

УДК 532.529.5

Экспериментальное исследование влияния физических свойств жидкости и размера сечения прямоугольного микроканала на режимы газожидкостного течения*

Г.В. Барткус^{1,2}, В.В. Кузнецов^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия
e-mail: germanbartkus@gmail.com

Поступила в редакцию 1.01.2019

После доработки 22.01.2019

Принята к публикации 24.01.2019

Экспериментально изучено двухфазное газожидкостное течение в микроканалах прямоугольного сечения с соотношением сторон 2/3 и 1/10. Формирование течения происходило внутренним Т-образным смесителем. Особенностью этой работы является использование жидкостей с различными физическими свойствами: вязкостью, поверхностным натяжением, плотностью. Визуализация режимов течения и измерение их характеристик проводились с помощью высокоскоростной видеосъемки и метода лазерного сканирования. Измерение локальных характеристик газожидкостного течения осуществлялось бесконтактным методом лазерно-индуцированной флюоресценции. Построены карты режимов в безразмерных координатах для учета свойств жидкостей и размера канала.

Ключевые слова: двухфазное течение, газожидкостное течение, микроканал, карта режимов, LIF.

Введение

В последнее время значительное внимание уделяется исследованиям газожидкостных [1–3] и двухжидкостных [4] течений в микроканалах. Это связано с тем, что применение микроканальных систем дает возможность управлять процессами переноса при фазовых превращениях и химических реакциях с временным разрешением порядка нескольких миллисекунд и позволяет разрабатывать высокоинтенсивные системы охлаждения для поддержания теплового режима процессоров компьютеров, микроконденсаторов и парогенераторов, химических реакторов и биологических чипов для экспресс-анализа крови [5]. Отношение поверхности к объему канала обратно пропорционально его поперечному размеру, что обеспечивает эффективный теплообмен в микросистемах. Вместе с тем уменьшение поперечного размера

канала вызывает изменение характеристик газожидкостного течения из-за изменения соотношения сил инерции, вязкости и поверхностного натяжения. В данной работе рассмотрено влияние размера поперечного сечения канала и физических свойств жидкости на локальные характеристики газожидкостного течения в горизонтальном микроканале с прямоугольным сечением. Определение характеристик течения и измерение локальной толщины пленки жидкости проведены с использованием лазерного сканирования и метода лазерно-индуцированной флюоресценции (ЛИФ).

1. Описание эксперимента

1.1. Схема экспериментальной установки

Эксперименты проводились на разомкнутом гидродинамическом контуре. Рабочая жидкость поступала из бака со встроенным фильтром через термомассовый регулятор расхода жидкост-

* Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта РФФИ №16-19-10519 и гранта РФФИ 18-08-01282-А.

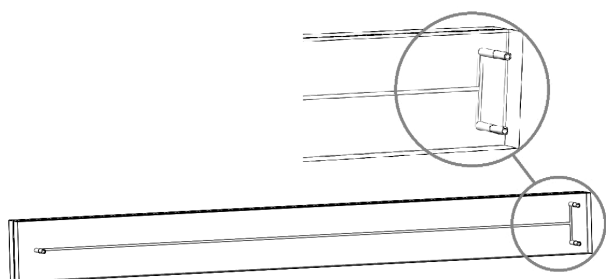


Рис. 1. Схема рабочего участка

ти Bronkhorst LIQUI-FLOW на вход в микроканал, показанный на рис. 1. На входе в микроканал жидкость смешивалась с азотом, поступающим из баллона через редуктор и контроллер расхода Bronkhorst EL-FLOW F-201CV. Давление на входе в Т-образный смеситель измерялось дифференциальным датчиком давления, показания которого использовались для определения объемного расхода газа в заданном сечении микроканала. На выходе из микроканала газожидкостная смесь стекала в открытый бак, и газ после разделения уходил в атмосферу. В качестве экспериментальных участков использованы горизонтальные микроканалы с сечениями 269×362 и 200×2000 мкм, на входе которых расположены Т-образные смесители для формирования газожидкостного течения. Микроканалы представляет собой зажатую с двух сторон стеклом нержавеющей пластину с прорезом, выполненным лазером. Длины микроканалов составляли 0.3 и 0.045 м.

