

УДК 532.529.5

Трение на стенке при движении газовых снарядов в кольцевом канале*

О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов

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

E-mail: kashinsky@itp.nsc.ru, kurdumov@itp.nsc.ru

Проведено исследование течения при движении одиночных газовых снарядов в кольцевом канале. С помощью электродиффузионного метода выполнено измерение касательного напряжения на обеих стенках кольцевого канала. Приведены осредненные распределения напряжения трения по длине канала в моменты прохождения газового снаряда для различных режимов. Показано существенное различие в значениях трения на внутренней и внешней стенках канала.

Ключевые слова: снарядное течение, кольцевой канал, эксперимент.

Одним из основных режимов течения газожидкостных смесей в трубах является снарядный режим. В случае движения в круглых трубах газовые снаряды имеют классическую форму пузырей Тейлора. Изучению характеристик снарядного течения в трубах посвящено огромное количество работ, обзор которых приведен, например, в публикации [1]. Для каналов другой формы, в частности, кольцевого канала, известно довольно ограниченное количество исследований снарядного режима течения. В работе [2] проводилось измерение перепада давления в различных режимах газожидкостного течения в каналах различной геометрии, включая кольцевой. Был сделан вывод, что при гидравлическом диаметре некруглого канала более 10 мм различия в границах параметров перехода между режимами течения отсутствуют. Детальное исследование движения газовых снарядов в кольцевом канале проводилось в работе [3]. Было показано, что в вертикальном кольцевом канале газовые снаряды имеют асимметричный вид и никогда не занимают все поперечное сечение канала. В отличие от круглой трубы, пузыри здесь имеют эллиптическую форму, что приводит к более высокой скорости всплытия по сравнению с круглой трубой. В работе [4] приведена карта режимов течения двухфазной смеси в кольцевом канале. Проводилось измерение объемного газосодержания и были получены корреляции для газосодержания и скорости всплытия газовых снарядов. В исследовании [5] был проведен анализ переходных режимов течения в кольцевом канале. Идентификация режимов течения выполнялась на основе анализа сигнала датчиков электропроводности, расположенных в различных точках канала. Работа [6] посвящалась исследованию различных режимов течения в кольцевом канале, включая снарядный.

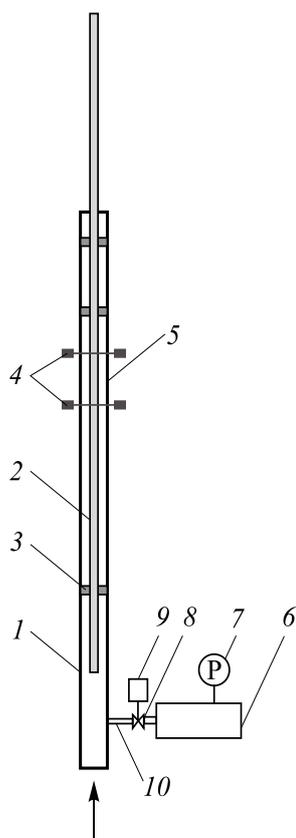
* Работа выполнена в рамках госконтракта с ИТ СО РАН.

Было проведено определение плотности межфазной границы и получены корреляции для скорости дрейфа.

Во всех перечисленных работах основное внимание уделялось характеристикам газовой фазы двухфазного течения. В то же время в них отсутствуют измерения характеристик жидкой фазы при прохождении газовых снарядов в кольцевом канале. Гидродинамика жидкой фазы в снарядном течении в круглой трубе исследовалась в работах [7–9] с использованием электродиффузионного метода. Аналогичные исследования в кольцевом канале отсутствуют.

