

Г. В. Барткус, В. В. Кузнецов

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

germanbartkus@gmail.com, vladkuz@itp.nsc.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДЕТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ *

Экспериментально изучена детальная структура восходящего газожидкостного течения смеси вода-азот в вертикальном микроканале с прямоугольным сечением 420×280 мкм. При проведении экспериментов использованы методы высокоскоростной видеосъемки и лазерно-индуцированной флуоресценции. В широком диапазоне расходов газа и жидкости определены характерные режимы газожидкостного течения, измерены скорости удлиненных пузырей и локальная толщина пленки жидкости. Определена зависимость локальной толщины пленки от капиллярного числа и установлено, что закон Тейлора для прямоугольного канала не выполняется в полной мере из-за деформации межфазной поверхности и стягивания жидкости в углы канала под действием капиллярных сил.

Ключевые слова: микроканал, газожидкостное течение, лазерно-индуцированная флуоресценция.

Введение

Многофазные микросистемы на основе микроканалов открывают новые перспективы для управления процессами переноса при фазовых превращениях и химических реакциях с временным масштабом порядка нескольких миллисекунд. Они используются в высокоинтенсивных системах охлаждения, микрохимических реакторах, биологических микрочипах [1]. Это связано с тем, что большие площади поверхности фаз (при уменьшении поперечного размера канала отношение поверхности к объему канала увеличивается обратно пропорционально диаметру канала) обеспечивают эффективный тепло- и массообмен в микросистемах на основе микроканалов.

Изучение детальной структуры газожидкостных течений в микроканалах (каналах с гидравлическим диаметром много меньше капиллярной постоянной) является одной из перспективных и сложных задач. Это связано с тем, что степень влияния гравитационных, капиллярных, инерционных и вязкостных сил в каналах микронного размера коренным образом изменяется по сравнению с хорошо прогнозируемым газожидкостным течением в обычных каналах, что создает большие возможности в разнообразных технологических применениях.

Экспериментальному изучению режимов газожидкостных течений в каналах малого размера с использованием фото- и видеорегистрации посвящена, например, работа [2]. Карты режимов течения, основанные на

* Исследование выполнено в ИТ СО РАН при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-07506 А).

двулучевом лазерном сканировании потока, получены в [3; 4]. В последнее время появились работы, в которых для измерения локальной толщины пленки жидкости используются методы лазерно-индуцированной флуоресценции (micro-LIF) [5] и конфокального лазерного смещения [6], обеспечивающие высокое пространственное разрешение без внесения гидродинамических возмущений в объект исследования. Измерения средней толщины пленки жидкости в мини-канале с квадратным сечением проведены в [7] на основе обработки фотоснимков, и показано, что зависимость безразмерной толщины пленки от капиллярного числа в таком канале значительно отличается от известного закона Тейлора.

Приведенный анализ литературных источников показывает, что, несмотря на значительное число работ по изучению газожидкостных течений в каналах малого размера, детальная структура течения в микроканалах остается слабоизученной. Целью данной работы является развитие метода лазерно-индуцированной флуоресценции для диагностики структуры газожидкостного течения и его применение для определения режима течения, измерения скорости движения межфазной поверхности и локальной толщины пленки жидкости при восходящем течении смеси вода-азот в прямоугольном микроканале с сечением 420×280 мкм.

Схема экспериментальной установки

Экспериментальное исследование восходящего газожидкостного течения проводилось в вертикальном микроканале (рис. 1, а). Формирование двухфазного потока проис-

ходило в микромиксере с внутренним Т-образным входом (1) при смешении потоков воды (4) и газообразного азота (5). В экспериментах была использована бидистиллированная вода с добавлением раствора родамина 6Ж. Массовый расход газа и жидкости определялся регуляторами массового расхода Bronkhorst LIQUI-FLOW (3) и EL-FLOW F-201CV (2). Давление на входе в Т-образный смеситель измерялось образцовым манометром. При определении объемного расхода газа в заданном сечении микроканала вводилась поправка на плотность газа в этом сечении, которая определялась по давлению в соответствии со справочными данными [8]. Давление определялось с использованием линейной аппроксимации изменения давления по высоте рабочего участка. Приведенная скорость фаз определена как объемный расход, деленный на площадь сечения микроканала.

