

УДК 532.529.5

## ОПУСКНОЕ ПУЗЫРЬКОВОЕ ТЕЧЕНИЕ В ТРУБЕ ПРИ ДОКРИТИЧЕСКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

© 2019 г. М. А. Воробьев<sup>а,\*</sup>, О. Н. Кашинский<sup>а</sup>, В. В. Рандин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

\* E-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.

После доработки 26.09.2018 г.

Принята к публикации 18.10.2018 г.

Представлены результаты экспериментального исследования опускного пузырькового потока в вертикальной трубе внутренним диаметром 20 мм. В качестве рабочей жидкости использовался водно-глицериновый раствор. Эксперименты проводились для значений чисел Рейнольдса от 1000 до 1500. Измерения локальных характеристик течения (локальное газосодержание, скорость жидкости, пульсации скорости) выполнялись с использованием электродиффузионного метода. Эксперименты показали сильное влияние газовой фазы на структуру течения, выраженное в увеличении напряжения трения на стенке и выполаживании профиля скорости в центральной части трубы. Значительное отклонение от однофазного потока происходит даже при малых расходных газосодержаниях.

*Ключевые слова:* электродиффузионный метод, опускное пузырьковое течение, локальное газосодержание

**DOI:** 10.1134/S0568528119020130

Структура двухфазного газожидкостного потока зависит как от значений расходных скоростей фаз, так и от ориентации канала и направления течения. При малых значениях расходных газосодержаний реализуется пузырьковый режим течения, когда газовая фаза диспергирована в жидкости в виде пузырей различного размера и формы. В общем случае локальные скорости жидкой и газовой фаз различны, что приводит к возмущающему воздействию газовой фазы на течение жидкости.

Большинство экспериментальных исследований газожидкостных течений выполнены с использованием воды в качестве жидкой фазы. Как правило, числа Рейнольдса жидкой фазы в этих работах соответствуют развитому турбулентному режиму. В работе [1] проведено исследование распределения газосодержания в восходящем и опускном течении в трубе. Детальные исследования опускного пузырькового течения в турбулентном режиме выполнены во многих работах, например, [2–5]. Было показано, что основным отличием опускного течения от восходящего является концентрация газовой фазы в центральной части канала.

В литературе имеется весьма ограниченное количество исследований пузырькового двухфазного течения при докритических числах Рейнольдса (условно называемого ламинарным). Одной из первых теоретических работ является работа Achard, Cartellier [6]. Первое детальное экспериментальное исследование восходящего пузырькового течения в ламинарном режиме проведено в [7].

Локальное газосодержание и профили скорости жидкости, а также напряжение трения на стенке были измерены с помощью электродиффузионного метода. В работах [8, 9] приведены результаты сравнения простых аналитических моделей с измерениями в плоском канале и в круглой трубе. Исследования ламинарного течения с дисперсной фазой в виде твердых частиц были выполнены в [10, 11]. Для фиксации пространственной координаты каждой частицы в поле течения был разработан метод стереофотографии. Этот же метод использовался в экспериментах с пузырьками газа сферической формы.

Прямое численное моделирование ламинарного пузырькового течения в плоском канале было проведено в [12]. В данной работе были рассмотрены случаи как восходящего, так и опускного течений. Показано, что для почти одинаковых пузырей сферической формы число пузырей в

центре канала таково, чтобы смесь была в гидростатическом равновесии. Для восходящего течения избыток пузырей выталкивается к стенкам, образуя слой с повышенной концентрацией. Для случая опускного течения пузыри концентрируются в центре канала, образуя свободный от пузырей слой вблизи стенки. Толщина этого слоя определяется тем, насколько должно быть повышено газосодержание в центре для достижения гидростатического равновесия. Профиль газосодержания может быть определен аналитически, используя очень простую модель. Эта же модель дает профиль скорости жидкости в случае опускного течения. В случае восходящего течения возрастание скорости в пристенном слое должно быть рассчитано путем численного моделирования. Скорость скольжения пузырей в центре канала и пульсации скорости хорошо рассчитываются по результатам в гомогенном течении.

Простые аналитические модели ламинарного пузырькового течения были представлены в [8, 12]. В этих работах профиль локального газосодержания задавался в виде ступенчатой функции. С учетом этого предположения было получено удовлетворительное согласие с измеренными профилями скорости.

