

УДК 532.582.92

DOI: 10.15372/PMTF202315357

ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРОВ-ЦЕПОЧЕК ПРИ ДВИЖЕНИИ ПУЗЫРЕЙ ОТ ОДИНОЧНОГО КАПИЛЛЯРА В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ

А. Е. Гореликова^{*,**}, О. Н. Кашинский^{*}, А. В. Чинак^{*}

^{*} Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

^{**} Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mails: gorelikova.a@gmail.com, kashinsky@itp.nsc.ru, chinak@mail.ru

Определены размеры и скорость всплытия пузырей в неподвижной жидкости в наклонном канале с круглым сечением при различных значениях расхода газа через капилляр ($3,0 \div 5,5$ мл/мин). Исследование размеров газовых пузырьков и их скорости проводилось с использованием метода теневой фотографии. Показано, что в диапазоне углов наклона канала $40 \div 60^\circ$ возможно формирование устойчивых пузырьковых структур — кластеров, состоящих из пузырей одинакового размера ($1,5 \div 1,8$ мм). В режимах без формирования кластеров-цепочек средний диаметр газовых пузырей увеличивался ($2,0 \div 2,2$ мм) за счет их коалесценции.

Ключевые слова: пузыри, наклонный канал, скорость пузыря, скорость газа

Исследование движения газовых пузырьков проводится в основном в вертикальных трубах и каналах, несмотря на то что ориентация канала может оказывать значительное влияние на движение пузырьков как в неподвижной жидкости, так и в газожидкостных течениях. В работе [1] изучалось движение пузырьков в плоском наклонном канале при углах наклона менее 10° . Газ (азот) вводился в жидкость (электролит) через множество капилляров, расположенных в нижней части канала. Были получены значения скорости пузырей в зависимости от угла наклона канала. Показано, что вблизи верхней стенки плоского канала, где концентрация газовых пузырей больше, их скорость увеличивается. В работе [2] исследованы пузырьки жидкости размером $4,75 \div 9,14$ мм, всплывающие вблизи наклонной поверхности (угол наклона равен 30°). Установлено, что в этом случае локальный коэффициент теплообмена в восемь раз больше, чем в случае свободной конвекции (среднее значение коэффициента теплообмена увеличивается в два раза по сравнению со случаем отсутствия газовой фазы). В [3] представлены результаты экспериментального изучения подъема одиночных пузырей в наклонном плоском канале. Скорость жидкости составляла $0 \div 0,2$ м/с, объем одного пузыря изменялся в диапазоне $1 \div 80$ мл, а глубина канала составляла 8, 4 или 1,5 мм. Показано, что при вертикальном расположении канала скорость пузырька зависит, прежде всего, от глубины канала. При увеличении угла наклона канала от 0 до 90° скорость пузыря монотонно растет и достигает максимума при вертикальном расположении канала. Этот результат отличается от результатов, получен-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 22-21-20029) и Правительства Новосибирской области.

© Гореликова А. Е., Кашинский О. Н., Чинак А. В., 2024

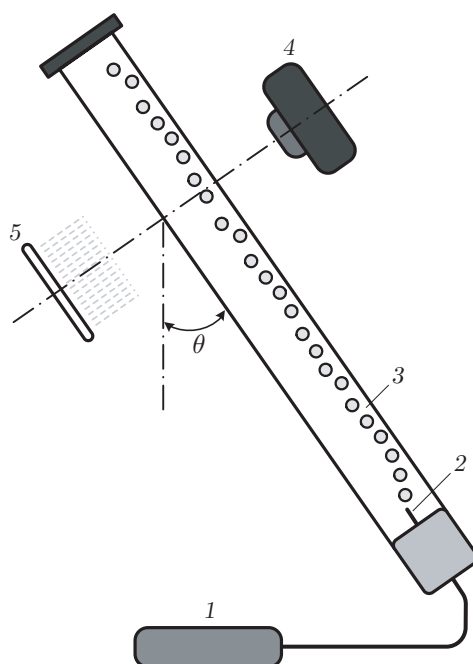


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — измеритель-регулятор расхода газа, 2 — капилляр, 3 — рабочий участок, 4 — камера, 5 — светодиодная матрица

ных для снарядных течений в круглых наклонных трубах больших сечений, где скорость максимальна при углах наклона, близких к 45° .

