

УДК 532.5:533.6

Трение на стенке при обтекании стационарного газового снаряда опускным потоком жидкости*

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

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

Исследована одиночная ячейка газожидкостного снарядного потока. Измерялось течение вокруг неподвижного газового снаряда, обтекаемого опускающим потоком жидкости, и за его доньшком. С помощью электродиффузионного метода измерены значения трения на стенке и его пульсации в зависимости от расстояния от носика снаряда. Показано, что в пленке жидкости, обтекающей снаряд, происходит демпфирование турбулентных пульсаций по сравнению с однофазным потоком жидкости. В кормовой части снаряда, где происходит отрыв вихрей, турбулентные пульсации существенно превышают однофазные.

ВВЕДЕНИЕ

К числу основных режимов движения газожидкостной смеси в вертикальной трубе относятся пузырьковый, снарядный, дисперсно-кольцевой. Течение двухфазной смеси в снарядном режиме встречается в широком диапазоне режимных параметров. Отличительной особенностью снарядного режима является наличие в потоке газовых пузырей, по форме напоминающих снаряд, в литературе часто называемых пузырями Тейлора. Газовый снаряд занимает почти все поперечное сечение трубы. Снарядный режим течения характеризуется квазипериодическим чередованием газовых снарядов и жидких пробок, в которых, как правило, содержатся мелкие пузырьки газа. В вертикальных трубах газовые снаряды имеют скругленную носовую часть, тогда как кормовая зона практически плоская.

Исследованию снарядного течения посвящено большое количество работ. Показано [1], что скорость подъема газового снаряда не зависит от его длины и может быть определена на основе известной скорости движения снаряда в покоящейся жидкости. Статистические параметры восходящего снарядного течения изучались в [2].

Следует отметить, что большинство исследований посвящено изучению характеристик газовой фазы (длины и скорости снарядов, частоты их прохождения). В то же время значительный интерес представляют характеристики жидкой фазы, которые исследовались методом визуализации течения в работе [3].

Исследование поля течения вокруг одиночного снаряда проведено в работе [4] при помощи PIV и пульсирующей теневой техники. Поле течения около носика и дна снаряда, а также на некотором расстоянии от доньшка снаряда исследовалось в [5].

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

Электродиффузионный метод использовался в работах [6–8] для исследования напряжения трения на стенке. Изучение структуры такого течения методом условного осреднения по длине газового снаряда и жидкой пробки проведено в [7], при этом учитывались данные по средней скорости газовых снарядов (для данного режима). В работе [8] проведено исследование условных профилей скорости в жидкой пробке за газовым снарядом.

При рассмотрении газожидкостного снарядного течения локальные характеристики, такие как трение под снарядом и пульсации трения, а также профили скорости жидкости за снарядом и т. д., можно определить только статистически, методом условного осреднения по ансамблю. Такие исследования проводились, например, в работах [7, 8]. К сожалению, этот подход дает только средние значения и не позволяет получить зависимость пульсаций трения от координаты для произвольного снаряда.

Перечисленные работы посвящены исследованию снарядного течения в восходящем режиме. Количество работ по опускному снарядному течению очень ограничено. Унос газа за стационарным снарядом, находящимся в опускном потоке жидкости, исследовался в [9]. При разных размерах пузырей, скоростях жидкости и уровнях турбулентности потока измерено локальное газосодержание и его радиальное распределение за пузырем.

В настоящей работе исследовались гидродинамические характеристики течения около неподвижного, “висящего” в опускном потоке жидкости снаряда, что позволяет определять его локальные характеристики в точной привязке расстояния от носика снаряда.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Использовалась экспериментальная установка, описанная в [10]. Жидкость из бака центробежным насосом через систему ротаметров поступала в восходящую секцию установки. Расход жидкости регулировался вентилями. Далее поток жидкости подавался через U-образную секцию в рабочий участок — вертикальную трубу из нержавеющей стали внутренним диаметром 20 мм длиной 2700 мм (рис. 1). Для реализации опускного течения обтекающего неподвижный одиночный снаряд, рабочий участок модернизировался по сравнению с предыдущей работой [10].