Важным вопросом при изучении газожидкостного течения является влияние газовой фазы на пульсационные характеристики жидкости. Детальный обзор исследований по псевдотурбулентности, вызванной относительным движением пузырей (*bubble-induced turbulence*), приведен в работе [13]. Пульсации скорости жидкости возникают всегда, когда локальные скорости жидкости и газа различны. Имеются корреляции для интенсивности пульсаций скорости жидкости в зависимости от размера и относительной скорости пузырей только для простейших случаев движения одиночного пузыря или пары пузырей. В случае течений с широким спектром размеров пузырей (которые реализуются практически во всех случаях) имеются корреляции интенсивности пульсаций скорости с величиной локального газосодержания. Это, в частности, связано с тем, что относительная скорость газовой фазы в коллективе пузырей отличается от скорости всплытия одиночного пузыря в покоящейся жидкости.

В литературе отсутствуют прямые экспериментальные исследования структуры опускного пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса. В частности, остается открытым вопрос о форме распределения локального газосодержания при различных значениях расходного газосодержания, также отсутствуют данные о пульсационных характеристиках жидкой фазы в таких режимах, включая структуру течения в пристенной зоне.

Цель настоящей работы – привести экспериментальные данные по локальным параметрам опускного пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса в широком диапазоне изменения расходного газосодержания.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОНТУР И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментального контура приведена на рис. 1. Жидкость из бака 1 подавалась центробежным насосом 2 в рабочий участок. Расход жидкости измерялся ротаметрами 3. Расход жидкости регулировался вентилями 4. Газ (воздух) подавался из линии высокого давления 10. Расход газа регулировался редуктором 11 и вентилем 15. Давление газа контролировалось манометром 12. Измерение расхода газа производилось с помощью расходомерной диафрагмы 13, перепад давления на которой измерялся дифференциальным датчиком давления 14. Калибровка газовой диафрагмы производилась с помощью газового счетчика типа ГСБ.

Рабочий участок представлял собой вертикальную трубу с внутренним диаметром 20 мм, изготовленную из оргстекла. Рабочий участок состоял из нескольких секций. На выходе рабочего участка устанавливался вентиль, который предотвращал разрыв опускного потока. Избыточное давление в измерительном сечении с помощью этого вентиля поддерживалось на уровне 50 КПа для всех режимов, в которых проводились измерения. Измерения проводились в сечении, отстоящем на 125 калибров от начала прямого участка опускной секции. Приведенная скорость газа вычислялась при давлении в рабочем участке. Приведенные скорости вычислялись по формулам: жидкости  $V_l = Q_l/S$  и газа  $V_g = Q_g/S$ , где  $Q$  – объемный расход соответствующей фазы,  $S$  – площадь поперечного сечения трубы.

Газ вводился в поток через систему из восьми нержавеющей капилляров с внутренним диаметром 0.2 мм, установленных в форкамере 5. Образование газовых пузырей производилось в восходящем течении. Затем газожидкостная смесь подавалась в измерительный участок 7 через U-образную трубку 6. Оценка отрывного диаметра пузырей в покоящейся жидкости по формуле Фритца (для водо-глицериновой смеси с соответствующей концентрацией и температурой) дает

