

## ТРЕНИЕ НА СТЕНКЕ В ВОСХОДЯЩЕМ СНАРЯДНОМ ТЕЧЕНИИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ

### АННОТАЦИЯ

В работе представлено исследование трения на стенке в восходящем снарядном газожидкостном течении в вертикальной трубе. Измерения локальных характеристик выполнены электродиффузионным методом. Использована методика условного осреднения по ансамблю реализаций, которая позволяет выделить крупномасштабные структуры на фоне турбулентных пульсаций жидкости. Получены осредненные распределения трения на стенке под газовым снарядом для различных режимных параметров.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Газожидкостное снарядное течение в трубах существует в широком диапазоне расходных скоростей жидкости и газа. Снарядный режим течения характеризуется квазипериодическим чередованием газовых снарядов и жидких пробок. Структура течения в жидкой пробке существенно отличается как от однофазного течения в трубе, так и от двухфазного пузырькового течения. В вертикальных трубах газовые снаряды имеют скругленную носовую часть, тогда как кормовая зона практически плоская. Жидкость, обтекающая газовый снаряд, движется в виде падающей пленки. При этом направление трения на стенке может не совпадать с направлением основного потока.

В более ранних работах [1, 2] 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, 4], было показано, что имеется значительное отклонение скоростей отдельных снарядов от среднего значения. В связи с этим в данной работе применялась методика, учитывающая индивидуальную скорость каждого снаряда в процессе осреднения по ансамблю.

### 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводились на установке, представляющей собой замкнутый по жидкости циркуляционный контур. Рабочим участком контура являлась вертикальная труба из нержавеющей стали с внутренним диаметром 20 мм 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 были проведены 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 электрохимическим методом [1, 6]. Для определения скорости и длины газовых включений на оси трубы были установлены два датчика проводимости, представляющие собой платиновые электроды диаметром 50 мкм, сваренные в стеклянный капилляр диаметром 100 мкм. Торцы датчиков были зашлифованы для придания им конической формы. Расстояние между датчиками составляло 5.75 мм. В сечении канала, совпадающем с первым по потоку датчиком проводимости, был установлен двойной датчик трения, позволяющий измерять знакопеременное трение на стенке и определять моменты смены направления течения. Датчик изготавливался из платиновых пластин размером 900x70 мкм, разделенных тонкой диэлектрической перегородкой.

Схема подключения первичной электронной аппаратуры приведена на рис. 1. Сигналы датчиков проводимости (3, 4) подавались на усилители (5, 7) и далее после выпрямления (8, 9) поступали на аналого-цифровой преобразователь (10). Датчик трения (2) подключался к двухканальному усилителю (7), после усилителя сигналы датчика также поступали на АЦП (10). Дальнейшая обработка сигналов проводилась в цифровом виде на компьютере. Датчики опрашивались с частотой 100 кГц по каждому каналу в течение 100±200 секунд (в зависимости от режимных параметров), объем первичных данных составлял 200±400 Мб на каждую точку. Для каждого режима набиралась статистика от 400 до 600

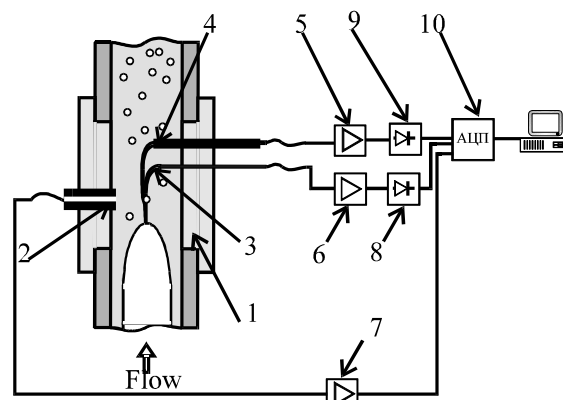


Рис.1. Схема измерительного блока: 1 – измерительный блок; 2 – двойной датчик трения; 3, 4 – неподвижные датчики проводимости; 5, 6, 7 – усилители; 8, 9 – выпрямители; 10 – АЦП

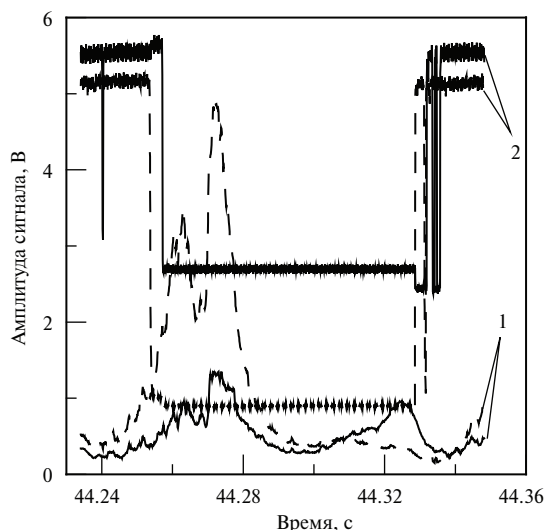


Рис. 2. Фрагмент реализации сигналов датчиков во время прохождения снаряда; 1 – датчики трения; 2 – датчики проводимости

снарядов. Все полученные реализации сохранились на жестком диске для последующей обработки.