На характер движения пузырьков может влиять не только геометрия канала, но и способ ввода газа в жидкость [4], расход газа [5], характеристики жидкости [6]. При этом сами пузырьки также могут оказывать влияние на структуру и характер течения жидкости. В работе [7] представлено численное решение задачи о взаимодействии одиночного пузырька с акустическими волнами в ограниченном объеме жидкости. Показано, что при различных параметрах пузырька и набегающей волны сжатия возможны как квазистатический коллапс пузыря и появление вторичных волн сжатия, так и струйная деформация пузырька, сопровождающаяся фрагментацией струи. В работе [8] приведена математическая модель неизотермического пузырькового течения жидкости и газа в вертикальной скважине и показано, что средний размер пузырей может оказывать значительное влияние на распределение температуры.

Целью настоящей работы является изучение влияния угла наклона на динамику пузырьков газа, инжектированных в жидкость одиночным капилляром.

1. Методика измерений и экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Газ (воздух) с помощью измерителя-регулятора Aalborg GFC17 (верхний предел измерений 10 мл/мин, погрешность $\pm 0,1$ мл/мин) подавался в жидкость через одиночный капилляр с внутренним сечением диаметром $D_c = 0,2$ мм. В качестве рабочего участка использовалась стеклянная труба с внутренним диаметром $D_t = 32$ мм, заполненная дистиллятом. Исследование размеров и скорости газовых пузырьков проводилось на расстояниях $100 \div 600$ мм от точки ввода газа с помощью метода теневой фотографии. Изображения пузырьков регистрировались камерой Nikon Zfc. Скорость съемки составляла 120 кадр/с при разрешении 1920×1280 пиксель. Для создания равномерного светового поля подсветка потока осуществлялась светодиодной матрицей размером 150×150 мм. Полученные изображения были обработаны с использованием ме-

тогда, описанного в работе [9]. Диаметр газовых пузырей вычислялся по площади пузыря на снимке с использованием формулы $D_b = \sqrt{4S/\pi}$. Погрешность определения границы пузыря составляла ± 1 пиксель. Согласно калибровочным кадрам 1 мм соответствует 22 пикселям, погрешность определения диаметра для пузырей размером $0,5 \div 5,0$ мм составляет $0,02 \div 0,18$ мм. Вследствие наклонного положения трубы пузырьки скапливаются вблизи верхней стенки. При достаточно малых значениях расхода газа трение не позволяет пузырькам удаляться на расстояние более $2 \div 3$ мм от центральной оси, на которой ведется съемка, поэтому искажение картины течения вследствие кривизны поверхности трубы является незначительным. Поскольку используется открытый контур и продолжительность эксперимента большая, дистиллят насыщался воздухом, тем не менее при измерении скорости и диаметра газовых пузырей уменьшения размера пузырей вследствие растворения газа не наблюдалось. Различие значений расхода газа, полученных при обработке видео и зарегистрированных измерителем-регулятором расхода газа, не превышало 0,05.

