

УДК 532.613.5

Закономерности всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости в присутствии поверхностно-активного вещества*

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

Томский государственный университет

E-mail: Usaninaanna@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования процесса всплытия кластера монодисперсных газовых пузырьков в вязкой жидкости в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества в области чисел Рейнольдса $Re = 0,01 \div 1$. Проанализировано влияние типа поверхностно-активного вещества на динамику всплытия пузырькового кластера. Определена качественная картина всплытия монодисперсного кластера пузырьков в зависимости от начальной объемной концентрации в диапазоне $C_V = 0,001 \div 0,04$. Получены новые экспериментальные данные по скорости и коэффициенту сопротивления компактного кластера монодисперсных пузырьков, всплывающего в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества в жидкости, для контактного и бесконтактного типов всплытия пузырьков.

Ключевые слова: кластер пузырьков, поверхностно-активное вещество, вязкая жидкость, коэффициент сопротивления, экспериментальное исследование.

Введение

Вопрос о влиянии поверхностно-активного вещества на динамику всплытия деформируемых частиц дисперсной фазы (пузырьков или капель) является одной из фундаментальных проблем механики гетерогенных сред. Актуальна задача о движении совокупности деформируемых частиц дисперсной фазы (в частности, пузырьковых течений) в дисперсионной среде, содержащей поверхностно-активное вещество. Также представляют интерес получение кластера пузырьков и динамика его движения при исследовании физических процессов в пузырьковых средах [1–4]. Детальное изучение динамики кластера пузырьков в вязкой жидкости необходимо для развития и решения практических проблем волновых технологий, применяющихся во многих отраслях промышленности [5], в технологии очистки поверхностей от микро- и нанозагрязнений [6], при производстве полимерных композитных материалов [7], при анализе поведения группы пузырьков в нелинейно-вязкой жидкости применительно к технологии получения вспененного битума [8].

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

Закономерности всплытия кластера газовых пузырьков зависят от многочисленных параметров, в частности, от силы сопротивления, размера и формы пузырьков, режима всплытия (числа Рейнольдса). Одним из ключевых параметров, влияющих на динамику пузырькового течения, является коэффициент поверхностного натяжения σ на границе раздела фаз газ – жидкость. Во многих промышленных технологических процессах и технических устройствах, основанных на использовании пузырьковых сред, для варьирования коэффициента σ в жидкую дисперсионную среду вводят поверхностно-активное вещество.

Присутствие молекул поверхностно-активного вещества на границе раздела фаз изменяет межфазное поверхностное натяжение и тем самым влияет на силы, действующие на границу раздела фаз. Для механизмов быстрой и медленной сорбции влияние поверхностно-активного вещества на поверхностное натяжение определяется уравнением состояния [2, 9]

$$\sigma - \sigma_0 = f(\Gamma),$$

где σ_0 — коэффициент поверхностного натяжения чистой жидкости (не содержащей поверхностно-активное вещество), Γ — адсорбция (то есть содержание молекул поверхностно-активного вещества на поверхности раздела фаз). Функция $f(\Gamma)$ определяется из используемой модели сорбции. Например, в случае применения модели Лангмюра [9] приведенное выше уравнение состояния принимает вид:

$$\sigma = \sigma_0 + RT\Gamma_{\infty} \ln \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_{\infty}} \right),$$

где R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура системы, Γ_{∞} — предельная адсорбция.

Для детального анализа влияния молекул поверхностно-активного вещества на динамику всплытия группы газовых пузырьков требуются прецизионные экспериментально-теоретические исследования при различных режимах двухфазного течения.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование динамики всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости в зависимости от типа поверхностно-активного вещества на границе раздела фаз газ – жидкость. Для получения сведений об отличительных особенностях движения кластера пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества выполнены также эксперименты для пузырькового кластера, всплывающего в отсутствие поверхностно-активного вещества.

Экспериментальная установка и методика исследования

Исследование проводилось на установке, состоящей из вертикально установленной прозрачной кюветы с плоскопараллельными стенками, наполненной жидкостью, устройства для создания компактного кластера монодисперсных пузырьков и системы визуализации процесса всплытия совокупности газовых пузырьков. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Кювета 1 размером 300×300×900 мм (объемом 81 л) выполнена из оптического стекла толщиной 15 мм. Экспериментальная установка и методика получения пузырькового кластера основана на импульсной подаче газа.