Метод лазерно-индуцированной флуоресценции

Схема метода лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) для измерения локальной толщины пленки жидкости показана на рис. 1, б. Выбор красителя родамина 6Ж обусловлен тем, что размер его молекулы составляет примерно 8×16 Å, что гарантирует отсутствие внесения гидродинамических возмущений в поток [9]. Спектры поглощения и флуоресценции родамина 6Ж лежат в диапазоне, удобном для применения в качестве источника возбуждения флуоресценции импульсного твердотельного лазера с длиной волны 532 нм (1). Для определения интенсивности переизлученного света ис-

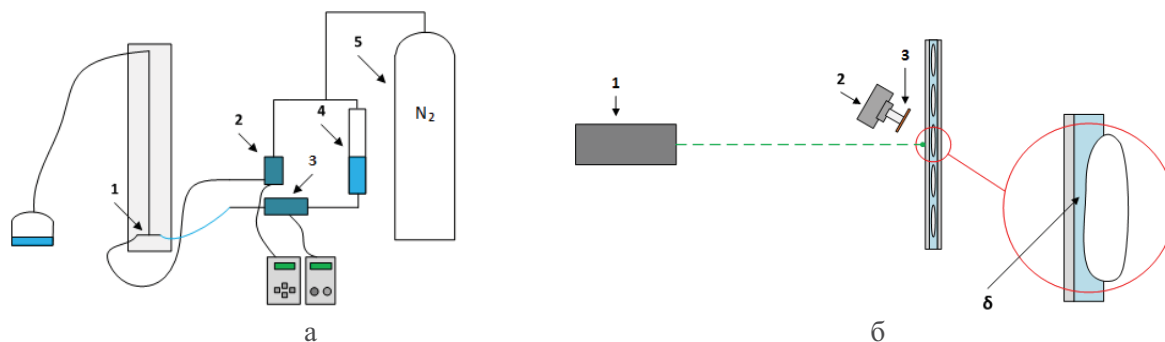


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки (а), схема измерения локальной толщины пленки методом лазерно-индуцированной флуоресценции (б)

пользуется светофильтр ОС-12 (3), который не прозрачен для длины волны лазера, и высокоскоростная видеокамера Optronis CR600x2 (2).

Известно, что для разбавленного раствора родамина бЖ интенсивность флуоресценции I в единице объема определяется произведением концентрации красителя C , интенсивности возбуждающего света I_0 , квантового выхода ϕ и коэффициента адсорбции света красителем ε [10]:

$$I = I_0 C \phi \varepsilon.$$

Для малой концентрации красителя влиянием ослабления света в растворе можно пренебречь. Калибровка метода ЛИФ проводилась на полностью затопленном канале при толщине слоя 280 мкм с использованием растворов красителя с концентрацией 0,2, 0,5, 0,7, 1, 2 и 3 мг/л. Измерения интенсивности флуоресценции проводились на расстоянии 13 см от Т-образного смесителя. Сигнал с матрицы видеокамеры обрабатывался, и определялась интенсивность флуоресценции в поперечном сечении канала в зависимости от концентрации красителя. Аппроксимируя эту зависимость на линейном участке (от 0,2 до 3 мг/л) и считая, что при нулевой концентрации интенсивность флуоресценции равна нулю, был построен калибровочный график зависимости интенсивности флуоресценции от концентрации родамина в центре канала. Учитывая, что калибровка проходила на полностью затопленном канале при температуре 20,5 °С и постоянной энергии лазерного излучения, была получена следующая зависимость интенсивности флуоресценции от толщины слоя красителя δ :

$$I = 0,149 C \delta.$$

Для течения с удлиненными пузырями измеряемая интенсивность флуоресценции определяется двумя слоями жидкости (см. рис. 1, б). Измерения интенсивности флуоресценции дальнего слоя жидкости показали, что она изменяется в зависимости от угла наклона камеры и при угле 27° не превышает 5%. Это значение угла наклона камеры использовалось в экспериментах, и погрешность определения толщины пленки жидкости методом ЛИФ составляет $\pm 0,5$ мкм.

