

А. Е. Гореликова<sup>1,2</sup>, О. Н. Кашинский<sup>1</sup>, В. В. Рандин<sup>1,2</sup>, А. В. Чинак<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

gorelikova.a@gmail.com; kashinsky@itp.nsc.ru; randin@itp.nsc.ru; chinak@itp.nsc.ru

## ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ГАЗА НА ДИАМЕТР ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ В ВОСХОДЯЩЕМ ПУЗЫРЬКОВОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКОМ НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена и трения на стенке в восходящем пузырьковом течении в наклонном плоском канале. Измерения проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости 0,3÷1,1 м/с и при различных значениях расходного объемного газосодержания. Измерения гидродинамической структуры проведены электрохимическим методом с использованием миниатюрных датчиков трения. Определены значения среднего трения и коэффициента теплообмена при различной ориентации канала. Показано, что в пузырьковом газожидкостном течении наблюдается существенная зависимость трения и теплообмена от угла наклона канала.

*Ключевые слова:* плоский канал, газожидкостный поток, пузыри, трение на стенке, коэффициент теплообмена.

### Введение

Многообразие режимов течения существенно усложняет теоретическое предсказание гидродинамики двухфазных потоков, требуя использования многочисленных гипотез, предположений и приближений. Нередко сложность структуры течения делает невозможным чисто теоретическое описание его поведения и требует использования эмпирических данных. Поэтому экспериментальное изучение газожидкостных потоков является актуальным.

Пузырьковый газожидкостный поток – один из тех случаев, где распределение газовой фазы не определяется только скоростью движения фаз. В двухфазных пузырьковых течениях имеется ряд проблем, по которым в настоящее время нет удовлетворительных теоретических подходов. Это

касается, в частности, задачи распределения газовой фазы по сечению канала, а также влияния дисперсной фазы на турбулентность несущей фазы. В отличие от однофазного течения на гидродинамические характеристики газожидкостного течения существенно влияют ориентация канала и направление течения.

В литературе широко и подробно представлены экспериментальные исследования восходящего газожидкостного течения в вертикальных трубах и каналах [1; 2]. Большая часть экспериментальных исследований пузырьковых потоков посвящена течениям в вертикальных трубах [3–6]. В этом случае распределение газовой фазы формируется с помощью боковых сил, действующих на всплывающие пузыри при наличии градиента скорости [7]. Намного меньше внимания было уделено пузырьковым газожидкост-

Гореликова А. Е., Кашинский О. Н., Рандин В. В., Чинак А. В. Влияние расхода газа на диаметр газовых пузырей в восходящем пузырьковом течении в плоском наклонном канале // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 2. С. 136–144.

ным потокам в горизонтальных и наклонных каналах, хотя именно в этом случае ориентация канала может быть очень важна.

Экспериментальные исследования потоков в наклонных трубах были представлены в работах [8; 9]. В работе [9] приведены результаты измерений профилей средней скорости и локального газосодержания в развитом восходящем пузырьковом течении в прямоугольном канале. Канал располагался под углами до  $30^\circ$  к вертикали. В работе показано, что вблизи верхней стенки профили скорости существенно искажены присутствием пузырей. Авторы пришли к выводу, что пузырьковый слой вблизи верхней стенки может существенно подавлять среднее трение на эту стенку. Пузырьковое газожидкостное течение в наклонном прямоугольном канале изучалось в работах [10; 11]. Было показано, что ориентация канала существенно влияет на гидродинамику течения. Поведение пузырьковых потоков в горизонтальном канале рассмотрено в работах [12; 13]. В работе [13] проведено экспериментальное исследование распределения газовой фазы в горизонтальном пузырьковом течении. С использованием датчиков электропроводности были измерены профили локального газосодержания, значения диаметров и скоростей пузырей. В работе показана существенная зависимость локального газосодержания и размеров пузырей от радиальной координаты вдоль поперечного сечения трубы. Максимумы этих зависимостей наблюдались у верхней стенки. Был изучен переход течения от режима дисперсных пузырей к режиму снарядного течения. В переходном режиме показано резкое изменение размера пузырей при небольших изменениях расходных скоростей смеси.

В работе [14] проведены исследования интенсификации массообмена на стенке введением в поток жидкости газовой фазы. Показано, что абсолютная величина массообмена в двухфазном потоке мало увеличивается с ростом скорости жидкости. Дисперсность газовой фазы значительно влияет на массообмен (с уменьшением размера пузырей массообмен возрастает). Быстрый рост массообмена на стенке происходит при очень малом газосодержании (до 0,05), после чего наблюдается монотонный медленный рост при дальнейшем возрастании газосодержания. Эффективность воздействия газовой фазы на массообмен увеличивается

с уменьшением скорости жидкости. Максимальное значение массообмена достигается в области углов наклона канала  $30\text{--}50^\circ$ .