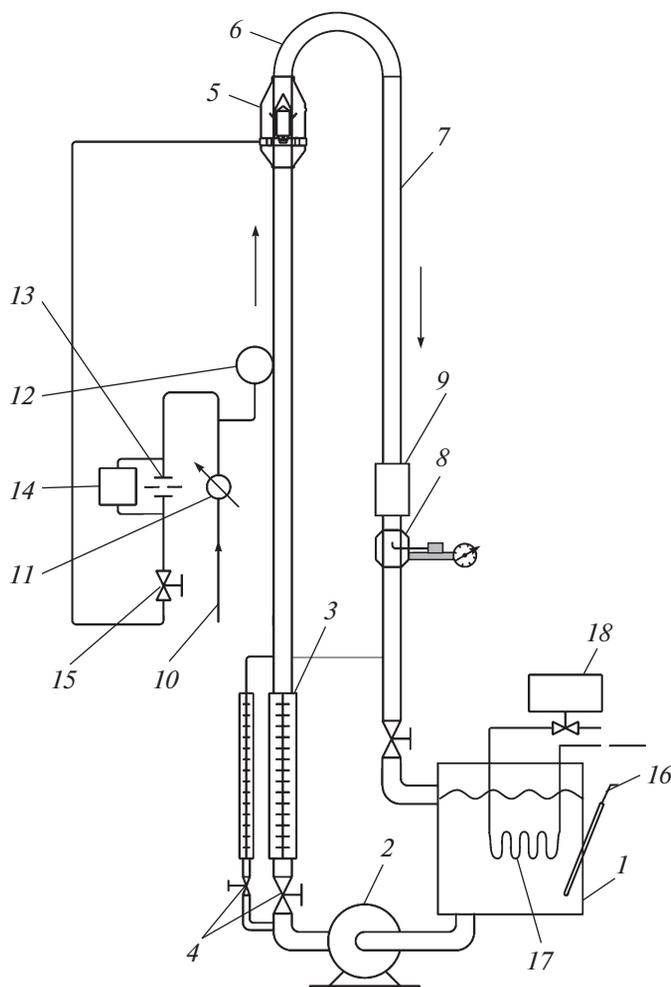


Рис. 1. Схема установки

значение 2.5 мм. Внутренний диаметр форкамеры 60 мм, средняя скорость жидкости в ней не превышала 0.04 м/с.

В процессе движения газожидкостной смеси происходили как коалесценция пузырей, так и их дробление. В результате в потоке реализовывалась газожидкостная смесь с широким спектром размеров пузырей. Во всех режимах производилась видеосъемка потока, по которой определялся средний размер пузырей. Средний размер пузырей менялся в пределах 2.6–3.5 мм в зависимости от режима. Образования крупных пузырей газа не наблюдалось во всех режимах.

Температура рабочей жидкости поддерживалась постоянной при помощи автоматической системы термостатирования, состоящей из термометра сопротивления 16, водяного нагревателя 17 и клапана с электрическим управлением 18.

Измерение гидродинамических характеристик течения проводилось электродиффузионным методом [7]. Рабочей жидкостью являлся водо-глицериновый раствор, в котором были растворены карбонат натрия и ферри- и ферроцианид калия. Кинематическая вязкость рабочей жидкости равнялась  $5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре  $25^\circ\text{C}$ . Ротаметры калибровались на этой рабочей жидкости при соответствующей температуре.

Датчик напряжения трения на стенке представлял собой платиновую пластинку сечением  $0.05 \times 0.6 \text{ мм}$ , которая клеивалась в стенку измерительного участка и зашлифовывалась заподлицо со стенкой. Датчик трения был установлен в измерительном участке 9. Для измерения локального газосодержания и скорости жидкости использовался датчик типа лобовая точка, установленный в измерительном участке 8. Этот датчик представлял собой платиновую проволоку диаметром 0.05 мм, вваренную в тонкостенный стеклянный капилляр. Рабочий торец проволоки

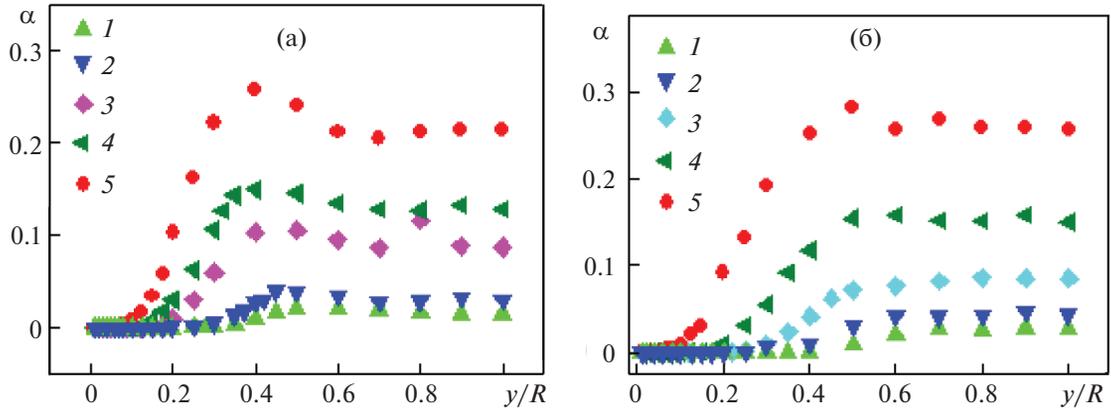


Рис. 2. Локальное газосодержание: (а) –  $Re = 1000$ ;  $\beta = 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1$  (I–5); (б) –  $Re = 1500$ ;  $\beta = 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1$  (I–5)

