

УДК 532.529.5

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ПОД НЕПОДВИЖНЫМ ГАЗОВЫМ СНАРЯДОМ, ОБТЕКАЕМЫМ ОПУСКНЫМ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

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

630090, Россия, Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Проведено экспериментальное исследование одиночной ячейки снарядного газожидкостного течения – стационарного газового пузыря Тейлора, обтекаемого опускаемым потоком жидкости. Измерение среднего и пульсационного трения на стенке производилось электрохимическим методом. Показано, что зависимость напряжения трения на стенке трубы от расстояния от носика снаряда, не зависит от длины снаряда. Отмечена «ламинаризация» течения в ускоряющейся пленке жидкости, обтекающей снаряд. Показано, что на некотором расстоянии от носика снаряда происходит стабилизация напряжения трения на стенке, причем значение напряжения трения в этой области согласуется с рассчитанным по предельной толщине пленки жидкости. Показано, что в следе за снарядом возмущение сохраняется на расстоянии свыше 20 диаметров трубы от его доньшка.

ВВЕДЕНИЕ

Снарядный режим течения паро- и газожидкостной смеси встречается в химической промышленности, медицине, совместной добыче нефти и газа, при внештатных и аварийных режимах в трубопроводах энергетического оборудования. 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, а его длина составляет несколько калибров трубы. В потоке происходит квазипериодическое чередование газовых снарядов и жидких

пробок, содержащих, как правило, мелкие пузырьки газа. В вертикальных трубах газовые снаряды имеют скругленную носовую часть, тогда как кормовая зона практически плоская.

Исследованию снарядного режима течения посвящено большое количество экспериментальных и теоретических 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.

Большинство работ посвящено изучению характеристик газовой фазы (длины и скорости снарядов, частоты их прохождения) [2,3]. В то же время значительный интерес представляют характеристики жидкой фазы, исследование которых стало возможным с развитием современных экспериментальных методик.

Мгновенные профили скорости жидкости в снарядном режиме течения получены при помощи метода визуализации потока [4]. Исследование поля течения вокруг одиночного снаряда проведено в работе [5] при помощи PIV и пульсирующей теневой техники. Изучение структуры снарядного течения при помощи электродиффузионной методики проведено в работе [6], при этом использовались данные по средней скорости газовых снарядов (для данного режима).

В ряде работ предложены модели снарядного течения. Уравнение формы поверхности газового снаряда предложено в [7]. На некотором расстоянии от носика снаряда течение устанавливается, и толщина пленки прекращает изменяться. Моделирование снарядного течения при помощи volume-of-fluid (VOF) метода проведено в [8]. Показано, что гидродинамические характеристики течения в значительной степени определяются силами инерции, вязкости и межфазного взаимодействия. Коэффициент массопереноса в обтекающей снаряд пленке жидкости выше, чем в зоне следа за снарядом.

При исследовании газожидкостного снарядного течения, локальные характеристики, такие как осредненное и пульсационное напряжение трения на стенке, а также профили скорости жидкости за снарядом и т.д., можно определить только статистически, методом условного осреднения по ансамблю. К сожалению, такой подход даёт только средние значения

и не позволяет получить зависимость пульсаций трения от координаты для произвольного снаряда.

В связи с этим проводятся исследования экспериментальных моделей снарядного течения, в которых исследуется структура потока при обтекании неподвижного газового пузыря или его твердой модели, в опускном потоке жидкости.

Исследование силы сопротивления твердой модели снаряда, обтекаемого опускным потоком жидкости, проведено в [9] для определения механизмов ускорения газового снаряда, находящегося в следе от предыдущего снаряда. Разработана одномерная модель течения. Показано, что ускорение снаряда вызвано изменением формы носика снаряда и его поперечным смещением относительно оси трубы.

Унос газа от неподвижного газового снаряда, находящегося в опускном потоке жидкости, исследован в [10]. При разных размерах пузырей, скоростях жидкости и уровнях турбулентности потока измерено локальное газосодержание и его радиальное распределение за пузырем.

