

**И. А. Козулин, 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*

*igornt@yandex.ru, vladkuz@itp.nsc.ru*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИНИ-КАНАЛЕ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ \***

С использованием метода двулучевого лазерного сканирования и высокоскоростной видеосъемки определены закономерности распределения фаз в поперечном сечении прямоугольного канала  $0,72 \times 1,50$  мм с гидравлическим диаметром порядка размера капиллярной постоянной. Изучена структура газожидкостного течения вода – азот, в том числе режимы течения и статистические характеристики двухфазного потока в области режима течения с удлиненными пузырями-снарядами, переходного течения и кольцевого режима течения при высоких скоростях газовой фазы.

*Ключевые слова:* мини-канал, газожидкостное течение, структура течения.

### **Введение**

В настоящее время наблюдается рост интереса к исследованиям в области капиллярной гидродинамики и теплообмена в микросистемах, вызванный бурным развитием электроники и медицины, а также миниатюризацией устройств в различных областях техники, например в аэрокосмической индустрии, энергетике и химической технологии [1]. Прикладные аспекты рассматриваемой проблемы связаны с перспективой применения каналов малого и сверхмалого размера для интенсификации теплопереноса в компактных энергетических устройствах.

Исследование адиабатного газожидкостного двухфазного потока в каналах с размером порядка миллиметра и меньше изучено

в большом числе работ. Одно из первых исследований режимов газожидкостного течения в каналах малого размера было выполнено D. Barnea et al. [2]. В этой работе проведена визуализация двухфазного режима течения в малых трубах диаметром от 4 до 12 мм, режимы течения классифицированы как дисперсный, кольцевой, пульсирующий и слоистый. M. Suo, P. Griffith [3] провели исследование пузырькового течения в капиллярных трубах диаметром от 1 до 1,6 мм. В работе C. A. Damianides, J. W. Westwater [4] исследовалась структура течения в каналах с гидравлическим диаметром от 1 до 5 мм, были построены карты режимов течения. В работе показано, что границы режимов, рассчитанные по модели Y. Taitel, A. E. Dukler [5], хорошо соответствуют каналу размером 5 мм, тогда как для 1 мм со-

---

\* Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

ответствие очень слабое. V. E. Nakoryakov, V. V. Kuznetsov [6] выполнили исследования режимов течения водно-воздушного потока в коаксиальном вертикальном зазоре толщиной 0,68 мм с диаметром внутреннего цилиндра 150 мм. Выделены пузырьковый, снарядный и ячеистый режимы течения с жидкими пробками. С использованием воды и газа в работе Triplett et al. [7] были проведены эксперименты с микроканалами круглого сечения с внутренним диаметром 1,1 и 1,45 мм и треугольного сечения с гидравлическим диаметром 1,09 и 1,49 мм. Обнаружены режимы течения: пузырьковый, вспененный, снарядный, снарядно-кольцевой, кольцевой. В работе [8] К. Mishima, М. Ishii развили математическую модель для предсказания режима течения для вертикальных восходящих потоков в узких прямоугольных каналах от 0,3 до 17 мм.

В работе R. Revellin, J. R. Thome [9] получены карты режимов, основанные на двухлучевом лазерном сканировании потока при кипении хладонов R134a and R245fa в одиночных трубках диаметром 0,509 и 0,79 мм. В работе Р. Ш. Абиева, И. В. Лаврецова [10] выполнено экспериментальное исследование гидродинамики снарядного течения в горизонтальном капилляре диаметром 0,92 мм на системах вода – воздух и водного раствора глицерин – воздух. Подробный обзор режимов течения в трубах и капиллярных каналах проведен в работе Е. А. Чиннова, О. А. Кабова [11].

Данная работа направлена на проведение комплексных экспериментальных исследований механизма гидродинамических процессов при тении жидкости в прямоугольном мини-канале с размером  $0,72 \times 1,50$  мм

с гидравлическим диаметром 0,97 мм. Гидравлический диаметр мини-канала порядка капиллярной постоянной. Капиллярная постоянная для воды  $\delta_c = 2,72$  мм. Определены закономерности распределения фаз с использованием метода двухлучевого лазерного сканирования потока. Режим течения фиксировался с помощью высокоскоростной видеосъемки.