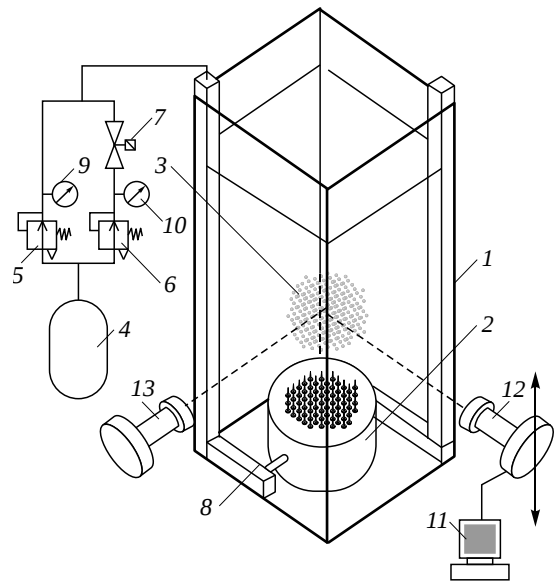


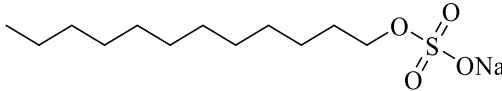
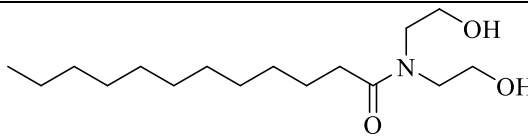
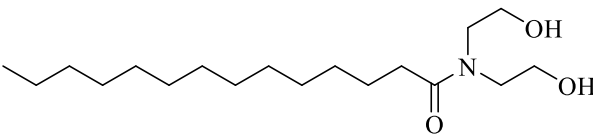
Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — кювета, 2 — коллектор, 3 — кластер пузырьков, 4 — баллон со сжатым газом, 5 — редуктор низкого давления, 6 — редуктор высокого давления, 7 — электропневмоклапан, 8 — патрубок, 9, 10 — манометры, 11 — компьютер, 12, 13 — видеокамеры.

В качестве рабочей вязкой жидкости использовался глицерин. Эксперименты проводились для двух типов поверхностно-активного вещества — анионного и неионогенного, имеющих идентичную гидрофобную часть и отличающихся гидрофильной частью.

Структурная и молекулярная формула используемых поверхностно-активных веществ (лаурилсульфат натрия и диламид) приведены в табл. 1. В экспериментах для проведения сравнения влияния типа поверхностно-активного вещества на закономерности движения группы монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости лаурилсульфат натрия

Таблица 1
Структурная и молекулярная формула используемых поверхностно-активных веществ

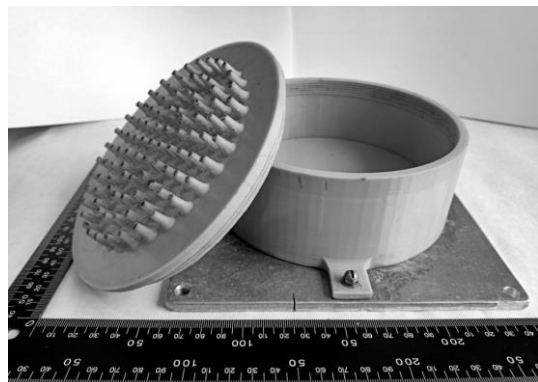
Лаурилсульфат натрия (анионное поверхностно- активное вещество)	 $C_{12}H_{25}NaO_4S$
Диламид (неионогенное поверхностно- активное вещество)	 $C_{16}H_{33}NO_3$  $C_{18}H_{37}NO_3$

и диламид вводились в глицерин в концентрациях, обеспечивающих близкий по значению коэффициент поверхностного натяжения σ на границе раздела жидкость – газ.

Система визуализации включала источники света (две лампы мощностью 18 Вт и одна — мощностью 1000 Вт), цифровые видеокамеры 12 «Nikon D600» и 13 «Panasonic HDC-SD60». Во время проведения экспериментов видеокамеры располагались в двух перпендикулярных плоскостях с возможностью вертикального хода вверх/вниз для одной из камер. Двухракурсная видеосъемка исследуемого процесса позволила повысить точность и обеспечить контроль за изменением динамических параметров процесса всплытия кластера пузырьков. Камера 12 использовалась для определения формы и размера пузырьков, составляющих кластер. Закрепленная неподвижно камера 13 фиксировала скорость всплытия группы пузырьков по всей траектории движения. Для контроля расстояния, пройденного кластером пузырьков, применялась масштабная линейка с ценой деления 1 мм.

Для формирования компактного кластера 3 равномерно распределенных в объеме жидкости монодисперсных пузырьков использовалось устройство [11], включающее расположенный в нижней части кюветы 1 с жидкостью коллектор 2 в виде цилиндрической емкости с газопроницаемой верхней крышкой, соединенный силиконовой трубкой с источником сжатого газа. В центре верхней крышки коллектора и по равноотстоящим концентрическим окружностям было выполнено 100 выступающих над поверхностью крышки перфораций, в которых устанавливались обычные медицинские иглы одинакового диаметра, что обеспечивало образование монодисперсных пузырьков. Расстояние между центрами перфораций составляло 11 мм. Общий вид коллектора приведен на фотографии (рис. 2). Для каждой из окружностей высота игл была одинакова и линейно уменьшалась с увеличением радиуса окружности. Наличие перфораций в центре верхней крышки коллектора и по равноотстоящим концентрическим окружностям, а также линейное уменьшение высоты игл, расположенных на окружностях, с увеличением радиуса окружности обеспечивало получение компактного кластера с равномерным распределением пузырьков в объеме жидкости.

В качестве выходных растробов для газовых пузырьков использовались медицинские иглы марки 33G и 30G внешним диаметром 0,2 и 0,3 мм соответственно. Для изменения количества пузырьков в кластере и начальной объемной концентрации группы пузырьков количество игл, используемых для формирования кластера пузырьков, варьировалось от 40 до 100; в неиспользуемые в отдельных сериях экспериментов отверстия перфораций помещались плотно прилегающие резиновые заслонки, предотвращающие затекание жидкости в коллектор и образование пузырьков.



В качестве источника газа использовался баллон 4 со сжатым газом, соединенный через редуктор низкого давления 5, а также через редуктор высокого давления 6 и электропневмоклапан 7 с патрубком 8 коллектора 2. Применение баллона со сжатым газом в качестве источника пос-

Рис. 2. Фотография коллектора, используемого для создания компактного кластера монодисперсных пузырьков.