В задачу настоящей работы входит исследование напряжения трения на стенках при прохождении одиночных газовых снарядов в вертикальном кольцевом канале. Эксперименты проводились на установке, представляющей собой замкнутый по жидкости гидродинамический контур. Жидкость из основного бака подавалась в рабочий участок. Расход жидкости регулировался системой вентиля. Измерение расхода выполнялось расходомерными диафрагмами, перепад давления на которых измерялся с помощью датчика дифференциального давления типа Метран-100. В качестве рабочей жидкости использовался раствор ферри- ($K_3Fe(CN)_6$) и ферроцианида ($K_4Fe(CN)_6$) калия в концентрации 3,3 и 4,2 г/л с углекислым натрием (Na_2CO_3) в концентрации 26 г/л в дистиллированной воде. Таким образом, общее содержание солей в растворе составляло 33,5 г/л или 3,35 %.

Температура рабочей жидкости поддерживалась на уровне 30 °С с помощью системы термостатирования. Схема рабочего участка приведена на рис. 1. Рабочий участок представлял собой вертикальную трубу из оргстекла 1 с внутренним диаметром 32 мм, составленную из нескольких секций. Для экспериментов в кольцевом канале внутри этой



трубы помещалась труба 2 с внешним диаметром 10 мм. Для обеспечения соосности обеих труб использовались центрирующие решетки 3. Подача газа в рабочий участок производилась через отверстие диаметром 6 мм. Газ подавался из сосуда 6 емкостью 1 л, в котором поддерживалось избыточное давление 200 кПа. Давление контролировалось манометром 7. На выходе этого сосуда устанавливался быстродействующий электрический клапан 8, который управлялся блоком 9. Участок капиллярной трубки 10 использовался для ограничения расхода газа при впрыске в канал. Объем впрыскиваемого газа регулировался путем изменения длительности электрического импульса, подаваемого на клапан. В представленной работе длительность импульса составляла 300 мс, что соответствует длине газового снаряда в кольцевом канале 95 ± 5 мм.

Для измерения трения на стенках кольцевого канала использовались два электродиффузионных датчика, вмонтированных во внешнюю и внутреннюю трубы. Датчики имели размер в направлении течения 0,05 мм и были расположены в одном поперечном сечении трубы на одном радиусе. Положение датчиков 5 также указано на рис. 1. Калибровка датчиков проводилась при течении жидкости в кольцевом канале.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — рабочий участок, 2 — внутренняя труба, 3 — центрирующие решетки, 4 — конический блок, 5 — датчики, 6 — сосуд, 7 — манометр, 8 — клапан, 9 — блок управления, 10 — участок капиллярной трубки.

При этом напряжение трения на стенках определялось по расходу жидкости по формуле Блазиуса. Для фиксации моментов прохождения снарядов через измерительное сечение использовались два оптических блока 4. Уровень выходного сигнала блока резко изменялся при прохождении в данном сечении границы раздела фаз. Эксперименты проводились как в круглой трубе, так и в кольцевом канале. Система подачи газа была одинаковой в обоих случаях. Эксперименты проводились как при нулевом расходе жидкости ($V_L = 0$ м/с), так и при наличии восходящего потока.

Характерные фотографии газовых снарядов в кольцевом канале приведены на рис. 2*a*. В случае круглой трубы снаряды имеют форму пузырей Тейлора и являются осесимметричными. В случае кольцевого канала форма снаряда существенно иная. Газовый снаряд как бы оборачивается вокруг центральной трубы, но он никогда не занимает всю окружность кольцевого зазора. Схематическое поперечное сечение снаряда в кольцевом канале представлено на рис. 2*b*. Различаются две области: область жидкой перемычки А, в которой имеется мостик жидкости между смежными границами газового снаряда, и область жидкой пленки В (как вокруг пузыря Тейлора). Если газовый снаряд формируется в круглой трубе, то первоначально он имеет форму пузыря Тейлора, но его форма резко меняется при «накаливании» на центральную трубу. Ширина области жидкой перемычки в кольцевом канале существенно меньше, чем область газового снаряда. В процессе движения газового снаряда вдоль канала происходит вращение всей структуры, поэтому угловая координата перемычки постоянно меняется. Авторами были проведены записи мгновенного трения на обеих стенках кольцевого канала для различных скоростей жидкости, которые выполнялись только для положения В относительно формы снаряда (рис. 2).

