

03

Некоторые особенности напряжения трения на стенке вертикальной трубы от тейлоровского пузыря малого размера в восходящем течении

© Л.С. Тимкин, Р.С. Горелик

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: timkin@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2013 г.

Восемью электродиффузионными датчиками трения, расположенными в одном сечении трубы равномерно по ее периметру, исследовано напряжение трения на стенке вертикальной трубы от тейлоровского пузыря в восходящем течении. Полученные результаты имеют самостоятельное значение. Осредненное по периметру трубы напряжение трения в пленке жидкости между пузырем малого размера (3–4 диаметра трубы) и стенкой трубы оказалось положительным в переходном и турбулентном режимах течения.

Снарядный режим течения, когда газовая фаза потока представлена тейлоровскими пузырями, является одним из часто используемых режимов в теплообменных устройствах, биохимических реакторах, при совместном транспорте нефти и газа и во многих других практических приложениях.

При искривлении формы головной части снаряда и смещении положения снаряда относительно оси трубы значительно возрастает его скорость всплытия, что впервые было обнаружено в наклонных трубах [1].

Экспериментальное исследование механизма возрастания скорости тейлоровского пузыря в опускном течении в вертикальной трубе 25.6 mm исследовано в [2]. Отмечено, что в турбулентном режиме течения головная часть снарядов существенно деформируется. Была измерена сила сопротивления твердых акриловых снарядов длиной $L = 75$ и $L = 150$ mm с пулеобразной и искусственно деформированной головной частью при различных боковых смещениях пузыря от оси трубы. Сила сопротивления для коротких пузырей ($L = 75$ mm) с

деформированной головной частью оказалась на 30% меньше, чем для пулеобразных.

Эксперименты в неподвижной жидкости и в спутном вертикальном ламинарном течении жидкостей различной вязкости выполнены в [3]. С помощью PST (Pulsed Shadowgraphy Techniques) определялась форма пузыря и одновременно, применяя PIV (Particle Image Velocimetry), измерялись профили скорости в головной части и в пленке жидкости между стенкой снаряда и стенкой трубы (под снарядом). Формы снарядов для малых вязкостей хорошо согласуются с решениями в головной части и в пленке жидкости под пузырем, полученными в [4] для потенциального всплытия пузыря в неподвижной жидкости. Отмечается, что с увеличением скорости потока наблюдается возрастание относительной скорости снаряда и деформация его головной части. Прямых измерений трения на стенке в указанных работах не проводилось.

Целью данной работы является экспериментальное исследование знакопеременного напряжения трения на стенке по периметру вертикальной трубы при всплытии тэйлоровских пузырей малого размера в переходном и турбулентном режимах течения с помощью электродиффузионного метода.

Экспериментальная установка — вертикальная труба из нержавеющей стали внутренним диаметром $D = 14.8 \text{ mm}$. Рабочая жидкость насосом из бака подавалась в газожидкостный смеситель, расположенный на входе в трубу. В смесителе с помощью специального устройства формировались одиночные пузыри. Автоматическая система термостабилизации поддерживала температуру жидкости постоянной. Расход жидкости измерялся тремя ротаметрами с перекрывающимися диапазонами расходов, установленными параллельно. Погрешность определения расхода не превышала 3%. Измерения напряжения трения проводились в рабочем участке на расстоянии 5 м от входа в трубу восемью двойными электродиффузионными датчиками, вклеенными и зашлифованными заподлицо с внутренней стенкой трубы в одном сечении трубы равномерно по ее периметру. Двойной датчик представляет собой два прямоугольных платиновых электрода размером $35 \times 210 \mu\text{m}$, разделенных слоем изоляции толщиной 20–30 μm . В рабочей установке перед каждым экспериментом тарировались первые по потоку электроды. После этого блок с датчиками трения переворачивался и при тех же расходах жидкости тарировались вторые электроды, служащие для

регистрации отрицательного трения. Трение для тарировки рассчитывалось по зависимостям Хагена–Пуазейля и Блазиуса для однофазного течения в трубе.