Воздух через штуцер 1, установленный в секции 2, подавался в медную трубку 3 внешним диаметром 1,5 мм, находящуюся в потоке жидкости. На конце трубки располагалась фторопластовая насадка 4, имеющая коническую форму, с отверстием для выхода газа, расположенным на нижнем торце. Чтобы насадка находилась на оси трубы, применялось специальное центрирующее устройство 5, состоящее из трех квадратных скоб, припаянных к трубке и расположенных друг относительно друга под углом 120° . Внешние грани скоб упирались в стенку трубы. Медная трубка имела возможность двигаться в вертикальном направлении, что позволяло перемещать

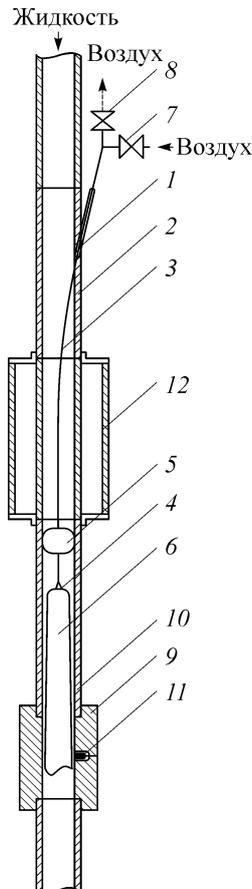


Рис. 1. Схема измерительной установки.

Рис. 2. Фотография стационарного газового пузыря.

насадку относительно датчика трения, расположенного в измерительном блоке. При подаче газа в трубку происходило образование газового пузыря под поверхностью насадки. В определенном диапазоне скоростей опускного течения жидкости в рабочем участке происходило образование стационарного газового снаряда (пузыря Тейлора) 6, носик которого располагался в точке ввода газа на нижнем торце насадка. Краны 7 и 8 позволяли изменять размер снаряда, добавляя в него воздух из системы подачи газа или выпуская из него воздух в атмосферу. Расход газа определялся с помощью измерительного капилляра, перепад давления на котором фиксировался дифференциальным датчиком давления МРХ-5010.

Измерительный блок 9 представлял собой корпус в виде прямоугольного параллелепипеда из органического стекла длиной 125 мм, по оси которого было просверлено отверстие диаметром 20 мм. К верхнему торцу параллелепипеда была приклеена трубка 10, выполненная из органического стекла длиной 190 мм и внутренним диаметром 20 мм. Наружные поверхности параллелепипеда и трубки шлифовались для придания им оптической прозрачности. В корпус измерительного блока клеивались два электрохимических датчика трения 11, которые зашлифовывались заподлицо со стенкой. Снаряд был хорошо виден через прозрачные поверхности измерительного блока.

Для проведения фото- и видеосъемки течения был установлен визуализационный блок 12, представляющий собой стеклянную трубку внутренним диаметром 20 мм и длиной 230 мм, помещенную в прямоугольный контейнер, заполненный иммерсионной жидкостью для уменьшения оптических искажений. При помощи съемки в этом блоке можно было определить точную форму поверхности снаряда (рис. 2).

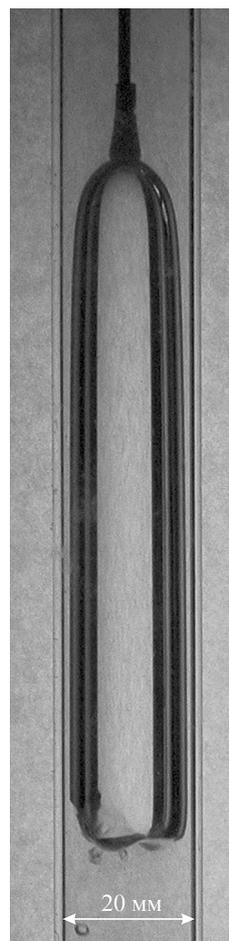
Датчики трения, вмонтированные в измерительный блок, соединялись с двухканальным усилителем постоянного тока. Усиленные сигналы датчиков подавались на АЦП инструментальной платы Е-440 и, после преобразования в цифровой вид, поступали в память компьютера. Калибровка датчиков производилась при однофазном течении жидкости в трубе. Полученные калибровочные коэффициенты использовались при обработке сигналов в двухфазном течении.

Температура рабочей жидкости поддерживалась на уровне $25 \pm 0,3$ °С при помощи автоматической системы термостабилизации. Рабочей жидкостью являлся раствор 0,25 М гидрокарбоната натрия и 0,01 М ферри- и ферроцианида калия в дистиллированной воде. Вязкость и плотность указанного раствора близки соответствующим параметрам воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Одиночный газовый снаряд, помещенный в трубу, заполненную жидкостью, всплывает со скоростью [1, 12]

$$U_s = 0,35(gD)^{1/2}, \quad (1)$$



причем скорость всплытия не зависит от его длины. Если одиночный газовый снаряд находится в опускном потоке жидкости, скорость которой равна скорости всплытия, то возникает режим зависания, в котором жидкость обтекает снаряд, являющийся неподвижным. В реальном эксперименте такого режима практически невозможно достичь из-за неустойчивого характера движения снаряда. Поэтому в настоящей работе точка, в которой начинается снаряд, фиксировалась местом ввода газа. Аналогичный способ образования стационарного снаряда использовался в работе [9].