Экспериментально определено влияние числа вспышек лазера на значение интенсивности, регистрируемой цифровой видеокамерой, и выбрано последовательное ос-

вещение слоя родамина с концентрацией 10 мг/л двумя или четырьмя вспышками, что обеспечило необходимую чувствительность измерительной системы. Это значение существенно ниже концентрации родамина 62,5 мг/л, при которой в микроканале еще имеет место линейная зависимость интенсивности флуоресценции от концентрации красителя [11].

Структура газожидкостного течения и результаты измерения локальной толщины пленки

С помощью высокоскоростной видеокамеры Optronis CR600x2 получена структура газожидкостного течения в области Т-образного смесителя и на расстоянии 13 см от смесителя. Эксперименты проведены в диапазоне приведенных скоростей жидкости от 0,024 до 0,094 м/с и газа от 0,064 до 3,21 м/с. Получено, что при восходящем газожидкостном течении в микроканале формируются три основных режима: периодическое течение с удлиненными пузырями, переходное и кольцевое течения, показанные на рис. 2.

Измерения скорости удлиненного пузыря были проведены двумя независимыми методами: высокоскоростной видеосъемки (для переходного течения) и ЛИФ при освещении потока последовательностью лазерных вспышек (для периодического течения с удлиненными пузырями). Последовательные

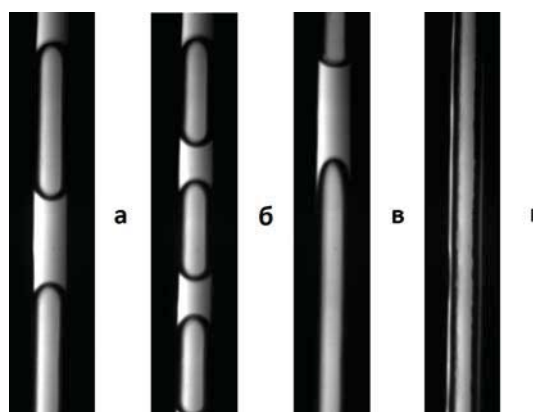


Рис. 2. Структура газожидкостного течения в микроканале 420 × 280 мкм; течение с удлиненными пузырями (а – $J_{\text{газ}} = 0,148$ м/с, $J_{\text{ж}} = 0,059$ м/с; б – $J_{\text{газ}} = 0,288$ м/с, $J_{\text{ж}} = 0,095$ м/с), переходное течение (в – $J_{\text{газ}} = 1,356$ м/с, $J_{\text{ж}} = 0,095$ м/с) и кольцевое (г – $J_{\text{газ}} = 1,925$ м/с, $J_{\text{ж}} = 0,024$ м/с)

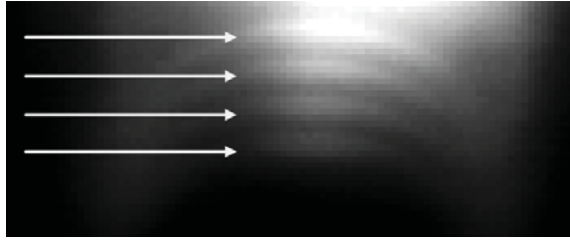


Рис. 3. Последовательные фотографии положения головки пузыря при импульсном освещении лазером при $J_{\text{газ}} = 0,06$ м/с и $J_{\text{ж}} = 0,059$ м/с

