

03.1

Влияние концентрации поверхностно-активного вещества на динамику всплытия кластера пузырьков

© В.А. Архипов, С.А. Басалаев, А.С. Усанина, Р.А. Чуркин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: usaninaanna@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 мая 2023 г.

В окончательной редакции 21 июля 2023 г.

Принято к публикации 24 июля 2023 г.

Представлены новые результаты экспериментального исследования стационарной скорости всплытия сферического кластера монодисперсных пузырьков воздуха в глицерине при различных концентрациях поверхностно-активного вещества в области чисел Рейнольдса $Re < 0.1$. Предложен новый способ получения кластера монодисперсных пузырьков для исследования процесса всплытия консолидированной системы пузырьков.

Ключевые слова: кластер монодисперсных пузырьков, поверхностно-активное вещество, концентрация поверхностно-активного вещества, стационарная скорость всплытия.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.18.56175.19642

Динамика пузырьковых течений играет важную роль при решении ряда прикладных задач в промышленности и ряде технологических процессов [1], а также в лабораторных исследованиях, в частности, процессов зажигания электрического разряда в жидкостях с помощью специально создаваемых кавитационных пузырьков [2,3], влияния акустических волн на процесс движения пузырьковых кластеров [4,5]. Во многих процессах для варьирования физико-химических свойств границы раздела фаз жидкость–газ вводят поверхностно-активное вещество (ПАВ) в жидкость. Наличие ПАВ в жидкости приводит к изменению скорости всплытия пузырьков [6], уменьшает вероятность коалесценции пузырьков в процессе всплытия [7] и снижает массоперенос вдоль границы раздела двух сред [8]. В большинстве публикаций исследовалось влияние ПАВ на всплытие одиночных пузырьков [6,9–12]. Изучению движения кластера пузырьков в присутствии ПАВ посвящено ограниченное число работ, связанных с исследованиями пузырьковых течений применительно к конкретным технологическим процессам. В частности, исследование динамики кластера пузырьков в вязкой жидкости в присутствии ПАВ требуется при производстве полимерных композитных материалов [13], при анализе поведения группы пузырьков в нелинейно-вязкой жидкости применительно к технологии получения вспененного битума [14].

Важной задачей при исследовании физико-химических процессов в пузырьковых средах является изучение влияния концентрации ПАВ на установившуюся скорость всплытия пузырька. В экспериментах по всплытию одиночного пузырька воздуха в водном растворе неионогенного ПАВ [9] показано, что скорость движения пузырька не зависит от концентрации ПАВ в растворе. Однако полученный результат противоречит экспериментальным данным работы [10], где авторы показывают

снижение скорости всплытия пузырька по мере увеличения концентрации ПАВ на границе раздела фаз.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование стационарной скорости всплытия кластера пузырьков при различных концентрациях ПАВ в жидкости. Для достижения сформулированной цели разработан способ получения кластера заданной конфигурации с равномерным распределением монодисперсных пузырьков в его объеме [15], заключающийся в импульсной подаче газа через трубки одинакового диаметра и реализующийся с помощью экспериментальной установки, схема которой приведена на рис. 1.

Кластер получается путем последовательной подачи с одинаковым интервалом времени N групп пузырьков, образующих горизонтальный слой 12, через трубки 6 одинаковой высоты, установленные на расстоянии 12 mm друг от друга. Каждая из трубок соединена с коллектором 3 через отдельный электропневмоклапан 10. Для варьирования размера пузырьков в кластере использовались сменные медицинские иглы (с внешним диаметром 0.2 и 0.3 mm), которые устанавливались на трубки. Для варьирования диаметра кластера, количества и начальной объемной концентрации пузырьков в кластере использовались резиновые заглушки, которые надевались на неиспользуемые в отдельных сериях экспериментов трубки коллектора.