Для опроса датчиков использовался многоканальный 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), установленный в компьютер IBM Pentium II. Минимальное время преобразования данных одного отсчета по всем 16 каналам АЦП составляло 0.1 ms, что обеспечивало практически мгновенный опрос всех датчиков.

Рабочая жидкость — ферроферрицианидный электрохимический раствор с добавкой глицерина. Температура раствора поддерживалась равной $25 \pm 0.2^\circ\text{C}$. При этой температуре плотность раствора равна $\rho = 1124 \text{ kg/m}^3$, вязкость $\nu = 3.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Видеосъемка проводилась в оптическом блоке, выполненном из стеклянной трубки, помещенной в контейнер с иммерсионной жидкостью. Блок расположен в непосредственной близости от измерительного участка. Использовалась цифровая камера Canon XL1 с частотой съемки 25 кадров в секунду. Форма, длина и скорость пузырей определялись при обработке изображений в компьютере.

Общее представление о форме пузырей в течении дают фотографии, представленные на рис. 1. При малых числах Рейнольдса течения — $Re = VD/\nu$ (где V — среднерасходная скорость жидкости в трубе) форма снаряда абсолютно симметрична относительно оси трубы и стабильна во времени (рис. 1, *a*). При увеличении Re форма пузыря искажается (рис. 1, *b*), а для длинного пузыря головная часть заостряется (рис. 1, *c*). При этом искажение формы пузыря и его смещение относительно оси трубы вызывают асимметрию течения. Для длинных снарядов значительную асимметрию в течение вносит донная часть, нестабильная начиная с ламинарных чисел Рейнольдса течения, здесь часто наблюдается отрыв мелких пузырьков (рис. 1, *c*).

При всплывании тейлоровского пузыря в вертикальной трубе в пленке жидкости под пузырем можно выделить несколько характерных участков. Первым выделяется обтекание головной части пузыря, сильно зависящее от симметрии течения, пульсаций жидкости перед пузырем, скорости пузыря, поверхностного натяжения и др. В конце этого участка трение в пленке стремится к квазистационарному значению с небольшим, но четко выраженным ростом. Это ламинарный участок обтекания пузыря. При дальнейшем увеличении длины пузыря на

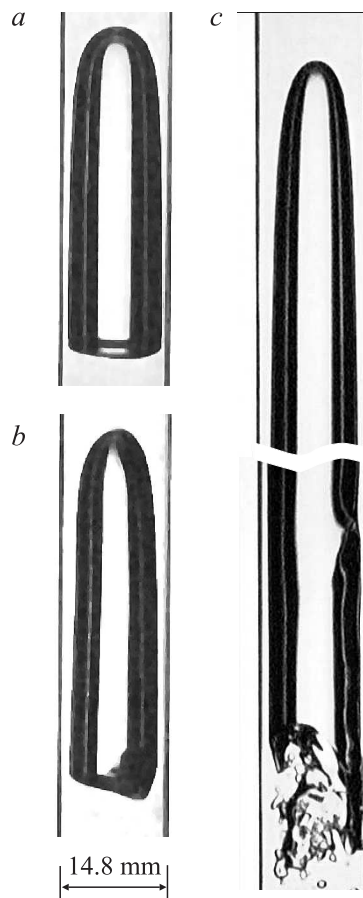


Рис. 1. Фотографии тейлоровских пузырей: *a* — короткий пузырь со стационарной формой, $Re = 22$, $L = 0.041$ м, $V_b = 0.13$ м/с; *b* — короткий пузырь, $Re = 3360$, $L = 0.046$ м, $V_b = 1.08$ м/с; *c* — длинный пузырь, $Re = 1387$, $L = 0.51$ м, $V_b = 0.67$ м/с.

поверхности пленки жидкости появляются неустойчивости и начинают развиваться волновые структуры (см. рис. 1, *c*), заметные в напряжении трения на стенке трубы как пульсации трения.