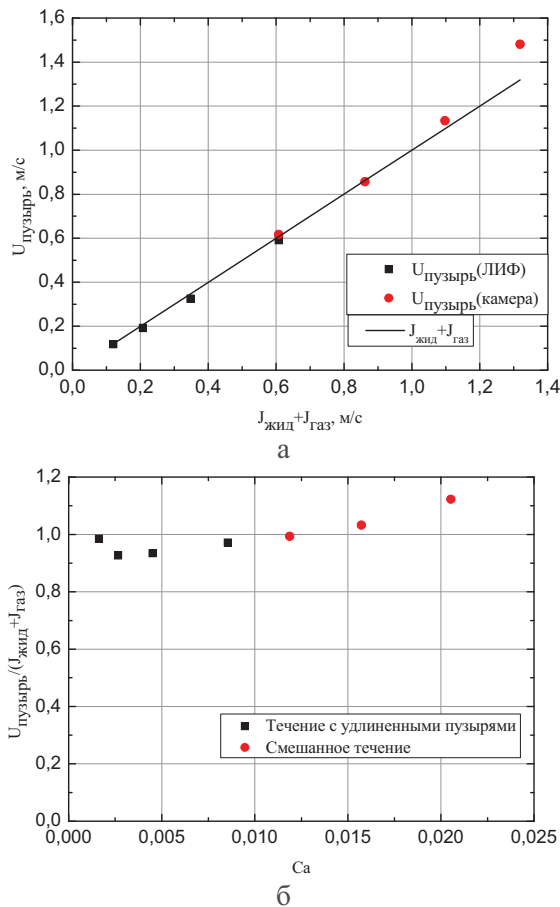


Рис. 4. Зависимость скорости пузырей от приведенной скорости смеси (а) и зависимость отношения скорости пузыря к приведенной скорости смеси от капиллярного числа (б)

фотографии положения головки пузыря при импульсном освещении лазером при $J_{\text{газ}} = 0,06$ м/с и $J_{\text{ж}} = 0,059$ м/с показаны на рис. 3. Зависимость скорости пузыря от приведенной скорости смеси приведена на рис. 4, а. Линией показан расчет для параметра распределения C , равного единице. Параметр распределения C равен отношению скоро-

сти пузыря к скорости смеси. Таким образом, полученная зависимость для скорости удлиненного пузыря при восходящем газожидкостном течении в микроканале имеет вид $U_{\text{пузырь}} = (J_{\text{газ}} + J_{\text{ж}})$, и скорость движения пузыря под действием сил гравитации в микроканале (скорость свободного всплытия пузыря) пренебрежимо мала. Зависимость параметра распределения от капиллярного числа Ca показана на рис. 4, б. Здесь представлены скорости пузырей, полученные двумя указанными ранее методами. Как видно, при увеличении капиллярного числа скорость удлиненных пузырей несколько возрастает, но величина параметра распределения остается близка к единице.

Для определения толщины пленки жидкости методом ЛИФ использовались течение с удлиненными пузырями и переходное течение при постоянной приведенной скорости жидкости $J_{\text{ж}} = 0,059$ м/с. Расход газа в экспериментах последовательно возрастал, начиная с 0,064 м/с. На рис. 5 показан характер изменения интенсивности флуоресценции при прохождении удлиненного пузыря. Рисунок 5, а показывает интенсивность флуоресценции от жидкой перемычки между газовыми пузырями. На следующих рисунках (рис. 5, б, в) показана интенсивность флуоресценции для пузырей различной длины. Две области свечения по краям канала имеют большую интенсивность и соответствуют жидким менискам в углах канала, область свечения в центре снимка преимущественно соответствует жидкой пленке на ближней стороне канала. Светлая тонкая полоса в центре снимка является артефактом изображения и была исключена при обработке снимков.

Для течений с удлиненными пузырями ($J_{\text{газ}} = 0,06, 0,148, 0,288, 0,549$ м/с) и переходных течений ($J_{\text{газ}} = 0,78, 0,99, 1,18$ м/с) определены интенсивность флуоресценции в центре канала и, с учетом калибровки, локальная толщина пленки жидкости. Зависимость безразмерной толщины пленки δ/D_h от капиллярного числа Ca показана на рис. 6, а. Здесь номера точек соответствуют различным расстояниям от начала пузыря до места измерения толщины пленки жидкости L/a , где L – расстояние от начала пузыря, a – ширина канала. На рис. 6, а приведены также данные [7], полученные для

