определить границы режимов течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kandlikar S. G., Grande W. J.** Evolution of microchannel flow passages — thermo hydraulic performance and fabrication technology // *Heat Transfer Engng.* 2003. V. 24, N 1. P. 3–17.
2. **Saisorn S., Wongwiset S.** A review of two-phase gas-liquid adiabatic flow characteristics in micro-channels // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2008. V. 12, N 3. P. 824–838.
3. **Coleman J. W., Garimella S.** Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 1999. V. 42, N 15. P. 2869–2881.
4. **Conrad K., Kohn R. E., Mishima K., Hibiki T.** Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1996. V. 22, N 4. P. 703–712.
5. **Akbar M. K., Plummer D. A., Ghiaasiaan S. M.** On gas-liquid two-phase flow regimes in micro-channels // *Intern. J. Multiphase Flow.* 2003. V. 29, N 5. P. 855–865.
6. **Suo M., Griffith P.** Two-phase flow in capillary tubes // *J. Basic Engng.* 1964. V. 86. P. 576–582.
7. **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. 410–416.
8. **Barnea D., Shemer L.** Void fraction measurements in vertical slug flow: applications to slug characteristics and transition // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1989. V. 15, N 4. P. 495–504.
9. **Van Hout R., Barnear D., Shemer L.** Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes // *Intern. J. Multiphase Flow.* 2001. V. 27, N 9. P. 1579–1602.
10. **Revellin R., Thome J. R.** A new type of diabatic flow pattern map for boiling heat transfer in microchannels // *J. Micromech. Microengng.* 2007. V. 17. P. 788–796.
11. **Mishima K., Hibiki T., Nishihara H.** Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1993. V. 19, N 1. P. 115–124.
12. **Nicklin D. J., Wilkes J. F.** Two-phase flow in vertical tubes // *Trans. Inst. Chem. Engrs.* 1962. V. 40. P. 61–68.
13. **Sowinski J., Dziubinski M., Fidos H.** Velocity and gas void fraction in two-phase liquid-gas flow in narrow mini-channels // *Arch. Mech.* 2009. V. 61, N 1. P. 29–40.

14. **Ungar E. K., Cornwell J. D.** Two-phase pressure drop of ammonia in small diameter horizontal tubes // Proc. of the 17th Aerospace ground testing conf., Nashville (TN), July 6–8, 1992. P. 12.
15. **Triplett K. A., Ghiaasiaan S. M., Abdel-Khalik S. I., et al.** Gas-liquid two-phase flow in microchannels. 2. Void fraction and pressure drop // Intern. J. Multiphase Flow. 1999. V. 25, N 3. P. 395–410.
16. **Dukler A. E., Wicks M., Cleveland R. G.** Frictional pressure drop in two phase flow. Pt A. A comparison of existing correlations for pressure loss and holdup // AIChE J. 1964. V. 10, N 1. P. 38–43.
17. **Garcia F., Garcia R., Padrino J. C., et al.** Power law and composite power law friction factor correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines // Intern. J. Multiphase Flow. 2003. V. 29, N 10. P. 1605–1624.

*Поступила в редакцию 27/VII 2010 г.,
в окончательном варианте — 11/II 2011 г.*