В работе [15] представлены результаты экспериментального исследования теплообмена и трения на стенке в восходящем пузырьковом течении в наклонном плоском канале. Показано, что в пузырьковом газожидкостном течении наблюдается существенная зависимость трения и теплообмена от угла наклона канала.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния газовых пузырей и угла наклона на теплообмен и гидродинамику двухфазного восходящего течения, а также нахождение зависимости диаметра газовых пузырей от расхода газа в наклонном плоском канале.

#### **Экспериментальная установка и методика измерений**

Экспериментальная установка (рис. 1) представляла собой замкнутый по жидкости циркуляционный двухфазный контур. Рабочая жидкость из бака (1) с помощью центробежного насоса (2) через расходомеры (3 и 4) подавалась в рабочий участок. Рабочий участок представляет собой прямоугольный канал из оргстекла с поперечным сечением  $10 \times 100$  мм и длиной 1,7 м. В качестве расходомеров жидкости использовались ротаметры. Расход жидкости регулировался с помощью регулировочных вентилях (5). На входе рабочего участка была установлена форкамера (6) с конфузуром и сеткой для выравнивания потока по поперечному сечению канала. Рабочий участок состоял из нескольких секций (7÷9), соединенных фланцами. В измерительной секции (9) помещались датчики трения (10) и температуры (11) или оптическая секция для наблюдения газовых пузырей. После рабочего участка жидкость подавалась в верхний бак – сепаратор (12), где отделялась от газа и вновь сливалась в основной бак (1). Газ (воздух) подавался от компрессора через расходомерную диафрагму (13). Перепад давления на диафрагме измерялся с помощью дифференциального датчика давления (14) MPX5050 фирмы «Motorola». Регулировка расхода газа производилась вентилем (15). Газ вводился в поток жидкости через 21 капилляр с внутренним диаметром 0,3 мм. Капилляры были вклеены в оргстек-

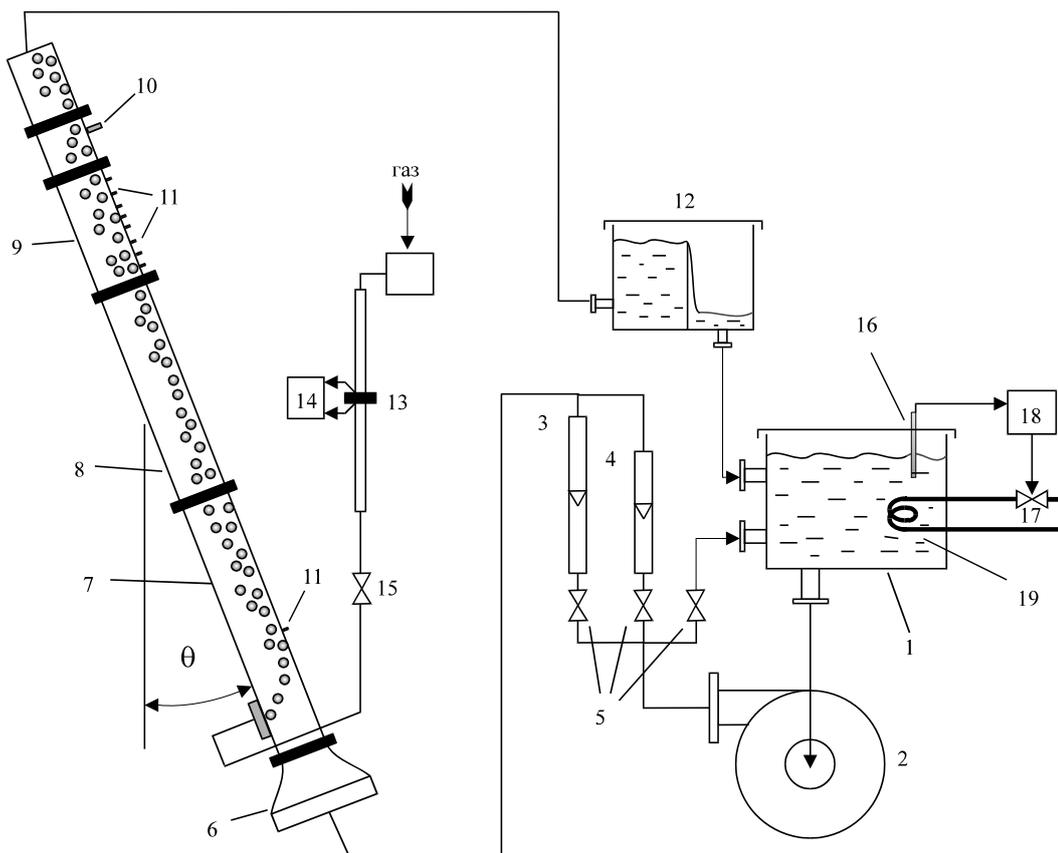


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – основной бак; 2 – насос; 3, 4 – жидкостные расходомеры; 5 – регулировочные вентили; 6 – форкамера с конфузуром; 7 – секция с генератором пузырей; 8 – промежуточная секция; 9 – измерительный блок; 10 – датчики касательного напряжения; 11 – датчики температуры; 12 – бак-сепаратор; 13 – расходомерная диафрагма; 14 – дифференциальный датчик давления; 15 – регулятор расхода газа; 16 – датчик температуры рабочей жидкости в основном баке; 17 – электрический клапан; 18 – регулятор температуры; 19 – теплообменник