Для поступления пузырьков газа через трубку в жидкость необходимо, чтобы давление в коллекторе p_k превышало гидростатическое давление жидкости p_l в нижней части резервуара 1: $p_k > p_l = p_{atm} + gH\rho_l$ (где p_{atm} — атмосферное давление, ρ_l — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, H — высота столба жидкости в резервуаре над верхней крышкой коллектора). При отработке способа было эксперименталь-

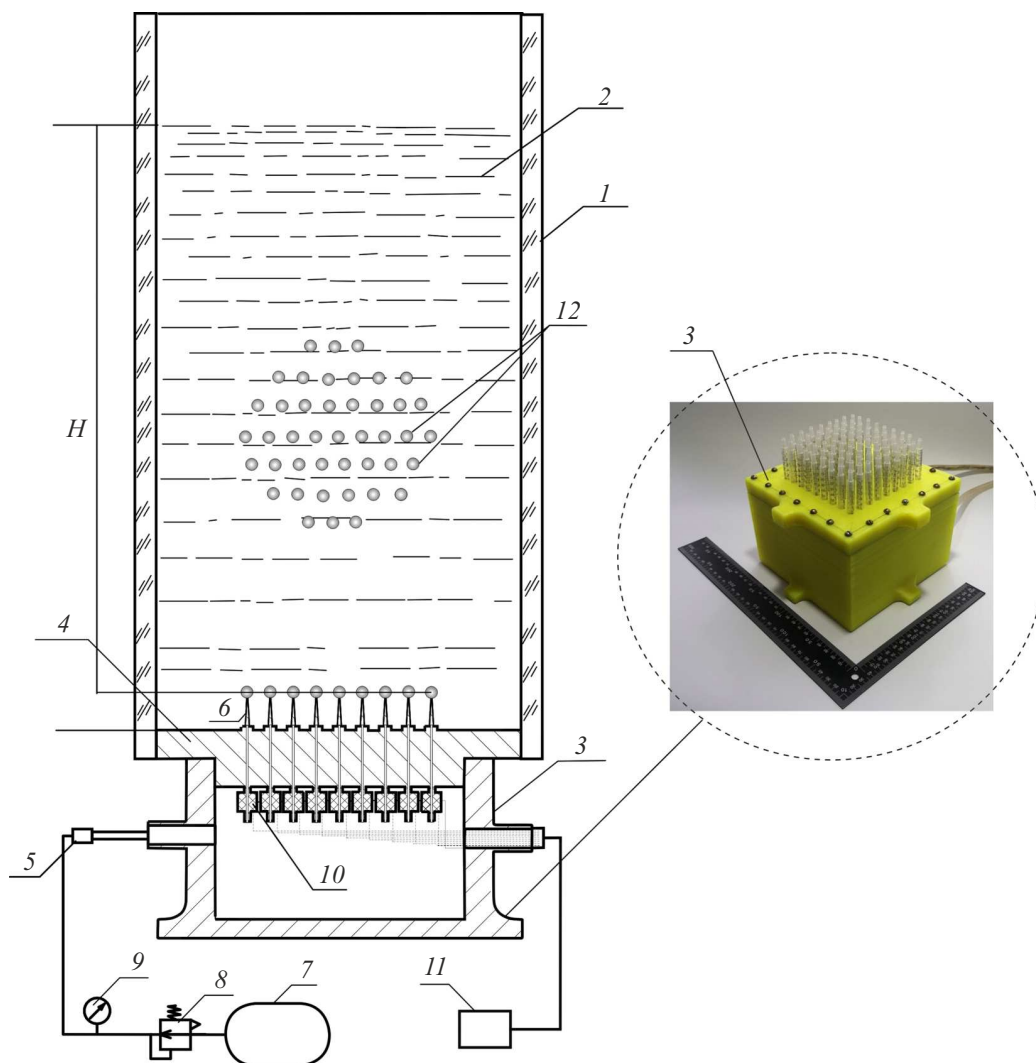


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса всплытия кластера пузырьков. 1 — резервуар, 2 — жидкость, 3 — коллектор, 4 — крышка коллектора, 5 — патрубок, 6 — трубки, 7 — баллон со сжатым газом, 8 — редуктор, 9 — манометр, 10 — электропневмоклапан, 11 — контроллер, 12 — слой пузырьков.

но получено уточненное соотношение для определения давления p_k , при котором устойчиво образуется одиночный пузырек при импульсной подаче газа в трубку:

$$p_k = p_{atm} + 1.25gH\rho_l. \quad (1)$$

С помощью редуктора 8 устанавливалось постоянное давление p_k в коллекторе 3, соответствующее условию (1). С помощью контроллера 11 одновременно подавался импульс электрического напряжения 5V от источника питания на группу электропневмоклапанов 10, открывающих заданную группу трубок. Длительность импульса t_1 определялась с учетом времени заполнения газом пузырька объемом V

$$t_1 = \frac{V}{Q} = \frac{2D^3}{3d^2} \sqrt{\frac{\rho_g}{0.5\rho_l gH}}. \quad (2)$$

Объемный расход газа определяется уравнением

$$Q = S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_g}},$$

где S — площадь проходного сечения трубки для подачи газа в резервуар, $\Delta p = p_k - p_l$ — перепад давления на трубке. При этом в жидкость поступает первый слой пузырьков ($n = 1$), всплывающих в жидкости.

