

03

## Особенности ламинарно-турбулентного перехода в восходящем монодисперсном микропузырьковом течении

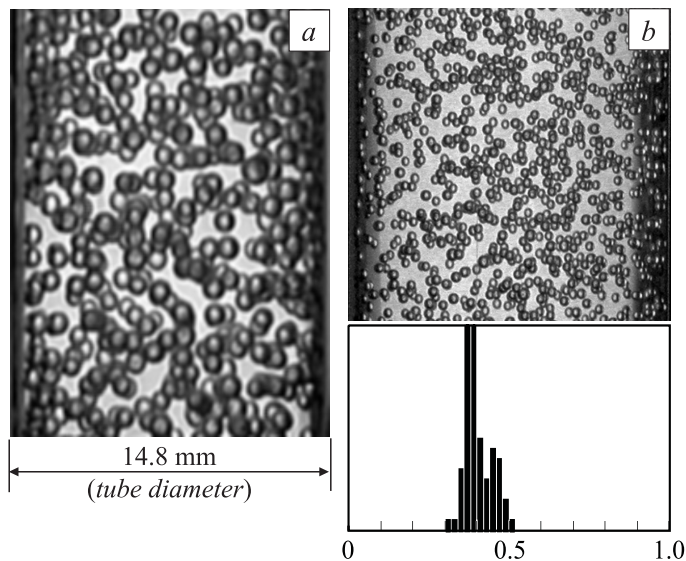
© Л.С. Тимкин, Р.С. Горелик

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

Поступило в Редакцию 25 декабря 2009 г.

Представлены результаты экспериментального исследования напряжения трения на стенке в восходящем монодисперсном пузырьковом течении в вертикальной трубе. Для получения монодисперсных субмиллиметровых пузырьков создан генератор с использованием фокусирующей методики. Результаты исследования показывают, что при использовании субмиллиметровых пузырьков существенно возрастает массообмен течения со стенкой трубы. Обнаружены особенности взаимодействия собственной турбулентности жидкости и введенной субмиллиметровыми пузырьками псевдотурбулентности в переходном режиме течения.

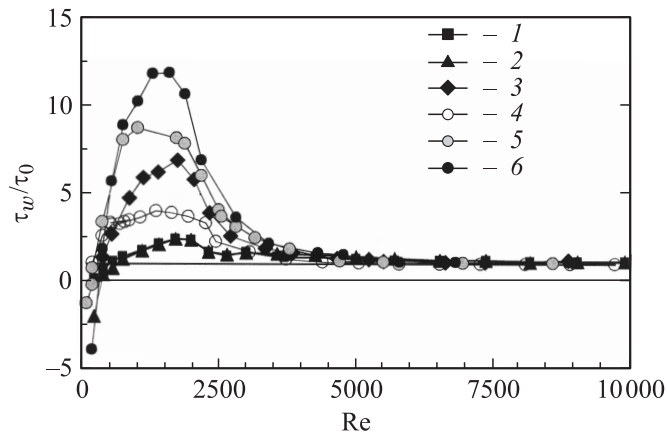
Экспериментальная установка выполнена в виде вертикального двухфазного контура, с рабочим участком — трубой внутренним диаметром 14.8 mm. Установка снабжена насосом, системой термостабилизации жидкости, газовыми и жидкостными расходомерами, электродиффузионными микродатчиками напряжения трения на стенке. В качестве газа используется сжатый воздух, в качестве жидкости — стандартный электрохимический раствор с 5%-ной добавкой этилового спирта для устранения коалесценции пузырьков. Физические свойства раствора близки к воде, при рабочей температуре 25°C вязкость  $\nu = 1.16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , плотность  $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$ . Субмиллиметровые пузырьки формировались в специальном генераторе, с использованием методики фокусировки течения [1], установленном осесимметрично на входе в трубу. Для обеспечения фиксированного размера пузырьков при разных расходах газа в генераторе использовались сменные кольца с количеством сопел от 1 до 24. Объемное расходное газосодержание изменялось в пределах  $\beta = 0.005\text{--}0.15$ .