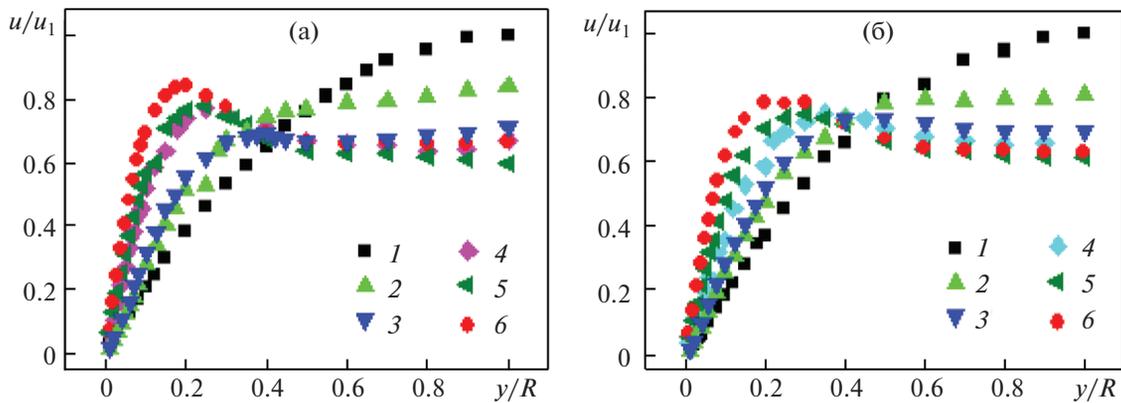


Рис. 3. Профили скорости жидкой фазы: (а) –  $Re = 1000$ ;  $\beta = 0, 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1$  (I–6); (б) –  $Re = 1500$ ;  $\beta = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1$  (I–6)

контактировал с потоком. Диаметр стеклянной изоляции на рабочем торце составлял около 0.07 мм. Оба датчика работали в режиме предельного диффузионного тока. Ток датчика усиливался широкополосным усилителем постоянного тока и подавался на АЦП. Обработка сигнала датчиков производилась численно. Калибровка датчиков трения и скорости производилась в рабочей трубе в однофазном течении, при этом датчик скорости располагался на оси трубы. Калибровка проводилась в режимах, соответствующих ламинарному течению в трубе.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения гидродинамических характеристик пузырькового течения проводились при двух значениях приведенной скорости жидкости  $V_l$ . Соответствующие значения числа Рейнольдса, построенные по параметрам жидкой фазы и по диаметру трубы, равнялись 1000 и 1500. Расходное объемное газосодержание, определяемое как  $\beta = V_g / (V_g + V_l)$ , изменялось в пределах 0.005 до 0.1.  $V_g$  – приведенная скорость газовой фазы, взятая при давлении в рабочем участке. Во всех случаях режим опускного течения был пузырьковый.

Измеренные профили локального газосодержания приведены на рис. 2. Вблизи стенки существует кольцевая область чистой жидкости, свободная от пузырей газа. Эта область хорошо видна при визуальном наблюдении потока. При малых значениях расходного газосодержания профиль  $\alpha$  имеет колоколообразную форму. При увеличении  $\beta$  профили имеют примерно постоянное значение в центральной части трубы. При наибольших значениях  $\beta$  профиль локального газосодержания имеет небольшой локальный максимум при промежуточном значении радиуса,

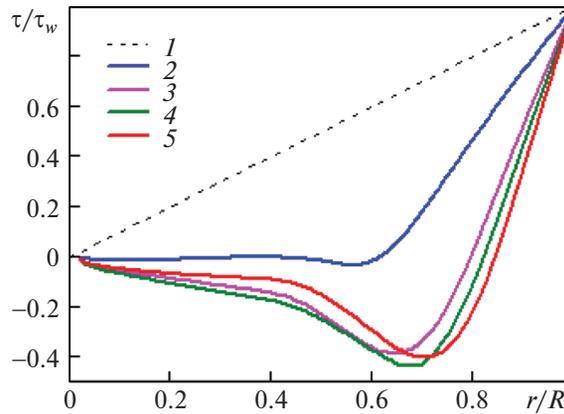


Рис. 4. Распределение касательного напряжения по сечению трубы:  $Re$  и  $\beta$  те же, что на рис. 2а