### Схема экспериментальной установки

Схема экспериментального стенда для определения параметров двухфазного потока в горизонтальном мини-канале приведена на рис. 1. Для исследования в качестве жидкой фазы использовалась дистиллированная вода, в качестве газовой фазы – азот. Использование азота позволило исключить возможность растворения газа в жидкости. В экспериментальной установке газ поступал из баллона (1) через регулировочный вентиль (3) в экспериментальный участок (5). Вода поступала из бака (2), далее через термомассовый регулятор расхода жидкости LIQUI-FLOW L30 (3) в смеситель (4), расположенный внизу перед экспериментальным участком (5).

Смеситель представлял собой внешний Т-образный вход и применялся для организации двухфазного течения в мини-канале. Экспериментальный участок (5) – прямоугольный стеклянный мини-канал с размерами  $0,72 \times 1,50$  мм, с гидравлическим диаметром 0,97 мм. Канал крепился жестко на швеллере, к которому крепились оптическая система визуализации течения. На выходе

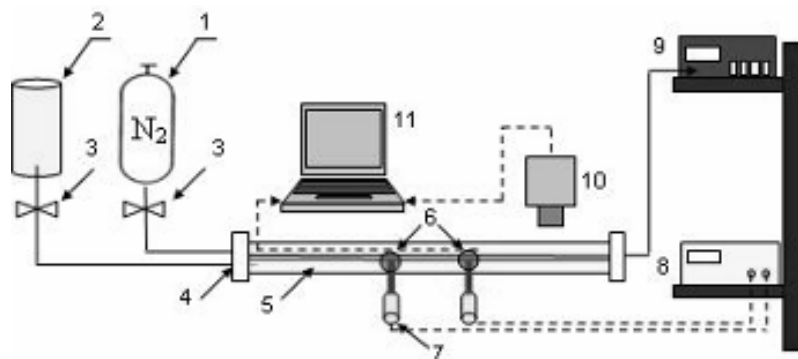


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

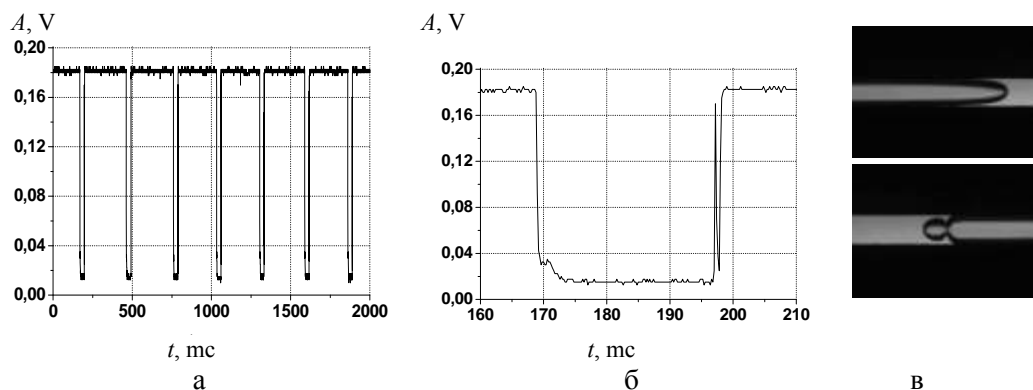


Рис. 2. Оптический сигнал с фотодиода и визуализация для режима с удлиненными пузырями-снарядами при  $J_{\text{liq}} = 0,63$  м/с,  $J_{\text{gas}} = 0,1$  м/с: а – оптический сигнал; б – передний и задний фронты газового снаряда; в – визуализация течения

из участка газожидкостная смесь откачивалась перистальтическим насосом (9).

Для исследования режимов газожидкостного течения использовался метод двойного лазерного сканирования. В данном методе два лазера (7) располагались так, что лазерные лучи освещали одну из сторон прямоугольного канала с диаметром светового пятна порядка размера канала. Расстояние между лучами менялось от 10 до 50 мм. Питание лазеров осуществлялось с помощью источника напряжения ТЕС-42 (8). Интенсивность прошедшего света измерялась с помощью фотодиодов (6), расположенных на противоположной стороне канала. Фокусировка лазерного света осуществлялась с помощью линзы, которая находилась между лазером и стеклянным каналом. С помощью координатников производилась регулировка фокуса лазерного излучения. Сигналы с фотодиодов регистрировались с помощью высокоскоростной платы АЦП (Lcard L-264) с максимальной частотой опроса по всем каналам 200 кГц и обрабатывались на компьютере (11). Запись сигналов с фотодиодов производилась в темной комнате, для исключения «шума» от ламп накаливания и дневного света. Для определения соответствия интенсивности излучения света с оптического канала на фотодиоде газовой или жидкой фазе производилась калибровка оптического сигнала. Экспериментально было установлено, что максимальный уровень сигнала с фотодиода соответствует жидкой фазе, минимальный – газовой фазе.

