

УДК 532.529.5

## **Влияние ориентации канала на теплообмен и трение в пузырьковом течении**

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

<sup>1</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет*

E-mail: randin@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена и трения на стенке в восходящем пузырьковом течении в наклонном плоском канале. Измерения проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости  $0,3 \div 1,1$  м/с и при различных значениях расходного объемного газосодержания. Измерения гидродинамической структуры были проведены с помощью электрохимического метода 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 двухфазного потока, 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. Для двухфазных пузырьковых течений имеется ряд проблем, к решению которых 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 газожидкостным потокам в горизонтальных и наклонных каналах, хотя именно в этом случае ориентация канала может быть очень важна.

Экспериментальным исследованиям потоков в наклонных трубах посвящены работы [8] и [9]. В работе [9] представлены 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. Было показано, что вблизи верхней стенки профили скорости существенно искажены присутствием пузырей. Авторы пришли к выводу, что пузырьковый слой вблизи верхней стенки может существенно подавлять на ней среднее трение. 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. Также была 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 малых газосодержаниях (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  $30\text{--}50^\circ$ .

Целью настоящей работы являлось изучение влияния газовых пузырей и угла наклона на теплообмен и гидродинамику двухфазного восходящего течения 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 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 конфузоров 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. 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 двадцать один капилляр внутренним диаметром 0,3 мм. Капилляры были вклеены во вставку из оргстекла, помещенную на нижней стенке канала. Пузыри газа образовывались при отрыве газа от торцов капилляров, которые выступали на 5 мм от нижней

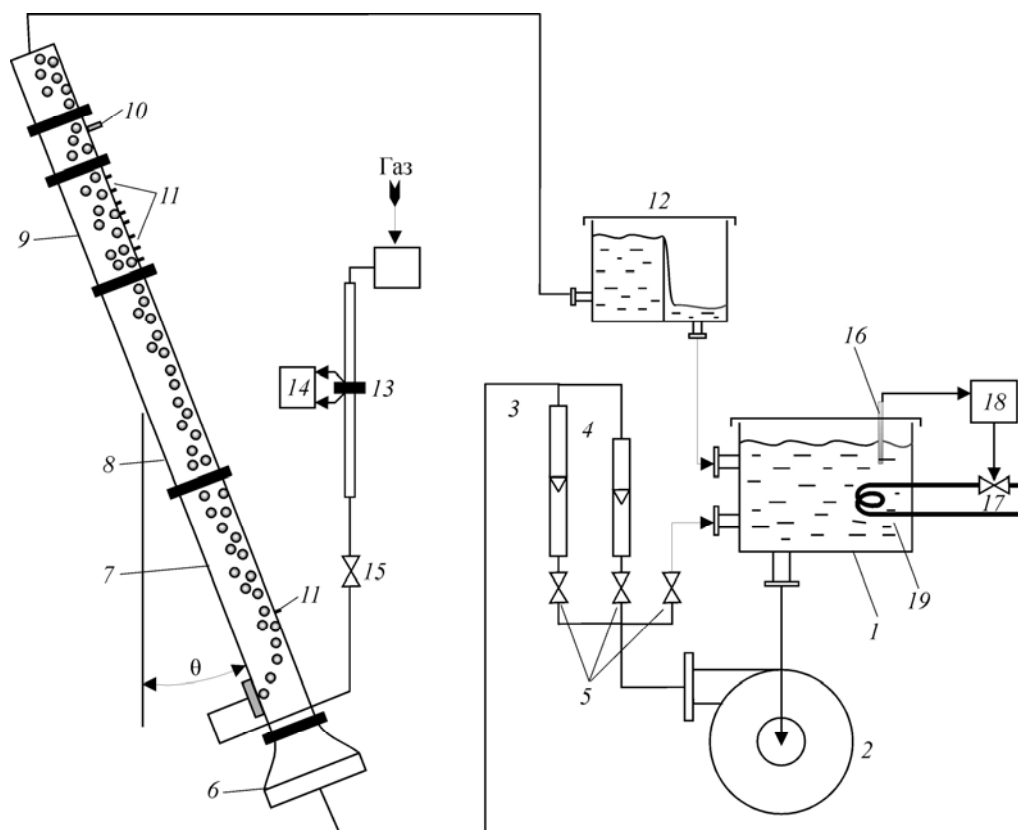


Рис. 1. Экспериментальная установка.