ледного позволяло обеспечить стационарный уровень давления при подаче газа в коллектор (в отличие, например, от компрессора, создающего неизбежные пульсации давления). Использование редуктора низкого давления обеспечивало предварительный наддув коллектора, что предотвращало затекание жидкости из резервуара в коллектор. Редуктор высокого давления и электропневмоклапан применялись для обеспечения импульсной подачи дополнительного газа в коллектор из баллона при импульсном включении электропневмоклапана. Под действием дополнительного импульсного давления происходил однократный ввод газа в жидкость через иглы с образованием компактного кластера пузырьков.

При давлении в коллекторе, равном величине максимального давления газа $p_{\max}$, газ поступал через иглы в жидкость. Это обеспечивалось при условии

$$p_{\max} > p_{\text{атм}} + p_h, \quad (1)$$

где $p_{\max}$ — атмосферное давление, $p_h = \rho_l g h$ — гидростатическое давление, g — ускорение свободного падения, ρ_l — плотность жидкости, h — высота столба жидкости над выходным торцом иглы.

Наибольшее гидростатическое давление реализуется для периферийных игл высотой h_k , для которых $h = H - h_k$ (H — высота столба жидкости в резервуаре над верхней крышкой коллектора). Из соотношения (1) следует:

$$p_{\max} > p_{\text{атм}} + \rho_l g (H - h_k). \quad (2)$$

При отработке методики экспериментально было получено уточнение условия (2):

$$p_{\max} = p_{\text{атм}} + 1,2 \rho_l g (H - h_k). \quad (3)$$

Отметим, что при выполнении соотношения (3) пузырьки газа поступали в жидкость через иглы коллектора.

Эксперименты проводились для двух газов: воздуха (плотностью $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$) и гелия (плотностью $\rho = 0,178 \text{ кг/м}^3$).

Измеряемые параметры

При проведении экспериментов измерялись основные параметры процесса: плотность ρ_l и коэффициент динамической вязкости μ_l жидкости, начальная объемная концентрация кластера пузырьков C_v , диаметр кластера пузырьков D , коэффициент поверхностного натяжения σ на границе раздела фаз газ–жидкость, пройденное пузырьками расстояние $s(t)$ и скорость всплытия $u(t)$. Физические свойства используемых жидкостей во время проведения экспериментов практически не менялись. Плотность глицерина и его растворов с поверхностно-активным веществом измерялась ареометром с относительной погрешностью 0,1 % и составляла $\rho_l = 1263 \text{ кг/м}^3$.

Коэффициент динамической вязкости используемых жидкостей μ_l варьировался в диапазоне $1,1 \div 1,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и определялся по измеренной скорости стационарного осаждения одиночного алюминиевого шарика диаметром $D_p = 3,5 \text{ мм}$ и плотностью $\rho_p = 2749 \text{ кг/м}^3$ в стоксовском режиме ($\text{Re}_p = \rho_l D_p u_p / \mu_l < 1$, $(C_D)_p = 24/\text{Re}_p$) по формуле

$$\mu_1 = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho_1)}{18u_p},$$

где $(C_D)_p$ — коэффициент сопротивления одиночной частицы, u_p — скорость стационарного осаждения алюминиевого шарика.

Расстояние, пройденное кластером пузырьков, и скорость всплытия кластера определялись покадровой обработкой результатов видеосъемки. Скорость всплытия центра масс группы монодисперсных пузырьков в некотором интервале времени Δt_i (где i — номер кадра) вычислялась по формуле

$$u_c(s_i) = \frac{s_{(i+1)} - s_{(i-1)}}{\Delta t_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1,$$

где $s_{(i+1)} - s_{(i-1)}$ — пройденное кластером расстояние, определяемое по $i-1$ и $i+1$ кадрам, n — количество кадров. Расстояние s_i устанавливалось с помощью компьютерной программы CorelDRAW. Погрешность измерения s_i , связанная с искажением изображения и разрешающей способностью видеокамеры, составляла $\pm 0,1$ мм.

Средняя скорость всплытия центра масс кластера пузырьков вычислялась по формуле

$$u = s/t,$$

где s — расстояние, пройденное кластером до начала распада, t — время, за которое кластер проходит расстояние s . Величина средней скорости всплытия кластера монодисперсных пузырьков в экспериментах вычислялась до момента распада кластера и изменялась в диапазоне $u = 0,08 \div 6,4$ см/с.

Эквивалентный сферический диаметр кластера пузырьков определялся по формуле

$$D = (D_1 + D_2)/2,$$

где D_1, D_2 — средние значения диаметров миделева сечения кластера в горизонтальном и вертикальном направлениях. В экспериментах начальный диаметр кластера пузырьков варьировался в диапазоне $D = 13 \div 100$ мм.

Диаметр пузырьков d , составляющих кластер, определялся путем компьютерной обработки полученного видеоряда процесса всплытия пузырьков с погрешностью 3 %. Диаметр пузырьков в экспериментах варьировался в диапазоне $d = 2 \div 6$ мм.

Начальная объемная концентрация кластера пузырьков в экспериментах определялась на расстоянии 5 см от выходных отверстий коллектора и рассчитывалась по формуле

$$C_V = N \frac{V_p}{V} = N \left(\frac{d}{D} \right)^3,$$

где N — количество пузырьков, содержащихся в кластере, V_p — объем одиночного пузырька в составе кластера, V — объем кластера пузырьков. Величина начальной объемной концентрации кластера пузырьков в экспериментах варьировалась в диапазоне $C_V = 0,001 \div 0,04$.