лянную вставку, помещенную на верхней стенке канала. Пузыри газа образовывались при отрыве газа от торцов капилляров, которые выступали на 5 мм от верхней стенки канала. Газожидкостный поток, получившийся при смешении газа и жидкости, поступал в измерительную секцию рабочего участка. Расстояние от места ввода газа до измерительной секции 750 мм. Температура рабочей жидкости поддерживалась постоянной на уровне 25 °С с помощью автоматической системы термостатирования (16–19). Угол наклона канала  $\theta$  отсчитывался от вертикали, таким образом, положение  $\theta = 0^\circ$  соответствовало вертикальному положению канала, а  $\theta = 90^\circ$  – горизонтальному.

Исследования гидродинамики течения проводились электродиффузионным методом [16]. В качестве рабочей жидкости использовался раствор ферри- и ферроцианида калия и углекислого натрия в дистиллиро-

ванной воде. Датчики касательного напряжения (рис. 2, а) были установлены на верхней стенке измерительного участка, они представляли собой платиновые пластинки размером 0,1 × 0,9 мм (1), вваренные в стеклянный капилляр (2). Датчики были вклеены в стенку канала и зашлифованы заподлицо с ней (3).

Для тепловых измерений использовался измерительный блок, показанный на рис. 2, б. На верхней стенке измерительной секции была наклеена фольга из нержавеющей стали (2) толщиной 200 мкм, длиной 273 мм и шириной 73 мм. Эта фольга служила нагревательным элементом. В качестве датчиков температуры использовались миниатюрные (2 × 2 × 1 мм) платиновые термосопротивления 700-102ВАА-В00 фирмы «Heraeus Sensor Technology» с номинальным сопротивлением 1 кОм при 0 °С. Датчики температуры (1) прикреплялись к обратной поверхности

металлической фольги в измерительной секции. Для обеспечения хорошего теплового контакта датчиков использовалась теплопроводная паста. В измерительной секции было установлено 7 датчиков температуры. Для измерения температуры входного потока в начале рабочего участка был установлен еще один датчик температуры. Нагрев производился посредством пропускания электрического тока через фольгу. В течение измерений сила тока поддерживалась постоянной. Измерение тока проводилось с помощью датчика тока типа CSLA2EN фирмы «Honeywell». Таким образом реализовывалось граничное условие  $q_{\text{стенки}} = \text{const}$ . Все измерения проводились при температурном напоре  $\Delta T \approx 5^\circ$ . В рабочем режиме ток через нагреватель достигал значений 210 А. Перед проведением измерений вся система «датчики + усилители + АЦП» была прокалибрована при помощи жидкостного термостата с погрешностью  $\pm 0,1^\circ$ .

Эксперименты проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости  $\bar{u}$  от 0,3 до 1,1 м/с. Объемное расходное газосодержание  $\beta = \bar{u}_g / (\bar{u} + \bar{u}_g)$  изменялось от 0,01 до 0,2. Во всех исследованных режимах поток оставался пузырьковым.

В качестве рабочей жидкости в экспериментах по теплообмену использовался раствор ферри- (0,16 %) и ферроцианида (0,21 %) калия и углекислого натрия (2,55 %) в дистиллированной воде.

Коэффициент теплопроводности 10 %-го водного раствора углекислого натрия при температуре  $20^\circ\text{C}$  составляет 0,607 Вт/м/град [17] и составляет 101,34 % от теплопроводности чистой воды. Это позволяет предположить, что добавки, присутствующие в рабочей жидкости не вносят заметного вклада в ее теплофизические свойства. Были проведены эксперименты, в которых проводились измерения теплообмена на стенке в турбулентном однофазном потоке с чистой водой и с рабочей жидкостью. Эксперименты показали, что замена рабочей жидкости на чистую воду не отражается на результатах измерений теплообмена.

Для определения зависимости диаметра газовых пузырей от расхода газа через оптическую секцию канала производилась съемка на скоростную камеру REDLAKE MotionPRO 2000.0. Скорость съемки камеры при разрешении 512\*512 точек – 500 кадров в секунду.