Далее с помощью контроллера 11 на электропневмоклапаны 10 подавались импульсы напряжения, обеспечивающие получение следующих пузырьковых слоев ($n = 2, 3, \dots, N$), образующих кластер, через одинаковые промежутки времени

$$t_2 = \frac{l}{u(D, \rho_l, \mu_l)}, \quad (3)$$

где l — расстояние между осями трубок, $u(D, \rho_l, \mu_l)$ — скорость всплытия пузырька газа диаметром D в жид-

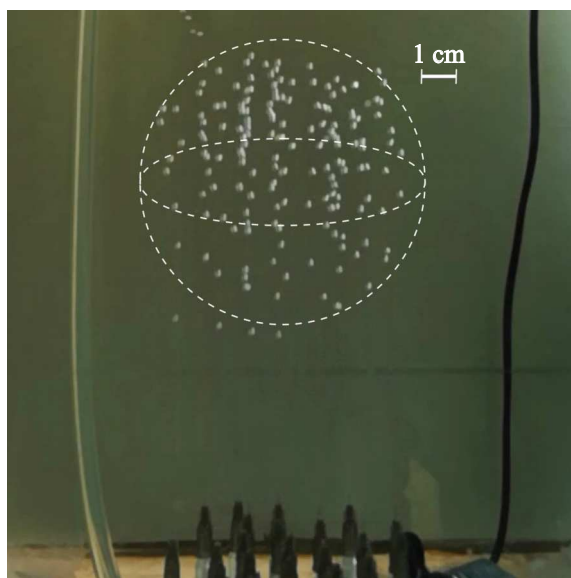


Рис. 2. Фотография сферического кластера монодисперсных пузырьков воздуха в глицерине.

Коэффициент поверхностного натяжения исследуемых жидкостей

Параметр	Концентрация ПАВ, g/l			
	0	$2.87 \cdot 10^{-2}$	$2.87 \cdot 10^{-1}$	2.87
$\sigma, \text{mN/m}$	64.9	56.4	44.3	36.2
$\mu, \text{Pa}\cdot\text{s}$	1.27	1.27	1.22	1.15

кости с плотностью ρ_l и коэффициентом динамической вязкости μ_l . Заданная конфигурация кластера обеспечивалась заранее заданным программным кодом на контроллере. Равномерное распределение пузырьков в кластере обеспечивается условиями (1) и (2). В качестве примера на рис. 2 приведена фотография сферического кластера монодисперсных пузырьков воздуха, всплывающих в глицерине.

С использованием рассмотренной установки проведено исследование процесса всплытия изначально сферического кластера монодисперсных пузырьков воздуха в чистом глицерине и растворе глицерина с неионогенным ПАВ диламидом. В работе исследовался бесконтактный тип всплытия пузырькового кластера [16], характеризующийся движением пузырьков без соприкосновения, как в начальный момент времени, так и в процессе всплытия. В таблице приведены значения коэффициента поверхностного натяжения σ используемых в экспериментах жидкостей. Диаметр пузырьков D в кластере варьировался от 2.3 до 3.9 mm с помощью сменных медицинских игл, которые устанавливались на трубки 6. Погрешность в нахождении диаметра пузырьков D , входящих в кластер, связана с разрешающей способностью видеокамеры и качеством видеосъемки и составляет

$\delta D = 3\%$. Начальный диаметр кластера пузырьков варьировался в диапазоне $D_c = 4.8\text{--}8.5 \text{ cm}$. Погрешность определения диаметра D_c связана с флуктуациями его формы в процессе всплытия и не превышала $\delta D_c = 3\%$. Начальная объемная концентрация кластеров пузырьков в экспериментах составляла

$$C_V \sim \pi(D/l)^3/6 = 0.005.$$

Скорость всплытия кластера пузырьков определялась на стационарном участке его движения, который для условий проведенных экспериментов устанавливался в среднем на расстоянии 5 cm от места отрыва пузырьков. Скорость всплытия центра масс кластера пузырьков в экспериментах определялась по формуле $u_c = L/t$ (где L — расстояние, пройденное центром масс кластера пузырьков до начала заметной деформации за время t ; t — время, за которое кластер проходит расстояние L). Основная погрешность при расчете u_c связана с определением центра масс кластера. Относительная погрешность нахождения u_c составляла $\delta u_c = 4\%$.