В качестве жидкой фазы использовались различные жидкости: дистиллированная вода и водные растворы этанола с объемной концентрацией 47.4% и 95%, в качестве газовой фазы – азот. Физические свойства жидкостей представлены в таблице.

Физические свойства жидкостей

Жидкость	ρ , кг/м ³	η , мПа·с	σ , Н/м
Вода	998.2	1.004	0.073
47.4% (об.) этанол	935.2	2.64	0.03
95% (об.) этанол	811	1.55	0.023

1.2. Методы измерения характеристик течения

В приведенной серии экспериментов использовалось три бесконтактных метода измерения локальных характеристик газожидкостного течения. Схема метода двухлучевого лазерного

сканирования показана на рис. 2. Она включает в себя два маломощных лазера (2), излучение которых (4) фокусируется на стенке канала с помощью линз (3), и два фотодиода ФД-24 (5), расположенных по другую сторону микроканала, для регистрации интенсивности лазерного пучка.

Сигналы с фотодиодов поступают на скоростную плату АЦП Zetlab-210 и оцифровываются с максимальной суммарной частотой 500 кГц. Запись сигнала составляла 1 мин. Метод позволяет измерять длины газовых пузырей и жидких перемычек и определять границу перехода от одного режима к другому. Метод двухлучевого лазерного сканирования [6] дает возможность следить за изменением двухфазного течения по длине канала на разном расстоянии от входа. Систему «лазер–фотодиод» далее будем называть оптический регистратор.

Высокоскоростная видеосъемка осуществлялась камерой Optronis CX600x2 (1) с частотой 500–2000 кадр/с, используя объектив с 10-кратным увеличением.

Для измерения толщины пленки жидкости в микроканале применялся метод лазерно-индуцированной флюоресценции. Этот метод основан на измерении интенсивности излучения раствора флюорофора (Родамина 6Ж), длина волны которого отличается от возбуждающего излучения, создаваемого лазером. Преимуществом данного метода являются хорошие пространственное и временное разрешения.

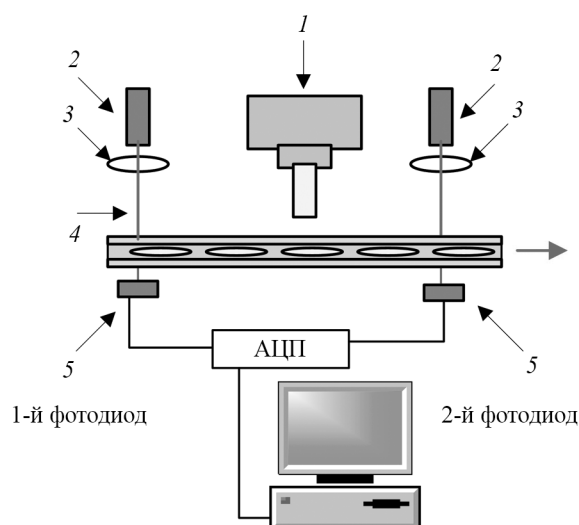


Рис. 2. Схема метода двухлучевого лазерного сканирования и высокоскоростной видеосъемки