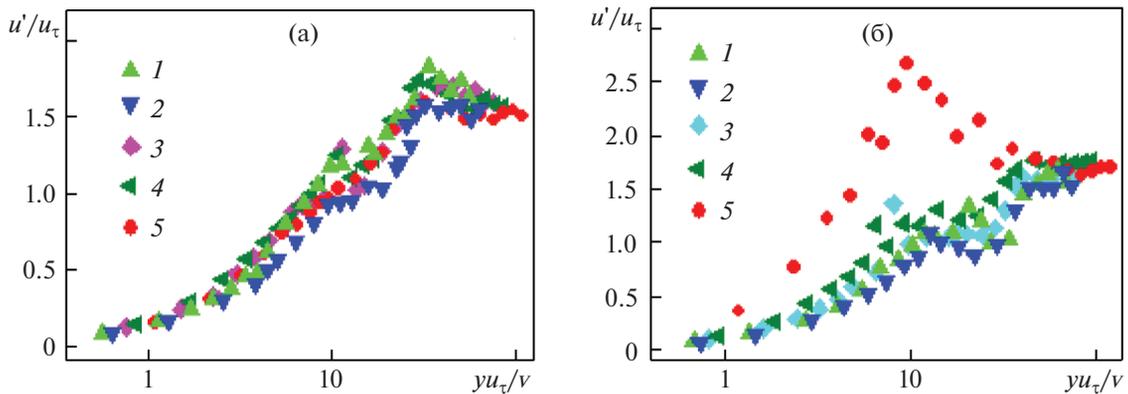


Рис. 5. Пульсации скорости жидкости в координатах закона стенки:  $Re$  и  $\beta$  те же, что на рис. 2

что более четко видно на рис. 2а. Аналогичное поведение профилей локального газосодержания отмечено в работах, выполненных в развитом турбулентном режиме.

На рис. 3 приведены измеренные профили скорости жидкости в двухфазном потоке. Для сравнения приведены также однофазные параболические профили скорости ( $\beta = 0$ ). Видно, что даже малая добавка газовой фазы приводит к существенной деформации профилей скорости, выражающейся в их выполаживании. В центральной части трубы значения скорости жидкости близки к постоянным. В то же время возникает максимум скорости при промежуточном значении радиуса, который более выражен при больших значениях  $\beta$ . Происходит также существенное возрастание градиента скорости в пристенной зоне, что коррелирует с повышенными значениями напряжения трения на стенке по сравнению с однофазным потоком.

На основе измеренных профилей локального газосодержания и напряжения трения на стенке были рассчитаны профили напряжения трения в потоке. Использовалось балансное соотношение, приведенное в работе [14]. На рис. 4 видно, что введение газовой фазы приводит к значительной деформации распределения трения даже при малых значениях расходного газосодержания. Это связано с дифференциальной плавучестью, вызванной неравномерным распределением газовой фазы по сечению трубы. В центральной части трубы значения трения становятся близкими к нулю и даже отрицательными. Этим качественно объясняется выполаживание профилей скорости жидкости в центральной зоне. В результате градиент скорости жидкости в пристенной области возрастает.

Измеренные значения среднеквадратичных пульсаций скорости жидкости  $u'$  приведены на рис. 5. Данные приведены в полулогарифмических координатах закона стенки [15]. Такое представление применяется для анализа турбулентных течений.  $u_t$  – динамическая скорость, вычисленная по измеренным значениям напряжения трения на стенке. Видно, что профили пульса-

ций скорости близки при существенно различных значениях  $\beta$ . Максимальные значения отношения  $u'/u_i$  лежат в диапазоне от 1.5 до 2, что близко к соответствующим значениям для однофазного турбулентного течения в трубах [15]. Таким образом, динамическая скорость является адекватным масштабом для пульсаций скорости жидкости в псевдотурбулентном пузырьковом течении.

Следует отметить, что эффект влияния малых добавок газовой фазы на характеристики пузырькового газожидкостного течения был отмечен ранее. В частности, в работе [16] в экспериментах в наклонном канале показано значительное увеличение напряжения трения на стенке и теплообмена при малых расходных газосодержаниях.

Существование ламинарного пузырькового течения без пульсаций не представляется возможным (по крайней мере, в условиях ненулевой гравитации). По мере увеличения расходной скорости жидкости (или объемного газосодержания) должен существовать непрерывный переход от чисто ламинарного течения к псевдотурбулентному и затем к развитому турбулентному. Как отмечено в данной статье, а также, например, в [7], фактически невозможно провести различие между псевдотурбулентным режимом и развитым турбулентным (по крайней мере, по простейшим осредненным и пульсационным характеристикам течения). Аналогичная ситуация имеет место при течении тонких пленок жидкости (см., например, монографию [17]). В пленках жидкости, стекающих по вертикальной поверхности, чисто ламинарное течение существует только при малых числах Рейнольдса. При увеличении числа Рейнольдса имеется обширная область волнового течения с интенсивными пульсациями толщины пленки, трения на стенке и скорости жидкости. Затем происходит переход к развитому турбулентному режиму. Выделить четко границу между волновым и турбулентным режимами невозможно.