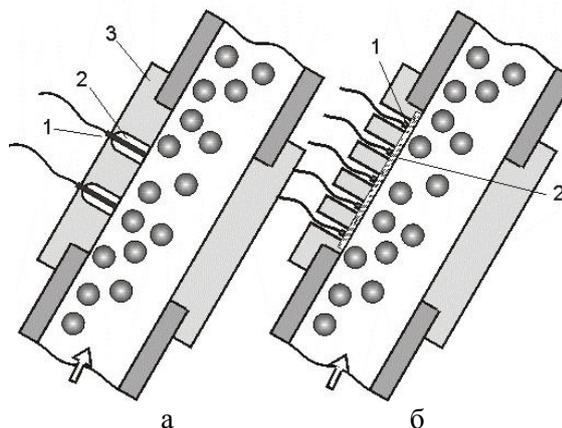


Рис. 2. Блок датчиков трения (а): 1 – платиновые датчики касательного напряжения; 2 – стеклянный капилляр; 3 – оргстеклянная вставка с датчиками касательного напряжения. Блок тепловых измерений (б): 1 – датчики температуры; 2 – фольга из нержавеющей стали

Визуальные наблюдения показали, что распределение пузырей по сечению канала стабилизируется уже на расстоянии  $\sim 200$  мм от места ввода газовой фазы в поток. Кроме того, проводились эксперименты, в которых расстояние от места ввода газа до измерительного участка было равно 450 мм. Показано, что дальнейшее увеличение расстояния от генератора пузырей до измерительного участка не оказывает влияния на результаты измерений.

### Результаты измерений

Получены зависимости трения и коэффициентов теплообмена на верхней стенке канала от скорости жидкости и газосодержания, а также от угла наклона канала. Получена зависимость диаметра пузырей от расходного газосодержания.

Для проверки методики и измерительной системы были проведены измерения в однофазном потоке. Результаты показали, что безразмерные коэффициенты теплоотдачи хорошо совпадают с известной зависимостью для однофазного турбулентного потока [18]:

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}.$$

Отклонение экспериментальных данных от теоретической кривой не превышало 5%.

Ширина нашего канала существенно больше его толщины. Поэтому в качестве

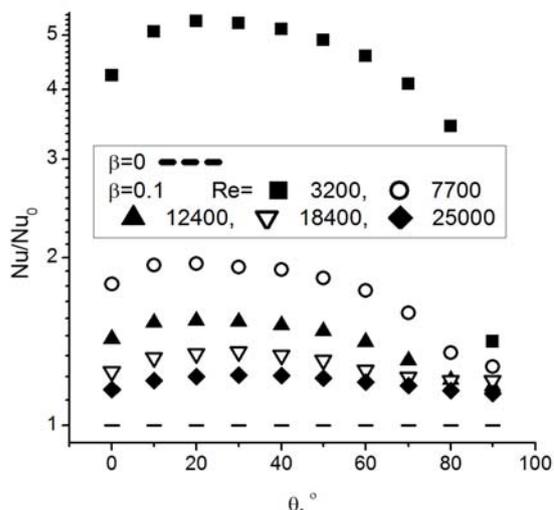


Рис. 3. Зависимость отношения  $Nu/Nu_0$  от угла наклона канала ( $Re = 3\,200, 7\,700, 12\,400, 18\,400, 25\,000$ ;  $\beta = 0,1$ )

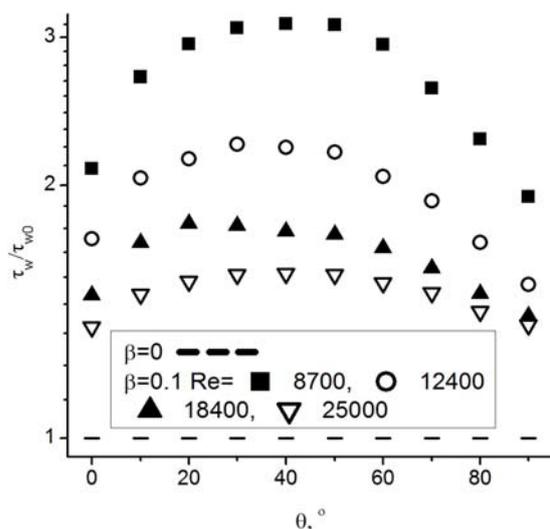


Рис. 4. Зависимость относительного касательного напряжения на стенке от угла наклона канала ( $Re = 8\,700, 12\,400, 18\,400, 25\,000$ ;  $\beta = 0,1$ )

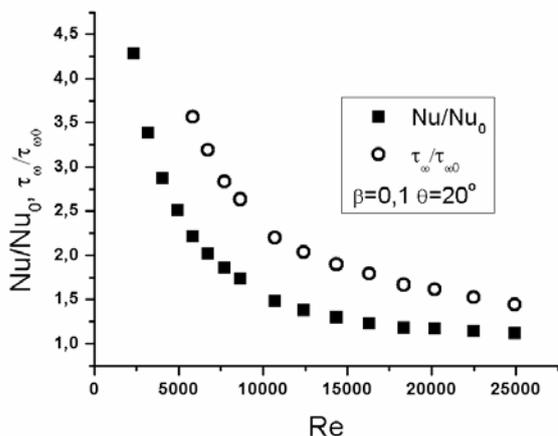


Рис. 5. Зависимость относительного касательного напряжения на стенке и теплообмена от числа  $Re$  ( $\beta = 0,1$ ;  $\theta = 20^\circ$ )

линейного размера в критериях  $Nu$  и  $Re$  использовался гидравлический диаметр бесконечно широкого прямоугольного канала, т. е. удвоенная толщина канала (20 мм).