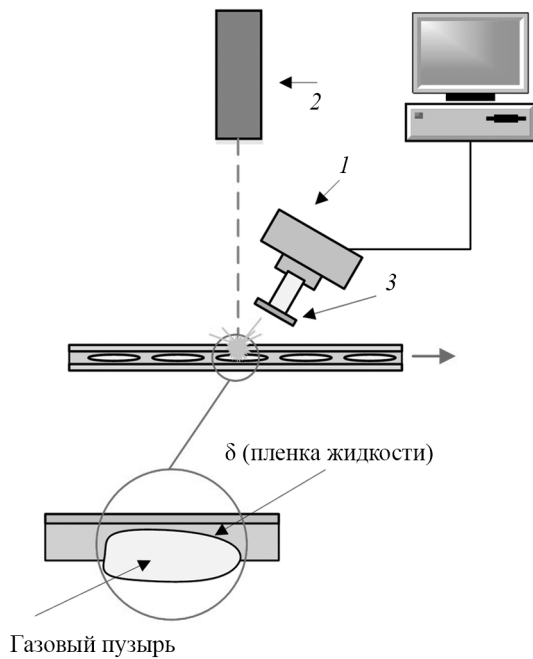


Рис. 3. Схема метода ЛИФ

Схема метода ЛИФ для измерения локальной толщины пленки жидкости показана на рис. 3. Выбор красителя Родамина 6Ж обусловлен тем, что размер его молекулы составляет примерно $8 \times 16 \text{ \AA}$ и гарантирует отсутствие внесения гидродинамических возмущений в поток [7]. Спектры поглощения и флюоресценции Родамина 6Ж лежат в диапазоне, удобном для применения в качестве источника возбуждения флюоресценции импульсного твердотельного лазера с длиной волны 532 нм (2). Для определения интенсивности переизлученного света используется светофильтр ОС-12 (3), который не прозрачен для длины волны лазера, и высокоскоростная видеокамера Optronix CX600x2 (1). По интенсивности переизлученного света с использованием калибро-

вочной зависимости интенсивности от концентрации Родамина 6Ж определялась толщина пленки жидкости δ . Более подробно метод описан в [5].

2. Результаты

2.1. Структура газожидкостного течения в микроканале $269 \times 362 \text{ мкм}$

Сигналы с оптического регистратора, расположенного на расстоянии 66 мм от входа, соответствующие режимам газожидкостного течения в горизонтальном микроканале с прямым Т-образным смесителем и сечением $269 \times 362 \text{ мкм}$, приведены на рис. 4. На рис. 4, а показан сигнал для периодического режима течения смеси этанол–азот, при котором наблюдается чередование газовых и жидких перемычек, длина перемычек практически не изменяется по длине канала. Приведенные скорости жидкости и газа равны $J_{liq} = 0.072 \text{ м/с}$, $J_{gas} = 0.147 \text{ м/с}$, где

$$J_{liq,gas} = \frac{Q_{liq,gas}}{S}$$

фаз $Q_{gas,liq}$ в заданном сечении вводилась поправка на плотность газа в этом сечении, которая определяется по измеренному дифференциальным датчиком давлению и соответствует справочным данным [9]. Давление в сечении определялось исходя из линейной аппроксимации изменения давления по длине микроканала.

Области сигнала, соответствующие максимуму напряжения на фотодиоде, соответствуют жидким перемычкам, а минимуму – газовым пузырям. Фотография на этом рисунке показывает вид удлиненного пузыря для периодического течения (направление течения показано стрелкой).

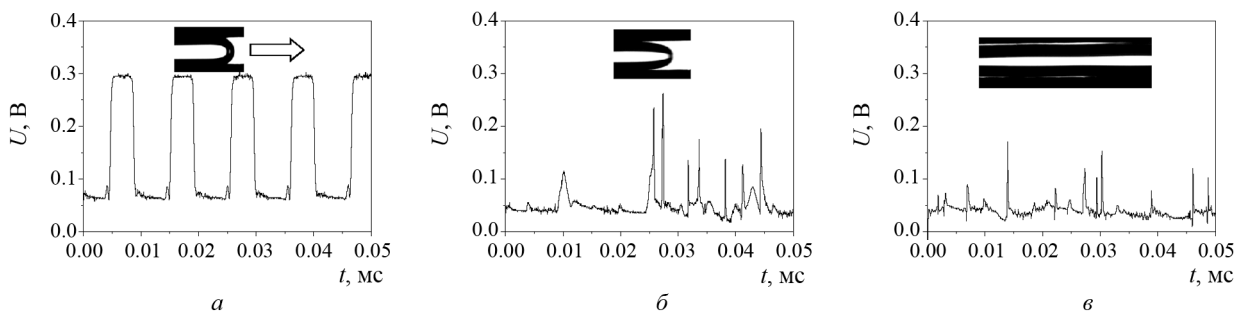


Рис. 4. Сигналы с фотодиода и соответствующие изображения течений для горизонтального течения двухфазной смеси 95% этанол–азот в микроканале с сечением $269 \times 362 \text{ мкм}$: а – периодический режим течения, $J_{liq} = 0.072 \text{ м/с}$, $J_{gas} = 0.147 \text{ м/с}$; б – переходной режим течения, $J_{liq} = 0.072 \text{ м/с}$, $J_{gas} = 1.399 \text{ м/с}$; в – кольцевой режим течения, $J_{liq} = 0.036 \text{ м/с}$, $J_{gas} = 3.62 \text{ м/с}$

