

УДК 532.529.5

Локальные характеристики восходящего пузырькового течения в кольцевом канале*

О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: kurdumov@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования пузырькового газожидкостного течения в вертикальном кольцевом канале. Электрохимическим методом проведено измерение среднего и пульсационного напряжений трения на обеих стенках канала и распределения локального газосодержания. Показано, что с ростом расходного газосодержания происходит значительное возрастание величины напряжения трения на стенках, причем этот эффект становится сильнее при уменьшении расходной скорости жидкости. Присутствие газовой фазы оказывает более существенное влияние на напряжение трения на внутренней стенке. Относительная интенсивность пульсаций трения одинаково возрастает на обеих стенках канала.

Ключевые слова: пузырьковое течение, кольцевой канал, газосодержание, трение на стенке, электрохимический метод.

К числу основных режимов движения газожидкостной смеси в вертикальной трубе относятся пузырьковый, снарядный, дисперсно-кольцевой. Течение двухфазной смеси в пузырьковом режиме происходит при малых значениях объемного газосодержания. Структура пузырькового течения зависит как от ориентации канала и направления течения, так и от формы канала. Наибольшее число экспериментальных исследований пузырькового течения выполнены в вертикальной круглой трубе как в восходящем [1–3], так и в опускном [4–6] режимах течения. В то же время большой научный и практический интерес представляет течение в каналах более сложной геометрии, в частности, в кольцевом канале. Количество экспериментальных исследований пузырькового течения в кольцевом канале ограничено, к их числу относятся работы [7–9], основное внимание в них уделено изучению характеристик газовой фазы (локальное газосодержание, скорость пузырей, удельная поверхность раздела фаз). Измерение распределения скорости жидкой фазы, проведенное в работе [7], не охватывает область течения вблизи стенок, важную для процессов тепломассопереноса.

Задачей настоящей работы явилось экспериментальное исследование локальных характеристик восходящего пузырькового течения в кольцевом канале. С помощью электродиффузионного метода изучены распределения среднего и пульсационного трения на стенках канала и профили локального газосодержания.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 07-08-00405).

Эксперименты проводились на установке, представляющей собой замкнутый по жидкости циркуляционный контур. Рабочим участком контура (рис. 1) является вертикальная труба из оргстекла 1 внутренним диаметром 42,2 мм и длиной 3,2 м. В эту трубу вставлена центральная труба 2 с внешним диаметром 20 мм и длиной 2,9 м. Восходящее течение газожидкостной смеси 3 происходило в кольцевом зазоре, образованном этими трубами.

Жидкость из бака подавалась в рабочий участок через регулирующие вентили, расход измерялся с помощью калиброванной расходомерной диафрагмы. Перепад давления на диафрагме измерялся с помощью дифференциального манометра Метран–100 ДД с пределом измерений 63 кПа.

На входе основной трубы (диаметром 42,2 мм) была установлена форкамера, в которой помещался инжектор для ввода газовой фазы. Воздух вводился в поток жидкости через 36 капилляров внутренним диаметром 0,3 мм. Расход газа измерялся с помощью расходомерной газовой диафрагмы, перепад давления на которой определялся дифференциальным датчиком давления типа МРХ 2050. Статическое давление газа перед диафрагмой определялось датчиком давления типа КРТ–5. При измерениях избыточное давление перед газовой диафрагмой поддерживалось постоянным на уровне 100 кПа. В связи с широким диапазоном изменения расхода газа использовались сменные газовые диафрагмы с диаметром отверстий 0,6, 0,7 и 0,8 мм.

Напряжение трения на стенке измерялось электрохимическим методом [4, 6], в качестве рабочей жидкости — раствор, содержащий ферри- и ферроцианид калия и углекислый натрий в дистиллированной воде. Во время экспериментов рабочая жидкость термостатировалась на уровне 25 °С.