На рис. 3 и 4 приведены результаты измерений теплообмена и касательного напряжения на стенке в газожидкостном пузырьковом потоке в зависимости от угла наклона канала и числа Рейнольдса, построенного по приведенной скорости и вязкости жидкости. Измерения проводились при  $\beta = 0,1$ . Видно, что зависимость числа Нуссельта и касательного напряжения на стенке от угла наклона качественно похожи. Максимумы теплоотдачи и касательного напряжения на стенке наблюдаются в диапазоне углов наклона канала  $\theta \approx 20-50^\circ$ . Это объясняется тем, что, во-первых, при этих углах газовая фаза сосредоточена вблизи верхней (измерительной) стенки канала, а во-вторых, проекция силы Архимеда на ось канала достаточно велика. Это приводит к тому, что, всплывая вблизи верхней стенки канала, пузыри увеличивают вихревой перенос импульса и тепла в этой области. При углах наклона канала близких к вертикали распределение пузырей по сечению канала становится более однородным, а концентрация пузырей вблизи верхней стенки снижается, что приводит к снижению вклада пузырей в вихревой перенос у верхней стенки. При углах наклона канала близких к горизонтальному газовая фаза сосредоточена вблизи верхней стенки, но проекция силы Архимеда на ось канала близка к нулю, и скорость пузырей относительно жидкости мала, что также уменьшает вклад газовой фазы в вихревой перенос.

С увеличением приведенного числа Рейнольдса жидкости зависимости  $Nu$  и  $\tau_w$  от угла наклона становятся слабее. При скорости жидкости более 1 м/с ( $Re = 25\,000$ ) разница между максимальным и минимальным значениями коэффициента теплоотдачи составляет  $\sim 7\%$ , а для  $Re = 7\,700$  – приблизительно  $35\%$ . Для касательного напряжения на стенке разница между максимальным и минимальным значениями составляет  $\sim 37\%$  при  $Re = 8\,660$  и  $\sim 14\%$  при  $Re = 25\,000$ . Следует отметить, что при углах наклона канала близких к горизонтальному положению ( $80-90^\circ$ ) и малой скорости жидкости пузыри активно объединяются и течение может менять структуру, переходя

в снарядное. Этот процесс приводит к большому разбросу в измерениях.

На рис. 5 приведены зависимости отношений  $Nu/Nu_0$  и  $\tau_w/\tau_{w0}$  от значений числа Рейнольдса ( $Nu_0$  – число Нуссельта в однофазном потоке,  $\tau_{w0}$  – касательное напряжение на стенке в однофазном потоке). Эксперименты проводились при угле наклона канала  $\theta = 20^\circ$  и  $\beta = 0,1$ . Видно, что наличие газовой фазы значительно больше влияет на интенсификацию касательного напряжения, чем на теплообмен. Приведенные данные показывают, что степень интенсификации теплообмена и касательного напряжения на стенке в двухфазном потоке по отношению к однофазному быстро уменьшается с ростом числа Рейнольдса. Это означает, что вклад пульсаций от пузырей при больших числах Рейнольдса по жидкости становится незначительным по сравнению с естественными турбулентными пульсациями несущей жидкости.

Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи от объемного расходного газосодержания имеет довольно сложный характер (рис. 6). Малые добавки газа (до 1 %) в поток жидкости приводят к резкому увеличению коэффициента теплоотдачи по сравнению с однофазным течением. При газосодержании 1–2 % наблюдается небольшой экстремум теплоотдачи. Он может быть связан с тем, что при увеличении расхода газа диаметры пузырей, отрывающихся от капилляров, несколько увеличиваются, кроме того, при увеличении газосодержания усиливается процесс коалесценции пузырей. А, как известно, мелкодисперсная газовая фаза оказывает большее влияние на интенсификацию процессов переноса. Качественно похожее поведение показывает зависимость трения на стенке от газосодержания. Здесь также малые добавки газа (до 1 %) в поток жидкости приводят к резкому увеличению трения по сравнению с однофазным течением.

На рис. 7 экспериментальные данные представлены в виде зависимости  $\tau_w/\tau_{w0}$  от  $Nu/Nu_0$ . Данные получены при расходном газосодержании  $\beta = 0,1$ , углах наклона канала  $\theta = 0; 20; 30; 40^\circ$  и числах Рейнольдса  $Re = 5\,800\text{--}25\,000$ . При таком представлении данных однофазному течению соответствует точка  $\tau_w/\tau_{w0} = 1$ ,  $Nu/Nu_0 = 1$ .