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.

стенки канала. Газожидкостный поток, получившийся при смешении газа и жидкости, поступал в измерительную секцию рабочего участка. Расстояние от места ввода газа до измерительной секции было равно 750 мм. Температура рабочей жидкости поддерживалась постоянной на уровне  $25^{\circ}\text{C}$  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 [15]. В качестве рабочей жидкости использовался раствор ферри- и ферроцианида калия и углекислого натрия в дистиллированной воде. Датчики касательного напряжения (рис. 2, а) были установлены на верхней стенке измерительного участка, они представляли собой платиновые пластинки 1 размером  $0,1 \times 0,9$  мм, 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

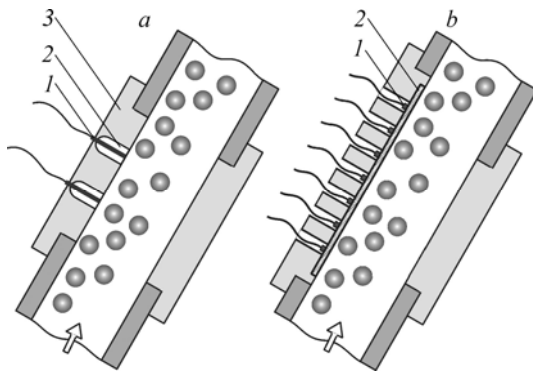


Рис. 2. Измерительные участки.

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

миниатюрные (2x2x1 мм) платиновые термосопротивления 700-102ВАА-В00 фирмы «Heraeus Sensor Technology» с номинальным сопротивлением 1 кОм при 0° С. Датчики температуры 1 при-

креплялись к обратной поверхности металлической фольги в измерительной секции. Для обеспечения хорошего теплового контакта датчиков использовалась теплопроводная паста. В измерительной секции было установлено семь 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 постоянства коэффициента теплообмена на стенке:  $q_w = \text{const}$ . 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-процентного водного раствора углекислого натрия при температуре 20 °С составляет 0,607 Вт/м/град [16] — 101,34 % теплопроводности чистой воды. Это позволяет предположить, что добавки, присутствующие в рабочей жидкости, не оказывают заметного влияния на 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.

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. Было 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.

Для проверки методики и системы измерений были проведены тесты в однофазном потоке, которые показали, что безразмерные коэффициенты теплоотдачи

хорошо совпадают с известной зависимостью для однофазного турбулентного потока [17]:

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

Отклонение экспериментальных данных от теоретической кривой не превышало 5 %. Ширина используемого в работе канала существенно больше его толщины. Поэтому в качестве 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 приведенного 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  $\theta \approx 20^\circ \div 50^\circ$ . 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 нулевому 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  $90^\circ$  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 ( $Re = 25000$ ) разница между максимальным и минимальным значениями коэффициента теплоотдачи составляет  $\sim 7\%$ , а для  $Re = 7700$  такая разница составляет  $\sim 35\%$ . Для касательного напряжения на стенке разница между максимальным и минимальным значениями составляет  $\sim 37\%$  при  $Re = 8660$  и  $\sim 14\%$  при  $Re = 25000$ . Следует отметить, что при углах наклона