Коэффициент поверхностного натяжения σ глицерина и его растворов с поверхностно-активным веществом определялся в соответствии с ГОСТ-ом на сталагмометре СТ2, принцип работы которого основывается на методе определения объема капель, выдавливаемых на границе жидкость — газ. Измерения коэффициента σ в экспериментах про-

Таблица 2
Физико-химические свойства используемых жидкостей

Жидкость	C , г/л	σ , мН/м
Глицерин	–	64,9
Глицерин-лаурилсульфат натрия	12,6	37,4
Глицерин-диамид	2,87	36,2

водились на границе жидкости с воздухом. Полученные значения σ для глицерина и его растворов с поверхностно-активным веществом, а также концентрации используемых поверхностно-активных веществ приведены в табл. 2. Выбор концентраций лаурилсульфат натрия и диамида, указанных в данной таблице, обусловлен примерным равенством коэффициента поверхностного натяжения на границе фаз.

В работе [12] было показано, что в области малых давлений при комнатной температуре величина σ на границе с гелием отличается от значения поверхностного натяжения на границе с воздухом не более чем на 1 мН/м, поэтому в экспериментах предполагается равенство поверхностных натяжений на свободной поверхности пар глицерин – воздух и глицерин – гелий при одинаковых концентрациях поверхностно-активного вещества в жидкости.

Результаты экспериментов

Эксперименты по всплытию компактного кластера монодисперсных газовых пузырьков в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества проводились в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = \rho_1 u d / \mu_1 = 0,01 \div 1$.

Качественная картина всплытия кластера пузырьков

В экспериментах исследовались два типа всплытия кластера пузырьков: с контактным и бесконтактным взаимодействием. Бесконтактный тип всплытия пузырькового кластера предполагает движение пузырьков, расположенных в начальный момент всплытия на одинаковом расстоянии друг от друга, без соприкосновения. Контактное взаимодействие пузырьков при всплытии предполагает наличие соприкосновений между пузырьками, в частности, с образованием агломератов пузырьков, коагуляцию пузырьков с образованием одного пузырька большего размера или соударение пузырьков без коагуляции.

Анализ полученных в экспериментах видеорядов по бесконтактному всплытию кластера пузырьков (рис. 3) показал, что по мере увеличения пройденного пузырьками расстояния кластер расширяется по всей высоте кюветы, то есть эквивалентный сферический диаметр кластера пузырьков постепенно увеличивается. По-видимому, расширение кластера пу-

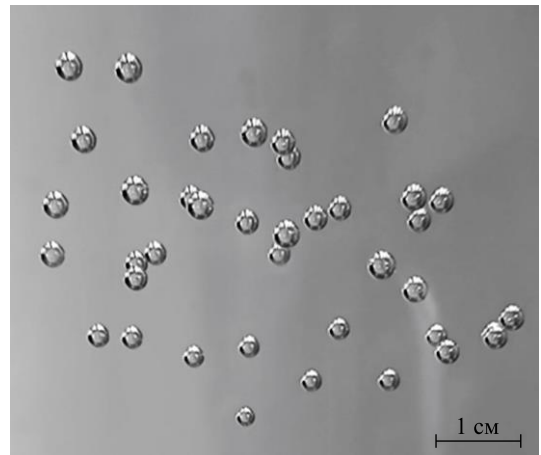


Рис. 3. Фотография кластера пузырьков воздуха ($d = 3$ мм), всплывающего в растворе глицерин-диамид.

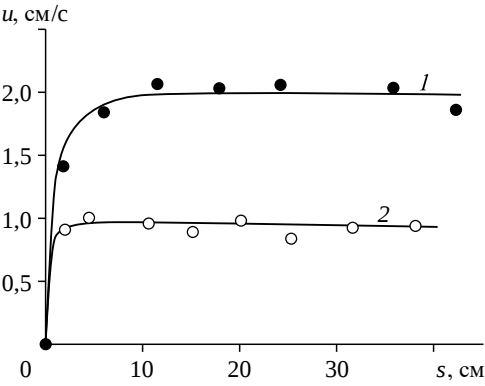


Рис. 4. Зависимости скорости всплытия кластера пузырьков воздуха, от пройденного расстояния.

$D = 8,6$ см, $d = 3,2$ мм, $C_V = 0,004$;
символы — данные эксперимента,
линии — аппроксимационные кривые;

1 — глицерин, 2 — раствор диламида в глицерине.

зырьков происходит до тех пор, пока пузырьки не начинают всплывать как одиночные частицы: без влияния на скорость движения соседних пузырьков. Такая динамика бесконтактного всплытия пузырьков характерна для всех рассмотренных в экспериментах жидкостей, то есть не зависит от присутствия/отсутствия поверхностно-активного вещества. В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости скорости всплытия кластера пузырьков, рассчитанной по центру масс, от расстояния, пройденного пузырьками, для чистого глицерина (кривая 1) и раствора глицерин-диламид (кривая 2). Из рисунка следует, что, начиная с некоторого расстояния, скорость всплытия кластера пузырьков устанавливается.