**Рис. 1.** Фотографии пузырьков в трубе: *a* — средний диаметр пузырька  $d_b = 1.2$  mm; *b* —  $d_b = 0.4$  mm с гистограммой распределения пузырьков по диаметрам,  $d_b = 0.0378 \pm 0.040$  mm.

Экспериментальные данные по течению с миллиметровыми пузырьками подробно представлены в [2]. Диаметр субмиллиметровых пузырьков определялся по результатам цифровой обработки фотографий. На рис. 1 приведены фотографии миллиметровых и субмиллиметровых пузырьков для  $\beta = 0.05$ . Количество обработанных пузырьков в каждой измерительной точке составляло 100–150. Среднеквадратичный разброс диаметра пузырьков 10–15%. Точность выставления среднего диаметра пузырьков составляла 10–15% и являлась одной из причин разброса экспериментальных данных по напряжению трения на стенке. В качестве примера на рис. 1, *b* приведена гистограмма для субмиллиметровых пузырьков.

Для регистрации напряжения трения использовался электродиффузионный метод с микродатчиками напряжения трения на стенке [3]. Для пространственного осреднения экспериментальных данных восемь двойных датчиков трения устанавливались в одном сечении измерительного



**Рис. 2.** Отношение осредненного по периметру двухфазного напряжения трения к однофазному. Объемное газосодержание  $\beta = 0.05$ : 1 —  $d_b = 2.2$  мм, 2 —  $d_b = 1.2$  мм, 3 —  $d_b = 0.6$  мм. Диаметр пузырька  $d_b = 0.4$  мм: 4 —  $\beta = 0.005$ , 5 —  $\beta = 0.02$ , 6 —  $\beta = 0.05$ . Прямой линией показано однофазное трение.

блока, равномерно по периметру трубы. Размер платиновых электродов в направлении течения равен  $30 \mu\text{m}$ , в направлении, перпендикулярном течению,  $300 \mu\text{m}$ , толщина изолирующей прослойки между электродами датчика  $20 \mu\text{m}$ .

Датчики подключались к индивидуальным усилителям, которые опрашивались с помощью 16-разрядного АЦП, установленного в компьютере. Данные для каждого датчика усреднялись по массиву, кратному 16 384 опросам во времени. Время между опросами менялось от 0.1 до 5 ms в зависимости от скорости жидкости. Дальнейшая обработка данных проводилась в программном режиме в компьютере. Более подробно экспериментальная установка и многоканальные измерения двойными датчиками описаны в [2].

Экспериментальные данные по напряжению трения осреднялись по периметру трубы. Отношение двухфазного напряжения трения к однофазному —  $\tau_w/\tau_0$  рассчитывалось при одном и том же числе Рейнольдса течения —  $Re$ . Данные для диаметров пузырьков  $d_b = 2.2$ , 1.2, 0.6 и 0.4 мм и объемного газосодержания  $\beta = 0.05$  представлены на рис. 2 черными символами. Для течений с разными диаметра-