Для проверки измерительной системы была проведена серия экспериментов при вертикальном положении канала ($\theta = 0^\circ$) и расходе газа $Q_g = 3,3$ мл/мин. Скорость всплытия пузыря зависит от подъемной силы и силы лобового сопротивления. При большом объеме неподвижной жидкости скорость всплытия пузыря составляет

$$U_b = \sqrt{\frac{4D_b(\rho_l - \rho_g)g}{3\rho_l C_d}},$$

где D_b — диаметр пузыря; ρ_l, ρ_g — плотность жидкости и газа соответственно; C_d — коэффициент сопротивления. Форма пузырей диаметром менее $3 \div 4$ мм не меняется, поэтому в качестве коэффициента сопротивления можно использовать значения C_d , полученные в работе [10] для твердой сферы, движущейся в жидкости:

$$C_d = \begin{cases} 24/\text{Re}_b, & \text{Re}_b < 2, \\ 18,5/(\text{Re}_b)^{0,6}, & 2 \leq \text{Re}_b < 500, \\ 0,44, & 500 \leq \text{Re}_b. \end{cases}$$

Здесь Re_b — число Рейнольдса, при вычислении которого использовались диаметр газового пузыря D_b и скорость пузыря U_b . Расчетные значения скорости движения пузырька в неподвижной жидкости и измеренные значения скорости всплытия пузырька в вертикальной трубе представлены на рис. 2. Различие экспериментальных и расчетных данных можно объяснить влиянием стенок трубы.

2. Результаты измерений. Были измерены размеры и скорость газовых пузырей в неподвижной жидкости в наклонной трубе при различных значениях расхода газа Q_g и угла наклона трубы θ .

На рис. 3 показано движение пузырей в наклонной трубе при различных углах наклона (расход газа поддерживался постоянным на уровне $Q_g = 3,33$ мл/мин). При малом угле наклона трубы ($\theta = 30^\circ$) движение пузырьков имеет сложный характер. Пузырьки совершают колебания в направлении, перпендикулярном направлению движения. В работе [11] аналогичное зигзагообразное движение было обнаружено для пузырьков диаметром более 1 мм. Кроме того, регистрируются пузыри со значительно различающимися диаметрами (см. рис. 3,а), что обусловлено коалесценцией пузырей вблизи капилляра и при движении вдоль наклонной поверхности.

С увеличением угла наклона трубы перпендикулярная составляющая скорости пузырьков значительно уменьшается вследствие их трения о верхнюю стенку трубы. Это позволяет уменьшить интенсивность колебаний и сформировать устойчивую кластерную структуру — цепочку пузырьков (см. рис. 3,б). При формировании кластера диаметр и скорость большинства пузырей имеют близкие значения (различие не превышает 5 %).

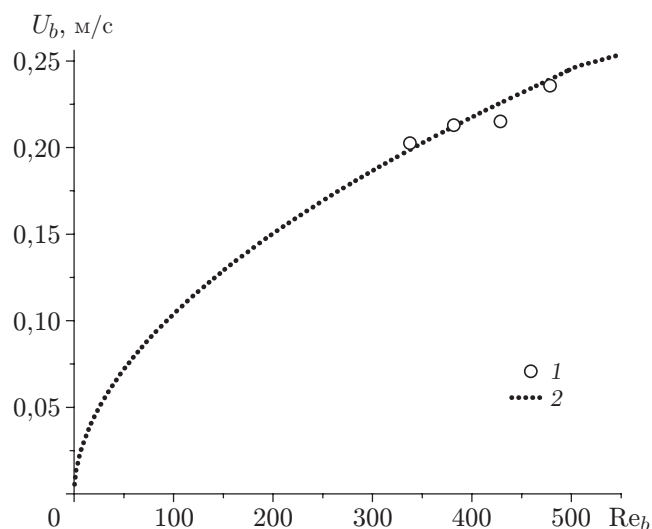


Рис. 2. Зависимость скорости пузырька от числа Рейнольдса при $\theta = 0^\circ$, $Q_g = 3,3$ мл/мин:
1 — экспериментальные данные, 2 — результаты расчета

