УДК 621.1.016:536.42

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ЕГО СТРУКТУРЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ С Т-ОБРАЗНЫМ ВХОДОМ

Козулин И.А., Кузнецов В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-08-01140-а и гранта Правительства России № 11.G34.31.0035 ведущего ученого Захарова В.Е. (Новосибирский государственный университет).

АННОТАЦИЯ

Микроканальные системы активно применяются для охлаждения процессоров суперкомпьютеров, систем авионики, в тонких химических и медицинских технологиях. Это связано со значительным увеличением поверхности тепло и массообмена, так и с возможностью организации новых режимов течения. Работа направлена на исследование двухфазного газожидкостного течения в микроканале прямоугольного сечения с размерами 370x217 мкм, исследуется влияние Т-образного входа на организацию течения, в том числе на распределения длин газовых и жидких перемычек. Методы исследования основаны на двулучевом лазерном сканировании и видеосъемки течения, позволяющие измерить скорость перемещения снарядов в двухфазном потоке, определить статистические характеристики двухфазного потока.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с развитием микротехнологий значительный акцент был сделан на исследование гидродинамики двухфазного газожидкостного течения в микроканалах. При уменьшении характерного размера течения в микрофлюидных системах возникает широкий спектр явлений, которые не типичны на большом масштабе и слабо изучены. Двухфазные микроканальные устройства применяются в широком диапазоне инженерных приспособлений, таких как химических реакторах, энергетических установках. [1, 2]. Проведено множество работ по исследованию структуры течения в микроканалах. В работах [3, 4] исследовалось влияние соотношение размеров на структуру двухфазного потока в прямоугольных микроканалах. В работе [5] исследовались адиабатические эксперименты по исследованию эффекта геометрии на течение двухфазного потока.

В работах отмечено, что тепло и массообменные характеристики двухфазных потоков зависят от режима течения смеси, от геометрии течения и направления движения фаз. Двухфазные течения в каналах с диаметром меньше капиллярной постоянной значительно отличаются от течений в обычных трубах. Для расчета различного современного технологического оборудования необходимо знание информации о переходе к микроканальности, структуре, осредненным и пульсационным характеристикам двухфазных потоков. Для течений в микроканалах важны вопросы определения границ переходов между режимами течения, статистические параметры течений. В условиях определяющего влияния капиллярных сил на режим течения, тепло и массообмена. Примером такого нового режима течения является строго периодическое течение с контролируемым размером жидких перемычек и газовых снарядов, когда режим течения задается периодическим движением межфазной поверхности в специально разработанном смесителе жидкости и газа. Отмеченные режимы течения очень слабо изучены, несмотря на значительные усилия, прилагаемые научным сообществом в этой области.

© Козулин И.А., Кузнецов В.В.

В данной работе проводилось исследование структуры двухфазного течения вода-азот в горизонтальном прямоугольном микроканале с размерами 217x370 мкм и гидравлическим диаметром 274 мкм, то есть в канале с поперечным размером существенно меньше капиллярной постоянной, равной для воды 2.7 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки для изучения гидродинамики двухфазного газожидкостного потока представлена на рис.1. В экспериментальной установке сжатый газ (N_2) поступал из баллона (1) через цифровой регулятор расхода газа (3) в экспериментальный участок (5). Вода поступала из бака (2) через цифровой термо-массовый регулятор расхода жидкости LIQUI-FLOW L30, и далее в Т-образный смеситель, где проводилось смешивание жидкости и газа, в прямоугольный микроканал. Поперечный размер микроканала равен 217x370 мкм, длина 300 мм. На выходе из экспериментального участка газожидкостная смесь разделялась, и вода откачивалась перистальтическим насосом (9) в открытый бак.

Для исследования режимов газожидкостного течения использовался метод двойного лазерного сканирования. В данном методе два лазера (7) располагались так, что лазерные лучи освещали длинную сторону прямоугольного канала с диаметром светового пятна порядка поперечного размера канала. Расстояние между лучами равно 53 мм. Питание лазеров осуществлялось с помощью источника напряжения TEC-42 (8).