Экспериментально показано, что наличие ПАВ на границе раздела фаз жидкость–газ приводит к уменьшению скорости всплытия кластера пузырьков [17]. По мере увеличения концентрации ПАВ скорость всплытия кластера пузырьков уменьшается (и соответственно

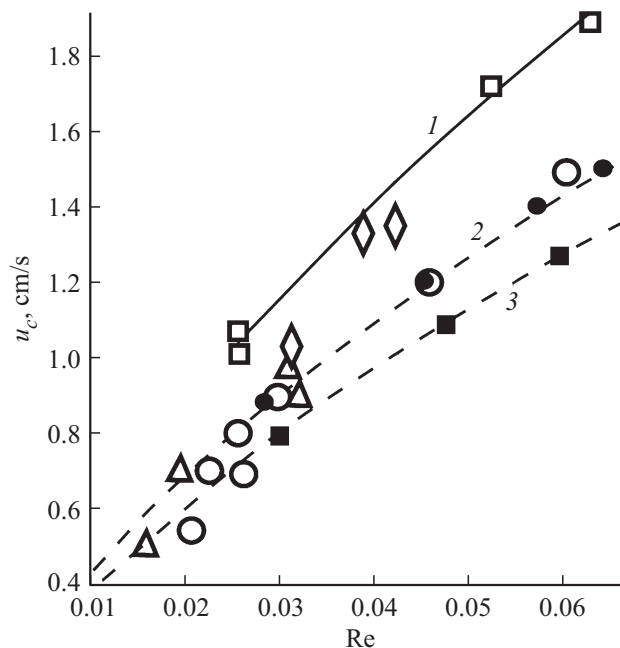


Рис. 3. Зависимость стационарной скорости всплытия кластера пузырьков воздуха в растворе глицерин–ПАВ от числа Рейнольдса при различных концентрациях ПАВ. Кривая 1 (аппроксимация экспериментальных данных), светлые квадраты — $C = 0 \text{ g/l}$, ромбы — $C = 2.87 \cdot 10^{-2} \text{ g/l}$, треугольники — $C = 2.87 \cdot 10^{-1} \text{ g/l}$, светлые кружки — $C = 2.87 \text{ g/l}$; кривая 2 — зависимость Адамара–Рыбчинского (темные кружки — экспериментальные данные [18]); кривая 3 — зависимость Стокса (темные квадраты — экспериментальные данные [6]).

коэффициент сопротивления увеличивается). Экспериментальные значения скорости всплытия центра масс кластера монодисперсных пузырьков воздуха в растворе глицерин–ПАВ в зависимости от числа Рейнольдса $Re = \rho_l u_c D / \mu_l$ для различных концентраций ПАВ приведены на рис. 3. Для сравнения с полученными результатами на рис. 3 представлены зависимости скорости всплытия одиночного пузырька с учетом зависимостей Адамара–Рыбчинского $C_D = 16/Re$ (кривая 2, темные кружки — экспериментальные данные [18]) и Стокса $C_D = 24/Re$ (кривая 3, темные квадраты — экспериментальные данные [6]) для коэффициента сопротивления при $Re < 1$ [19]. В работах [6,18] показано, что кривые 2 и 3 на рис. 3 соответствуют всплытию пузырька в отсутствие ПАВ и в присутствии ПАВ соответственно.

Таким образом, предложен новый способ получения пузырькового кластера заданной конфигурации из равномерно распределенных в его объеме монодисперсных пузырьков. Можно отметить аналогию процесса формирования пузырькового кластера со способом получения трехмерных изделий методом 3D-печати.

