



ISSN: 2658–5782

Номер 3

2025

# МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

[mfs.uimech.org](https://mfs.uimech.org)





## Экспериментальное исследование влияния поверхностно-активного вещества на динамику бидисперсного пузырькового кластера

В.А. Архипов, С.А. Басалаев, К.В. Костюшин, А.С. Усанина✉

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

E-mail: [usaninaanna@mail.ru](mailto:usaninaanna@mail.ru)

Представлены результаты экспериментального исследования процесса всплытия кластера, состоящего из пузырьков двух разных размеров, в неограниченном стенками объеме жидкости при наличии и в отсутствие поверхностно-активного вещества в жидкой среде в диапазонах чисел Рейнольдса  $Re = 200 \div 600$  и  $Re = 0.1 \div 50$ . Проанализировано влияние концентрации поверхностно-активного вещества и параметров кластера (начальной концентрации, соотношения количества и диаметров пузырьков в кластере) на качественную картину всплытия и скорость бидисперсного пузырькового кластера. Экспериментально установлено условие существования кластера бидисперсных пузырьков.

**Ключевые слова:** бидисперсный пузырьковый кластер, поверхностно-активное вещество (ПАВ), качественная картина всплытия, скорость кластера, экспериментальное исследование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-79-10028,  
<https://rscf.ru/project/22-79-10028>

## Experimental study of the surfactant effect on the dynamics of bidispersed bubble cluster

V.A. Arkhipov, S.A. Basalaev, K.V. Kostyushin, A.S. Usanina✉

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: [usaninaanna@mail.ru](mailto:usaninaanna@mail.ru)

The article presents the results of an experimental study of the process of ascent of a cluster consisting of bubbles of two different sizes in a volume of liquid unlimited by walls in the presence and absence of surfactant in a liquid medium in the ranges of Reynolds numbers  $Re = 200 \div 600$  and  $Re = 0.1 \div 50$ . The effect of the concentration of the surfactant and the cluster parameters (initial concentration, ratio of the number and diameters of bubbles in the cluster) on the qualitative picture of ascent and the velocity of the bidispersed bubble cluster is analyzed. The condition for the existence of the cluster of bidispersed bubbles is experimentally established.

**Keywords:** bidispersed bubble cluster, surfactant, qualitative picture of ascent, cluster velocity, experimental study

### 1. Введение

Динамика пузырьковых течений является одним из актуальных вопросов в области исследований двухфазных потоков. Закономерности пузырьковых течений играют важную роль в ряде технологических процессов, охватывающих различные отрасли промышленности, такие как нефтегазовая, пищевая, химическая, косметическая и др. Одним из ключевых факторов, влияющих на динамику пузырькового двухфазного потока, является сила поверхностного натяжения на границе между газом и жидкостью. Для изменения свойств граничной поверхности в жидкие дисперсионные среды в различных

технологических процессах добавляют поверхностно-активное вещество (ПАВ). В частности, применение ПАВ способствует более эффективному извлечению углеводородов из нефтяных пластов, улучшает смешивание реагентов, ускоряет реакции и стабилизирует эмульсии в химических технологиях.

Физическое и математическое моделирование процессов, связанных с закономерностями движения деформируемых частиц дисперсной фазы (капель, пузырьков) при наличии ПАВ во внешней дисперсионной среде, проводилось преимущественно для случая движения одиночной частицы [1–10]. Известно, что введение

ПАВ в жидкость приводит к увеличению коэффициента сопротивления пузырька, в частности, при числе Рейнольдса  $Re < 1$  в уравнении движения одиночного пузырька под действием силы Архимеда выражение для коэффициента сопротивления, полученное из решения Адамара–Рыбчинского, в присутствии ПАВ на поверхности раздела фаз газ–жидкость сменяется выражением Стокса для коэффициента сопротивления твердой сферы. При всплытии пузырька в жидкости, содержащей ПАВ, в кормовой части пузырька содержание ПАВ будет больше, чем в лобовой части, поскольку в процессе всплытия реализуется скольжение жидкости по поверхности пузырька, приводящее к накоплению молекул ПАВ в его тыловой части [11]. В результате этого вдоль поверхности пузырька появляются дополнительные тангенциальные силы  $F$ , стремящиеся уравновесить поверхностную плотность ПАВ путем торможения циркуляционной зоны (рис. 1).