Целью настоящей работы являлось исследование распределение осредненного и пульсационного напряжения трения на стенке трубы под неподвижным газовым снарядом и в течении жидкости за его доньшком.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальный стенд представлял собой замкнутый по жидкой фазе и разомкнутый по газу контур (рис. 1). В рабочий участок подавалась жидкость из бака 1 при помощи центробежного насоса 2. Расход жидкости регулировался вентилями 3 и контролировался при помощи системы ротаметров 4. Далее жидкость поступала во входную секцию 5, откуда через конфузور попадала в рабочий участок, который представлял собой трубу внутренним диаметром 20 мм. Верхняя секция рабочего участка 6, выполненная из

нержавеющей стали, соединялась с блоком визуализации течения 7, представляющим собой трубу из зашлифованного для оптической прозрачности органического стекла, длина которой составляла 550 мм. Ниже по потоку находился измерительный блок 8, представлявший собой корпус в виде прямоугольного параллелепипеда из органического стекла длиной 125 мм, по оси которого было просверлено отверстие диаметром 20 мм. Наружные поверхности параллелепипеда шлифовались для придания им оптической прозрачности. Газовый снаряд был хорошо виден через прозрачные поверхности визуализационного и измерительного блоков.

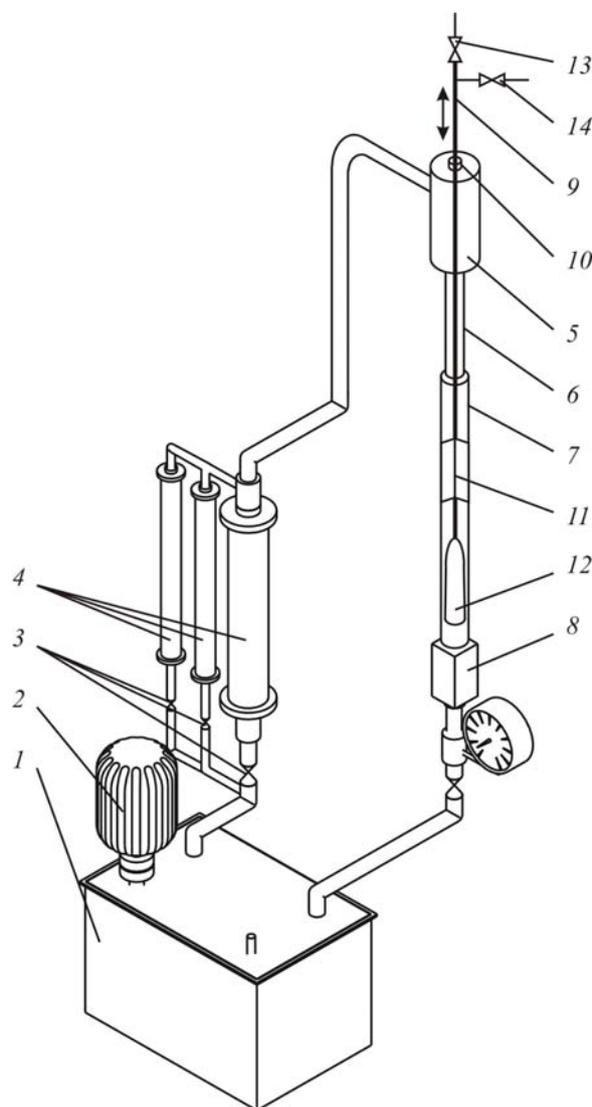


Рисунок 1. Экспериментальная установка.

В корпус измерительного блока были вклеены два электрохимических датчика течения, которые зашлифовывались заподлицо со стенкой. Таким образом, измерения можно считать бесконтактными. Датчики соединялись с двухканальным усилителем постоянного тока. Усиленные сигналы датчиков подавались на АЦП инструментальной платы E-440, и после преобразования в цифровой вид, запоминались в памяти компьютера. Калибровка датчиков производилась в однофазном течении жидкости в трубе. Полученные калибровочные коэффициенты использовались при обработке сигналов в двухфазном течении.

Одиночный газовый снаряд, помещенный в трубу, заполненную жидкостью, всплывает со скоростью:

$$U_s = 0.35(gD)^{1/2},$$

где g – ускорение свободного падения, D – внутренний диаметр трубы, причем скорость всплытия не зависит от его длины [1]. 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 такой режим практически невозможно достичь из-за неустойчивого характера движения снаряда. Поэтому в данной работе точка, в которой начинается снаряд, была фиксирована местом ввода газа. Эксперимент проводился при расходной скорости жидкости 0.16 м/с. Аналогичный способ образования стационарного снаряда использовался в работе [10].