При увеличении приведенной скорости газа периодичность следования газовых пузырей и жидких перемычек одинаковых размеров нарушается и происходит переход от периодического к переходному (непериодическому) режиму течения. На рис. 4, б показан пример сигнала и фотография пузыря для приведенных скоростей $J_{liq} = 0.072$ м/с, $J_{gas} = 1.399$ м/с. Для данного режима течения характерна форма пузыря, подобная снарядному режиму течения.

Дальнейшее увеличение приведенной скорости газа приводит к кольцевому режиму течения. Из визуализации течения выявлено, что данный режим отличается от переходного наличием непрерывного газового ядра в центре канала, жидкость течет в виде пленки по стенкам микроканала и в менисках. Редко образуются симметричные волны на поверхности менисков жидкости, и их объединение приводит к образованию жидкой перемычки и спонтанному разрушению кольцевого течения. На рис. 4, в показан пример сигнала для кольцевого режима течения. Можно наблюдать более низкий уровень сигнала с фотодиода, показывающий отсутствие сплошных жидких перемычек.

2.2. Структура газожидкостного течения в микроканале 200×2000 мкм

Процесс формирования газожидкостного течения для смеси 95% этанол-азот в прямоугольном канале с сечением 200×2000 мкм представлен на рис. 5.

Жидкость поступала в канал через два боковых входа малого размера, а газ поступал через центральный вход, по размерам равный ширине канала. Газовый пузырь образовывался при соединении двух областей жидкости, расположенных друг напротив друга (см. рис. 5).

На рис. 6 представлен пример течения на расстоянии 38 мм от смесителя. Рис. 6, а соответствует периодическому режиму течения для приведенных скоростей газа и жидкости $J_{liq} = 0.044$ м/с, $J_{gas} = 0.084$ м/с. Для периодического режима характерен небольшой разброс по длинам газовых пузырей и жидких перемычек. При увеличении приведенной скорости газа структура течения меняется: в потоке наблюдаются пузыри и жидкие перемычки разных размеров (рис. 6, б), задняя часть пузырей ста-

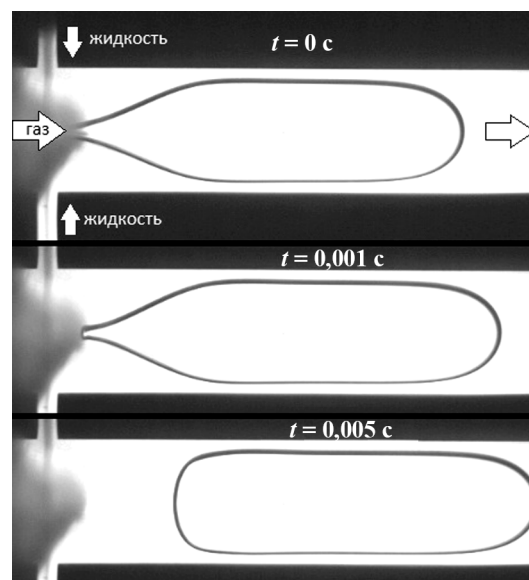


Рис. 5. Фотографии области смешения жидкости и газа, показывающие процесс формирования газового пузыря в канале 200×2000 мкм для течения 95% этанол-азот при приведенных скоростях $J_{liq} = 0.044$ м/с, $J_{gas} = 0.084$ м/с