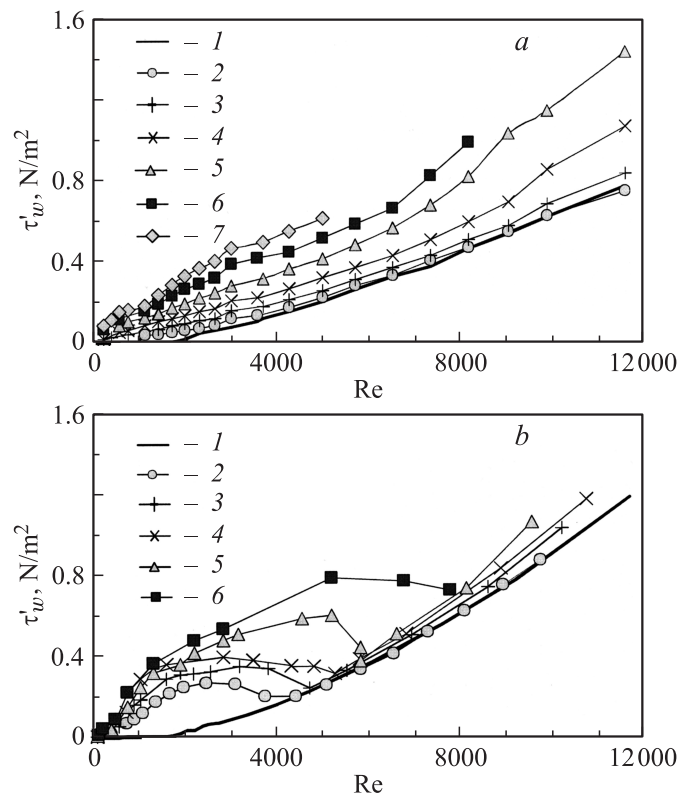
ми пузырьков характер зависимостей от числа Рейнольдса подобен. При малых  $Re$  наблюдаются режимы течения, близкие к барботажу. Визуально вблизи стенок трубы фиксируются возвратные течения, что коррелирует с отрицательными напряжениями трения на стенке, регистрируемыми датчиками, течение выглядит хаотическим. С ростом  $Re$  пузырьки мигрируют к стенке трубы, формируя пристенный пузырьковый подслой. При этом среднее трение растет и достигает максимума. В переходном и турбулентном режимах течения влияние пузырьков уменьшается, что объясняется размытием пузырькового подслоя растущими турбулентными пульсациями жидкости и ростом градиента скорости жидкости на масштабе порядка диаметра пузырька. Падение отношения трений и начало развала пристенного пузырькового подслоя для разных диаметров пузырьков находятся на границе ламинарно-турбулентного перехода.

Влияние пузырьков с уменьшением среднего диаметра существенно растет. Уменьшение диаметра пузырьков  $d_b$  с 2.2 до 0.6 и далее до 0.4 мм приводит к возрастанию среднего напряжения трения в максимуме в 3–4 раза.

Светлыми кружками на рис. 2 обозначены серии данных для  $d_b = 0.4$  мм и объемных газосодержаний потока  $\beta = 0.005$  и 0.02. Начиная с очень малых газосодержаний отношение трений для этих пузырьков резко растет. Так, уже для  $\beta = 0.005$  трение в максимуме в два раза выше, чем для миллиметровых пузырьков с большим на порядок газосодержанием.

Псевдотурбулентные пульсации в пузырьковом течении формируются из следов за пузырьками, пульсаций при обтекании пузырьков, взаимодействия пузырьков со стенкой трубы и взаимодействия между пузырьками, иногда формирующими структурированное течение. В переходном и турбулентном режимах к псевдотурбулентности добавляются собственные пульсации жидкости. Собственная турбулентность в данной экспериментальной трубе начинает развиваться с  $Re \sim 1900$ . Осредненные по периметру трубы пульсации напряжения трения для потока со средним диаметром пузырьков  $d_b = 2.2$  мм и объемными газосодержаниями  $\beta = 0.005–0.20$  представлены на рис. 3, *a*, с диаметром пузырьков  $d_b = 0.4$  мм — на рис. 3, *b*. Пульсации однофазного потока представлены на рисунках толстыми линиями.

Зависимости пульсаций от числа Рейнольдса течения с  $d_b = 2.2$  мм и  $d_b = 0.4$  мм качественно отличаются. С большими пузырьками



**Рис. 3.** Пульсации напряжения трения на стенке трубы: *a* — диаметр пузырька  $d_b = 2.2$  mm (число Рейнольдса по диаметру пузырька и скорости всплытия в большом объеме —  $Re_b = 380$ ); *b* — диаметр пузырька  $d_b = 0.4$  mm ( $Re_b = 14$ ). 1 —  $\beta = 0$ , 2 —  $\beta = 0.005$ , 3 —  $\beta = 0.02$ , 4 —  $\beta = 0.05$ , 5 —  $\beta = 0.10$ , 6 —  $\beta = 0.15$ , 7 —  $\beta = 0.20$ .

(рис. 3, *a*) псевдотурбулентные пульсации органично сочетаются с собственными пульсациями жидкости и монотонно растут с числом Рейнольдса. Пузырьковый вклад в величину пульсаций растет не только с числом Рейнольдса течения, но и с газосодержанием потока. Провести разделение псевдотурбулентности и турбулентности жидкости в этом случае сложно, что отмечалось ранее в классических работах [4].