Если скорость опускного течения жидкости меньше, чем U_s , то образования стационарного снаряда не происходит, поскольку пузыри газа в этом случае срываются и движутся вверх в противотоке с жидкостью. Начиная с некоторого значения средней скорости жидкости V_L происходит образование стационарного газового снаряда. Газ, подаваемый через отверстие в точке, где находится носик снаряда, накапливается в снаряде, увеличивая его длину. Одновременно с этим в кормовой части снаряда происходит отрыв пузырей газа из-за неустойчивости донной поверхности снаряда. Интенсивность этого процесса существенно зависит от длины снаряда и диаметра трубы. Так, при размерах снарядов порядка 1–4 диаметров трубы унос газа не регистрировался. При увеличении размеров снарядов появляется процесс отрыва пузырей. Регулируя расход газа, можно получить стационарный снаряд заданной длины. При этом унос газа за счет отрывающихся пузырей равен подаваемому расходу. В наших экспериментах расход газа составлял менее 0,1 мл/с и не мог быть измерен используемым газовым расходомером.

Для измерения распределения трения по длине снаряда производилось перемещение точки ввода газа вдоль оси трубы. При этом расстояние между носиком снаряда и датчиками трения изменялось. Измерения проводились при значении средней скорости жидкости 0,22 м/с. Для трубы диаметром 20 мм скорость всплытия снаряда по формуле (1) равнялась 0,16 м/с.

На рис. 3 приведена зависимость напряжения трения на стенке под снарядом от расстояния от его носика для снарядов длиной 65 и 140 мм. С увеличением расстояния от носика снаряда трение под ним существенно возрастает и многократно превышает однофазные значения. Это вызвано тем, что газовый снаряд перекрывает собой существенную часть сечения трубы, и поэтому скорость жидкости в ее пленке, обтекающей снаряд, существенно выше, чем скорость жидкости в пристенной области однофазного течения. Отметим, что для снарядов различной длины трение на одинаковом расстоянии от носика идентично в пределах погрешности измерения. Согласно [11], предельная толщина обтекающей снаряд пленки для скорости жидкости 0,22 м/с составляет 0,7 мм. При такой толщине пленки оценочное трение составляет 7 Н/м² (пунктирная линия на рисунке). В области течения за донным снарядом происходит резкое падение величины трения, и на некотором расстоянии от донны снаряда трение вновь становится равным однофазному.

На рис. 4 приведены реализации напряжения трения на стенке, полученные на расстоянии $x = 70$ (а) и 160 (б) мм,

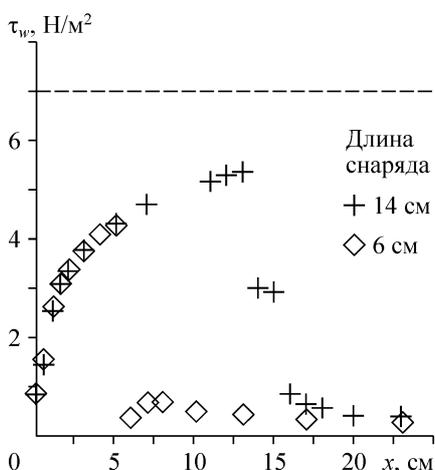


Рис. 3. Среднее напряжение трения на стенке под снарядом.

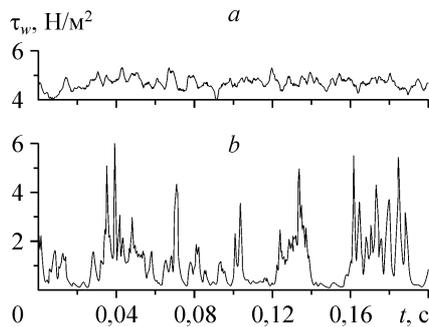


Рис. 4. Реализации напряжения трения на стенке.

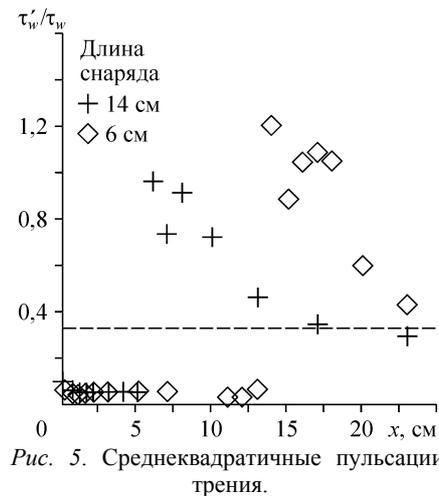


Рис. 5. Среднеквадратичные пульсации трения.

для пузыря длиной 140 мм. Для точки, находящейся посередине газового снаряда, характерны высокое напряжение трения и малые относительные пульсации. Вторая точка находится в зоне кольцевого вихря за снарядом, недалеко от места истечения обтекающей снаряд пленки жидкости. Для этой области характерно низкое, по сравнению с центральной областью снаряда, напряжение трения на стенке. Пульсации напряжения трения существенно превышают таковые как в однофазном потоке, так и в области под снарядом.