### Режимы течения

На основе высокоскоростной видеосъемки и двойного лазерного сканирования определены основные режимы течения. Установлено, что доминирующими режимами течения являются: течение с жидкими перемычками, стабилизированными капиллярными силами, и кольцевое течение с волнами на короткой стороне канала.

В мини-канале доминирующим режимом течения являлся периодический режим удлиненных пузырей-снарядов, который наблюдался в диапазоне приведенных скоростей жидкости  $J_{\text{liq}} = 0,08 \div 0,63$  м/с и газа  $J_{\text{gas}} = 0,04 \div 0,92$  м/с. ( $Re_{\text{liq}} = 77 \div 607$ ,  $Re_{\text{gas}} = 2,5 \div 58$ ;  $We_{\text{liq}} = 0,09 \div 5,31$ ,  $We_{\text{gas}} = 2,5 \cdot 10^{-5} \div 0,013$ ). Он характеризуется чередованием удлиненных газовых снарядов и жидких перемычек. Течение характеризуется периодичностью, и отсутствием значительного количества мелких пузырьков за снарядом. На рис. 2 представлены сигналы с оптического датчика и визуализация течения для периодического режима удлиненных пузырей-снарядов с длинной и короткой жидкой перемычкой соответственно.

В диапазоне приведенных скоростей жидкости  $J_{\text{liq}} = 0,08 \div 0,33$  м/с и газа  $J_{\text{gas}} = 0,78 \div 3,05$  м/с ( $Re_{\text{liq}} = 77 \div 318$ ,  $Re_{\text{gas}} = 50 \div 193$ ;  $We_{\text{liq}} = 0,09 \div 1,46$ ,  $We_{\text{gas}} = 9,47 \cdot 10^{-3} \div 0,15$ ) получен переходный режим (рис. 3, а). Переходный режим течения в мини-канале характеризуется непериодичностью движения удлиненных пузырей-снарядов, разру-

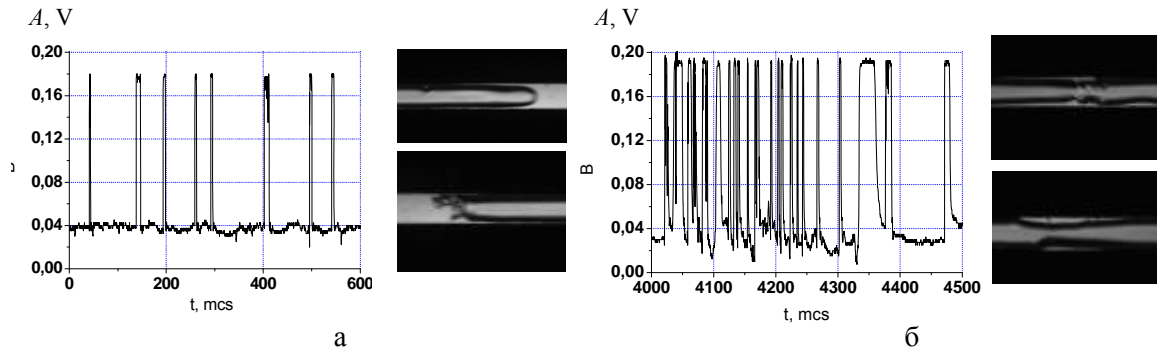


Рис. 3. Оптический сигнал с фотодиода и визуализация: а – переходный режим течения при  $J_{liq} = 0,17$  м/с,  $J_{gas} = 2,79$  м/с; б – кольцевой режим течения с крупными волнами при  $J_{liq} = 0,17$  м/с,  $J_{gas} = 5,36$  м/с