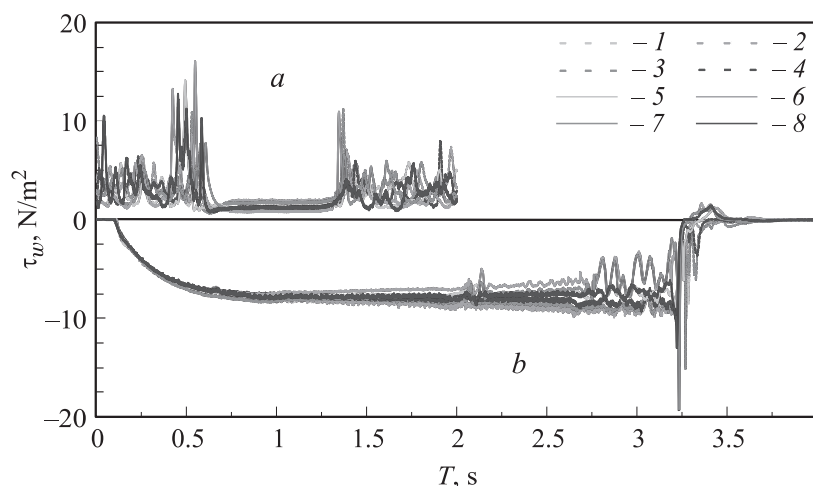


Рис. 2. Реализации напряжения трения на стенке трубы с восьми двойных датчиков: *a* — ламинарный участок течения (между турбулентными пробками) в переходном режиме, $Re = 2830$; *b* — длинный газовый пузырь в течении с $Re = 22$, $L = 0.53$ м и $V_b = 0.138$ м/с. Цифрами обозначены порядковые номера датчиков трения, расположенных равномерно по периметру трубы.

Реализации напряжения трения с восьми датчиков представлены для ламинарного участка течения (между турбулентными пробками) в переходном режиме течения на рис. 2, *a* и для длинного снаряда в ламинарном течении — рис. 2, *b*. В ламинарном течении до появления длинного снаряда трение одинаково по всему периметру трубы и в пределах точности измерений соответствует однофазному. На протяжении первой секунды прохождения снаряда показания всех датчиков одинаковы, что свидетельствует о симметрии течения вокруг головы снаряда. Прохождение длинного снаряда приводит к большим отрицательным значениям трения в пленке жидкости под снарядом. На второй секунде реализации (на расстоянии 0.2 м от головы снаряда) в пленке жидкости появляются нарастающие во времени и асимметричные по периметру трубы пульсации трения.

В переходном режиме течения (при $Re = 2830$) пульсации трения однофазной жидкости хаотичны в турбулентных пробках, а на участках

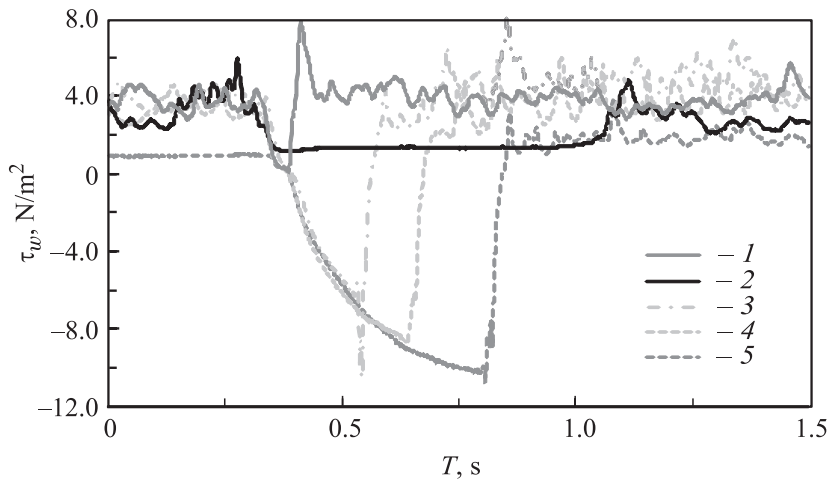


Рис. 3. Осредненное по периметру трубы напряжение трения при прохождении пузырей в течении с разными числами Рейнольдса трубы в зависимости от расстояния вдоль потока. Параметры Re , L , V_b соответственно принимают значения: 1 — 3360, 0.046 м, 1.08 м/с; 2 — ламинарный участок течения (между турбулентными пробками) в переходном режиме течения, $Re = 2830$; 3 — 3360, 0.285 м, 1.13 м/с; 4 — 2830, 0.40 м, 1.03 м/с; 5 — 1844, 0.48 м, 0.87 м/с.