Для образования снаряда воздух подавался в вертикальную трубку из нержавеющей стали 9 внешний диаметр которой равнялся 3 мм. Нижняя часть трубки располагалась в потоке жидкости по оси основной трубы, а верхняя выходила наружу установки. Герметизация осуществлялась при помощи штуцера 10, который позволял вертикальное перемещение трубки. Для того, чтобы трубка находилась на оси трубы, применялось специальное центрирующее устройство 11, состоящее из трех квадратных скоб, припаянных к трубке и расположенных друг относительно друга под углом 120° . Внешние грани скоб упирались в стенку трубы. К нижнему концу трубки была припаяна нержавеющая трубка внешним диаметром 1.5 мм, к которой крепилась фторопластовая насадка с отверстием для выхода газа, расположенным на нижнем торце, имеющая коническую форму. 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) 12, носик которого располагался в точке ввода газа на нижнем торце насадки. Краны 13 и 14 позволяли изменять размер снаряда, добавляя воздух из системы подачи газа или выпуская воздух в атмосферу.

Рабочая жидкость представляла собой ферро- феррицианидный электрохимический раствор. Температура рабочей жидкости поддерживалась постоянной с помощью автоматической системы термостабилизации в пределах $25 \pm 0.2^{\circ}$ С. Физические параметры жидкости, эквивалентны таковым для воды.

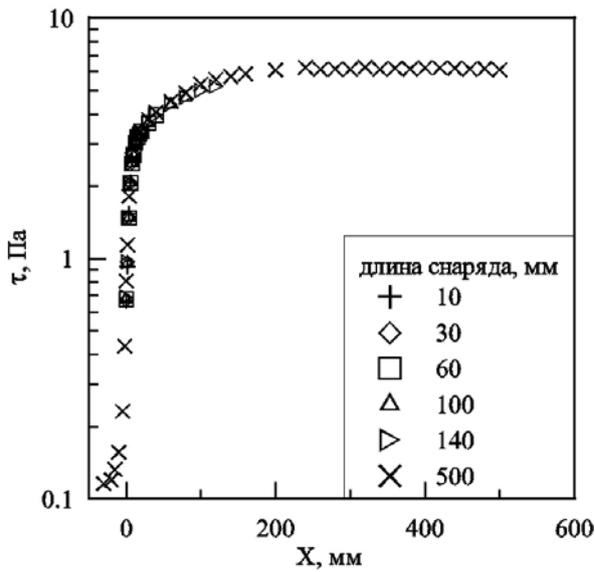


Рисунок 2. Зависимость напряжения трения под снарядом от расстояния от носика снаряда.

Погрешность измерения составляла 3, 7, 15 %, для длин снарядов, напряжения трения на стенке трубы, и его пульсаций соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для исключения погрешности позиционирования при исследовании снарядов разных длин эксперимент

проводился следующим образом: сначала кончик насадки устанавливался на требуемом для проведения эксперимента расстоянии от датчиков трения. Затем в трубку подавался газ до образования снаряда минимальной из измеряемых в данной точке длины, после чего производилось измерение напряжения трения на стенке. Затем в трубку подавался газ до установления следующего размера снаряда и эксперимент повторялся.

Распределение напряжения трения на стенке τ под снарядом и его среднеквадратичных пульсаций τ' , в зависимости от расстояния от носика снаряда X , для различных длин снарядов приведено на Рисунках 2,3. На расстоянии 30 мм и выше по потоку от носика снаряда (отрицательные X), значения напряжения трения и его пульсаций соответствуют однофазным. При сокращении расстояния от носика снаряда до датчиков трения,

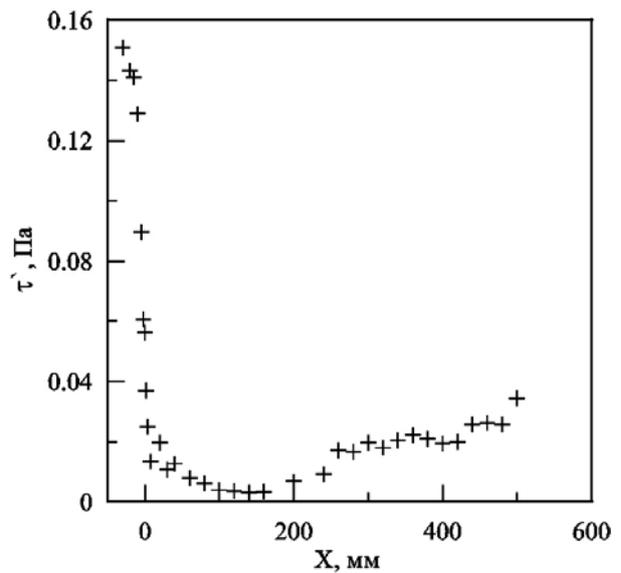


Рисунок 3. Распределение пульсаций трения под снарядом длиной 500 мм.