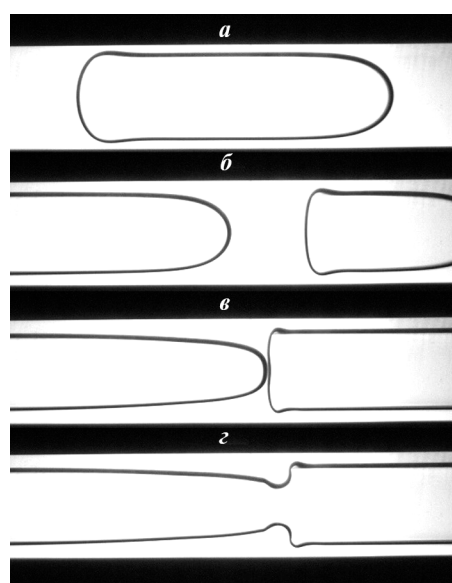


Рис. 6. Фотографии газожидкостного течения на расстоянии 38 мм от смесителя: а – $J_{liq} = 0.044$ м/с, $J_{gas} = 0.084$ м/с; б – $J_{liq} = 0.044$ м/с, $J_{gas} = 0.418$ м/с; в, г – $J_{liq} = 0.044$ м/с, $J_{gas} = 0.83$ м/с

новится менее скругленной, чем для меньших скоростей, наблюдается объединение пузырей в потоке (рис. 6, в, г).

2.3. Измерение толщины пленки методом ЛИФ

Ключевой характеристикой при описании течения двухфазной смеси в микроканале является распределение жидкости в поперечном се-

чении канала. Жидкость движется в углах и на длинных сторонах канала, образуя мениски и тонкие пленки жидкости. На рис. 7, а представлено изменение толщины жидкости в поперечном сечении канала для кольцевого режима течения с волнами для смеси 95% этанола–азот. Как видно, на коротких сторонах канала находится значительное количество жидкости. Можно наблюдать бегущие симметричные волны на коротких сторонах канала, которые смачивают длинную сторону канала, но не соединяются, образуя сплошную жидкую переемычку.

Толщина пленки жидкости в центральном сечении длинной стороны канала также является значимой характеристикой газожидкостного течения. На рис. 7, б приведена динамика изменения толщины пленки жидкости в центре длинной стороны микроканала после прохождения волн возмущений в верхнем и нижнем менисках. Получено, что сразу после прохождения волны возмущения толщина пленки жидкости в центральном сечении возрастает и затем постепенно уменьшается до прохождения следующего возмущения.

В областях течения с толщиной пленки больше 20 мкм, соответствующих менискам жидкости, восстановленные значения толщины пленки жидкости не соответствуют действительности, так как в данном диапазоне интенсивностей калибровочная прямая не работает. Для определения адекватных толщин в углах канала необходима калибровка при использовании жидкой фазы с меньшей концентрацией флюорофора.

2.4. Карта режимов в безразмерных координатах

На основании визуализации течения и сигналов с оптических регистраторов построены карты режимов. Для обобщения экспериментальных данных для всех наборов смесей было предложено использовать в качестве координат безразмерный комплекс, предложенный в [8], состоящий из чисел Рейнольдса и Вебера в виде $Re^{0.2}We^{0.4}$, где

$$Re_{liq,gas} = \frac{J_{liq,gas} \cdot D_h}{\nu_{liq,gas}}, \quad (1)$$

$$We_{liq,gas} = \frac{\Delta\rho \cdot J_{liq,gas}^2 \cdot D_h}{\sigma}, \quad (2)$$

На рис. 8 представлены карты режимов для течения смеси 95% этанола–азот (треугольные маркеры) и 47.4% этанола–азот (квадратные маркеры) в канале 269×362 мкм, 95% этанола–азот в канале 200×2000 мкм (круглые маркеры). Заливка маркера указывает на соответствующий режим течения: прозрачным маркером обозначен периодический режим течения, маркер с горизонтальными линиями – переходной режим течения (непериодический), полностью залитый маркер – кольцевой режим течения. Видно, что построение карты режимов в координатах безразмерного комплекса хорошо обобщает границу перехода от периодического режима течения к переходному для разных типов жидкости в экспериментах с одной и той же геометрией. Для каналов различной геометрии