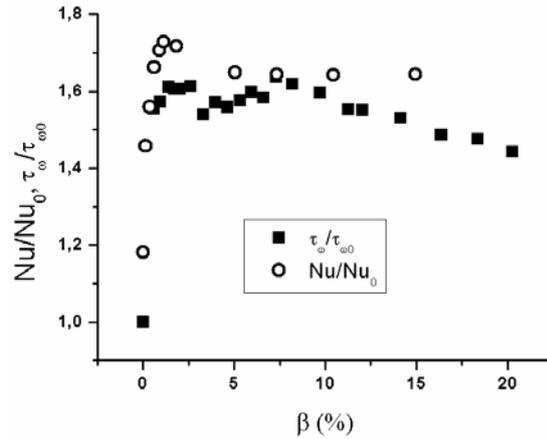


Рис. 6. Зависимость относительных теплообмена и касательного напряжения от расходного газосодержания ( $Re = 12\,400$ ;  $\theta = 45^\circ$ )

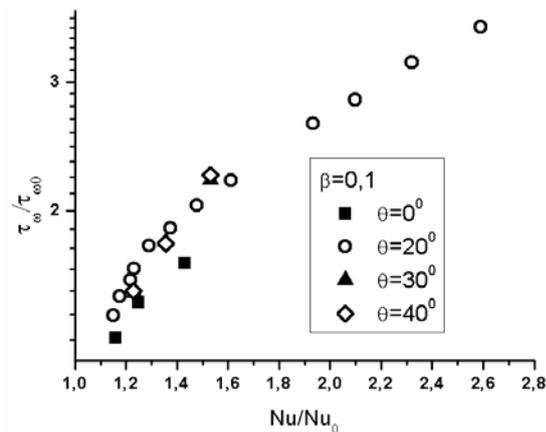


Рис. 7. Аналогия между теплообменом и касательным напряжением на стенке в газожидкостном потоке ( $Re = 5\,800\text{--}25\,000$ )

С увеличением газосодержания и уменьшением числа Рейнольдса точка, соответствующая данному режиму, будет удаляться от «однофазной точки» ( $\tau_w/\tau_{w0} = 1$ ,  $Nu/Nu_0 = 1$ ). Видно, что все приведенные точки на графике расположены вблизи области, которую можно аппроксимировать прямой.

При одних и тех же параметрах течения степень возрастания теплообмена по отношению к однофазному течению оказывается несколько меньше, чем степень возрастания трения. Возможно, это в определенной степени связано с частичной блокировкой поверхности теплообмена газовыми пузырями, которые в большинстве режимов «прижаты» к верхней стенке канала, где и находился нагреватель.

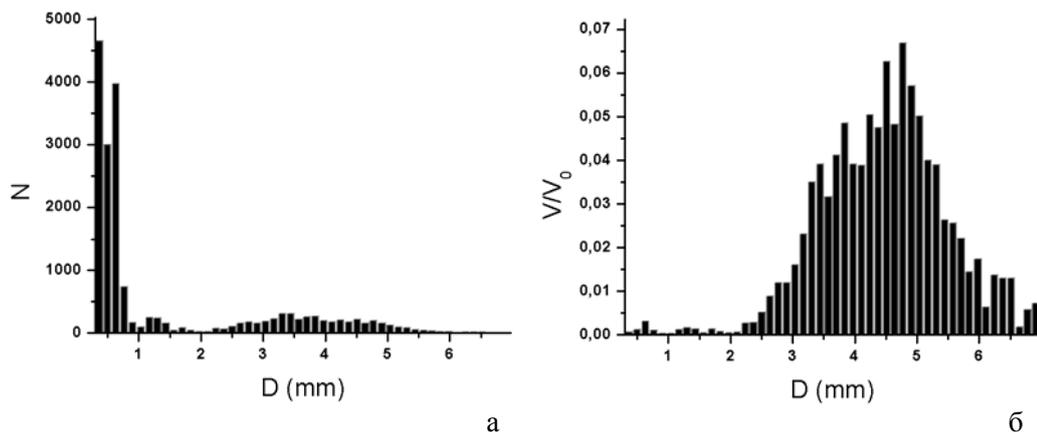


Рис. 8. Гистограммы размеров пузырей ( $\beta = 9\%$ ,  $Re = 12\,400$ ,  $\theta = 45^\circ$ ): *a* – без нормировки; *б* – объем газа, перенесенный одним диаметром пузырей, нормированный на полный объем газа