Детальный сценарий развития турбулентного режима в пузырьковом двухфазном течении будет являться предметом дальнейших исследований авторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидродинамическая структура опускного пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса качественно подобна структуре опускного течения в развитом турбулентном режиме.

Основным механизмом, определяющим деформацию профилей скорости жидкости, является изменение распределения напряжения трения по сечению трубы, вызванное дифференциальной плавучестью из-за неравномерного распределения газовой фазы по сечению.

Динамическая скорость, построенная по измеренным значениям напряжения трения на стенке, является адекватным масштабом для псевдотурбулентных пульсаций скорости жидкости, вызванных относительным движением пузырей газа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ибрагимов М.Х., Бобков В.П., Тычинский Н.А.* Исследование поведения газовой фазы в турбулентном потоке смеси воды и газа в каналах // Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11. С. 1051–1061.
2. *Ганчев Б.Г., Пересадыко В.Г.* Процессы гидродинамики и теплообмена в опускных пузырьковых потоках // ИФЖ, 1985. Т. 49. № 2. С. 181–189.
3. *Hibiki T., Goda H., Kim S., Ishii M., Uhle J.* Experimental study on interfacial area transport of a vertical downward bubbly flow // Experiments in Fluids. 2003. V. 35. P. 100–111.
4. *Hibiki T., Goda H., Kim S., Ishii M., Uhle J.* Structure of vertical downward bubbly flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 2004. V. 47. P. 1847–1862.
5. *Ishii M., Paranjape S.S., Kim S., Sun X.* Interfacial structures and interfacial area transport in downward two-phase bubbly flow // Int. J. Multiphase Flow. 2004. V. 30. P. 779–801.
6. *Achard J.L., Cartellier A.* Local characteristics of upward laminar bubbly flows // Phys.-Chem. Hydrodynamics. 1985. V. 6. P. 841–852.
7. *Kashinsky O.N., Timkin L.S., Cartellier A.* Experimental study of “laminar” bubbly flows in a vertical pipe // Experiments in Fluids. 1993. V. 15. P. 308–314.
8. *Rivière N., Cartellier A.* Wall shear stress and void fraction in Poiseuille bubbly flows: Part I: simple analytic predictions // Eur. J. Mechanics B: Fluids. 1999. V. 18. P. 823–846.
9. *Rivière N., Cartellier A., Timkin L.S., Kashinsky O.N.* Wall shear stress and void fraction in Poiseuille bubbly flows: Part II. Experimental validity of analytic predictions // Eur. J. Mechanics B: Fluids. 1999. V. 18. P. 847–867.

10. Luo R., Pan X.H., Yang X.Y. Laminar light particle and liquid two-phase flows in a vertical pipe // Int. J. Multiphase Flow. 2003. V. 29. P. 603–620.
11. Luo R., Song Q., Yang X.Y., Wang Z. A three-dimensional photographic method for measurement of phase distribution in dilute bubble flow // Experiments in Fluids. 2002. V. 32. P. 116–120.
12. Lu J., Biswas S., Tryggvason G. A DNS study of laminar bubbly flows in a vertical channel // Int. J. Multiphase Flow. 2006. V. 32. P. 643–660.
13. Joshi J.B., Nandakumar K., Evans G.M., Pareek V.K., Gumulya M.M., Sathe M.J., Khanwale M.A. Bubble generated turbulence and direct numerical simulations // Chem. Eng. Sci. 2017. V. 157. P. 26–75.
14. Sato Y., Sadatomi M., Sekoguchi K. Momentum and heat transfer in two phase bubbly flow // Int. J. Multiphase Flow. 1981. V. 7. P. 167–177.
15. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
16. Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Пахомов М.А., Рандин В.В., Терехов В.И., Чинак А.В. Турбулентная структура потока и теплообмен в наклонном пузырьковом течении // Изв. РАН. МЖГ. 2017. С. 117–129.
17. Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: ВО Наука, Сиб. изд. фирма, 1992. 256 с.