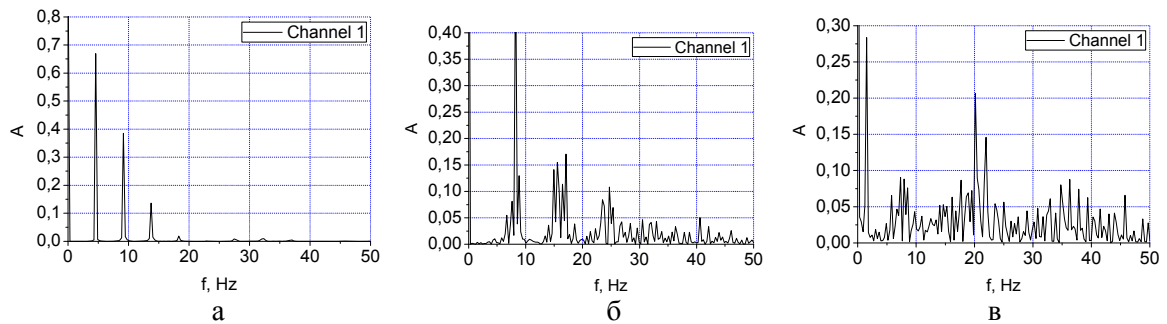


Рис. 4. Фурье-спектр: а – снарядный режим течения  $J_{liq} = 0,124$  м/с,  $J_{gas} = 0,795$  м/с; б – переходный режим течения  $J_{liq} = 0,124$  м/с,  $J_{gas} = 0,992$  м/с; в – кольцевой режим течения  $J_{liq} = 0,124$  м/с,  $J_{gas} = 3,832$  м/с

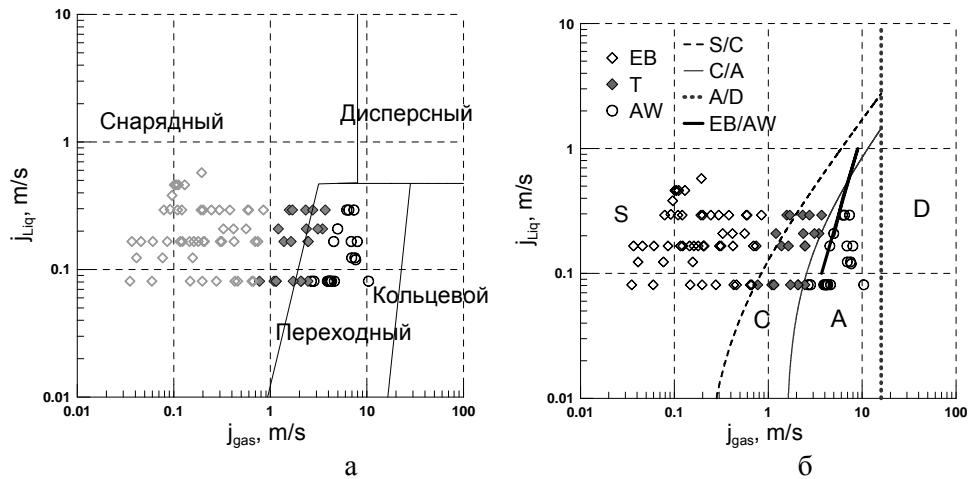


Рис. 5. Сравнение режимов течений в горизонтальном мини-канале  $0,72 \times 1,50$  мм с расчетами: а – по модели Akbar et al. [12]; б – по модифицированной модели К. Mishima, М. Ishii [8]. Режимы течения по модели: S – снарядный, С – вспененный, А – кольцевой, D – дисперсно-кольцевой

шением задней части снаряда и хаотическим поведением сигнала непосредственно за снарядом. При увеличении приведенных скоростей получен переход к кольцевому режиму с крупными волнами (рис. 3, б).

Кольцевой режим течения наблюдался в диапазоне приведенных скоростей  $J_{liq} =$

$= 0,08 \div 0,29$  м/с,  $J_{gas} = 4,5 \div 10,51$  м/с ( $Re_{liq} = 77 \div 280$ ,  $Re_{gas} = 285 \div 632$ ;  $We_{liq} = 0,09 \div 1,13$ ,  $We_{gas} = 0,32 \div 1,56$ ). Этот режим отличался от других хаотическими всплесками амплитуды интенсивности сигнала. Визуализация течения показала, что данные всплески связаны не с чередованием жидких перемычек,

а с большими волнами возмущений на межфазной поверхности.

### Фурье-спектр режимов течения

Проведен анализ Фурье-спектра режимов течения двухфазного газожидкостного течения. На рис. 4 представлены спектры для снарядного, переходного и кольцевого режимов течения. Видно, что для снарядного режима течения выделяется основная частота движения газовых перемычек (рис. 4, а). В спектре наблюдается уширение основной гармоники и добавление новых частот движения газовых перемычек для непериодического (переходного) режима течения (рис. 4, б). Для кольцевого режима с волнами наблюдается широкий спектр с многочисленными гармониками (рис. 4, в).