Обработка и анализ экспериментальных видеок кадров по контактному всплытию кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости показал, что процесс всплытия пузырьков можно разделить на три стадии (рис. 5): стадия движения сферы (рис. 5a), стадия формирования (рис. 5b) и движения сфероида, стадия распада сфероида (рис. 5c). На первой стадии всплытия кластера пузырьков наблюдается движение изначально сферического облака, сопровождающееся циркуляцией периферийных пузырьков в направлении, противоположном всплытию кластера пузырьков. На второй стадии происходит формирование и движение сфероидального кластера с сохранением циркуляции периферийных пузырьков. В процессе движения имеет место постепенное расширение кластера в двух диаметральных направлениях сфероида. На третьей, заключительной стадии наблюдается распад кластера пузырьков на фрагменты, состоящие из отдельных пузырьков и групп пузырьков. При этом разрушение происходит из центра масс кластера таким образом, что система приобретает чашеобразную форму. Следует отметить, что картина контактного всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости аналогична динамике гравитационного осаждения совокупности твердых сферических частиц [13] в пересекающемся диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 0,01 \div 1$.

Влияние поверхностно-активного вещества на качественную картину всплытия кластера пузырьков в вязкой жидкости выявлено на третьей стадии процесса всплытия:

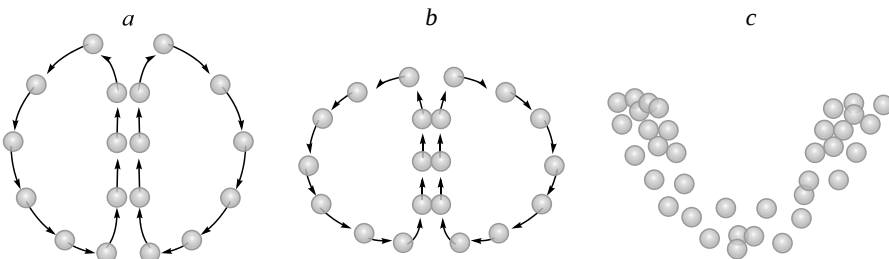


Рис. 5. Стадии всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости.

a — стадия движения сферы, b — стадия формирования и движения сфероида,
c — стадия распада сфероида.



Рис. 6. Фотографии агломератов пузырьков воздуха в растворе глицерин-диламид.

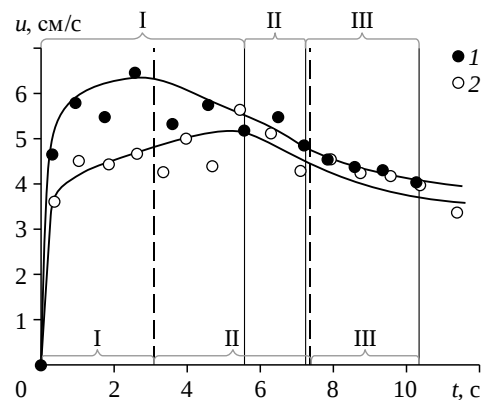
в отсутствие поверхностно-активного вещества в образованных фрагментах кластера при столкновении пузырьков наблюдается коагуляция пузырьков, а в присутствии поверхностно-активного вещества коагуляции не происходит. При наличии в жидкости поверхностно-активного вещества ввиду изменения физико-химических свойств межфазной поверхности пузырьки при соприкосновении прилипают друг к другу, образуя агломерат, состоящий из двух и более пузырьков (рис. 6). При этом в агломерате периферийные пузырьки циркулируют по поверхности соседних пузырьков по аналогии с вышеописанной первой и второй стадиями всплытия кластера. Этот эффект особо заметен для агломератов, образованных пузырьками в количестве более пяти.

Экспериментально обнаружено, что продолжительность первой стадии зависит от наличия поверхностно-активного вещества в жидкости. В присутствии его молекул на границе раздела фаз жидкость–газ продолжительность стадии движения сферы возрастает по сравнению со случаем всплытия пузырьков в отсутствие поверхностно-активного вещества. Полученные экспериментально зависимости скорости всплытия центра масс кластера пузырьков воздуха от времени в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества приведены на рис. 7 для следующих начальных параметров экспериментов: $d = 3,6$ мм, $D = 7,2$ см, $C_V = 0,018$. На рисунке границы вышеописанных стадий всплытия пузырькового кластера отмечены в случае присутствия поверхностно-активного вещества сплошными линиями, а в случае его отсутствия — штриховыми. Следует отметить, что в стадии движения сферы наблюдается увеличение скорости всплытия кластера пузырьков до некоторого максимального значения, при достижении которого наступает вторая стадия всплытия, сопровождающаяся снижением скорости кластера пузырьков. В третьей стадии наблюдается дальнейшее уменьшение скорости кластера монодисперсных пузырьков.

Для используемых в экспериментах поверхностно-активных веществ (лаурилсульфата натрия и диламида) не обнаружено отличия в продолжительности вышеописанных стадий, то есть тип поверхностно-активного вещества не оказывает влияния на картину всплытия кластера монодисперсных пузырьков. В качестве примера на рис. 8 приведены видеоряды по динамике всплытия кластера пузырьков воздуха в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества со следующими начальными пара-

Рис. 7. Зависимости скорости всплытия кластера пузырьков воздуха от времени.

I — первая стадия, II — вторая стадия, III — третья стадия; символы — данные эксперимента:
1 — глицерин, 2 — раствор глицерин-диламид;
кривые линии — аппроксимационные зависимости.