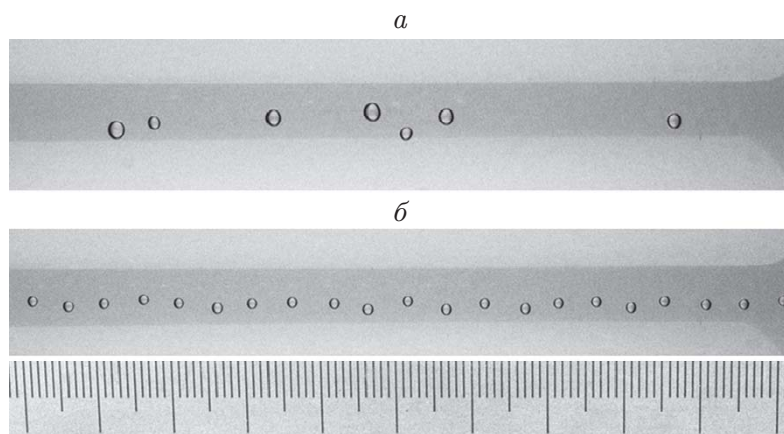


Рис. 3. Движение пузырьков в неподвижной жидкости в наклонной трубе ($Q_g = 3,3$ мл/мин, расстояние от точки ввода газа $L = 100 \div 200$ мм) при различных углах наклона трубы:
а — $\theta = 30^\circ$, б — $\theta = 50^\circ$

На рис. 4,а приведена зависимость количества пузырей от их диаметра при $Q_g = 3,33$ мл/мин и различных углах наклона трубы (N — количество пузырьков определенного диаметра, V — объем пузырька определенного диаметра, N_{full} — общее количество пузырьков, V_{full} — общий объем газа). Видно, что при увеличении угла наклона трубы и капилляра, через который осуществляется ввод газа в жидкость, уменьшается диаметр газовых пузырьков при отрыве, о чем свидетельствует сдвиг первого пика в сторону меньших диаметров. При малых углах наклона ($\theta = 30^\circ$) вследствие сложного характера движения пузырька увеличивается вероятность коалесценции, что приводит к увеличению диапазона размеров пузырьков и увеличению ширины пика. При значениях угла наклона $\theta = 40 \div 50^\circ$ существенное количество пузырьков имеют малый размер ($1,4 \div 1,5$ мм), при этом диапазон размеров пузырьков достаточно мал, что свидетельствует о формировании