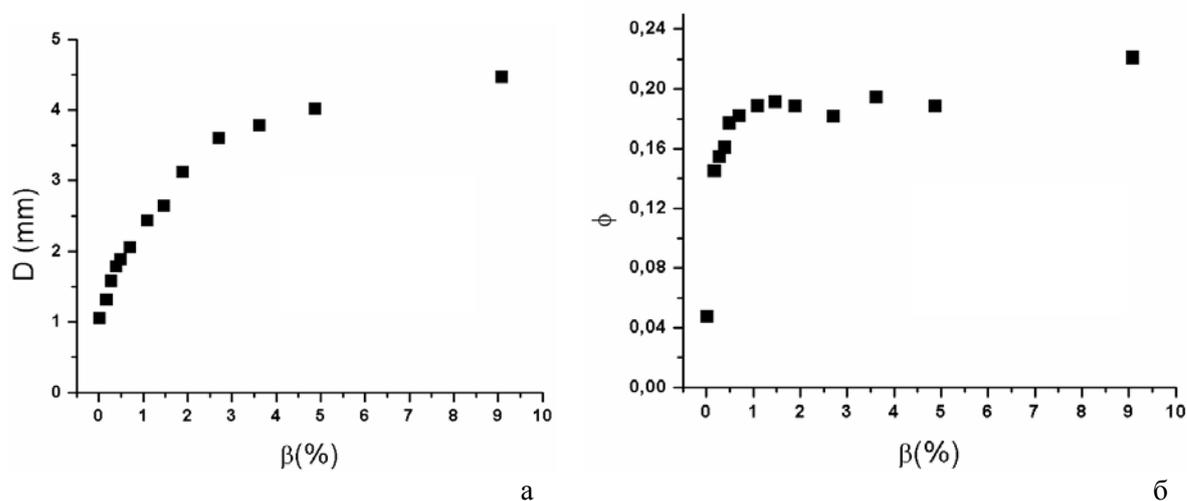


Рис. 9. Зависимость диаметра пузырей, переносящих основной объем газа (*a*), и заполненности пузырькового слоя (*б*) от объемного расходного газосодержания при  $Re = 12\,400$ ,  $\theta = 45^\circ$

Размер газовых пузырей исследовался при угле наклона  $\theta = 45^\circ$  и числе Рейнольдса  $Re = 12\,400$ . Для различных значений объемного расходного газосодержания были построены гистограммы распределения размеров газовых пузырей. На рис. 8, *a* представлена гистограмма для  $\beta = 9\%$ , которая показывает, что даже при больших значениях объемного расходного газосодержания основная часть газовых пузырей имеет диаметр менее 1 мм. Рассмотрим зависимость отношения объема газа, перенесенного одним диаметром пузырей, к полному объему газа ( $V/V_0$ ) от диаметра газовых пузырей ( $D$ ) для того же значения объемного расходного газосодержания (рис. 8, *б*). На гистограмме видно, что даже при преобладании пузырей

малого диаметра, основной объем газа переносится пузырями, имеющими диаметр в диапазоне 3–6 мм. Также, если построить зависимость диаметра пузырей, переносящих основной объем газа, от объемного расходного газосодержания, получим ожидаемое увеличение этой зависимости (рис. 9, *a*).

При данных числах Рейнольдса и углах наклона все пузыри находятся у верхней стенки плоского канала в 1 слой. Вводим оценочную характеристику, заполненность пузырькового слоя  $\phi = S_b/S_{\text{full}}$ , которая является процентом площади, занимаемой пузырьками на снимке. Зависимость заполненности пузырькового слоя от объемного расходного газосодержания (рис. 9, *б*) имеет качественно похожий вид с уже рассмот-

ренными зависимостями коэффициента теплоотдачи от объемного расходного газосодержания и трения на стенке от газосодержания, т. е. малые добавки газа (до 1 %) в поток жидкости приводят к резкому увеличению заполненности пузырькового слоя, при газосодержании 1–2 % наблюдается небольшой экстремум. При росте газосодержания от 5 до 15 % наблюдается постепенный рост этого параметра.

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование напряжения трения на стенке, теплообмена и диаметра газовых пузырей в восходящем двухфазном пузырьковом течении в прямоугольном канале переменной ориентации. Показано, что в газожидкостном течении угол наклона канала по отношению к горизонту оказывает существенное влияние на трение и теплообмен. Наибольшие значения трения и теплообмена соответствуют углам наклона канала  $\theta \approx 20\text{--}50^\circ$ .

Отмечено качественное подобие поведения трения и теплообмена при изменении угла наклона канала и объемного расходного газосодержания. Отмечено качественное подобие зависимости трения, теплообмена и заполненности пузырькового слоя от расходного газосодержания. Показано, что степень влияния газовой фазы на трение и теплообмен уменьшается с увеличением приведенной скорости жидкости. Показано, что с увеличением расходного газосодержания увеличивается диаметр газовых пузырей, которыми переносится основная часть газа, при этом основная часть пузырей имеет диаметр менее 1 мм.