Датчики трения 4 и 5 (см. рис. 1) изготавливались из платиновых пластинок сечением 0,1×0,9 и 0,03×0,2 мм. Они клеивались в стенки трубы и шлифовались заподлицо с ней. Два датчика были заделаны во внутреннюю трубу (диаметром 20 мм) на расстоянии 1,9 м от нижнего конца, два других — размещены в измерительный блок, выполненный из оргстекла. Блок имел отверстие диаметром 42,2 мм и устанавливался как секция основной трубы на расстоянии 2,6 м от ее нижнего конца. Внутренняя труба была повернута таким образом, что все датчики трения располагались друг против друга в одном горизонтальном сечении. В измерительном блоке также помещался датчик для измерения локального газосодержания 6. Этот датчик представлял собой платиновую проволоку диаметром 50 мкм, вваренную в стеклянный капилляр диаметром около 100 мкм. Рабочий торец датчика шлифовался для придания ему конической формы. Датчик клеивался в державку, сделанную из металлической трубки диаметром 3 мм. Перемещение данного датчика в радиальном направлении производилось с помощью координатного механизма. Датчик газосодержания использовался в режиме датчика электропроводности. На него подавалось переменное напряжение частотой 100 кГц. Его ток усиливался и выпрямлялся. Низкочастотная огибающая этого сигнала имела два уровня, соответствующие нахождению чувствительного элемента датчика в жидкой и газовой фазах. Сигнал этого датчика использовался для определения локального газосодержания α .

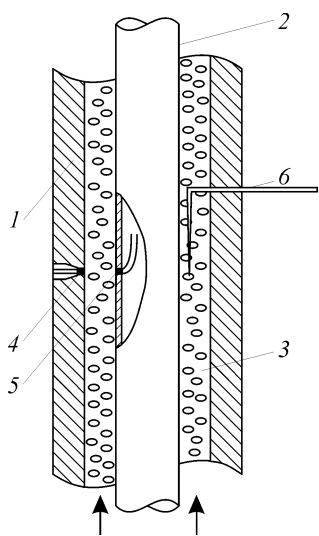


Рис. 1. Схема рабочего участка.

Рис. 2. Распределение локального газосодержания по сечению кольцевого канала.

$$\beta = 0,047 (1), 0,065 (2), 0,091 (3), 0,103 (4), 0,127 (5)$$

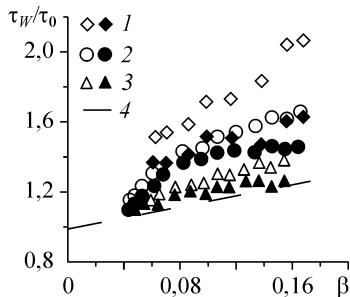
Калибровка датчиков трения проводилась при однофазном течении жидкости в кольцевом канале. Полученные калибровочные зависимости использовались затем в измерениях в двухфазном потоке.

В измерительном блоке было просверлено отверстие для регистрации статического давления жидкости. Измерение давления во время эксперимента производилось с помощью датчика давления типа Метран–100 ДД с пределом измерения 40 кПа.

Эксперименты проводились при скорости жидкости $V_L = 0,4, 0,6$ и $0,8$ м/с при различных значениях расходного объемного газосодержания β . При определении расходного объемного газосодержания вносилась поправка на статическое давление в рабочем участке кольцевого канала. В процессе экспериментов производилась запись реализаций всех датчиков трения. Кроме этого, записывались выходные напряжения дифференциальных датчиков давления на жидкостной и газовой расходомерных диафрагмах, а также входные напряжения датчиков статического давления газа и жидкости. Наряду с этим записывались показания датчика температуры жидкости. Все первичные данные записывались на жесткий диск компьютера для хранения и дальнейшей обработки.