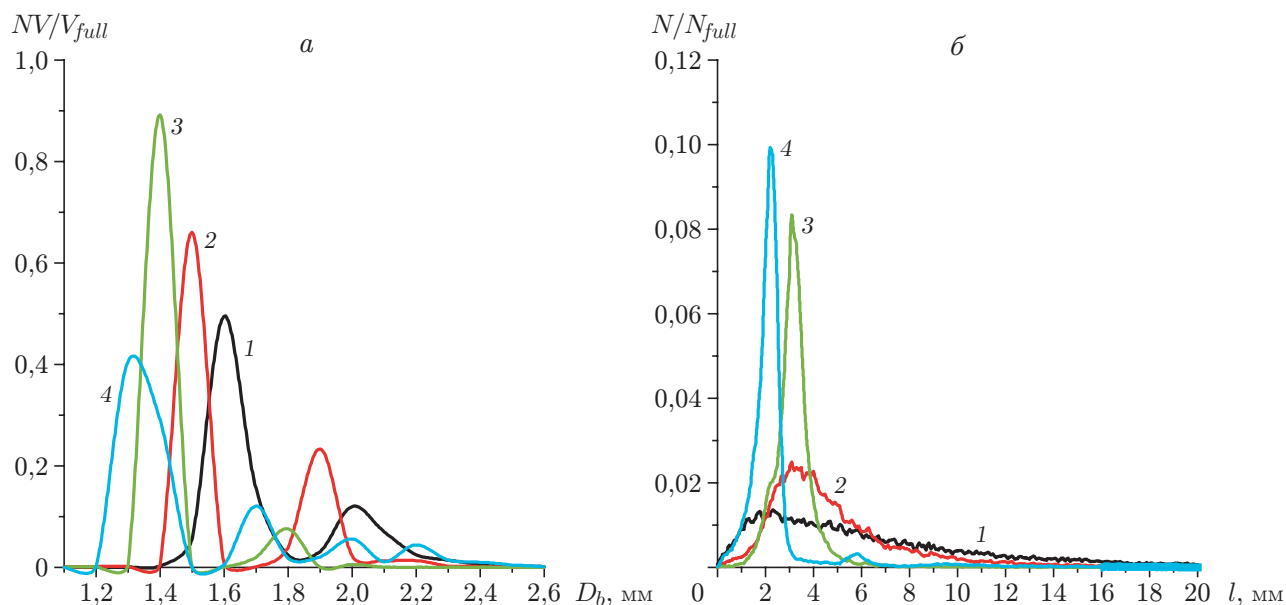


Рис. 4. Зависимости количества пузырьков от их диаметра D_b (а) и расстояния между пузырями l (б) при $Q_g = 3,3$ мл/мин, $L = 100$ мм и различных углах наклона трубы:

1 — $\theta = 30^\circ$, 2 — $\theta = 40^\circ$, 3 — $\theta = 50^\circ$, 4 — $\theta = 60^\circ$

цепочки пузырьков с близкими значениями диаметра. Уменьшение количества пузырьков малого диаметра при угле наклона $\theta = 60^\circ$ и рост вторичного пика на рис. 4,а свидетельствуют о том, что вследствие уменьшения расстояния между отдельными пузырьками скорость коалесценции увеличивается. При таких условиях цепочка пузырей малого диаметра не формируется.

На рис. 4,б приведено распределение расстояний между ближайшими пузырьками при различных углах наклона канала. По мере увеличения угла наклона трубы расстояние между отдельными пузырями уменьшается, что обусловлено увеличением трения о верхнюю стенку трубы и уменьшением скорости движения отдельных пузырей.

На рис. 5 приведена карта режимов, при которых происходит формирование кластеров пузырей приблизительно одинакового размера. При значениях расхода газа $Q_g = 3 \div 5$ мл/мин, расстояниях от точки ввода газа до оптической секции $L = 100 \div 600$ мм и углах наклона трубы $\theta = 30 \div 35^\circ$ цепочка пузырьков не образуется. Поперечные колебательные движения пузырьков не позволяют им образовать устойчивую кластерную структуру, что приводит к увеличению вероятности коалесценции пузырей. Цепочки пузырьков начинают образовываться при углах наклона трубы $\theta = 40^\circ$ и расходах газа $Q_g = 3,0; 3,3$ мл/мин на расстояниях $L = 100 \div 300$ мм. При увеличении угла наклона трубы до значений $\theta = 50 \div 55^\circ$ расстояние, на котором возможно существование кластера-цепочки, увеличивается до значения $L = 600$ мм.

По мере увеличения скорости газа вследствие коалесценции пузырьков вблизи капилляра и при движении вдоль наклонной поверхности уменьшается область формирования цепочек пузырьков малого диаметра. При значениях расхода газа $Q_g > 5$ мл/мин формирования кластеров не происходит во всем рассматриваемом диапазоне углов наклона канала.

На рис. 6 приведены зависимости среднего размера пузырьков D_a и средней скорости U_a от угла наклона трубы θ . На средний размер пузырей оказывают влияние диаметр