Характерные записи мгновенного трения на стенке τ_w при прохождении газовых снарядов в круглой трубе приведены на рис. 3. Поведение трения на стенке полностью аналогично приведенному в работе [9]. В момент прохождения газового снаряда происходит резкое возрастание мгновенного трения, которое соответствует ускоряющейся пленке жидкости, обтекающей газовый снаряд. Значения трения в этой области для различных снарядов совпадают. В области за снарядом наблюдаются значительные пульсации трения, которые затухают по мере удаления от снаряда. Как можно видеть из приведенных графиков, трение в этой области имеет нерегулярную структуру.

На рис. 4 приведены характерные записи мгновенного трения в кольцевом канале как для внешней, так и для внутренней его стенок при прохождении в нем газовых снарядов. Поведение трения на внешней стенке кольцевого канала аналогично его поведению в круглой трубе. В момент прохождения газового снаряда происходит значительное возрастание трения, что свидетельствует о стекании пленки по внешней стенке. Поведение

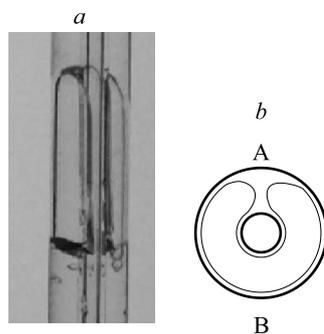


Рис. 2. Форма снаряда в кольцевом канале. *a* — снимок, *b* — схема поперечного сечения.

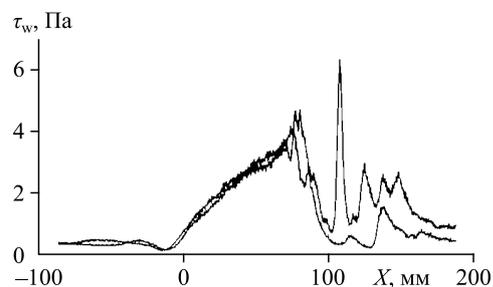


Рис. 3. Записи мгновенного трения в круглой трубе.

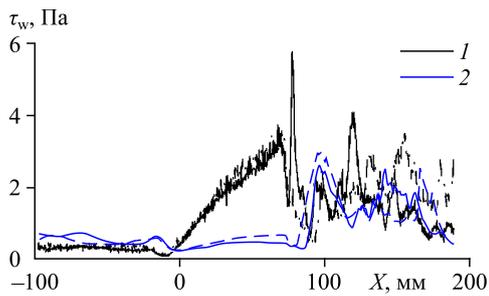


Рис. 4. Записи трения в кольцевом канале при $V_L = 0,3$ м/с.

1 и 2 — внешняя и внутренняя стенки соответственно.

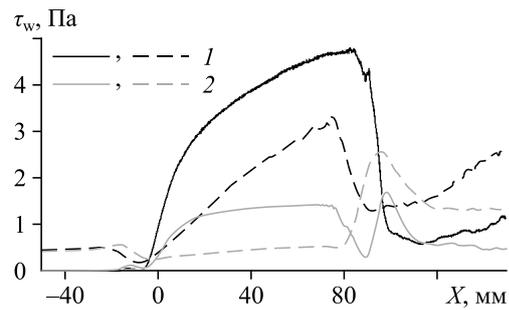


Рис. 5. Распределение осредненного трения в кольцевом канале.

Сплошные линии — $V_L = 0$ м/с,
пунктирные линии — $V_L = 0,3$ м/с;

трения на внутренней стенке практически не отличается, хотя его величина существенно ниже, чем на внешней. В области стекания жидкой пленки наблюдается повторяемость поведения трения на стенке для последовательно проходящих снарядов (сплошные и пунктирные линии на рис. 4). В области за снарядом присутствуют большие пульсации трения на внешней стенке, хотя величина их существенно ниже, чем в круглой трубе.