### Карта режимов течения

Карта режимов течения была определена на основе визуализации, статистических параметров течения и Фурье-спектра оптического сигнала. Проведено сравнение полученных границ режимов течения с моделью, предложенной в работе [12] (рис. 5, а). Видно, что линии границ режимов течения сместились в область кольцевого режима, модель достаточно хорошо предсказывает переходный режим.

Проведено сравнение экспериментальных данных с расчетом по модифицированной модели К. Mishima, М. Ishii [8] (рис. 5, б). На рис. 5: EB – точки, соответствующие режиму течения вытянутых пузырей или снарядов, T – переходный, непериодический режим, AW – кольцевой режим течения с волнами.

На рис. 5, а видно, что модель К. Mishima, М. Ishii [8] хорошо предсказывает границы перехода от снарядного режима течения к переходному, отмеченному на рисунке линией (S/C), и от переходного режима течения к кольцевому с волнами (C/A).

Темной сплошной линией (EB/AW) отмечен переход от переходного режима течения к кольцевому, согласно модели д-ра физ.-мат. наук В. В. Кузнецова [13]. Эта модель основана на предположении, что переход к кольцевому течению возникает, если касательное напряжение на межфазной поверхности достаточно велико для перемещения всей поступающей в мини-канал

жидкости вниз по потоку. Это условие может быть представлено в эквивалентной форме как условие равенства толщины пленки в снарядном режиме течения за жидкой перемычкой толщине пленки при кольцевом течении. Толщина пленки за жидкой перемычкой определялась по закону Тейлора, где основным параметром является капиллярное число:

$$\delta_{sl}/D = 0,67Ca^{2/3} / (1 + 3,35Ca^{2/3}).$$

Толщина пленки для кольцевого течения определялась согласно J. C. Asali, T. J. Hanratty [14].

Из рис. 5, б видно, что построенная граница определяет переход от непериодического снарядного режима течения к кольцевому с волнами достаточно точно. Это показывает, что на мини-масштабе доминирующим эффектом является учет капиллярных сил на межфазной поверхности.

### Статистическая обработка экспериментальных данных

На основе лазерного сканирования установлены статистические характеристики движения жидкой и газовой фаз при двух значениях расстояния от входа: при  $x_1/D = 174$  и  $x_2/D = 184$  (соответственно первый и второй оптические каналы). На рис. 6 приведены вероятности попадания скорости снаряда, его длины и длины жидкой перемычки. Гистограммы приведены для мини-канала  $1,50 \times 0,72$  мм при скоростях потока  $J_{liq} = 0,29$  м/с и  $J_{gas} = 0,78$  м/с.

Аппроксимация функции распределения скорости снарядов производилась нормальным распределением. При исследовании течения для каждого значения приведенной скорости жидкости и газа определялась дисперсия распределений при анализе оптического сигнала. Было обнаружено, что при смене режима течения со снарядного (EB) на переходный (T) наблюдается увеличение дисперсии (ширины) распределений. Связано оно с появлением разброса длин газовых и жидких перемычек в течении.

### Заключение

Экспериментально получена структура газожидкостного течения в канале с гидравлическим диаметром порядка капиллярной постоянной. Детально изучена структура

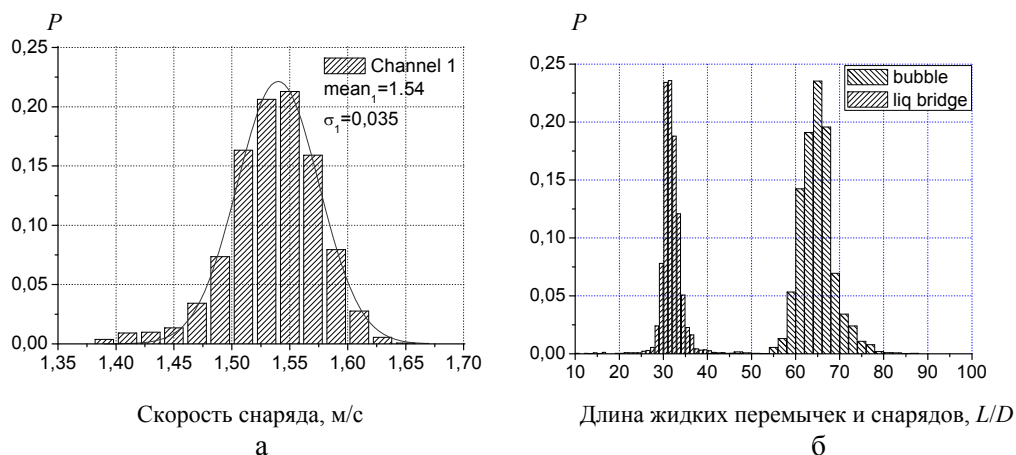


Рис. 6. Характеристики снарядного режима течения в мини-канале при скоростях потока  $J_{\text{liq}} = 0,29$  м/с и  $J_{\text{gas}} = 0,78$  м/с. Вероятность попадания в интервал гистограммы скорости снаряда (а) длины жидкой перемычки и газового снаряда (б), нормированных на гидравлический диаметр