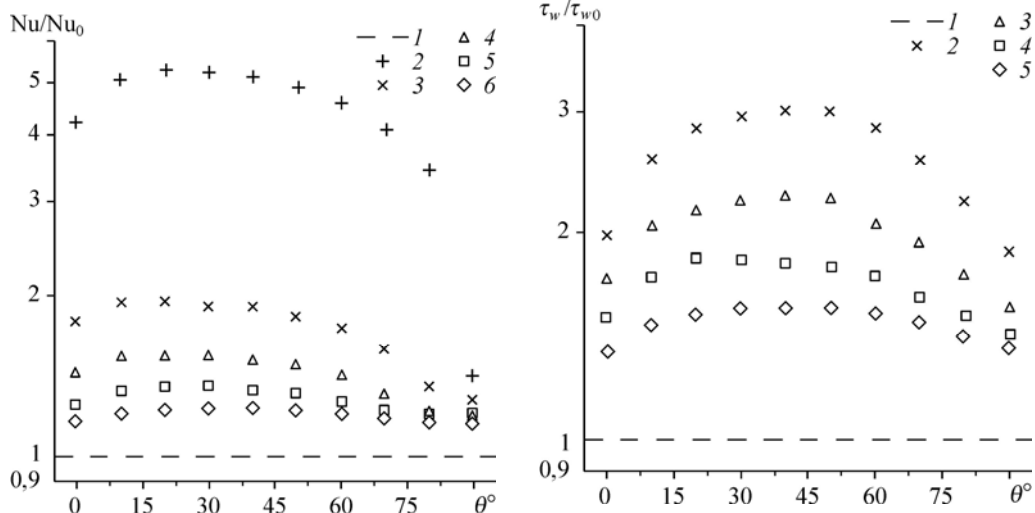


Рис. 3. Зависимость отношения  $Nu/Nu_0$  от угла наклона канала.  $\beta = 0$  (1);  $\beta = 0,1$ :  $Re = 3200$  (2), 7700 (3), 12400 (4), 18400 (5), 25000 (6).

Рис. 4. Зависимость относительного касательного напряжения на стенке от угла наклона канала.  $\beta = 0$  (1);  $\beta = 0,1$ :  $Re = 8660$  (2), 12400 (3), 18400 (4), 25000 (5).

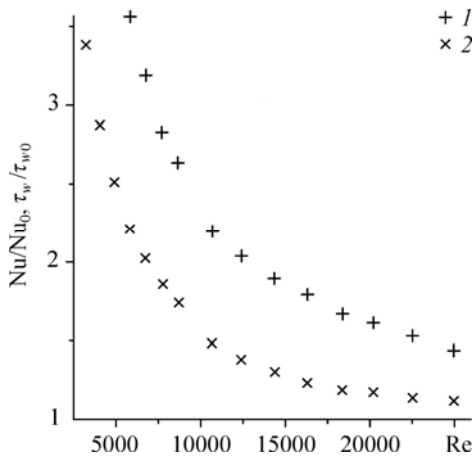


Рис. 5. Зависимость относительных касательного напряжения на стенке и теплообмена от числа Re.  $\beta = 0,1, \theta = 20^\circ, 1 — \tau_w/\tau_{w0}, 2 — Nu/Nu_0.$

канала близких к  $80^\circ \div 90^\circ$  и малой скорости жидкости пузыри активно объединяются и течение может менять структуру, переходя в снарядное. Этот процесс приводит к большому разбросу в результатах измерений.

На рис. 5 приведены зависимости отношений  $Nu/Nu_0$  и  $\tau_w/\tau_{w0}$  от значений числа Рейнольдса,  $Nu_0$  и  $\tau_{w0}$  — число Нуссельта и 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 становится незначительным по сравнению с естественными турбулентными пульсациями несущей жидкости.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от объемного расходного газосодержания ( $\beta$ ) 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 росте газосодержания от 5 % до 15 % происходит постепенный рост коэффициента теплоотдачи. При газосодержании 1÷2 % наблюдается небольшой экстремум теплоотдачи. Этот экстремум 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 (рис. 7). Здесь также малые

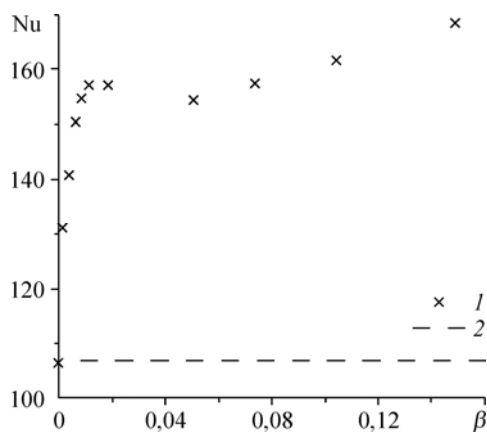


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплообмена от газосодержания.  $1 — Re = 12400, \theta = 45^\circ, 2 — \beta = 0.$