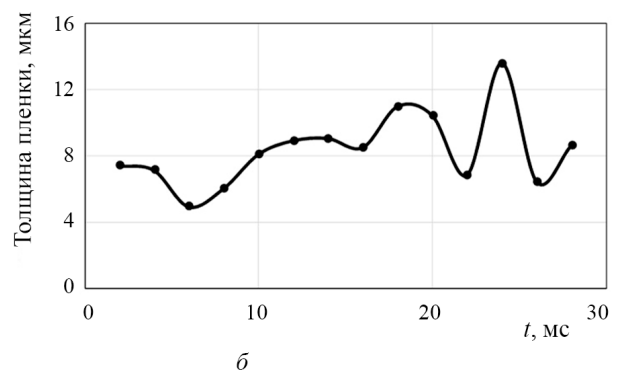
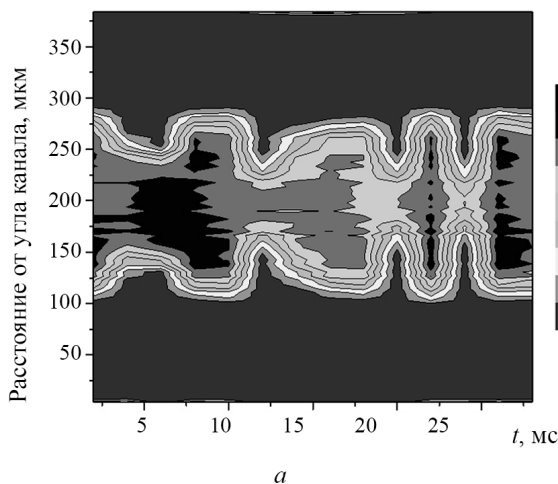


Рис. 7. Распределение толщины жидкости на длинной стороне канала в зависимости от времени для кольцевого режима течения смеси 95% этанола–азот при $J_{liq} = 0.072$ м/с, $J_{gas} = 11.35$ м/с (а) и изменение толщины пленки жидкости в центре длинной стороны канала при прохождении волн возмущения (б)

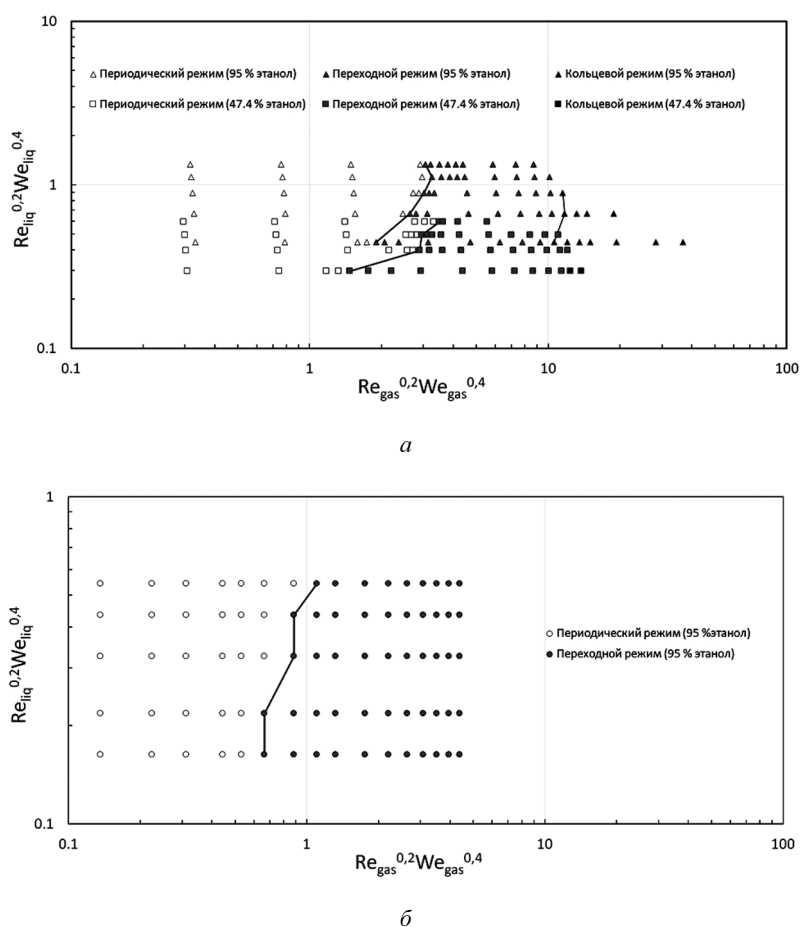


Рис. 8. Карты режимов для горизонтального расположения микроканала, построенные в безразмерных координатах [8] для каналов 269×362 мкм (а) и 200×2000 мкм (б)

(269×362 и 200×2000 мкм) границы переходов режимов не совпадают, и требуется дальнейший анализ влияния геометрии канала и смеси-теля на входе на границы режимов течения. Так, для канала с большим соотношением сторон (1:10) переход от периодического течения с удлиненными пузырями к непериодическому (переходному) происходит при меньших приведенных скоростях по газу.

