

УДК 532.529.5

ТРЕНИЕ НА СТЕНКЕ В ВОСХОДЯЩЕМ СНАРЯДНОМ ТЕЧЕНИИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ*

О.Н. КАШИНСКИЙ, А.С. КУРДЮМОВ, В.В. РАНДИН

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

Исследовалось трение на стенке в восходящем снарядном газожидкостном течении в вертикальной трубе. Измерения локальных характеристик выполнялись электродиффузионным методом. Использовалась методика условного осреднения по ансамблю реализаций, которая позволяет выделить крупномасштабные структуры на фоне турбулентных пульсаций жидкости. При осреднении учитывалась индивидуальная скорость каждого снаряда, измеренная двойным датчиком электропроводности. Получены осредненные распределения трения на стенке под газовым снарядом для различных режимных параметров.

ВВЕДЕНИЕ

Газожидкостное снарядное течение в трубах существует в широком диапазоне расходных скоростей жидкости и газа. Отличительной особенностью такого режима является наличие в потоке газовых снарядов, часто называемых пузырями Тейлора. Газовый снаряд занимает почти все поперечное сечение трубы. Снарядный режим течения характеризуется квазипериодическим чередованием газовых снарядов и жидких пробок. В вертикальных трубах газовые снаряды имеют скругленную носовую часть, тогда как кормовая зона практически плоская. Они разделяются жидкими пробками, газовая фаза в которых существует в виде пузырей. Структура течения в жидкой пробке существенно отличается как от однофазного течения в трубе, так и от двухфазного пузырькового течения.

Исследованию снарядного режима течения посвящено большое количество работ. В работе [1] показано, что скорость подъема газового снаряда не зависит от его длины и может быть определена на основе известной скорости движения снаряда в покоящейся жидкости. В [2] представлена расчетная модель, позволяющая определить основные характеристики снарядного течения. Модель основана на упрощенной схеме течения. Статистические параметры восходящего снарядного течения изучались в [3]. Следует отметить, что большинство исследований было посвящено изучению характеристик газовой фазы (длины и скорости снарядов, частоты их прохождения). В то же время значительный интерес представляют характеристики жидкой фазы. Движение жидкости в снарядном течении исследовалось в [4] методом визуализации течения. В [5, 6] для этого использовался метод PIV. Во всех указанных работах практически не исследовалась пристенная зона течения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-01-00328) и Фонда поддержки отечественной науки (грант “Лучший аспирант РАН-2006”).

В работах [7–9] для исследования напряжения трения на стенке был использован электродиффузионный метод. В [8] проводилось изучение структуры снарядного течения методом условного осреднения по длине газового снаряда и жидкой пробки, однако при этом использовались данные по средней скорости газовых снарядов (для данного режима). В ряде работ, в частности [3, 5], было показано, что имеется значительное отклонение скоростей отдельных снарядов от среднего значения. В работе [10] проведено исследование условных профилей скорости в жидкой пробке за газовым снарядом.

Целью настоящей работы стало дальнейшее исследование поведения напряжения трения на стенке в восходящем снарядном течении. Использовалась методика, учитывающая индивидуальную скорость каждого снаряда в процессе осреднения по ансамблю.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводились на установке, описанной в [10]. Установка — это замкнутый по жидкости циркуляционный контур. Его рабочим участком являлась вертикальная труба из нержавеющей стали внутренним диаметром 20 мм и длиной 4,5 м. Жидкость из бака центробежным насосом подавалась в рабочий участок через регулирующие вентили, расход измерялся с помощью ротаметров. Воздух вводился в поток жидкости на входе рабочего участка через сопло диаметром 8 мм. Расход воздуха определялся по перепаду давления на расходомерной диафрагме. Измерения проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости от 0,5 до 1,0 м/с и объемных расходных газосодержаний от 0,2 до 0,5.

Измерения проводились электродиффузионным (электрохимическим) методом [7, 10]. Для определения скорости и длины газовых включений на оси трубы были установлены два датчика электропроводности, представляющие собой платиновые электроды диаметром 50 мкм, вваренные в стеклянный капилляр диаметром 100 мкм. Торцы датчиков шлифовались для придания им конической формы. Расстояние между датчиками составляло 5,75 мм. В сечении канала, совпадающем с первым по потоку датчиком электропроводности, был установлен двойной датчик трения [7, 8], позволяющий измерять знакопеременное трение на стенке и определять моменты смены направления течения. Датчик изготавливался из платиновых пластин размером 0,07×0,9 мм, разделенных тонкой диэлектрической пленкой. При совместном включении обоих электродов датчика сигнал второго по потоку электрода будет несколько меньше, чем при раздельном включении, т. к. он находится в диффузионном следе первого электрода. Таким образом, сравнение сигналов электродов датчика позволяет определить направление течения. Для определения величины напряжения трения на стенке использовался сигнал первого по потоку электрода датчика. Применялся относительный вариант электрохимического метода с калибровкой датчика в однофазном потоке.