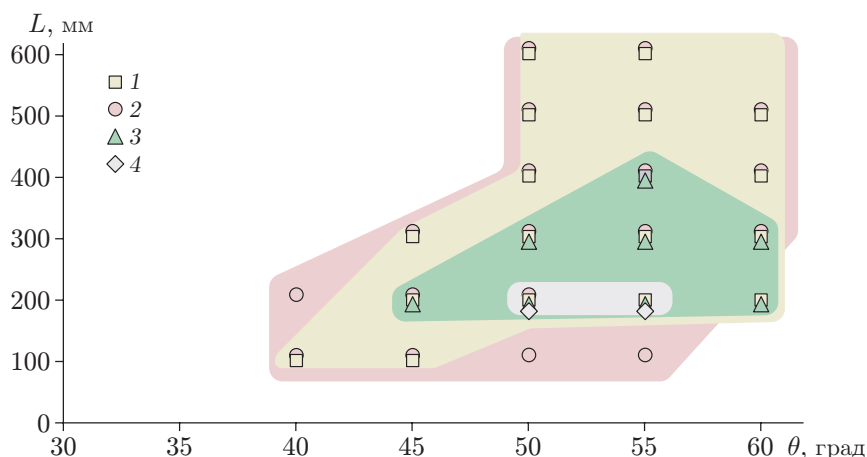


Рис. 5. Карта режимов, при которых происходит формирование кластера-цепочки из пузырьков малого диаметра:

1 — $Q_g = 3,0$ мл/мин, 2 — $Q_g = 3,3$ мл/мин, 3 — $Q_g = 4,0$ мл/мин, 4 — $Q_g = 4,5; 5,0$ мл/мин

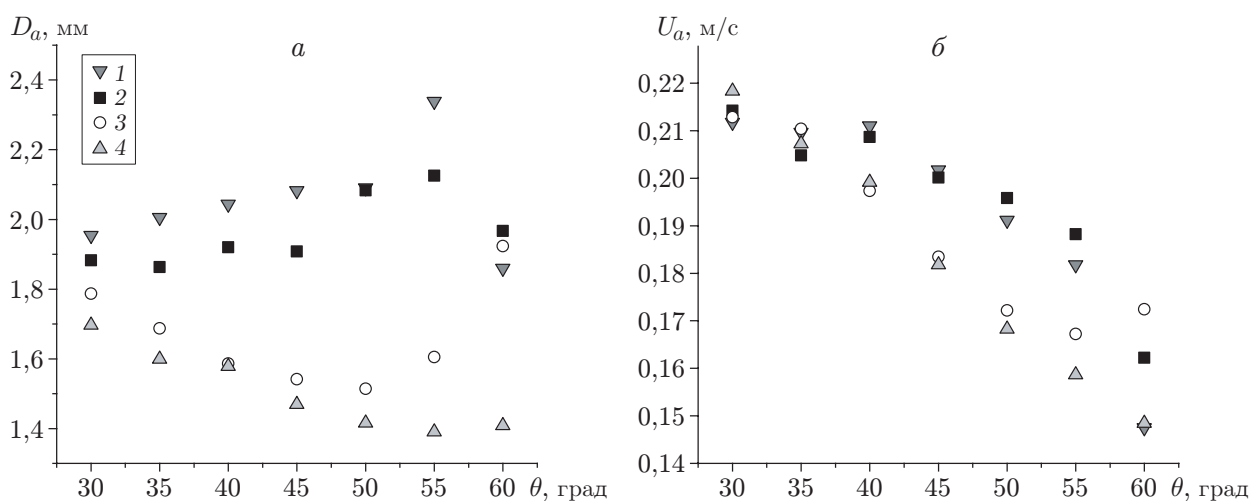


Рис. 6. Зависимости среднего размера пузырьков D_a (а) и средней скорости U_a (б) от угла наклона трубы θ на различных расстояниях от точки ввода газа ($Q_g = 3,3$ мл/мин):

1 — $L = 600$ мм, 2 — $L = 400$ мм, 3 — $L = 200$ мм, 4 — $L = 100$ мм

пузырей при отрыве, коалесценция пузырей вблизи капилляра и при их движении вдоль наклонной плоскости. Формирование цепочек пузырей приблизительно одинакового диаметра приводит к уменьшению скорости роста размеров пузырей при увеличении длины пройденного пути. При увеличении угла наклона трубы средняя скорость U_a уменьшается за счет увеличения проекции силы Архимеда на ось, перпендикулярную направлению движения, что приводит к увеличению трения пузырей о наклонную поверхность. При увеличении угла наклона канала от 30 до 60° средняя скорость пузырьков уменьшается с $0,22$ до $0,15$ м/с при расходе газа $Q_g = 3,3$ мл/мин. Нелинейный характер уменьшения скорости при увеличении угла наклона трубы на расстояниях от точки ввода газа $L \geq 400$ мм также обусловлена коалесценцией пузырей.