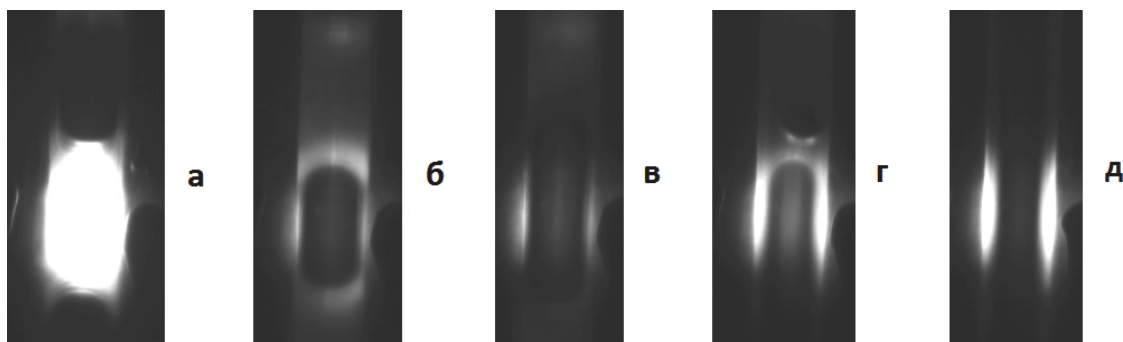


Рис. 5. Кадры, полученные методом ЛИФ ($J_{ж} = 0,059$ м/с): а – флуоресценция при попадании лазерного пучка на жидкую перемычку при $J_{газ} = 0,06$ м/с; б, в – флуоресценция при попадании лазерного пучка на газовый пузырь при $J_{газ} = 0,06$ м/с и $J_{газ} = 0,148$ м/с соответственно; г – переходной режим; д – кольцевой режим

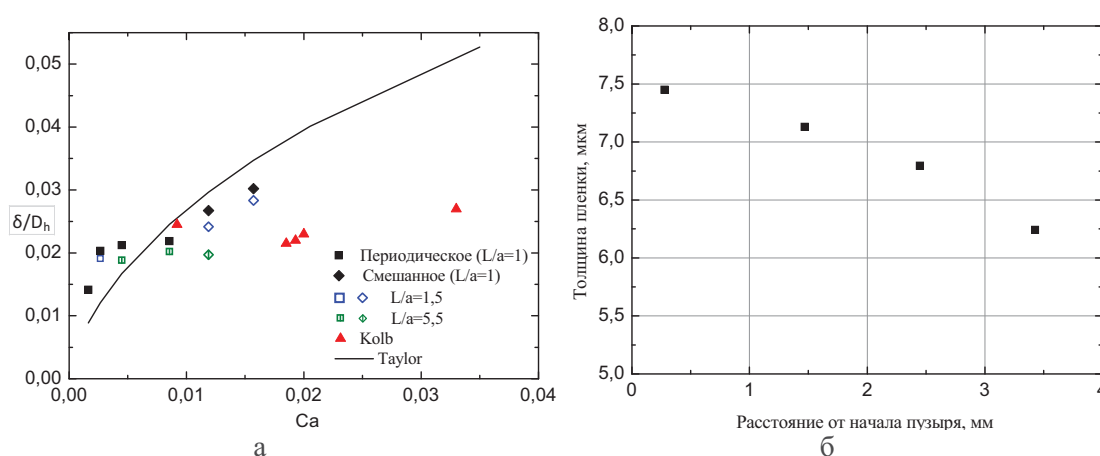


Рис. 6. Графики зависимости безразмерной толщины пленки от капиллярного числа (а) и зависимости толщины пленки пузыря от расстояния от начала пузыря (вдоль пузыря) для расходов $J_{ж} = 0,059$ м/с, $J_{газ} = 0,549$ м/с (б)

мини-канала с поперечным сечением 2×2 мм. Сплошной линией приведен расчет толщины пленки для круглого канала по закону Тейлора [12]:

$$\delta/D_h = 0,67Ca^{2/3} / (1 + 3,35Ca^{2/3}).$$

Как видно, в соответствии с законом Тейлора толщина пленки жидкости на малых расстояниях от начала пузыря ($L/a = 1$) увеличивается при увеличении капиллярного числа, но на больших расстояниях ($L/a = 5,5$) она уменьшается, и закон Тейлора для прямоугольного канала не выполняется в полной мере. Полученная зависимость локальной толщины пленки от капиллярного числа на больших расстояниях от начала пузыря согласуется с данными [6], полученными методом конфокального лазерного смещения для канала с гидравлическим диаметром 200 мкм.

Зависимость локальной толщины пленки от расстояния от начала пузыря показана на

рис. 6, б. Как видно, толщина пленки жидкости максимальна в начале пузыря и убывает с ростом расстояния от головки пузыря из-за стягивания жидкости капиллярными силами в углы канала.

Заключение

Выполнено экспериментальное изучение детальной структуры восходящего газожидкостного течения смеси вода-азот в микроканале с сечением 420×280 мкм, имеющем Т-образный вход. Методом высокоскоростной видеосъемки получены основные режимы газожидкостного течения: течение с удлиненными пузырями, переходное течение и кольцевое течение. Измерения скорости удлиненных пузырей с помощью скоростной видеосъемки и лазерно-индуцированной флуоресценции показали, что для вертикального микроканала величина отношения

скорости снаряда к приведенной скорости смеси немного возрастает с ростом капиллярного числа, но остается близкой к единице.