Характерные распределения локального газосодержания приведены на рис. 2 для $V_L = 0,6$ м/с. Координата y отсчитывалась от стенки внутренней трубы. Значение $y = 11,1$ мм соответствует стенке внешней трубы. Распределения локального газосодержания имеют максимум в центральной части кольцевого канала, примерно посередине между обеими стенками. Аналогичный вид имеют распределения локального газосодержания для других приведенных скоростей жидкости. В проведенных экспериментах не отмечалось повышенной концентрации газовой фазы вблизи какой-либо из стенок кольцевого канала. Пристенные пики газосодержания зафиксированы в восходящем пузырьковом течении в круглых трубах [1–3]. Причиной отсутствия таких пиков в проведенных экспериментах в кольцевом канале может быть соотношение среднего размера газовых включений и ширины канала. Средний диаметр газовых пузырей зависел от расходных параметров фаз и достигал величины 3–5 мм, что соизмеримо с расстоянием между стенками кольцевого канала (11,1 мм). Получение газожидкостной смеси с меньшим средним размером пузырей было невозможно из-за процессов коагуляции и дробления, которые приводили к образованию некоего равновесного распределения пузырей по размерам.

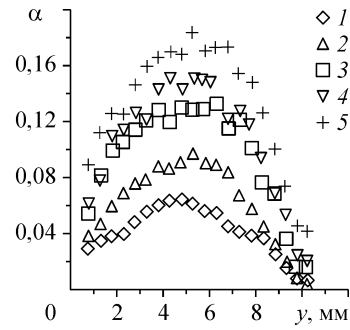
Результаты измерений среднего по времени напряжения трения на стенках канала представлены на рис. 3. По оси ординат отложено отношение напряжения



трения на стенке в двухфазном потоке τ_w к соответствующему значению в однофазном потоке τ_0 . Светлые точки соответствуют стенке внутренней трубы, темные — стенке наружной трубы. С увеличением расходного газосодержания

Рис. 3. Зависимость среднего трения на стенке от расходного газосодержания.

$$V_L = 0,4 (1), 0,6 (2), 0,8 (3) \text{ м/с, расчет по формуле (1)–(4).}$$



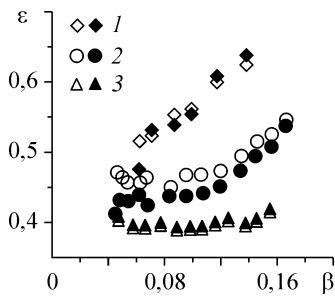


Рис. 4. Зависимость относительной интенсивности пульсаций трения от расходного газосодержания.
 $V_L = 0,4$ (1), $0,6$ (2), $0,8$ (3) м/с.

происходит рост относительного трения на обеих стенках кольцевого канала. На величину относительного трения оказывает существенное влияние приведенная скорость жидкости, с уменьшением которой значения τ_w/τ_0 возрастают. Аналогичный эффект отмечен в восходящем пузырьковом течении в круглой трубе [2]. Следует отметить, что рост относительного трения является более существенным для внутренней трубы, чем для внешней. Для сравнения на графике пунктирной линией приведена зависимость Арманда [10]

$$\tau_w/\tau_0 = (1 - 0,833 \beta)^{-1,53}. \quad (1)$$

Различие в величинах среднего трения на обеих стенках связано с неравномерным распределением газовой фазы по сечению канала.

На рис. 4 приведены значения относительной интенсивности пульсаций трения ε в зависимости от расходного газосодержания. Имеет место существенный рост пульсаций с увеличением β . Интенсивность пульсаций трения также существенно зависит от приведенной скорости жидкости. При $V_L = 0,4$ м/с относительная интенсивность пульсаций достигает значений $0,7-0,8$, что свидетельствует о сильном возмущающем воздействии пузырей газа. При малых расходных газосодержаниях значения ε приближаются к уровню, соответствующему развитому турбулентному однофазному течению в трубе. Поведение относительной интенсивности пульсаций является подобным как для внутренней, так и для внешней трубы. Следует отметить, что даже при минимальном значении скорости жидкости $V_L = 0,4$ м/с число Рейнольдса, построенное по эквивалентному диаметру кольцевого канала (22,2 мм), равнялось более 10000, то есть течение было развитым турбулентным.