Схема подключения первичной электронной аппаратуры приведена на рис. 1. Сигналы датчиков проводимости (1, 2) подавались на усилители (3, 4) и далее после выпрямления (5, 6) поступали на аналого-цифровой преобразователь (7). Датчик трения (8) подключался к двухканальному усилителю (9), после которого сигналы датчика также поступали на АЦП (7). Дальнейшая обработка сигналов проводилась в цифровом виде на компьютере. Датчики опрашивались с частотой 100 кГц по каждому каналу в течении 100÷200 с (в зависимости от режимных параметров), объем первичных данных составлял 200÷400 Мб на каждую точку. Для каждого режима набиралась статистика от 400 до 600 снарядов. Все полученные реализации сохранялись на жестком диске для последующей обработки.

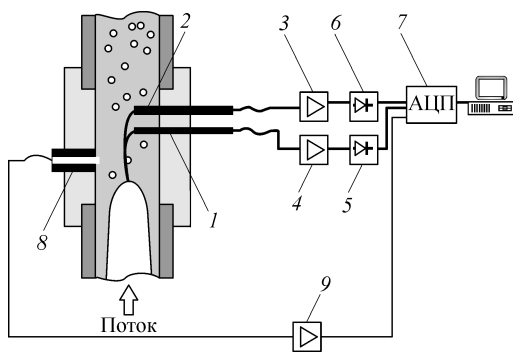


Рис. 1. Схема измерительного участка.

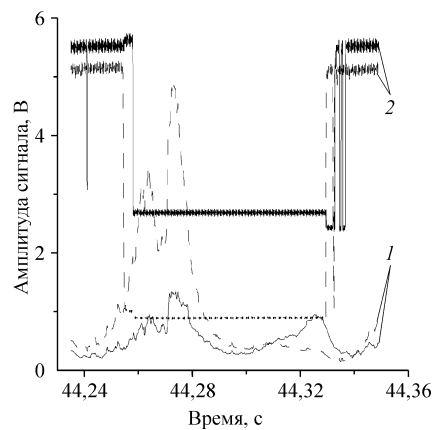


Рис. 2. Запись сигналов датчиков трения и проводимости.

При обработке реализаций использовалась следующая методика. Первым этапом обработки было определение порогового уровня сигнала датчиков электропроводности, соответствующего переходу между газом и жидкостью. По времени прохождения границы раздела газ–жидкость между датчиками определялась скорость движения газового включения (рис. 2). На рисунке обозначены: 1 — датчики трения, 2 — датчики электропроводности; пунктирными линиями соответствуют первые по потоку датчики, сплошными — вторые. Далее из скорости и времени нахождения датчика проводимости в газе рассчитывалась длина газового включения. Снарядами считались газовые включения длиной больше, чем диаметр трубы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате обработки реализаций двойного датчика электропроводности были получены данные по скоростям снарядов в различных режимах. Зависимость средней скорости снарядов от скорости движения смеси представлена на рис. 3. Средняя скорость снарядов оказалась ниже зависимости, приведенной в работе Коллинза [12]. В одном и том же режиме (при постоянных значениях приведенных скоростей жидкости и газа) скорости индивидуальных снарядов существенно различались. На рис. 4 приведена характерная гистограмма распределений скоростей снарядов для режима $V_L = 0,5$ м/с, $\beta = 0,4$. На рис. 5 представлена дисперсия скорости снарядов при двух значениях приведенной скорости жидкости. Как видно, значения дисперсии сильно возрастают с ростом расходного газосодержания. Это свидетельствует о том, что при больших значениях газосодержания снарядное течение становится менее регулярным.

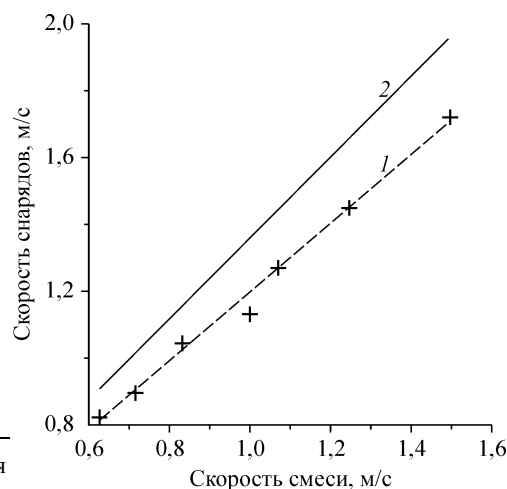


Рис. 3. Зависимость скорости движения снарядов от скорости смеси.