Задача о закономерностях движения совокупности пузырьков, в том числе с учетом наличия ПАВ на граничной поверхности, рассматривалась, по большей части, для пристенного пузырькового течения [12–22], для которого существенное влияние оказывают процессы взаимодействия со стенками канала. Исследования закономерностей движения совокупности пузырьков в неограниченном объеме внешней жидкой среды проведены в единичных работах [23–25].

Наибольший прогресс достигнут в математическом моделировании процессов динамического взаимодействия деформируемых частиц дисперсной фазы. Анализ известных публикаций показывает, что для повышения достоверности результатов численных расчетов характеристик двухфазных потоков с деформируемыми частицами необходима база экспериментальных данных по динамике дисперсных частиц в присутствии и в отсутствие ПАВ на граничной поверхности.

В отдельную группу можно выделить исследования, посвященные закономерностям движения полидисперсных систем [26–28]. Влияние полидисперсности пузырькового потока и доли газовой фазы на коэффициент сопротивления группы пузырьков, стесненно всплывающих в воде при заданных давлениях, исследовано в работе [26]. Авторы использовали в качестве ПАВ этанол. Показано, что на коэффициент сопротивления отдельных пузырьков влияет полидисперсная природа пузырькового течения.

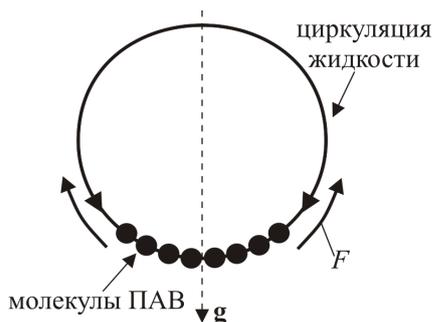


Рис. 1. Схема распределения ПАВ при всплытии пузырька

Влияние давления на коэффициент сопротивления отдельных пузырьков в полидисперсном пузырьковом потоке, движущемся в стесненных условиях в присутствии ПАВ, исследовалось в работе [27]. Размер пузырьков варьировался от 0.4 до 6 мм. Исследование проведено при значениях давления 0.14, 0.46, 2.4 МПа. В качестве газовой фазы использовался азот. Обнаружено, что коэффициенты сопротивления отдельных пузырьков уменьшаются по мере увеличения давления при постоянном содержании газовой фазы. При росте давления распределение пузырьков по размерам смещалось в сторону меньших размеров. Авторы [27] полагают, что пузырьки меньшего размера вызывают незначительные возмущения жидкости, что приводит к уменьшению сопротивления. В диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = 46 \div 2089$  и Бонда  $Bo = 0.02 \div 4.54$  авторами предложено эмпирическое выражение для коэффициента сопротивления, учитывающее давление во внешней среде.

Особое внимание уделяется бидисперсным пузырьковым кластерам [29–31], которые представляют собой системы, состоящие из пузырьков двух размеров. Для бидисперсных систем представляется возможным проанализировать экспериментальные данные по влиянию отдельных «элементарных» процессов на динамику множества частиц в двухфазном потоке, что является затруднительным для полидисперсных систем.

Авторы работы [29] подчеркивают необходимость учета содержания пузырьков разных размеров при прогнозировании гидродинамики бидисперсных систем. В работе путем численного моделирования показано, что бидисперсность может приводить к снижению коэффициента сопротивления группы пузырьков по сравнению с монодисперсным аналогом. Изменение сопротивления напрямую коррелирует с соотношением размеров крупных  $d_2$  и мелких  $d_1$  пузырьков ( $d_2/d_1$ ). Авторы объясняют обнаруженный эффект изменением структуры потока жидкости внутри группы пузырьков. Мелкие пузырьки имеют тенденцию скапливаться в следах за крупными пузырьками, что приводит к снижению общего гидродинамического сопротивления всей системы.

Снижение коэффициента сопротивления группы бидисперсных пузырьков по сравнению с монодисперсными пузырьками также отмечено в работе [30, 31]. Показано, что в бидисперсных системах средняя скорость всплытия пузырьков больше, чем в монодисперсной системе при одинаковой концентрации пузырьков. Изменение сопротивления зависит от параметров пузырьковой системы.