3. Выводы. Результаты выполненных в работе измерений позволяют сделать следующие выводы.

Диаметр пузырька при отрыве зависит от угла наклона капилляра, максимальный диаметр, при котором происходит отрыв пузырька, может быть получен при вертикальной ориентации капилляра.

Угол наклона трубы может оказывать значительное влияние на характер движения пузырьков в неподвижной жидкости вследствие увеличения трения. Определены режимы, при которых происходит формирование устойчивой структуры — цепочки из пузырьков одинакового диаметра.

При изменении угла наклона трубы средний размер газовых пузырьков меняется по нелинейному закону, так как на средний размер пузырей оказывает влияние не только коалесценция, но и уменьшение диаметра пузыря при отрыве с увеличением угла наклона капилляра, а также формирование цепочек пузырей одинакового размера.

Средняя скорость движения газовых пузырьков при увеличении угла наклона трубы уменьшается за счет увеличения силы трения о верхнюю стенку трубы. Нелинейный характер уменьшения скорости обусловлен изменением диаметра газовых пузырьков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zenit R., Tsang Y. H., Koch D. L., Sangani A. S.** Shear flow of a suspension of bubbles rising in an inclined channel // J. Fluid Mech. 2004. V. 515. P. 261–292.
2. **Donnelly B., O'Reilly Meehan R., Nolan K., Murray D. B.** The dynamics of sliding air bubbles and the effects on surface heat transfer // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 91. P. 532–542.
3. **Tihon J., Pěnkavová V., Vejražka J.** Wall shear stress induced by a large bubble rising in an inclined rectangular channel // Intern. J. Multiphase Flow. 2014. V. 67. P. 76–87. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.07.005.
4. **Li M., Hu L.** Experimental investigation of the behaviors of highly deformed bubbles produced by coaxial coalescence // Experiment. Thermal Fluid Sci. 2020. V. 117. 110114.
5. **Воробьев М. А., Кашинский О. Н., Лобанов П. Д., Чинак А. В.** Формирование мелкодисперсной газовой фазы в восходящем и опускном потоке жидкости // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2012. № 4. С. 75–81.
6. **Jamialahmadi M., Zehtaban M. R., Müller-Steinhagen H., et al.** Study of bubble formation under constant flow conditions // Chem. Engng Res. Design. 2001. V. 79. P. 523–532.
7. **Воронин Д. В.** Динамика газового пузырька при его взаимодействии с волнами сжатия и разрежения // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 5. С. 76–85.
8. **Шарафутдинов Р. Ф., Хабиров Т. Р., Садретдинов А. А.** Исследование неизотермического двухфазного течения в вертикальной скважине // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 2. С. 15–20.
9. **Fu Y., Liu Y.** Development of a robust image processing technique for bubbly flow measurement in a narrow rectangular channel // Intern. J. Multiphase Flow. 2016. V. 84. P. 217–228.
10. **Bhunia A., Pais S. C., Kamotani Y., Kim I.-H.** Bubble formation in a coflow configuration in normal and reduced gravity // AIChE J. 1998. V. 44. P. 1499–1509.
11. **Magnaudet J., Eames I.** The motion of high-Reynolds-number bubbles in inhomogeneous flows // Annual Rev. Fluid Mech. 2000. V. 32, N 1. P. 659–708.

*Поступила в редакцию 1/VIII 2023 г.,
после доработки — 1/VIII 2023 г.
Принята к публикации 4/VIII 2023 г.*