При обработке реализаций использовалась методика условного осреднения [2]. Первым этапом обработки было определение порогового уровня сигнала датчиков проводимости, соответствующего переходу между газом и жидкостью [5]. По времени прохождения границы раздела газ-жидкость между датчиками определялась скорость движения газового включения (рис. 2). На рисунке 2 пунктирными линиями обозначены 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.

Для определения знакопеременного трения использовался двоярный электрохимический датчик [6]. При совместном включении обоих электродов

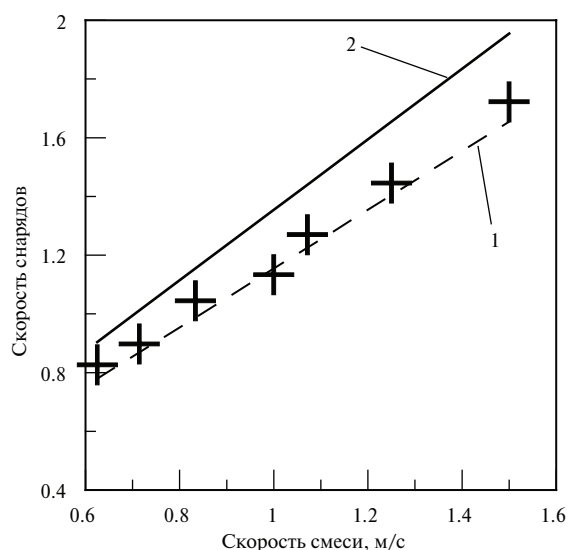


Рис. 3. Зависимость скорости снарядов от скорости движения смеси

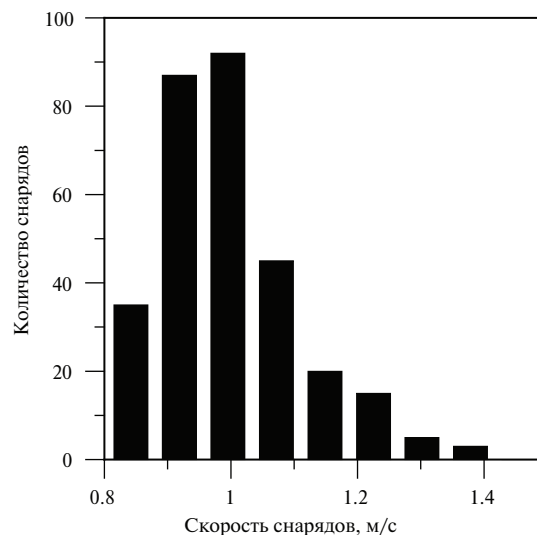


Рис. 4. Гистограмма распределения снарядов по скоростям,  $U = 0.5$  м/с,  $\beta = 0.4$

датчика сигнал второго по потоку электрода будет несколько меньше (рис.2), 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.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для всех режимов были получены гистограммы распределения длин и скоростей снарядов. Для разных снарядов скорость может сильно отклоняться от среднего значения (рис. 4). Вследствие этого в данной работе применялась методика, учитывающая индивидуальную скорость каждого снаряда в процессе осреднения по ансамблю. Средняя ско-

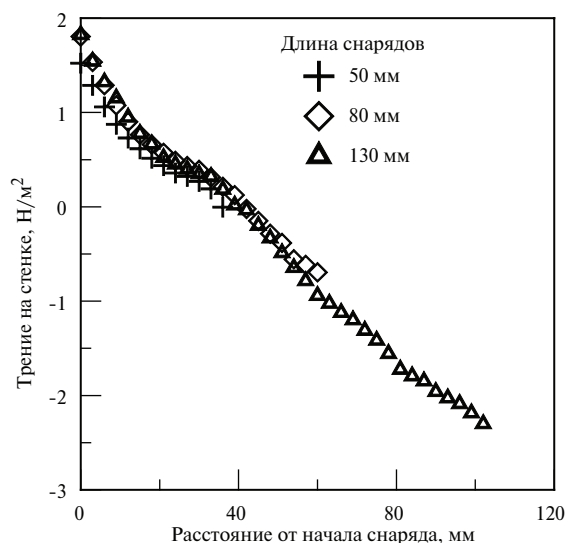


Рис. 5. Осредненное по ансамблю трение под снарядом для разных длин снарядов,  $U=0.5$ ,  $\beta=0.4$