Характерные временные реализации мгновенного напряжения трения на стенках в различных режимах приведены на рис. 5. Эти реализации получены путем линейаризации сигналов электрохимических датчиков трения с учетом измеренных калибровочных зависимостей. Реализации напряжения трения на стенке в двухфазном потоке существенно отличаются от реализаций в однофазном потоке

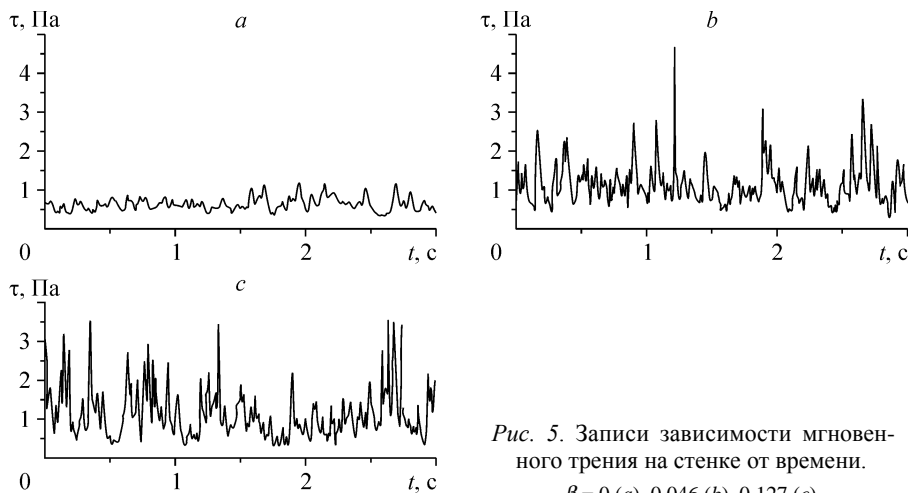


Рис. 5. Записи зависимости мгновенного трения на стенке от времени.
 $\beta = 0$ (a), $0,046$ (b), $0,127$ (c).

(см. рис. 5, a , $\beta = 0$). В двухфазном потоке (см. рис. 5, b , c , $\beta = 0,046, 0,127$ соответственно) происходит значительное увеличение интенсивности пульсаций трения, которые становятся более высокочастотными. При малых скоростях жидкости и больших расходных газосодержаниях наблюдаются выбросы, существенно превышающие среднее значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Serizawa A., Kataoka I., Mishiohi I. Turbulent structure of air-water bubbly flow // Inter. J. Multiphase Flow. 1975. Vol. 2. P. 221–246.
2. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Burdukov A.P., Odnoral V.P. Local characteristics of upward gas-liquid flows // Inter. J. Multiphase Flow. 1981. Vol. 7. P. 63–81.
3. Liu T.J., Bankoff S.G. Structure of air-water bubbly flow in a vertical pipe // Inter. J. Heat Mass Transfer. 1993. Vol. 36. P. 1061–1072.
4. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly gas-liquid flow in a vertical pipe // Inter. J. Multiphase Flow. 1999. Vol. 23. P. 109–138.
5. Goda H., Hibiki T., Kim S., Ishii M., Uhle J. Drift-flux model for downward two-phase flow // Inter. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. P. 4835–4844.
6. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Богословцев Г.В. Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускающего пузырькового течения // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 4. С. 637–643.
7. Hibiki T., Situ R., Mi Y., Ishii M. Experimental study of interfacial air transport in vertical bubbly two-phase flow in an annulus // Inter. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. P. 427–441.
8. Hibiki T., Situ R., Mi Y., Ishii M. Local flow measurements of vertical upward bubbly flow in an annulus // Inter. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. P. 1479–1496.
9. Situ R., Hibiki T., Sun X., Mi Y., Ishii M. Flow structure of subcooled boiling flow in an internally heated annulus // Inter. J. Heat Mass Transfer. 2004. Vol. 47. P. 5351–5364.
10. Арманд А.А. Сопротивление при движении газожидкостного потока по горизонтальным трубам // Изв. ВТИ. 1946. № 1. С. 16–23.

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2010 г.