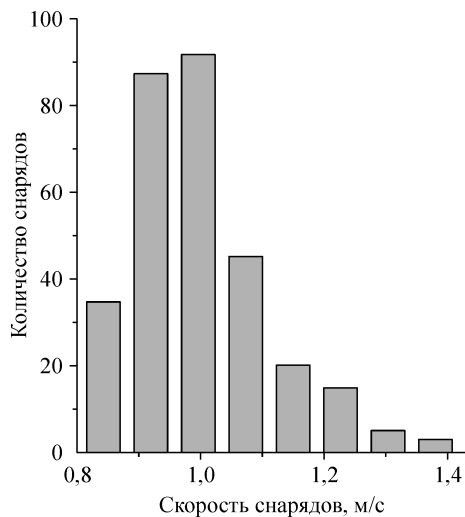


Рис. 4. Гистограмма распределения скоростей снарядов.

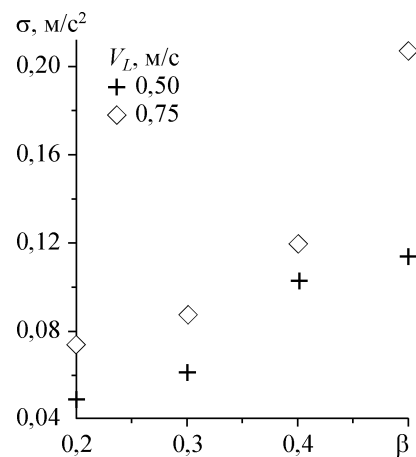


Рис. 5. Дисперсия скорости снарядов.

Результаты измерения среднего по времени напряжения трения на стенке приведены на рис. 6. При приведенной скорости жидкости 0,5 м/с наблюдается некоторое отклонение экспериментальных результатов от расчета по зависимости Арманда [13] при высоких газосодержаниях ($\beta = 0,5$). Аналогичное поведение трения в снарядном течении отмечалось в работе [7]. При еще более низких приведенных скоростях жидкости среднее по времени трение может стать отрицательным.

На рис. 7 приведено распределение мгновенного трения на стенке во времени, полученное путем обработки записи токов двойного датчика трения. Видно, что имеются крупномасштабные пульсации трения, вызванные прохождением газового снаряда. И жидкой пробки. В момент прохождения газового снаряда происходит резкое уменьшение значения трения, затем оно становится отрицательным, при этом течение вблизи стенки направлено вниз. Участок отрицательного трения соответствует опускному течению пленки жидкости, обтекающей газовый снаряд. На крупномасштабную структуру распределения трения наложены мелкомасштабные пульсации, обусловленные собственной турбулентностью жидкости.

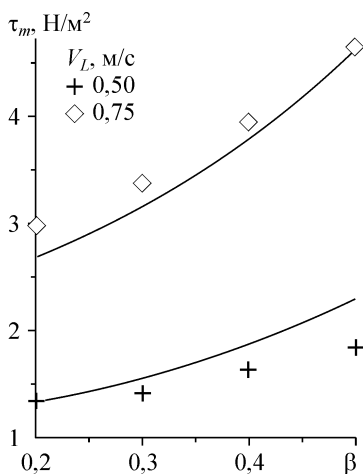


Рис. 6. Среднее трение на стенке.

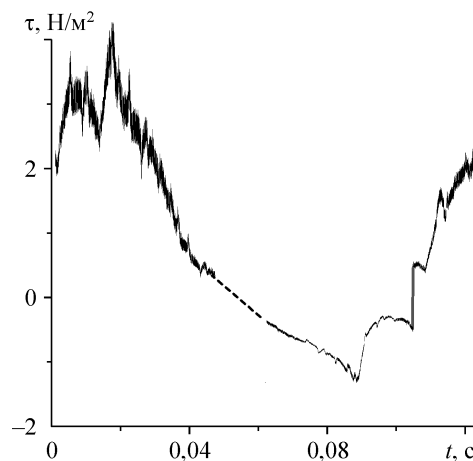


Рис. 7. Мгновенное трение на стенке.

Рис. 8. Среднее по ансамблю трение на стенке.

Для получения осредненного распределения трения в моменты прохождения газовых снарядов использовалась методика условного осреднения по ансамблю реализаций. Ранее эта методика была применена для изучения снарядного течения в работах [8, 10]. В записях сигналов выбирались участки, соответствующие прохождению снарядов примерно одной и той же длины.