Целью настоящей работы является экспериментальное выявление закономерностей процесса нестесненного всплытия кластера бидисперсных пузырьков воздуха в присутствии и в отсутствие ПАВ в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = 0.1 \div 50$  и  $Re = 200 \div 600$ . Под нестесненным движением понимается движение частиц в неограниченной стенками среде. В работе использовалась оригинальная методика получения бидисперсного кластера пузырьков.

## 2. Описание экспериментальной установки и методики исследования

Исследование динамики бидисперсных пузырьковых кластеров проводилось на экспериментальной установке, основным элементом которой является заполненная жидкостью стеклянная кювета (300 × 300 × 900 мм) с плоскопараллельными стенками толщиной 15 мм. Формирование кластера обеспечивалось специализированным генератором пузырьков, а его эволюция фиксировалась с помощью системы высокоскоростной видеосъемки. Управление режимами работы установки осуществлялось автоматизированным модулем.

Выбор указанного размера кюветы обусловлен выполнением условия отсутствия влияния стенок на динамику пузырькового кластера и основан на результатах расчетов, проведенных авторами работ [32, 33].

Бидисперсный пузырьковый кластер с начальной формой, близкой к сферической, формировался с использованием устройства [34], размещенного в нижней части экспериментальной кюветы (рис. 2). Коллектор, соединенный с источником сжатого газа, оснащен перфорированной верхней крышкой с матрицей вертикальных трубок одинакового диаметра и высоты, расположенных на расстоянии 11 мм друг от друга. Для получения пузырьков двух фракций на трубки устанавливались сменные иглы двух калиброванных размеров. Управление режимом генерации для каждой трубки осуществлялось независимо через отдельный миниатюрный электропневмоклапан (ЭПК), подключенный к запрограммированному устройству управления. Данная схема обеспечила возможность вариации числа пузырьков в кластере, их пространственной координации и конфигурации.

Устройство управления ЭПК представляет собой систему взаимосвязанных блоков. В его состав входят: контроллер ESP-8266, адресные модули WS2812, релейные модули, коммутационные печатные платы для сопряжения релейных модулей с клапанами, 40-контактные шлейфы и блоки питания. Контроллер ESP-8266 выполняет функцию центрального узла по обработке управляющих сигналов и реализует беспроводной интерфейс управления установкой посредством соединения Wi-Fi, обеспечивая двустороннюю связь между пользователем и системой. Адресные модули WS2812 функционируют как преобразователи цифрового сигнала, получаемого от контроллера, в управляющие импульсы для релейных модулей, тем самым регулируя последовательность активации ЭПК. Для обеспечения надежной коммутации релейных модулей с ЭПК используются специализированные печатные платы, оснащенные 40-контактным ATA IDE разъемом и схемой подавления обратной электродвижущей силы. Соединение коммутационных плат с исполнительными механизмами ЭПК выполнено при помощи 40-контактных шлейфов, которые подключаются к ответной части ATA IDE разъема, расположенного на крышке коллектора для генерации кластера пузырьков. Электропитание устройства организовано от двух неза-

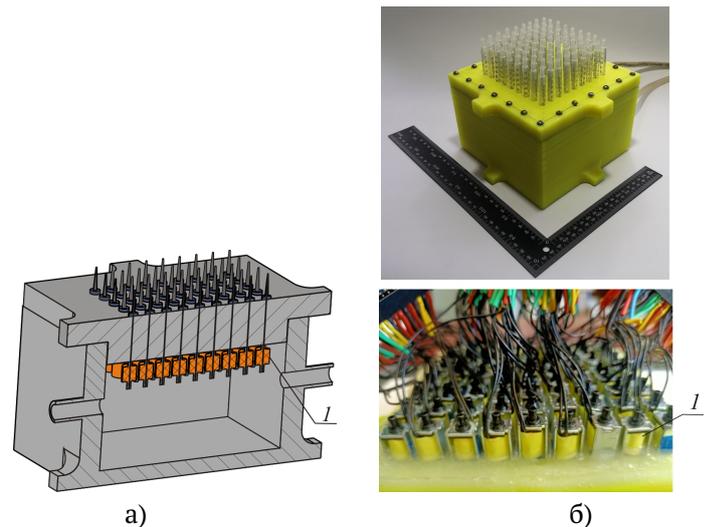


Рис. 2. Схема (а) и фотография (б) устройства для получения пузырькового кластера: 1 — электропневмоклапан

висимых источников постоянного тока напряжением 5 В. Первый источник обеспечивает питание контроллера ESP-8266, массива модулей WS2812 и релейных модулей, второй источник предназначен исключительно для питания ЭПК.