Интенсивность прошедшего света измерялась с помощью фотодиодов (6), расположенных на противоположной стороне канала.

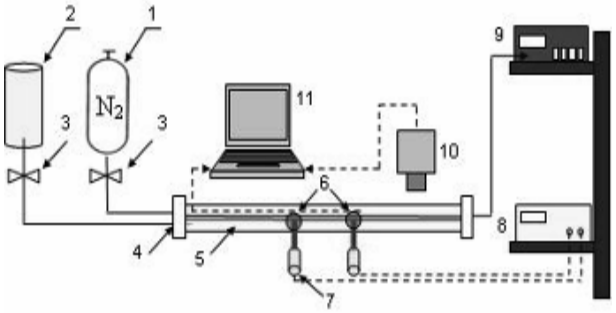

Рис.1 Схема экспериментального стенда для моделирования горизонтального газо-жидкостного течения в микроканале.

Сигналы с фотодиодов регистрировались с помощью высокоскоростной платы АЦП (Lcard L 264) и обрабатывались на компьютере (11). Оцифровка сигнала осуществлялась с частотой 5 кГц. С лицевой стороны канала, проводилась визуализация течения при помощи цифровой видеокамеры AOS X-Pri (10).

РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ

Применение метода непрерывного лазерного сканирования потока позволило детально изучить структуру двухфазного потока в микроканале прямоугольного сечения. В результате проведенных исследований были определены режимы течения. Режимы течения определялись как по визуализации течения с помощью скоростной видео камеры, так и с помощью лазерного сканирования. Получено, что основными режимами течения в микроканале являются режим течения с периодическими и непериодическими удлиненными пузырями (аналог снарядного течения) и кольцевое течение.

Периодическое течение с удлиненными пузырями наблюдается в микроканале в диапазонах приведенных скоростей и чисел Рейнольдса по жидкости J_{liq}=0.035÷0.192 м/с (Re_{liq}=10÷53) и газа J_{gas}=0.08÷0.67 м/с (Re_{gas}=2÷12). Оно характеризуется последовательным прохождением удлиненных пузырей и жидких пробок, и длина пузырей возрастает с увеличением расхода газа. На рис.2 приведены сигналы с фотодиода и визуализация течения для течения с короткой и длинной жидкой перемычкой.

Непериодическое течение с удлиненными пузырями наблюдается в диапазоне приведенных скоростей жидкости J_{liq}=0.035÷0.088 м/с (Re_{liq}=10÷24) и газа J_{gas}=0.68÷4.2 м/с (Re_{liq}=10.7÷75).

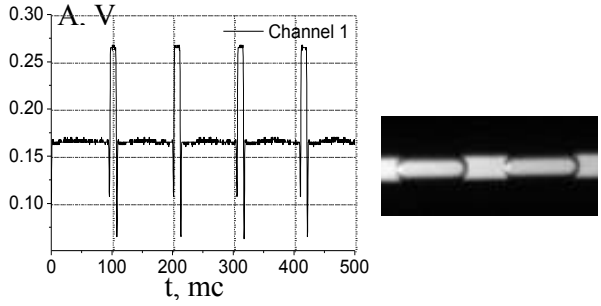

Рис.2 Оптический сигнал с фотодиода и визуализация течения для снарядного периодического режима течения J_{liq}=0.035 м/с, J_{gas}=0.17 м/с.

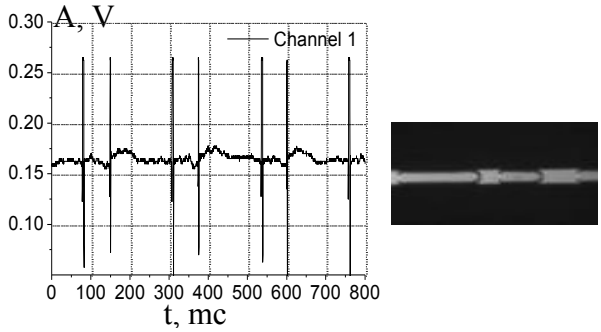

Рис.3 Оптический сигнал с фотодиода и визуализация для снарядного непериодического течения J_{liq}=0.035м/с, J_{gas}=0.75 м/с.