между пробками течение полностью ламинарно, таким образом наблюдается известное явление перемежаемости. На ламинарных участках течения турбулентные пульсации напряжения трения на стенке трубы полностью отсутствуют, напряжение трения симметрично по периметру трубы. При этом напряжение трения на стенке совпадает с трением, рассчитанным по зависимости Гаггена–Пуазейля для данного числа Рейнольдса течения. Среднее напряжение трения в турбулентных пробках (между ламинарными участками течения) совпадает с соответствующей зависимостью Блазиуса.

На рис. 3 представлены осредненные по периметру трубы реализации напряжения трения в ламинарном участке течения при $Re = 2830$, при прохождении короткого газового снаряда в турбулентном режиме ($Re = 3360$), и для трех длинных снарядов в ламинарном ($Re = 1844$), переходном ($Re = 2830$) и турбулентном ($Re = 3360$) режимах течения.

До подхода пузырей трение носит пульсационный характер в турбулентном и переходном режимах течения. При прохождении длинных снарядов трение резко уходит в отрицательные значения, практически совпадая на начальном участке для разных чисел Рейнольдса, а затем стремится к квазистационарному значению. При этом течение в пленке ламинируется, пульсации трения в пленке под пузырем практически отсутствуют. Чем выше скорость жидкости, тем выше скорость снаряда и тем меньше время существования пленки жидкости на стенке трубы. При высоких числах Рейнольдса ($Re \geq 2830$) для достижения стационарного течения пленки под снарядом необходима значительно большая длина снарядов — $L > 0.5 \text{ m}$ ($L/D > 33$).

Наиболее интересны особенности трения для короткого снаряда в переходном и турбулентном режимах течения. Короткий снаряд с длиной $L/D = 2-3$, при этих числах Рейнольдса течения не успевает обратить напряжение трения в пленке под пузырем в отрицательные значения. Во всех случаях — в ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения, для малых и больших тейлоровских пузырей, длина ламинизации течения жидкости в жидкой пленке под пузырьком приблизительно равна, или чуть короче, чем длина соответствующего пузыря.

Тейлоровские пузыри в целом формируют симметричные структуры напряжения трения на стенке трубы, асимметрия трения проявляется в следе за пузырем и в головной части, особенно заметная в переходном и турбулентном режимах течения. Прохождение тейлоровского пузыря приводит к подавлению пульсаций в жидкости, окружающей пузырь. Пульсации в пленке жидкости под снарядом начинают развиваться лишь при длине снаряда более 0.2 m или при времени существования пленки под ним более 2 s .

Электродиффузионный метод измерения напряжения трения на стенке трубы, с использованием восьми двойных датчиков трения, однозначно подтверждает симметричность течения в пленке жидкости под тейлоровским пузырем, так же как и в переходном режиме течения, на ламинарном участке между турбулентными пробками. Впервые экспериментально зафиксированы положительные значения трения вдоль снаряда малого размера (3–4 диаметра трубы) в турбулентном режиме течения. Это указывает на возможность реализации режима оптимального газлифта из таких снарядов при расстоянии между пузырями больше двух диаметров трубы.

Список литературы

- [1] Zukosky E.E. // J. Fluid Mechanics. 1966. V. 25. P. 821–837.
- [2] Tudose E.T., Kawadji M. // Chemical Engineering Science. 1999. N 54. P. 5761–5775.
- [3] Nogueira S., Riethmuler M.L., Campos J.B.L.M., Pinto A.M.F.R. // Chemical Engineering Science. 2006. V. 61. N 2. P. 845–857.
- [4] Dumitrescu D.T. // Zeitschrift fuer Angewandte Mathematik und Mechanik. 1943. V. 23. P. 139–149.