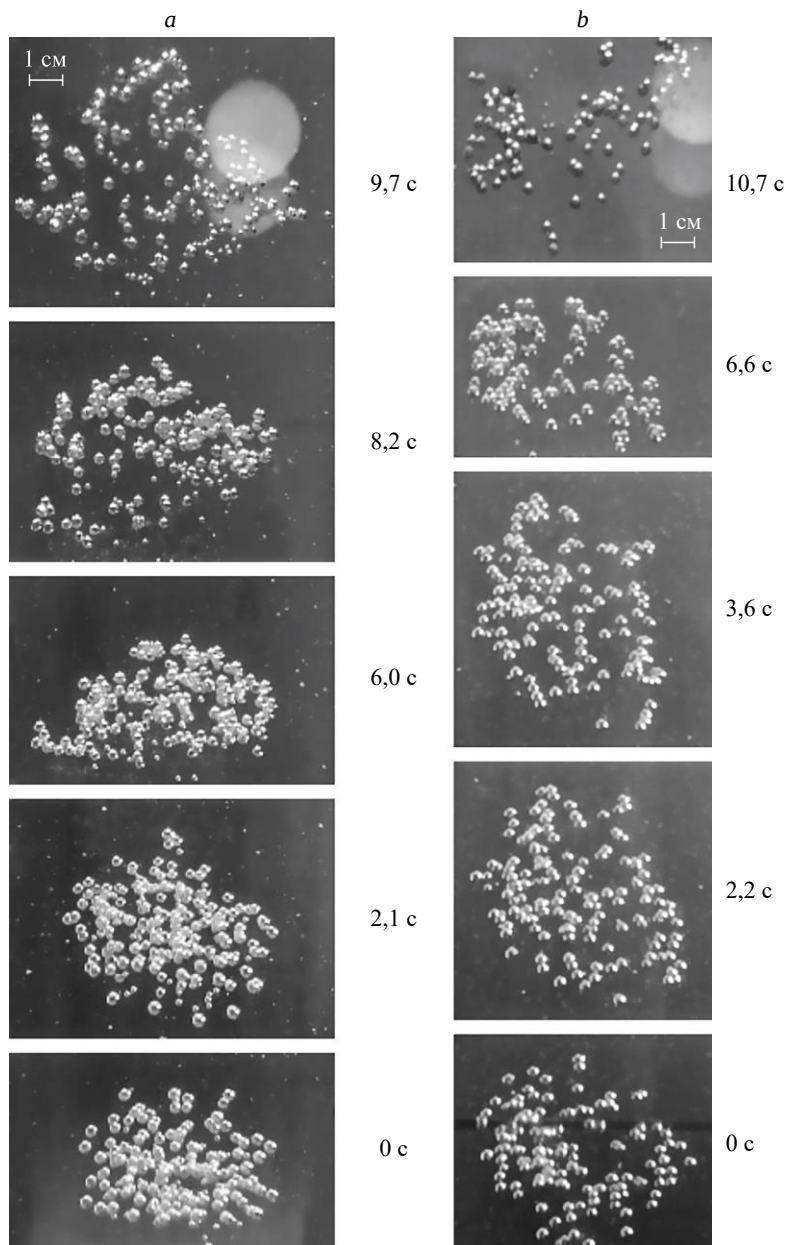


Рис. 8. Видеоряды процесса всплытия кластера монодисперсных пузырьков воздуха в глицерине (а) и в растворе глицерин-диламид (b).
 $d = 3,6 \text{ мм}, D = 7,2 \text{ см}, C_V = 0,018$.

метрами экспериментов: $d = 3,6 \text{ мм}, D = 7,2 \text{ см}, C_V = 0,018$.

Предельные значения объемной концентрации кластера пузырьков

Проанализировано влияние начальной объемной концентрации кластера пузырьков на характер его всплытия в зависимости от наличия поверхностно-активного вещества в жидкости в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 0,01 \div 1$. В отсутствие поверхностно-

активного вещества описанные стадии всплытия кластера монодисперсных газовых пузырьков характерны для кластеров с начальной объемной концентрацией пузырьков $C_V = 0,006 \div 0,02$. При значениях $C_V \geq 0,025$ наблюдается коагуляция пузырьков практически сразу после формирования кластера пузырьков.

При наличии поверхностно-активного вещества в жидкости нижняя граница начальной объемной концентрации пузырьков, при которой наблюдаются вышеописанные стадии, совпадает со случаем всплытия пузырьков в отсутствие поверхностно-активного вещества и составляет $C_V = 0,006$.

Бесконтактное всплытие монодисперсных газовых пузырьков характерно для кластеров с начальной объемной концентрацией пузырьков $C_V = 0,002 \div 0,005$. Указанный диапазон значений C_V не зависит от наличия поверхностно-активного вещества в жидкости.

Коэффициент сопротивления кластера пузырьков

Значение коэффициента сопротивления кластера монодисперсных газовых пузырьков определялось по измеренным в эксперименте значениям параметров с помощью уравнения движения одиночного пузырька в стационарном режиме (при $du/dt = 0$):

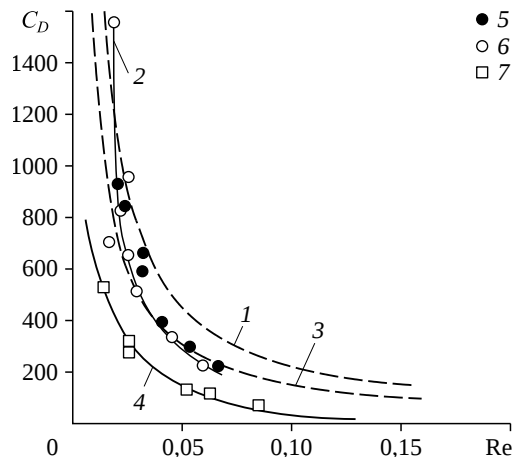
$$C_D = \frac{4}{3} \cdot \frac{gd(\rho_l - \rho)}{\rho_l u^2}. \quad (4)$$

При этом предполагалось, что скорость кластера и отдельного пузырька, входящего в кластер, совпадают.