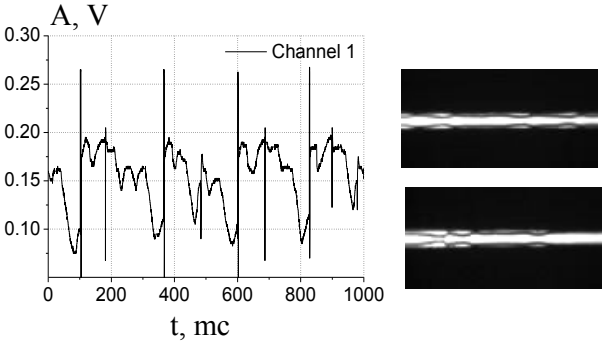

Рис.4 Оптический сигнал с фотодиода и визуализация для снарядного непериодического течения J_{liq}=0.035м/с, J_{gas}=2.49 м/с.

На рис.3 представлен сигнал с фотодиода и визуализация течения для этого режима течения. В отличие от эмульсионного течения для каналов с гидравлическим диаметром больше 1 мм, снарядный непериодический режим не характеризовался разрушением заднего фронта снаряда. Газовые снаряды, движущиеся в микроканале, имеют разную длину, при этом более короткие снаряды газа могут догонять более медленные длинные и объединяться.

С увеличением приведенной скорости газа наблюдался переход к кольцевому режиму течения. Данный режим наблюдался при скоростях жидкости J_{liq}=0.035÷0.088 м/с (Re_{liq}=10÷24) и газа J_{gas}=4.15÷20.0 м/с (Re_{gas}=74÷357), На рис.4 представлена визуализация кольцевого режима течения. Кольцевое течение характеризуется тем, что газовое ядро движется в центре канала, жидкость при этом течет в виде устойчивой волновой пленки по стенкам микроканала.

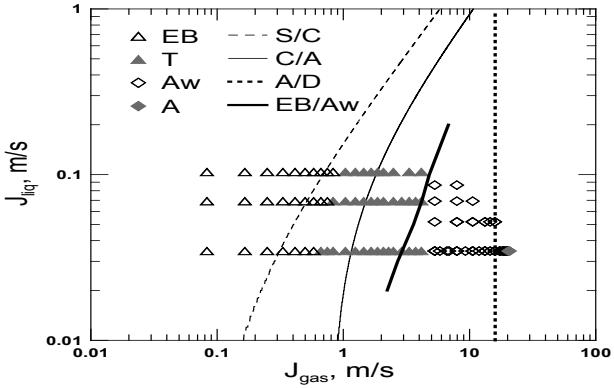

Рис.5 Карта режимов течения для микроканала 370x217 мкм.

На рис.5 приведена карта режимов течения для микроканала 217x370 мкм. Проведено сравнение режимов с модифицированной моделью Mishima K., Ishii M., которая предложена в работе [6]. При сравнении видно, что модель не удовлетворительно описывает границы режимов течения в микроканале. Сравнение карты режимов течения с расчетами по модели Mishima-Ishii показывает, что предсказания картины течения этой модели далеки от экспериментальных наблюдений. Это связано с тем, что в работе не учитывается эффекты стеснения и доминирования капиллярных сил в каналах с поперечным размером существенно меньше капиллярной постоянной.

На основе статистических характеристик потока определены границы режимов течения, предложена модель перехода к кольцевому течению, основанная на определении условий исчезновения жидких пробок в потоке. Данная граница отмечена на карте жирной линией.

ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ

Проведено измерение градиентов давления в горизонтальном микроканале 217x370 мкм и соотношением сторон 0,729. Число Пуазейля для микроканала составило 15,08. В микроканале измерялся перепад давления для однофазного и двухфазного течения до 30 кПа. Ограничение связано с возможностью разрушения микроканала при больших перепадах давления.