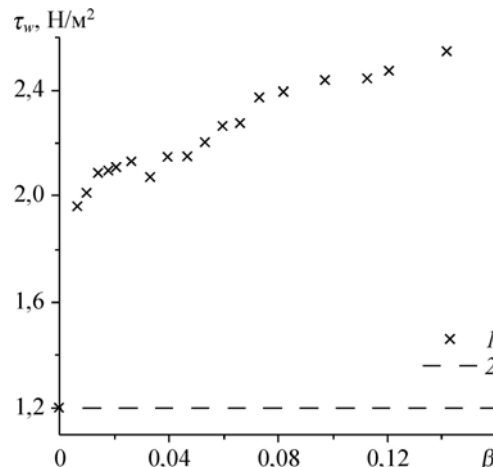


Рис. 7. Зависимость касательного напряжения на стенке от газосодержания.  $1 — Re = 12400, \theta = 45^\circ, 2 — \beta = 0.$

Рис. 8. Аналогия между теплообменом и касательным напряжением на стенке в газожидкостном потоке при  $Re = 5800-25000$ .

$\beta = 0,1$ ;  $\theta = 0^\circ$  (1),  $20^\circ$  (2),  $30^\circ$  (3),  $40^\circ$  (4).

добавки газа (до 1 %) в поток жидкости приводят к резкому увеличению трения по сравнению с однофазным течением. При росте газосодержания от 5 % до 15 % происходит постепенный рост значений трения на стенке.

На рис. 8 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  $Re = 5800 \div 25000$ . При таком представлении данных однофазному течению соответствует точка  $\tau_w/\tau_{w0} = 1$ ,  $Nu/Nu_0 = 1$ . 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 расположен нагреватель.

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование напряжения трения на стенке и теплообмена в 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  $\theta \approx 20^\circ \div 50^\circ$ .

Отмечено качественное подобие поведения трения и теплообмена при изменении угла наклона канала и объемного расходного газосодержания. Показано, что степень влияния газовой фазы на трение и теплообмен уменьшается с увеличением приведенной скорости жидкости.

### Обозначения

$Nu$  — число Нуссельта,

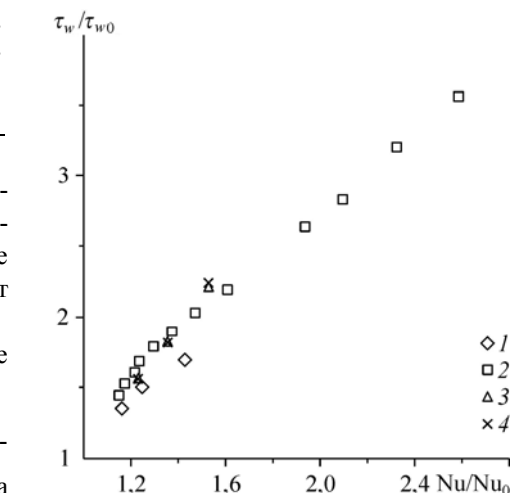
$Nu_0$  — число Нуссельта в однофазном потоке,

$Pr$  — число Прандтля,

$q_w$  — плотность теплового потока на стенке канала ( $Вт/м^2$ ),

$Re$  — число Рейнольдса,

$T$  — температура ( $^\circ C$ ),



### 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 // 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 // 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 // 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 // J. of Engng Thermophysics. 2008. Vol. 17, No. 2. P. 120–125.
7. Zun I. The transverse migration of bubbles influenced by walls in vertical bubbly flow // 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. FED-Vol.180. P. 119–127.
10. Кашинский О.Н., Чинак А.В., Каипова Е.В. Пузырьковое газожидкостное течение в наклонном плоском канале // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 1. С. 71–78.
11. Каипова Е.В. Two-phase bubble flow in inclined and horizontal channel // J. of Engng 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 // Multiphase Flow. 2002. No. 28. P. 553–578.
13. Andreussi P., Paglianti A., Silva F.S. Dispersed bubble flow in horizontal pipes // Chemical Engng Sci. 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 // Инж.-физ. журн. 1993. Т. 64, № 5. С. 523–528.
15. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И. Электродиффузионный метод исследования локальных характеристик турбулентных течений. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1986. 247 с.
16. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука. 1972. 720 с.
17. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.: Гос. энергетическое изд-во, 1949. 397 с.

*Статья поступила в редакцию 13 декабря 2012 г.,  
после доработки — 22 января 2013 г.*