течения с помощью двулучевого лазерного сканирования и высокоскоростной видеосъемки течения газо-жидкостного течения в прямоугольном миниканале с размерами  $1,50 \times 0,72$  мм, получены статистические характеристики потока. Статистические характеристики дают важную информацию о временной и пространственной неоднородности течения, которая необходима для объяснения закономерностей теплообмена при фазовых превращениях. В работе определены границы режимов течения, предложена модель перехода к кольцевому течению, основанная на определении условий исчезновения жидких пробок в потоке.

### Список литературы

1. Coleman J. W., Garimella S. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol. 42. Is. 15. P. 2869–2881.
2. Barnea D., Luninski Y., Taitel Y. Flow pattern in horizontal and vertical two-phase flow in small diameter pipes // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 1983. Vol. 61. Is. 5. P. 617–620.
3. Suo M., Griffith P. Two-phase flow in capillary tubes // Journal of Basic Engineering. 1964. Vol. 86. Is. 3. P. 576–582.
4. Damianides C. A., Westwater J. W. Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and in small tubes // Second UK National

Conference on Heat Transfer (2 Vols). Glasgow, 1988. P. 1257–1268.

5. Taitel Y., Dukler A. E. A model for predicting flow regime transition in horizontal and near horizontal gas liquid flow // AIChE Journal. 1976. Vol. 22. Is. 1. P. 47–55.

6. Nakoryakov V. E., Kuznetsov V. V., Vitovsky O. V. Experimental investigation of upward gas-liquid flow in vertical narrow annulus // International Journal of Multiphase Flow. 1992. Vol. 18. Is. 3. P. 313–326.

7. Triplett K. A., Ghiaasiaan S. M., Abdel-Khalik S. I. and Sadowski D. L. Gas-liquid two-phase flow in microchannels: part I: two-phase flow patterns // International Journal of Multiphase Flow. 1999. Vol. 25. Is. 3. P. 377–394.

8. Mishima K., Ishii M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1984. Vol. 27. Is. 5. P. 723–737.

9. 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.

10. Абиев Р. Ш., Лаврецов И. В. Гидродинамика снарядного течения газожидкостной системы в капиллярах: сравнение теории и эксперимента // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, вып. 3. С. 251–263.

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

12. Akbar M. K., Plummer D. A. and Ghiaasiaan S. M. On gas-liquid two-phase flow regimes in microchannels // International Journal of Multiphase Flow. 2003. Vol. 29. Is. 5. P. 855–865.

13. Kuznetsov V. V., Shamirzaev A. S., Kozulin I. A. Correlation of the Flow Patter and Refrigerant Flow Boiling Heat Transfer in Microchannel Heat Sink // Proceedings of the 6th European Thermal Sciences Conference, 4–

7 September 2012, Poitiers. – Futuroscope France, paper A3669VK. 8 p.

14. Asali J. C., Hanratty T. J., Andreussi P. Interfacial drag and film height for vertical annular flow // AIChE Journal. 1985. Vol. 31. Is. 6. P. 895–902.

*Материал поступил в редколлегию 17.07.2015*

### **I. A. Kozulin, V. V. Kuznetsov**

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

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

*igornt@yandex.ru, vladkuz@itp.nsc.ru*

### **EXPERIMENTAL STUDY STRUCTURE OF GAS-LIQUID FLOW IN RECTANGULAR MINICHANNEL BY OPTICAL METHODS**

In this paper, using method of two-beam laser scanning and high-speed video was identified patterns of distribution phases in the cross-section of the rectangular channel  $0.72 \times 1.50$  mm with hydraulic diameter of the order to capillary constant. The structure of the gas-liquid flow was studied including flow regimes and statistical characteristics of the two-phase flow in regime with elongated bubbles, transition flow and annular flow regime.

*Keywords:* minichannel, gas-liquid flow, flow structure.