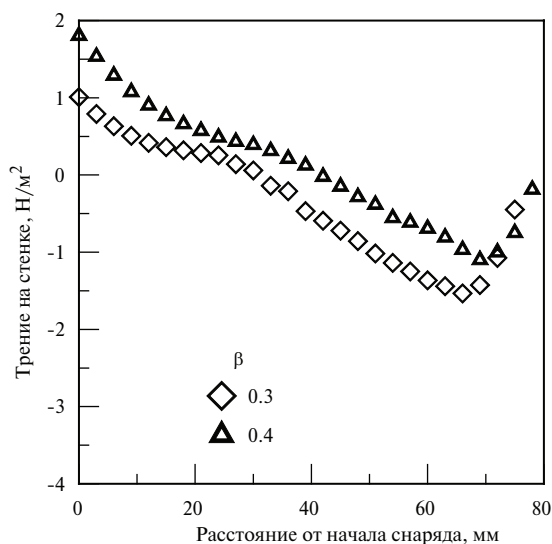


Рис. 6. Трение под снарядом для разных режимов,  $U = 0.5$  м/с

рость движения газовых снарядов отличается от зависимости Коллинза [5] (рис. 3). На этом рисунке обозначены: 1 – аппроксимация экспериментальных данных. 2 – расчетная зависимость Коллинза[5].

Осредненные значения трения на стенке под газовым снарядом для различных длин снарядов представлены на рис. 5, 6. Видно, что трение уменьшается по мере удаления от носика снаряда и может принимать отрицательные значения при больших длинах снарядов (рис. 5). Данный факт объясняется возникновением возвратных течений в пленке жидкости под газовым снарядом. Увеличение объемного расходного газосодержания приводит к увеличению трения под снарядом (рис. 6). Для разных значений длины газовых снарядов и газосодержаний характер изменения трения с ростом расстояния от начала снаряда остается практически неизменным.

В начале жидкой пленки под газовым снарядом вблизи носика снаряда, как правило, наблюдаются повышенные пульсации трения на стенке (рис. 7). Вблизи доньшка снаряда интенсивность пульсаций увеличивается (по-видимому, из-за возмущающего действия вихря за снарядом).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные по распределению среднего и пульсационного трения в восходящем снарядном течении. Результаты демонстрируют «осредненную» локальную структуру снарядного течения. Данные, полученные в данной работе, могут быть использованы для разработки и тестирования новых методик расчёта снарядных потоков.

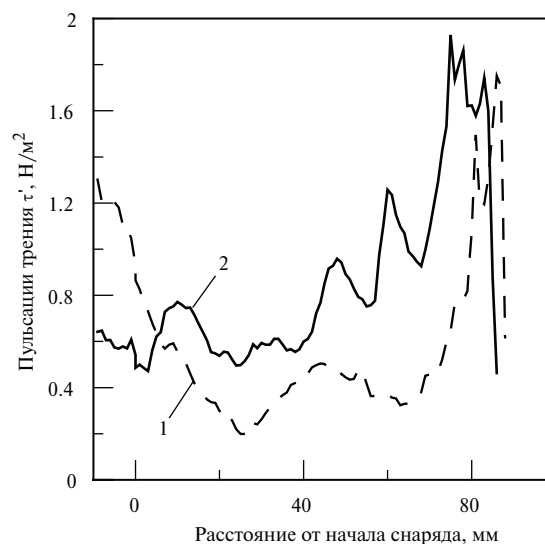


Рис. 7. Пульсации трения под снарядами одинаковой длины в разных режимах: 1 –  $U = 0.5$ ,  $\beta = 0.4$ ; 2 –  $U = 0.5$ ,  $\beta = 0.3$

Работа поддержана грантом РФФИ 04-01-00328.

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

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $U$  – расходная скорость жидкости, м/с;
- $\beta$  – объемное расходное газосодержание;
- $\tau$  – трение на стенке, Н/м<sup>2</sup>;
- $\tau'$  – среднеквадратичные пульсации трения на стенке, Н/м<sup>2</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmekko B.K.** Experimental study of gas-liquid slug flow in small diameter vertical pipe // *Int. J. Multiphase Flow*. 1986. Vol. 12. P. 337–355.
2. **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. 7. P. 560–566.
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 // *PhysicoChemical Hydrodynamics*. 1987. Vol. 8. № 3. P. 243–253.
5. **Collins R.** The motion of large bubbles rising through liquid owing in a tube // *Journal of Fluid Mechanics*. 1978. Vol. 89. P. 497–514.
6. **Электродиффузионный метод исследования локальной структуры турбулентных течений** / В.Е. Накоряков, А.П. Бурдуков, О.Н. Кашинский, П.И. Гешев. Новосибирск: Институт теплофизики, 1986.