Заключение

Высокоскоростная видеосъемка и лазерное сканирование позволили выделить характерные режимы течения, встречающиеся в микроканалах для течения двухфазных смесей водных растворов этанола (47.4% и 95%) и дистиллированной воды совместно с газом – азотом. Для микроканала с сечением 269×362 мкм основными режимами течения являются периодический, переходной (непериодический) и кольце-

вой; для канала 200×2000 мкм наблюдались периодический и переходной режимы течения в исследованном диапазоне скоростей. На основании высокоскоростной видеосъемки и лазерного сканирования были построены карты режимов течения в безразмерных координатах комплексов чисел Рейнольдса и Вебера $Re^{0.2}We^{0.4}$, предложенные в [8], и показано сравнение карт режимов, реализованных в прямоугольных каналах с различным отношением сторон для жидкостей с различными физическими свойствами. Безразмерный комплекс учитывает свойства жидкости и дает хорошее обобщение экспериментальных данных для одного канала. Данные для каналов с прямоугольной геометрией и различным отношением сторон не обобщаются в используемых координатах. С использованием метода ЛИФ получена динамика распределения толщины пленки жидкости для кольцевого течения смеси 95% этанола–азот. Установлена толщина пленки жидкости в центральном сечении микроканала и показано ее увеличение при прохождении волн возмущения в менисках.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

D_h – гидравлический диаметр, м;
 J – приведенная скорость, м/с;
 Q – объемный расход, м³/с;
 S' – площадь поперечного сечения, м²;
 Re – число Рейнольдса;
 We – число Вебера.
 η – динамическая вязкость, Па·с;
 σ – поверхностное натяжение, Н/м;
 ρ – плотность, кг/м³;
 ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Индексы

liq – жидкость;
 gas – газ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козулин И.А., Кузнецов В.В. Экспериментальное изучение структуры газожидкостного течения в прямоугольном мини-канале оптическими методами // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10. № 3. С. 63–69.

2. **Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Кабов О.А.** Режимы двухфазного течения в микро-и миниканалах (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. №. 3. С. 275–297. DOI: 10.1134/S0869864315030014
3. **Барткус Г.В., Кузнецов В.В.** Экспериментальное изучение детальной структуры газожидкостного течения в прямоугольном микроканале // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11. №. 1. С. 73–79.
4. **Ягоднищина А.А., Ковалев А.В., Бильский А.В.** Визуализация режимов течения несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2015. №. 1. С. 207–210.
5. **Günther A. and Jensen K.F.** Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis // Lab Chip. 2006. V. 6. P. 1487–1503. DOI: 10.1039/b609851g
6. **Козулин И.А., Кузнецов В.В.** Статистические характеристики двухфазного газожидкостного потока в вертикальном микроканале // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 6. С. 129–139. DOI: 10.1134/S0021894411060149
7. **Бояршинов Б.Ф., Федоров С.Ю.** Измерение методом LIF температуры и концентрации радикала ОН при горении водорода и этанола // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 5. С. 16–20. DOI: 10.1023/B:CESW.0000041402.12524.07
8. **Waelchli S., Rudolf von Rohr P.** Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors // Int. Jour. of Multiphase Flow. 2006. V. 32. P. 791–806. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.02.014
9. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

Experimental investigation of the influence of liquid physical properties and channel dimensions on gas-liquid flow patterns in rectangular microchannels