Показано, что стационарная скорость всплытия кластера в отсутствие ПАВ превышает скорость всплытия одиночного пузырька при одинаковых числах Рейнольдса на $\sim 30\%$, что соответствует результатам работы [6] и объясняется воздействием на скорость всплытия соседних пузырьков. Разность скорости всплытия кластера и одиночного пузырька снижается по мере увеличения содержания ПАВ (рис. 3). В исследованном диапазоне коэффициента поверхностного натяжения на границе раздела фаз $\sigma = 36.2\text{--}64.9$ мН/м наблюдается снижение скорости кластера пузырьков от 20 до 30%.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10028 (<https://rscf.ru/project/22-79-10028/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Б.В. Бошнятов, *Микропузырьковые газожидкостные среды и перспективы их использования* (LAP LAMBERT, Саарбрюккен, 2016).
- [2] А.П. Дрожжин, С.М. Коробейников, В.С. Тесленко, *Науч. вестн. НГТУ*, № 2, 1 (2003).
- [3] В.В. Скорых, *ЖТФ*, **56** (8), 1569 (1986).
- [4] А.О. Максимов, Е.В. Соседко, *Письма в ЖТФ*, **29** (3), 40 (2003). [A.O. Maksimov, E.V. Sosedko, *Tech. Phys. Lett.*, **29** (2), 102 (2003). DOI: 10.1134/1.1558738].
- [5] О.Б. Гуськов, *Прикладная математика и механика*, **78** (2), 186 (2014). [O.B. Gus'kov, *J. Appl. Math. Mech.*, **78** (2), 126 (2014). DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2014.07.004].
- [6] В.А. Архипов, И.М. Васенин, А.С. Усанина, *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*, № 2, 142 (2016). [V.A. Arkhipov, I.M. Vasenin, A.S. Usanina, *Fluid Dyn.*, **51** (2), 266 (2016). DOI: 10.1134/S0015462816020137].
- [7] J. Lu, C.M. Corvalan, Y.M.J. Chew, J.Y. Huang, *Chem. Eng. Sci.*, **196**, 493 (2019). DOI: 10.1016/j.ces.2018.11.002
- [8] К.А. Бушуева, М.О. Денисова, А.Л. Зуев, К.Г. Костарев, *Конвективные течения*, № 3, 139 (2007).
- [9] Y. Zhang, J.A. Finch, *J. Fluid Mech.*, **429**, 63 (2001). DOI: 10.1017/S0022112000002755
- [10] R. Bel Fdhila, P.C. Duineveld, *Phys. Fluids*, **8** (2), 310 (1996). DOI: 10.1063/1.1879712
- [11] F. Takemura, *Phys. Fluids*, **17** (4), 048104 (2005). DOI: 10.1063/1.1879712
- [12] Y. Tagawa, S. Takagi, Y. Matsumoto, *J. Fluid Mech.*, **738**, 124 (2014). DOI: 10.1017/jfm.2013.571
- [13] V. Michaud, *Transp. Porous Med.*, **115** (3), 581 (2016). DOI: 10.1007/s11242-016-0629-7
- [14] О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, М.В. Агафонцева, *Вестн. ТГАСУ*, № 4 (37), 144 (2012).
- [15] В.А. Архипов, А.С. Усанина, К.Г. Перфильева, С.А. Басалаев, С.Н. Поленчук, К.В. Костюшин, *Способ получения пузырькового кластера заданной конфигурации*, патент РФ на изобретение № 2796910, МПК В01F 23/23 (опубл. 29.05.2023).
- [16] В.А. Архипов, С.А. Басалаев, К.Г. Перфильева, А.С. Усанина, *Инж.-физ. журн.*, **93** (5), 1243 (2020). [V.A. Arkhipov, S.A. Basalaev, K.G. Perfil'eva, A.S. Usanina, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **93** (5), 1200 (2020). DOI: 10.1007/s10891-020-02222-4].
- [17] В.А. Архипов, А.С. Усанина, С.А. Басалаев, Л.Е. Каличкина, В.С. Мальков, *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*, № 1, 104 (2020). DOI: 10.31857/S0568528120010028 [V.A. Arkhipov, A.S. Usanina, S.A. Basalaev, L.E. Kalichkina, V.S. Mal'kov, *Fluid Dyn.*, **55** (1), 103 (2020). DOI: 10.1134/S0015462820010024].
- [18] В.А. Архипов, И.М. Васенин, А.С. Усанина, *Инж.-физ. журн.*, **86** (5), 1097 (2013). [V.A. Arkhipov, I.M. Vasenin, A.S. Usanina, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **86** (5), 1171 (2013). DOI: 10.1007/s10891-013-0939-3].
- [19] Р.И. Нигматуллин, *Динамика многофазных сред* (Наука, М., 1987).