Сценарий развития пульсаций трения на стенке с субмиллиметровыми пузырьками качественно отличается (рис. 3, *b*). В ламинарном течении псевдотурбулентные пульсации растут с числом Рейнольдса и выходят на практически постоянное значение в переходном режиме, не замечая собственной турбулентности жидкости. Собственная турбулентность жидкости не влияет на пульсации до чисел Рейнольдса, при которых однофазные пульсации жидкости сравниваются с псевдотурбулентными. Пузырьковая псевдотурбулентность преобладает при числах Рейнольдса течения ниже этой точки.

Выше этой точки пульсации определяет растущая собственная турбулентность жидкости, а пузырьки лишь добавляют составляющую, растущую с газосодержанием потока и числом Рейнольдса течения. Число Рейнольдса течения для этой точки растет с ростом объемного газосодержания.

Конкуренция пузырьковой псевдотурбулентности и собственной турбулентности жидкости приводит к тому, что доминирует более мощная компонента. Точкой раздела влияния той или иной турбулентности является равенство их интенсивностей.

В области максимального влияния пузырьков на гидродинамические характеристики течения получается течение в трубе, имеющей внутреннюю трубу, сформированную из пристенного пузырькового подслоя. Пузырьки вжимаются в подслоя поперечной силой, и эта „внутренняя пузырьковая труба“ определяет тепломассообмен в течении. Пузырьковый слой экранирует пульсации в ядре течения от пульсаций на стенке трубы и препятствует развитию собственной турбулентности жидкости. Когда турбулентность жидкости пробивается через пристенный пузырьковый подслой, из него начинают вымываться пузырьки, резко падает среднее напряжение трения. С ростом числа Рейнольдса пульсации жидкости растут и полностью размывают пристенный пузырьковый подслой. Пульсации течения в основном определяются собственной турбулентностью жидкости, а пузырьки лишь вносят небольшую добавку.

В работе с использованием фокусирующей методики получены монодисперсные пузырьковые смеси со средним диаметром пузырьков меньше миллиметра.

Отношение среднего по времени и осредненного по периметру трубы двухфазного трения к однофазному существенно зависит от размера пузыря и возрастает в 3–4 раза для субмиллиметровых пузырьков по сравнению с миллиметровыми пузырьками. Интересно, что трение

для пузырьков с  $d_b = 0.4 \text{ mm}$  даже при  $\beta = 0.005$  в максимуме превышает аналогичное для миллиметровых пузырьков при газосодержании в 10 раз больше. Трение в течение с субмиллиметровыми пузырьками выше однофазного в 13 раз, что позволяет надеяться на достижение высоких коэффициентов тепломассообмена в данных режимах.

Псевдотурбулентные пульсации трения для субмиллиметровых пузырьков растут с числом Рейнольдса течения, достигают определенного уровня, а далее остаются практически постоянными в ламинарной и переходной области. Пузырьковый подслои задерживает развитие собственных турбулентных пульсаций. Когда уровень собственной турбулентности жидкости достигает уровня псевдотурбулентности и превышает его, пульсации в потоке определяются собственной турбулентностью жидкости, с добавкой от пузырьков, растущей с газосодержанием.

Более точное понимание обнаруженных эффектов взаимодействия субмиллиметровых пузырьков с турбулентностью в переходном режиме течения требует дальнейшего изучения.

## Список литературы

- [1] Cordillo J.M., Ganan-Calvo A.M., Perez-Saborid M. // Phys. of Fluids. 2001. V. 13. N 12. P. 3839–3842.
- [2] Кашинский О.Н., Тимкин Л.С., Горелик Р.С., Лобанов П.Д. // ИФЖ. 2006. Т. 79. № 6. С. 66–80.
- [3] Накоряков В.Е., Бурбуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И. // Электро-диффузионный метод исследования локальных характеристик турбулентных течений. Новосибирск: ИТФ СО РАН, 1986.
- [4] Sato Y., Sadatomi M., Secoguchi K. // Int. J. Multiphase Flow. 1981. V. 7. P. 167–190.