На рис. 5 показана зависимость пульсаций трения под снарядом от расстояния от его носика. В зоне обтекающей снаряд пленки наблюдается существенное снижение турбулентных пульсаций жидкости по сравнению с однофазными значениями, обозначенными на рисунке пунктирной линией. В районе кормовой части снаряда, где происходит отрыв вихрей, турбулентные пульсации существенно превышают однофазные. Снижение пульсаций трения в пленке, обтекающей снаряд в восходящем течении, было отмечено в работах [7, 12]. По всей видимости, демпфирование турбулентных пульсаций в этой области связано с ускорением течения. Известно, что в однофазных потоках с сильным ускорением (большим отрицательным градиентом давления по длине) наблюдается ламинаризация течения. В области за доньшком снаряда возникает тороидальный вихрь, вызванный истечением кольцевой пленки жидкости, обтекающей снаряд. Этот вихрь является причиной существенного повышения интенсивности пульсаций трения за счет возникновения крупномасштабных пульсаций. Согласно работе [4], длина вихревой зоны за снарядом составляет около четырех диаметров трубы. Пульсации трения сразу за снарядом резко возрастают, затем падают по мере удаления от доньшка снаряда до однофазного значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование структуры течения при обтекании стационарного пузыря Тейлора в опускном течении жидкости, измерены распределения среднего и пульсационного трения по длине трубы. Показано, что при обтекании стационарного снаряда происходит резкое возрастание напряжения трения на стенке в кольцевой пленке вокруг снаряда. В этой области пульсации трения имеют пониженную интенсивность по сравнению с однофазным течением в трубе. В области течения непосредственно за кормой снаряда происходит резкое снижение среднего напряжения трения и существенное повышение интенсивности пульсаций, что связано с турбулизацией течения крупномасштабным кольцевым вихрем, возникающим за доньшком снаряда.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

D — внутренний диаметр трубы, мм,	V_L — расходная скорость жидкости, м/с,
g — ускорение свободного падения, м/с ² ,	x — расстояние от носика снаряда, мм,
U_S — скорость пузыря Тейлора в трубе при неподвижной жидкости, м/с,	τ_w — среднее трение по всей реализации, Н/м ² ,
	τ_w — пульсации трения, Н/м ² .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nicklin D.J., Wilkes M.A., Davidson J.F.** Two-phase flow in vertical tubes // *Trans. Inst. Chem. Engng.* — 1962. — Vol. 40, No. 1. — P. 61–68.
2. **Van Hout R., Barnea D., Shemer L.** Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes // *Inter. J. Multiphase Flow.* — 2001. — Vol. 27, No. 9. — P. 1579–1602.
3. **Shemer L., Barnea D.** Visualization of instantaneous velocity profiles in gas-liquid slug flow // *Phys. Chem. Hydrodynamics.* — 1987. — Vol. 8, No. 3. — P. 243–253.
4. **Nogweira S., Sousa R.G., Pinto A.M.F.R., Riethmuller M.L., Campos J.B.L.M.** Simultaneous PIV and pulsed shadow technique in slug flow: a solution for optical problems // *Experiments in Fluids.* — 2003. — Vol. 35. — P. 598–609.
5. **Shemer L.** Hydrodynamic and statistical parameters of slug flow // *Inter. J. Heat and Fluid Flow.* — 2003. — Vol. 24. — P. 334–344.
6. **Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K.** Experimental study of gas-liquid slug flow in small diameter vertical pipe // *Inter. J. Multiphase Flow.* — 1986. — Vol. 12. — P. 337–355.
7. **Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Petukhov A.V., R.S.Gorelik.** Study of local hydrodynamic characteristics of upward slug flow // *Experiments in Fluids.* — 1989. — Vol. 7. — P. 560–566.
8. **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.
9. **Delfos R., Wisse C.J., Oliemans R.V.A.** Measurement of air-entrainment from a stationary Taylor bubble in a vertical tube // *Inter. J. Multiphase Flow.* — 2001. — Vol. 27. — P. 1769–1787.
10. **Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Богословцев Г.В.** Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускного пузырькового течения // *Теплофизика и аэромеханика.* — 2005. — Т. 12, № 4. — С. 637–643.
11. **Бэтчелор Дж.** Введение в динамику жидкости. — М.: Мир, 1973. — 760 с.
12. **Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Рандин В.В.** Трение на стенке в восходящем снарядном течении в вертикальной трубе // *Теплофизика и аэромеханика.* — 2006. — Т. 13, № 3. — С. 411–416.

Статья поступила в редакцию 25 июня 2007 г.