Обработка и анализ экспериментальных данных показал, что величина коэффициента сопротивления кластера газовых пузырьков зависит от типа всплытия последних (бесконтактное или контактное). Экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления кластера монодисперсных пузырьков воздуха от числа Рейнольдса при бесконтактном всплытии приведены на рис. 9. Для сравнения полученных данных по коэффициенту сопротивления кластера пузырьков с динамикой осаждения одиночной твердой сферы приведена зависимость Стокса $C_D = 24/Re$ (кривая 1). Также на рис. 9 показана зависимость Адамара–Рыбчинского $C_D = 16/Re$ (кривая 3) для коэффициента сопротивления одиночного пузырька, всплывающего в отсутствие поверхностно-активного вещества. Из рис. 9 следует, что наличие поверхностно-активного вещества на границе раздела жидкость–газ приводит к увеличению коэффициента сопротивления кластера пузырьков. Из полученных экспериментальных данных можно сделать заключение о том, что тип поверхностно-

Рис. 9. Экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления кластера монодисперсных пузырьков воздуха от числа Рейнольдса при бесконтактном типе всплытия.

1 — зависимость Стокса ($C_D = 24/Re$),
2 — эмпирическая кривая для кластера пузырьков в растворе глицерин-лаурилсульфат натрия (5) и глицерин-диламид (6),
3 — зависимость Адамара–Рыбчинского ($C_D = 16/Re$), 4 — эмпирическая кривая для кластера пузырьков в глицерине (7).



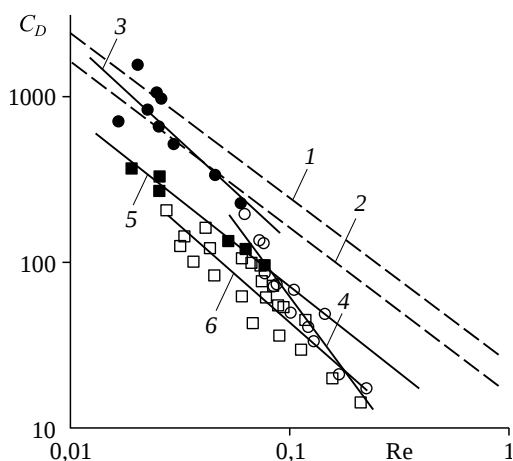


Рис. 10. Экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления кластера монодисперсных пузырьков воздуха от числа Рейнольдса.

- 1 — зависимость Стокса ($C_D = 24/Re$),
- 2 — зависимость Адамара–Рыбчинского ($C_D = 16/Re$),
- 3 — эмпирическая кривая для бесконтактного всплытия кластера пузырьков в растворе глицерин-диламид, 4 — эмпирическая кривая для контактного всплытия кластера пузырьков в растворе глицерин-диламид,
- 5 — эмпирическая кривая для бесконтактного всплытия кластера пузырьков в глицерине,
- 6 — эмпирическая кривая для контактного всплытия кластера пузырьков в глицерине.

активного вещества не влияет на коэффициент сопротивления группы монодисперсных газовых пузырьков, всплывающих в вязкой жидкости.

При контактном всплытии кластера монодисперсных пузырьков наблюдается уменьшение коэффициента сопротивления по сравнению со случаем бесконтактного всплытия.

На рис. 10 представлены зависимости $C_D(Re)$ для глицерина и раствора глицерин-диламид для контактного и бесконтактного видов всплытия пузырьков. Видно, что наклон эмпирических кривых 5 и 6, приведенных для глицерина, совпадает с наклоном кривых 1 и 2, соответствующих зависимости Стокса и Адамара–Рыбчинского. Отличие наклона эмпирических кривых 3 и 4 на рис. 10, полученных для раствора глицерин-диламид, связано с зависимостью времени достижения равновесного поверхностного натяжения на свежесформированной свободной поверхности раствора поверхностно-активного вещества от размера пузырьков, поскольку в экспериментах значение числа Рейнольдса варьировалось путем изменения размера пузырьков. Угол наклона кривых 3 и 4 на рассматриваемом рисунке указывает на то, что для пузырьков меньшего размера (при маленьких числах Рейнольдса) быстрее достигалось равновесное поверхностное натяжение в процессе всплытия и наблюдалось наибольшее увеличение коэффициента сопротивления, чем для пузырьков большего размера (при больших числах Рейнольдса).

Дополнительные экспериментальные исследования показали, что природа газовой фазы не влияет на динамику всплытия пузырькового кластера. В качестве примера на рис. 11 приведена зависимость $C_D(Re)$, полученная для случая всплытия кластера воздушных и гелиевых пузырьков в глицерине. При введении поверхностно-активного вещества в жидкость наблюдается качественное и количественное совпадение результатов по динамике всплытия кластеров пузырьков гелия и пузырьков воздуха.