На рис. 5 приведены осредненные распределения напряжения трения как в покоящейся жидкости, так и при скорости ее движения 0,3 м/с. Как и в случае отдельных реализаций, осредненные значения напряжения трения на внутренней стенке значительно ниже, чем на внешней. Кроме этого, наблюдается существенная зависимость трения на внутренней стенке от приведенной скорости жидкости.

При движении газового снаряда в круглой трубе относительный расход жидкости, равный произведению относительной скорости снаряда на поперечное сечение, полностью распределяется в пленке жидкости, обтекающей снаряд. В случае кольцевого канала этот расход перераспределяется между внешней и внутренней стенками. Если стекающая пленка жидкости становится стабилизированной, то напряжение трения на стенке становится пропорционально удельному расходу. Как видно из рис. 5, в приведенных экспериментах стабилизации пленки жидкости не происходит. Тем не менее можно сделать вывод, что удельный расход жидкости на внешней стенке существенно выше, чем на внутренней. По всей видимости, это связано с величиной отношения диаметров внешней и внутренней труб кольцевого канала. В дальнейшем будет проведена серия экспериментов с различным соотношением диаметров труб.

Заключение

Установлено, что особенностью снарядного течения в кольцевом канале является отсутствие осевой симметрии структуры с наличием областей газового снаряда и жидкой перемычки. Измеренные значения касательного напряжения на стенках кольцевого канала показывают существенно более низкое значение трения на внутренней стенке канала, чем на внешней. Это свидетельствует о неравномерном перераспределении удельного расхода в стекающих пленках жидкости.

Список литературы

1. Morgado A.D., Mirinda J.M., Aratijo J.D.P., Campos J.B.L.M. Review of vertical gas-liquid slug flow // Int. J. Multiphase Flow. 2016. Vol. 85, No. 5. P. 348–368.
2. Sadatomi M., Sato Y., Saruwatari S. Two-phase flow in vertical noncircular channels // Int. J. Multiphase Flow. 1982. Vol. 8, No. 6. P. 641–655.

3. **Kelessidis V.C., Dukler A.E.** Motion of large gas bubbles through liquids in vertical concentric and eccentric annuli // *Int. J. Multiphase Flow* 1990. Vol. 16, No. 3. 375–390.
4. **Hasan A.R., Kabir C.S.** Two-phase flow in vertical and inclined annuli // *Int. J. Multiphase Flow*. 1992. Vol. 18, No. 2. P. 279–293.
5. **Das G., Das P.K., Purohit N.K., Mitra A.K.** Flow pattern transition during gas liquid flow through vertical concentric annuli. P. I. Experimental investigations // *J. Fluids Engng.* 1999. Vol. 121, Iss. 4. P. 895–901.
6. **Ozar B., Jeong J.J., Dixit A., Julia J.E., Hibiki T., Ishii M.** Flow structure of gas liquid two phase flow in an annulus // *Chemical Engng Sci.* 2008. Vol. 63, No. 15. P. 3998–4011.
7. **Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Petukhov A.V., Gorelik R.S.** Study of local characteristics of upward slug flow // *Experiments in Fluids.* 1989. Vol. 7, Iss. 8. P. 560–566.
8. **Mao Z.-S., Dukler A.E.** An experimental study of gas-liquid flow // *Experiments in Fluids.* 1989. Vol. 8, Iss. 3–4. P. 169–182.
9. **Кашинский О.Н., Рандин В.В., Курдюмов А.С.** Трение на стенке в восходящем снарядном течении в вертикальной трубе // *Теплофизика и аэромеханика.* 2006. Т. 13, № 3. С. 410–416.

*Статья поступила в редакцию 22 июля 2020 г.,
после доработки — 29 октября 2020 г.,
принята к публикации 16 декабря 2020 г.*