На рис.6 представлена зависимость фактора трения от числа Рейнольдса для однофазного и двухфазного течения. Число Рейнольдса построено по гомогенной модели Dukler et. al. [7]. С увеличением приведенной скорости потока данные для двухфазного потока при кольцевом режиме течения стремятся к расчету по гомогенной модели.

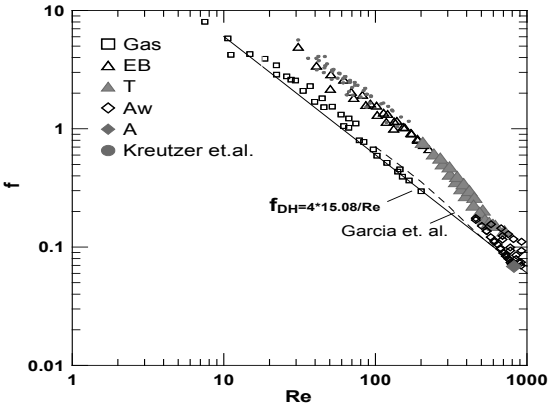

Рис.6 Коэффициент сопротивления для однофазного и двухфазного режимов течения.

ВЫВОДЫ

В данной работе с использованием двухлучевого лазерного сканирования и скоростной видеосъемки получены закономерности капиллярной гидродинамики газо-жидкостного течения в прямоугольном микроканале с размерами 217x370 мкм, получены их статистические характеристики.

На основе статистических характеристик потока и визуализации течения определены границы режимов течения, предложена модель перехода к кольцевому течению, основанная на определении условий исчезновения жидких пробок в потоке.

Выделены режимы течения со сверхтонкой пленкой жидкости на стенках каналов.

Обсуждены подходы к моделированию кольцевого течения в условиях определяющего влияния капиллярных сил на режим течения и теплообмена, проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Изучено влияние Т-образного входа на структуру течения двухфазного потока, в том числе влияние на распределение длин газовых и жидких перемычек.

Измерены градиенты давления в микроканале и предложен метод их расчета для однофазного и двухфазного потока. Для двухфазного течения экспериментальные данные были сравнены с существующими моделями. Было установлено, что работа Kreutzer M.T. et. al. [7], где учитывается перепад давления на каждом газовом снаряде, наилучшим образом предсказывает перепад давления в снарядном режиме течения.

Статистические характеристики потока дают важную информацию о временной и пространственной неоднородности течения, которая необходима для объяснения закономерностей теплообмена при фазовых превращениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coleman J.W., Garimella S. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1999. – Vol. 42. – N 15. – P. 2869-2881.
2. Qu W., and Mudawar I. Thermal design and methodology for high-heat-flux single phase and two-phase microchannel heat sinks // Proceedings of the Intersocietal Conference on Thermal Phenomena in Electronics Systems. – 2002. – P. 347-359.
3. Choi C.W. Yu D.I., Kim M.H. Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios: part 1 – flow pattern, pressure drop and void fraction //

Int. J. of Heat and Mass Trans. –2011. – Vol. 54. – P. 616-624.
4. Chung P.M.-Y., Kawaji M. The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels // Int. J. Multiphase Flow. – 2004. – Vol.30. – N 7-8. – P.735–761.
5. Chung P. M.-Y., Kawaji M., Kawahara A., and Shibata Y. Two-phase flow through square and circular microchannels – effects of channel geometry // J. Fluid. Eng. – 2004. – Vol. 126. – N 4. – P.546–552.
6. Mishima K. and Ishii M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes // Int. J. Heat Mass Trans. – 1984. – Vol. 27. – N 5. – P.723–737.
7. Dukler A. E., Wicks M., and Cleveland R. G. Frictional pressure drop in two-phase flow // AIChE J. – 1964. – Vol.10. – N 1. – P.38-51.
8. Kreutzer M.T., Kapteijn F., Moulijn J.A., Kleijn C.R., Heiszwolf J.J. Inertial and interfacial effects on pressure drop of Taylor flow in capillaries // AIChE J. – 2005. – Vol. 51. – N 9. – P. 2428–2440.