G.V. Bartkus^{1,2}, V.V. Kuznetsov^{1,2}

¹*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia*

²*Kutateladze Institute of Thermophysics, Novosibirsk, 630090, Russia*

e-mail: germanbartkus@gmail.com

The influence of microchannel cross section size and physical properties of liquids on the local characteristics of gas-liquid flow in a horizontal microchannel with rectangular section were investigated in this paper. Microchannels with rectangular cross-sections 269×362 and 200×2000 μm and internal T-shaped mixers for forming two-phase flow were used in the experiments. The feature of this work consists in application of liquids with various physical properties such as viscosity, surface tension, and density. The distilled water and the aqueous solutions of the ethanol with volume fractions 47.4% and 95% and gas-nitrogen were used. The flow characterization and the local film thickness measurement of the fluid inside the channel were carried out using contactless visualization methods: the high-speed imaging, the laser scanning and the laser-induced fluorescence (LIF). High-speed imaging allowed distinguishing the characteristic flow patterns obtained in the microchannels for the given gas and liquid flow rates. The characteristic flow patterns for the microchannel with cross section 269×362 μm are a periodic, a transition (non-periodic) and annular flow regimes. The periodic and the transition flow patterns were observed for the microchannel with cross-section 200×2000 μm for the given speed range. Flow patterns and their boundaries were also confirmed using the laser scanning method. Using the LIF method the dynamics of the liquid distribution along the microchannel long side (362 μm) was obtained for the annular flow of 95% ethanol-nitrogen mixture. It was found that most of the liquid flow in the meniscus, there is also a thin liquid film in the center. The liquid film thickness in the center is increased with the passage of perturbation waves on the meniscus and then decreased before the passage of a new wave. Based on the measurements made by the high-speed video and the laser scanning, flow patterns maps were plotted for the channels with different aspect ratio and liquids with different physical properties. The maps plotted in dimensionless coordinates by Waelchli demonstrate that the dimensionless complex $Re^{0.2}We^{0.4}$ takes into account the liquid properties and gives a good generalization of the experimental data, but the data for the channels with different aspect ratios are not generalized in these coordinates.

Keywords: two-phase flow, gas-liquid flow, microchannel, flow pattern map, LIF.

REFERENCES

1. **Kozilin I.A., Kuznetsov V.V.** Eksperimental'noe izuchenie struktury gazozhidkostnogo techeniya v pryamougol'nom mini-kanale opticheskimi metodami [Experimental study of structure of gas-liquid flow in rectangular minichannel by optical methods]. *Vestnik NGU. Seriya: Fizika – Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 3, pp. 63–69. In Russ.
2. **Chinnov E.A., Ron'shin F.V., Kabov O.A.** Regimes of two-phase flow in micro- and minichannels (review). *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 265–284. DOI: 10.1134/S0869864315030014
3. **Bartkus G.V., Kuznetsov V.V.** Eksperimental'noe izuchenie detal'noj struktury gazozhidkostnogo techeniya v pryamougol'nom mikrokanale [Experimental investigation of detailed structure of gas-liquid flow in rectangular microchannel]. *Vestnik NGU. Seriya: Fizika – Vestnik NSU. Series: Physics*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 73–79. In Russ.
4. **Yagodnitsyna A.A., Kovalev A.V., Bilsky A.V.** Vizualizatsiya rezhimov techeniya nesmeshivayushhikhsya zhidkostej v mikrokanale T-tipa [Flow pattern visualisation of immiscible liquid-liquid flow in a T-shaped microchannel]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii – Modern science: research, ideas, results, technology*, 2015, no. 1, pp. 207–210. In Russ.
5. **Günther A., Jensen K. F.** Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis. *Lab Chip*, 2006, vol. 6, pp. 1487–1503. DOI: 10.1039/b609851g
6. **Kozilin I.A., Kuznetsov V.V.** Statistical characteristics of two-phase gas-liquid flow in a vertical microchannel. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, vol. 52, no. 6, pp. 956–964. DOI: 10.1134/S0021894411060149
7. **Boyarshinov B.F., Fedorov S.Yu.** Measurement of temperature and concentration of OH radicals in combustion of hydrogen and ethanol by the laser-induced fluorescence technique. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2004, vol. 40, no. 5, pp. 511–515. DOI: 10.1023/B:CESW.0000041402.12524.07
8. **Waelchli S., Rudolf von Rohr P.** Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors. *Int. Jour. of Multiphase Flow*, 2006, vol. 32, pp. 791–806. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.02.014
9. **Vargaftik N.B.** *Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej* [Handbook of thermophysical properties of gas and liquids]. Moscow: Science, 1972. 720 p. In Russ.