происходит увеличение напряжения трения и снижение пульсаций напряжения трения, что вызвано перестройкой течения, вызванной обтеканием снаряда жидкостью. В области носика снаряда происходит резкое увеличение напряжения трения. Оно вызвано тем, что снаряд занимает часть сечения трубы, и площадь сечения, занимаемая жидкостью, уменьшается, что приводит к ускорению жидкости. В области носика снаряда напряжение трения на стенке резко нарастает с увеличением расстояния от носика снаряда до датчиков трения. Это связано с тем, что форма носика снаряда имеет полусферическую форму, что можно наблюдать визуально, и при удалении от начала снаряда, происходит быстрое снижение толщины окружающей снаряд пленки жидкости.

С дальнейшим увеличением расстояния от носика снаряда до датчиков трения происходит постепенное снижение толщины пленки жидкости, что приводит к плавному увеличению напряжения трения на стенке трубы. В этой области наблюдается существенное снижение турбулентных пульсаций жидкости, происходит «ламинаризация» течения. Примечательно, что трение на стенке не зависит от длины снаряда, а определяется только расстоянием от его носика. При достижении определенного расстояния от носика снаряда значение напряжения трения на

стенке стабилизируется. Полученное в этой области напряжение трения согласуется с рассчитанным по предельной толщине пленки жидкости для газового снаряда [7].

Форма получаемого сигнала напряжения трения в значительной степени зависит от местоположения датчиков (рис. 4). В области перед носиком снаряда

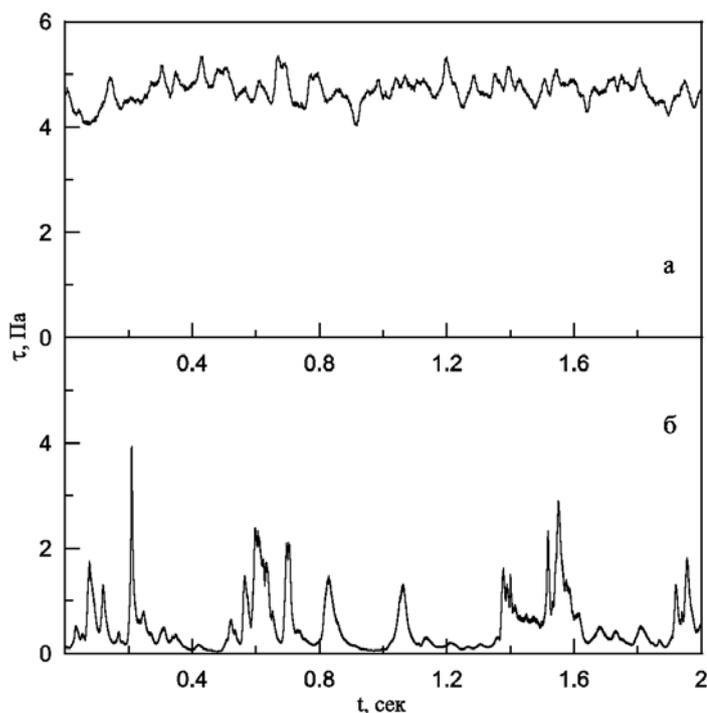


Рисунок 4. Реализации сигнала датчиков трения.

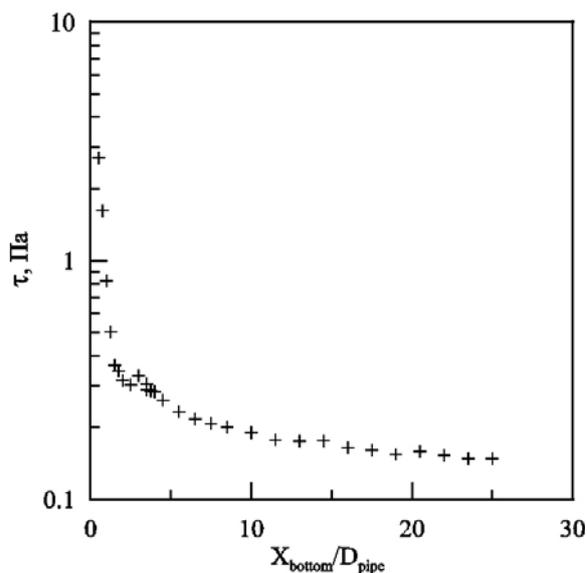


Рисунок 5. Напряжение трения в следе за снарядом.