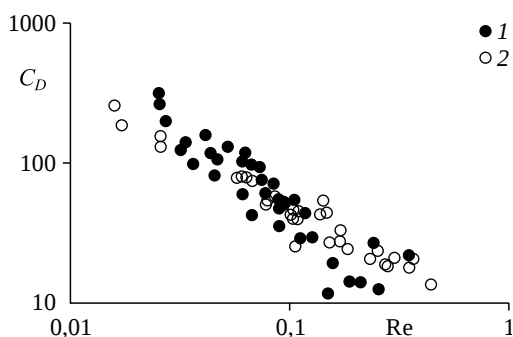


Рис. 11. Зависимость коэффициента сопротивления кластера монодисперсных пузырьков воздуха (1) и гелия (2), всплывающих в глицерине, от числа Рейнольдса.

Заключение

По результатам экспериментального исследования процесса всплытия монодисперсного кластера пузырьков в вязкой жидкости в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества в жидкости можно сделать следующие выводы.

1. Получены новые экспериментальные данные по закономерностям всплытия компактного монодисперсного кластера пузырьков в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества в области чисел Рейнольдса $Re = 0,01 \div 1$ при варьировании начальной объемной концентрации пузырьков в диапазоне $C_V = 0,001 \div 0,04$.

2. Определено, что процесс контактного всплытия кластера пузырьков можно разделить на три стадии: стадия движения сферы, стадия формирования и движения сфероида и стадия распада сфероида.

3. Показано, что коэффициент сопротивления компактного кластера пузырьков возрастает при введении поверхностно-активного вещества в жидкость. При этом величина коэффициента сопротивления кластера пузырьков зависит от характера всплытия: при бесконтактном всплытии кластера пузырьков коэффициент сопротивления больше, чем при контактном всплытии пузырьков.

4. Экспериментально установлено, что природа поверхностно-активного вещества не влияет на динамику (качественную картину всплытия, коэффициент сопротивления) всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости.

5. Экспериментально определено, что природа газовой фазы не влияет на динамику всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости.

6. Для условий проведенных экспериментов ($Re = 0,01 \div 1$) получена оценка значения граничной начальной объемной концентрации кластера пузырьков $C_V \geq 0,006$, разделяющего бесконтактное и контактное всплытие пузырьков. Установленное значение C_V не зависит от наличия поверхностно-активного вещества в жидкости.

7. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для уточнения существующих физико-математических моделей всплытия пузырьков при наличии и в отсутствие поверхностно-активного вещества в жидкости.

Обозначения

C — концентрация поверхностно-активного вещества в жидкости, г/л,

C_V — объемная концентрация пузырьков в кластере,

C_D — коэффициент сопротивления,

d — диаметр одиночного пузырька, входящего в кластер, м,

D — эквивалентный сферический диаметр кластера пузырьков, м,

g — ускорение свободного падения, м/с²,

s — расстояние, пройденное кластером пузырьков, м,

t — время, с,

T — температура, К,

u — скорость всплытия, м/с,

μ_1 — коэффициент динамической вязкости жидкости, кг/(м·с),

ρ — плотность газа, кг/м³,

ρ_l — плотность жидкости, кг/м³,

σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе газ – жидкость, Н/м,

Re — число Рейнольдса.

Список литературы

1. Дрожжин А.П., Коробейников С.М., Тесленко В.С. Иницирование пробоя в жидкости с помощью кавитационных пузырьков // Научн. Вестн. НГТУ. 2003. № 2. С. 1–11.
2. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: ГИФМЛ, 1959. 700 с.
3. Sebba F. Foams and biliquid foams-aphrons. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1987. 236 p.
4. Бобровиц Г.И. Экспериментальные исследования критических тепловых потоков при кипении бинарных смесей // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1964.

5. **Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.** Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. М., Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, научно-изд. центр «Регулярная и хаотическая динамика». 2011. 780 с.
6. **Frommhold P.E., Mettin R., Holsteys F., Lippert A.** Surface cleaning by soft acoustic cavitation bubbles // On-line Proceedings of Intern. Conf. «German Annual Conference on Acoustics» DAGA. 2012. P. 455–456.
7. **Michaud V.** A review of non-saturated resin flow in liquid composite moulding processes // Transport Porous Media. 2016. Vol. 115, No. 3. P. 581–601.
8. **Матвиенко О.В., Базаев В.П., Агафонцева М.В.** Исследование динамики пузырька в закрученном потоке нелинейно-вязкой жидкости // Вестн. ТГАСУ. 2012. № 4. С. 144–156.
9. **Кнорре Д.Г., Крылова Л.Ф., Музыкантов В.С.** Физическая химия. М.: Высш. шк., 1990. 416 с.
10. **Langmuir I.** The constitution and fundamental properties of solids and liquids. II. Liquids // J. of the American Chemical Society. 1917. Vol. 39, No. 9. P. 1848–1906.
11. **Пат. 2670228 РФ, МПК⁵¹ B01F 3/04, СРК⁵² B01f 3/04.** Устройство для создания компактного кластера монодисперсных пузырьков / Архипов В.А., Басалаев С.А., Усанина А.С., Перфильева К.Г., Поленчук С.Н., Романдин В.И.; патентообладатель НИТГУ. № 2017142492; заявл. 05.12.2017; опубл. 19.10.2018, Бюл. № 29.
12. **Pallas N.R., Pethica B.A.** The surface tension of water // Colloids and Surfaces. 1983. No. 6. P. 221–227.
13. **Архипов В.А., Усанина А.С.** Гравитационное осаждение высококонцентрированной системы твердых сферических частиц // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 5. С. 739–750.

*Статья поступила в редакцию 10 апреля 2023 г.,
после доработки — 4 мая 2023 г.,
принята к публикации 16 июня 2023 г.*