### Список литературы

1. Sun X., Kim S., Smith T. R., Ishii M. Local Liquid Velocity Measurements in Air-Water Bubbly Flow // *Experiments in Fluids*. 2002. No. 33. P. 653–662.
2. Magaud F., Souhar M., Wild G., Boisson N. Experimental Study of Bubble Column Hydrodynamics // *Experiments in Fluids*. 2001. No. 56. P. 4597–4607.
3. Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I. Turbulent Structure of Air-Water Bubbly Flow // *Int. J. Multiphase Flow*. 1975. No. 2. P. 235–246.
4. Nakoryakov V. E., Kashinsky O. N., Burdukov A. P., Odnoral V. P. Local Characteristics of Upward Gas-Liquid Flows // *Int. J. Multiphase Flow*. 1981. No. 7. P. 63–81.
5. Wang S. K., Lee S. J., Jones O. C., Lahey R. T. 3-D Turbulence Structure and Phase Distribution Measurements in Bubbly Two-Phase Flows // *Int. J. Multiphase Flow*. 1987. No. 13. P. 327–343.
6. Kashinsky O. N., Randin V. V., Lobanov P. D. The Influence of a Small Gas Addition to the Structure of Gas-Liquid Downward Flow in a Tube // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2008. Vol. 17. No. 2. P. 120–125.
7. Zun I. The Transverse Migration of Bubbles Influenced by Walls in Vertical Bubbly Flow // *Int. J. Multiphase Flow*. 1980. No. 6. P. 583–588.
8. Barnea D., Shoham O., Taitel Y., Dukler A. E. Gas-Liquid Flows in Inclined Tubes: Flow Pattern Transition for Upward Flow // *Chem. Eng. Sci.* 1985. No. 40. P. 735–740.
9. Sanaullah K., Thomas N. H. Velocity and Voidage Profiles for Steeply Inclined Bubbly Flows in Segregated – Disperse Regime // *Experimental and Computational Aspects of Validation of Multiphase Flow CFD Codes*. 1994. Vol. 180. P. 119–127.
10. Кашинский О. Н., Чинак А. В., Каупова Е. В. Пузырьковое газожидкостное течение в наклонном плоском канале // *Теплофизика и аэромеханика*. 2003. Т. 10, № 1. С. 71–78.
11. Kaipova E. V. Two-Phase Bubble Flow in Inclined and Horizontal Channel // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2003. Vol. 12. No. 4. P. 297–311.
12. Gabillet C., Colin C., Fabre J. Experimental Study of Bubble Injection in a Turbulent Boundary Layer // *International Journal of Multiphase Flow*. 2002. No. 28. P. 553–578.
13. Andreussi P., Paglianti A., Silva F. S. Dispersed Bubble Flow in Horizontal Pipes // *Chemical Engineering Science*. 1999. No. 54. P. 1101–1107.
14. Кашинский О. Н., Чинак А. В., Смирнов Б. М., Успенский М. С. Массообмен при движении газожидкостного потока в наклонном плоском канале // *ИФЖ*. 1993. Т. 64, № 5. С. 523–528.
15. Кашинский О. Н., Рандин В. В., Чинак А. В. Влияние ориентации канала на теплообмен и трение в пузырьковом течении //

Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 4. С. 401–408.

16. *Накоряков В. Е., Бурдуков А. П., Кашинский О. Н., Гешев П. И.* Электродиффузионный метод исследования локальных характеристик турбулентных течений. Новосибирск, 1986. 247 с.

17. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

18. *Михеев М. А.* Основы теплопередачи. М.: Гос. энергетическое изд-во, 1949. 397 с.

*Материал поступил в редколлегию 25.03.2014*

**A. E. Gorelikova<sup>1,2</sup>, O. N. Kashinsky<sup>1</sup>, V. V. Randin<sup>1,2</sup>, A. V. Chinak<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Thermophysics of SB RAS  
1 Lavrentiev Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University  
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*gorelikova.a@gmail.com; kashinsky@itp.nsc.ru; randin@itp.nsc.ru; chinak@itp.nsc.ru*

**DEPENDENCE OF GAS BUBBLE DIAMETER  
FROM THE GAS FLOW RATE IN UPWARD TWO-PHASE FLOW  
IN AN INCLINED FLAT CHANNEL**

Experimental study of heat transfer and wall shear stress in an upward bubbly flow in an inclined flat channel is presented. The measurements were performed in the range of superficial liquid velocities 0.3÷1.1 m/s and different values of volumetric gas flow rate ratio. Measurements of hydrodynamic structure were carried out by electrochemical method using a miniature sensors of friction. The values of average friction and heat transfer coefficient at different orientations of the channel were determined. It is shown that there is a significant dependence of friction and heat transfer on the channel inclination angle in the gas-liquid flow.

*Keywords:* flat channel, gas-liquid flow, bubbles, wall friction, heat transfer coefficient.