сигнал датчиков имеет форму, характерную для развитого турбулентного режима течения. Под снарядом наблюдается высокое напряжение трения, в разы превышающее однофазные значения (рис. 4, а). Относительные пульсации напряжения трения в этом месте значительно ниже, чем в развитом турбулентном течении. Сигнал трения на небольшом расстоянии от кормовой части снаряда имеет сложную структуру, характеризующуюся

чередованием областей с высокой и низкой степенью турбулентности (рис. 4, б). На расстоянии около 4 калибров трубы и выше, регистрируется сигнал характерный для развитого турбулентного режима течения. Исследования, проведенные в работе [5] показали, что в пределах 4 калибров трубы за снарядом располагается зона кольцевого вихря, вызванного отрывом пленки жидкости от кормы снаряда.

Распределение напряжения трения в жидкости за кормой снаряда длиной 60 мм приведено на Рисунке 5. Здесь X_{bottom} – расстояние от доньшка снаряда, D – внутренний диаметр трубы. Из-за высокой неравномерности распределения трения в области находящейся непосредственно за кормой снаряда, для получения более точных значений среднего напряжения трения измерения в каждой точке проводились непрерывно в течение пяти минут. Опрос датчиков при этом проводился с частотой 10 кГц.

Трение на стенке резко снижается в непосредственной близости от доньшка снаряда. С дальнейшим увеличением расстояния от кормы снаряда происходит плавное снижение напряжения трения. Возмущение потока, вызванное пузырем настолько велико, что не гасится на расстоянии более чем 20 калибров трубы.

Выводы

В рамках исследования снарядного режима течения в трубе в работе проведено исследование гидродинамики одиночного стационарного газового снаряда, обтекаемого опускным потоком жидкости и структуры течения жидкости за его кормой. В ходе проведения работы получена информация о пульсационной структуре течения под снарядом, измерение которой в реальном снарядном режиме течения затруднительно. Показано, что возмущение потока начинается на расстоянии около 15 мм до снаряда из-за обтекания его жидкостью. При этом повышается напряжение трения на стенке трубы, и снижаются его относительные пульсации. В области под снарядом трение в десятки раз превышает однофазные значения, при этом наблюдается «ламинаризация» течения. Показано, что трение под снарядом определяется не длиной пузыря, а расстоянием от его носика. За кормой снаряда наблюдается сложная структура течения, характеризующаяся чередованием областей с высоким напряжением трения и его пульсаций и областей с малыми значениями данных величин. Возмущение потока одиночным газовым снарядом распространяется на расстояние более 20 калибров трубы.

Работа проведена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 07-08-00405.

Литература

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. pp. 61-68.
2. Van Hout R., Barnea D., Shemer L. Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes. Int. J. Multiphase Flow. 2001. Vol. 27, No. 9 pp. 1579-1602.
3. Shemer L. Hydrodynamic and statistical parameters of slug flow. Int. J. Heat and Fluid Flow. 2003. Vol. 24. pp. 334-344

4. L. Shemer and D.Barnea. Visualization of instantaneous velocity profiles in gas-liquid slug flow. *Physico Chemical Hydrodynamics*. 1987. Vol. 8, No. 3 pp. 243-253.
5. S. Nogweira, R.G. Sousa, A.M.F.R. Pinto, M.L. Riethmuller, J.B.L.M. Campos, Simultaneous PIV and pulsed shadow technique in slug flow: a solution for optical problems. *Experiments In Fluids*. 2003. Vol. 35 pp. 598-609
6. 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.
7. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. «Мир», М., 1973, 760 с.
8. Zheng D., He X., Che D. CFD simulations of hydrodynamic characteristics in a gas-liquid vertical upward slug flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2007. Vol. 50, No 21-22 pp. 4151-4165.
9. Tudose E.T., Kawaji M. Experimental investigation of Taylor bubble acceleration mechanism in slug flow. *Chem. Eng. Sci*. 1999. Vol. 54. pp. 5761-5775
10. Delfos R., Wisse C.J., Oliemans R.V.A. Measurement of air-entrainment from a stationary Taylor bubble in a vertical tube. *Int. J. Multiphase Flow*. 2001. Vol. 27. pp. 1769-1787.