Определена зависимость локальной толщины пленки жидкости в центральном сечении удлиненного пузыря от величины капиллярного числа. Установлено, что для прямоугольного канала закон Тейлора не выполняется в полной мере, в особенности для больших расстояний от начала пузыря, и его можно использовать только для оценки толщины пленки вблизи начала пузыря.

Принятые обозначения

$U_{\text{пузырь}}$ – измеренная скорость пузыря, м/с

D_h – гидравлический диаметр канала, м

J – приведенная скорость, м/с

Безразмерные комплексы

$$Ca = \frac{U_{\text{пузырь}} \mu}{\sigma}$$

$$C = \frac{U_{\text{пузырь}}}{(J_{\text{ж}} + J_{\text{газ}})}$$

Греческие символы

δ – толщина пленки жидкости, м

μ – динамическая вязкость, кг/(с·м)

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м

Индексы

ж – жидкость

газ – газ

Список литературы

1. *Günther A., Jensen K. F.* Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis // *Lab Chip*. 2006. Vol. 6. P. 1487–1503.

2. *Чиннов Е. А., Кабов О. А.* Двухфазные течения в трубах и капиллярных каналах // *Теплофизика высоких температур*. 2006. Т. 44, вып. 5. С. 777–795.

3. *Revellin R., Thome J. R.* A new type of diabatic flow pattern map for boiling heat transfer in microchannels // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2007. Vol. 17. Is. 4. P. 788–796.

4. *Козулин И. А., Кузнецов В. В.* Статистические характеристики двухфазного га-

зожидкостного потока в вертикальном микроканале // *Прикладная механика и техническая физика*. 2011. Т. 52, № 6 (310). С. 129–139.

5. *Барткус Г. В., Козулин И. А., Кузнецов В. В.* Экспериментальное изучение структуры газожидкостного течения в канале компактного теплообменника оптическими методами // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2015. Т. 5, №1. С. 211–216.

6. *Fries D. M., Trachsel F., Rohr P. R. von.* Segmented gas-liquid flow characterization in rectangular microchannels // *Int. J. Multiph. Flow*. 2008. Vol. 34. P. 1108–1118.

7. *Kolb W. B., Cerro R. L.* Coating the inside of a capillary of square cross-section // *Chemical Engineering Science*. 1991. Vol. 46 (9). P. 2181–2195.

8. *Варгафтик Н.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.

9. *Бояришинов 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.

10. *Алексеев С. В., Бильский А. В., Васечкин В. Н., Дулин В. М., Маркович Д. М., Харламов С. М.* Крупномасштабные структуры в двухфазных потоках // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2008. Т. 9, вып. 1. С. 1–8.

11. *Minakov A. V., Yagodnitsyna A. A., Lobasov A. S., Rudyak V. Ya., Bilsky A. V.* Micro-Lif and Numerical Investigation of Mixing in Microchannel // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2013. Vol. 1. P. 15–27.

12. *Aussilous P., Quere D.* Quick deposition of a fluid on the wall of a tube // *Phys Fluids*. 2000. Vol. 12, № 10. P. 2367–2371.

G. V. Bartkus, V. V. Kuznetsov

*Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
1 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

germanbartkus@gmail.com, vladkuz@itp.nsc.ru

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DETAILED STRUCTURE OF GAS-LIQUID FLOW IN RECTANGULAR MICROCHANNEL

The detailed structure of upward gas-liquid flow of water and nitrogen in a vertical microchannel with a rectangular cross-section $420 \times 280 \mu\text{m}$ was experimentally investigated. The experiments were conducted using the methods of high-speed video and laser-induced fluorescence. In a wide range of flow rates the characteristic regimes of the gas-liquid flow were defined, velocity of elongated bubbles and the local thickness of the liquid film were measured. The dependence of the local film thickness on the capillary number was determined and it was found that the Taylor Law for rectangular channel is not fully implemented due to the deformation of the interface and the contraction of the liquid into the corners of the channel by capillary force.

Keywords: microchannel, gas-liquid flow, laser-induced fluorescence (LIF).