Осредненные значения трения на стенке под газовым снарядом для различных длин снарядов при $V_L = 0,5$ и $\beta = 0,4$ представлены на рис. 8. Видно, что трение уменьшается по мере удаления от носика снаряда и может принимать отрицательные значения при больших длинах снарядов. Увеличение объемного расходного газосодержания приводит к увеличению трения под снарядом. Для разных значений длины газовых снарядов и газосодержаний характер изменения трения с ростом расстояния от начала снаряда остается практически неизменным. Следует отметить, что в области отрицательного трения не наблюдалось стабилизации трения по длине, что, по всей видимости, связано с недостаточной длиной газовых снарядов.

В начальном участке жидкой пробки, следующей за газовым снарядом, происходит резкое возрастание трения, связанное с разрушением пристенной струи жидкости, вытекающей из под газового снаряда. В результате образуется циркуционное течение (тороидальный вихрь), приводящее к существенной деформации профиля скорости по длине жидкой пробки, отмеченной в [10].

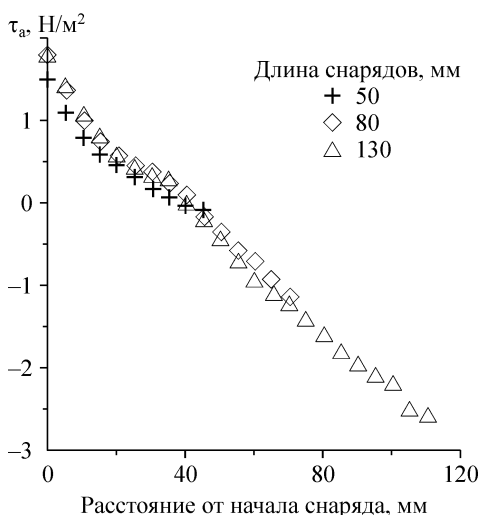
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные по распределению трения в восходящем снарядном течении. Результаты демонстрируют осредненную локальную структуру снарядного течения. Данные, полученные в настоящей работе, могут быть использованы для разработки и тестирования новых методик расчета снарядных потоков, основанных на реальной структуре газожидкостного течения.

Курдюмов А.С. благодарит Фонд поддержки отечественной науки за предоставленный грант для Лучших аспирантов РАН-2006.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

V_L — расходная скорость жидкости, м/с,
 β — объемное расходное газосодержание,
 σ — дисперсия скоростей снарядов, м/с,



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nicklin D.J., Wilkes M.A., Davidson J.F.** Two-phase flow in vertical tubes // Trans. Inst. Chem. Eng. — 1962. — Vol. 40, No 1. — P. 61–68.
2. **Fernandes R.D., Semiat R., Dukler A.E.** A hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes // AIChE J. — 1983. — Vol. 29 — P. 981–989.
3. **Похвалов Ю.Е., Субботин В.И.** Статистические параметры снарядного двухфазного течения // Теплоэнергетика. — 1988. — № 2. — С. 28–33.
4. **Shemer L., Barnea D.** Visualization of instantaneous velocity profiles in gas-liquid slug flow // Phys.-Chemical Hydrodynamics. — 1987. — Vol. 8, No. 3. — P. 243–253.
5. **Polonsky S., Barnea D., Shemer L.** Averaged and time-dependent characteristics of the motion of an elongated bubble in a vertical pipe // Intern. J. Multiphase Flow. — 1999. — Vol. 25, No. 5 — P. 795–812.
6. **Van Hout R., Barnea D., Shemer L.** Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes // Intern. J. Multiphase Flow. — 2001. — Vol. 27, No. 9. — P. 1579–1602.
7. **Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K.** Experimental study of gas-liquid slug flow in small diameter vertical pipe // Intern. J. Multiphase Flow. — 1986. — Vol. 12. — P. 337–355.
8. **Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Petukhov A.V., Gorelik R.S.** Study of local hydrodynamic characteristics of upward slug flow // Experiments in Fluids. — 1989. — Vol. 7. — P. 560–566.
9. **Mao Z.-S., Dukler A.E.** An experimental study of gas-liquid slug flow // Experiments in Fluids. — 1989. — Vol. 8. — P. 169–182.
10. **Кашинский О.Н., Рандин В.В., Курдюмов А.С.** Структура восходящего снарядного течения в вертикальной трубе // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 11, № 2. — С. 273–280.
11. **Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н. и др.** Электродиффузионный метод исследования локальной структуры турбулентных течений. — Новосибирск: Изд. Ин-та теплофиз. СО АН СССР, 1986. — 247 с.
12. **Collins R.** The motion of large bubbles rising through liquid flowing in a tube // J. of Fluid Mechanics. — 1978. — Vol. 89. — P. 497–514.
13. **Арманд А.А.** Исследование процесса движения и сопротивления при движении двухфазной смеси по горизонтальным трубам // Изв. ВТИ. — 1946. — No. 1. — С. 16–23.

Статья поступила в редакцию 12 мая 2006 г.