Для управления установкой генерации пузырькового кластера заданной конфигурации разработана программа для ЭВМ [35]. Программа формирования управляющих команд предназначена для создания файлов с управляющими командами по заданной трехмерной модели пузырькового кластера. Входные данные включают трехмерную модель кластера в формате stl и число слоев разбиения трехмерной модели. В программе реализована возможность перемещения, поворота и масштабирования исходных трехмерных моделей. Программа разработана с использованием технологий React, JSX, Next, tailwind css, Javascript и языков программирования C++, Python, HTML и JavaScript. Управление осуществляется через веб-интерфейс. Реализованы сервисные функции: диагностика и продувка ЭПК в ручном и полупри автоматическом режимах.

Система визуализации процесса всплытия включает два регулируемых светодиода GR1FLV460 со световым потоком 4000 лм и две скоростные камеры машинного зрения MER2-502-79U3C. Источники света расположены с противоположных сторон кюветы: один находится спереди (со стороны видеокамеры), а второй — сзади (напротив видеокамеры). Первая камера отслеживает общую траекторию и скорость всплытия бидисперсного кластера, вторая — фиксирует форму и размер отдельных пузырьков в составе кластера.

В основе методики эксперимента лежит визуальное наблюдение за качественной картиной всплытия бидисперсного кластера пузырьков в зависимости от определяющих параметров с последующим измерением скорости всплытия: сначала бидисперсного кластера, а затем и образующихся при его расслоении монодисперсных кластеров.

Таблица 1. Физические характеристики используемых жидкостей

Жидкость	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент динамической вязкости $\mu$ , Па·с
Дистиллированная вода	1000	$1.01 \cdot 10^{-3}$
Глицерин	1263	1.00

Таблица 2. Используемые поверхностно-активные вещества

Обозначение	Наименование ПАВ	Молярная масса ПАВ, г/моль	Тип ПАВ
ПАВ-1	Лаурилсульфат натрия	288.4	анионный
ПАВ-2	Диламид	287	неионогенный

Исследования проведены на системах «пузырьки воздуха–дистиллированная вода» и «пузырьки воздуха–глицерин» при температуре 20 °С. В настоящей работе при проведении экспериментов поддерживалась постоянная температура окружающей среды (воздуха). С учетом значительной температурной зависимости физических характеристик жидкости при проведении экспериментов осуществлялись измерения физических характеристик непосредственно до и после проведения каждого эксперимента. Характеристики жидкостей представлены в табл. 1.

Для получения сведений о влиянии ПАВ на закономерности всплытия пузырьков в дистиллированную воду вводился лаурилсульфат натрия, а в глицерин — диламид (табл. 2). Выбор лаурилсульфат натрия для воды обусловлен тем, что для анионного ПАВ скорость изменения коэффициента поверхностного натяжения в процессе всплытия пузырька больше чем для другого типа ПАВ [36]. Экспериментально выявлено, что тип ПАВ в глицерине не влияет на динамику пузырьков, поэтому главным требованием при выборе ПАВ являлось его хорошая растворимость в жидкости.

Плотность исследуемых жидкостей (чистых и их растворов с ПАВ) измерялась с помощью ареометра. Относительная погрешность измерений плотности составляла 0.1 %. Коэффициент динамической вязкости определялся на вискозиметре Гепплера. В данном случае относительная погрешность не превышала 2 %. В ходе эксперимента было выявлено, что присутствие ПАВ не оказывает влияния на величину динамической вязкости.

Скорость всплытия кластера пузырьков определялась времяпролетным методом (с относительной погрешностью 2 %) как скорость движения центра эквивалентной сферы, аппроксимирующей кластер. Положение центра сферы определялось на основе окружности минимального диаметра  $D$ , описывающей все пузырьки кластера.

Начальный диаметр кластера пузырьков  $D$  определялся как среднеарифметическое значений диаметров миделева сечения кластера в горизонтальном и вертикальном направлениях. Погрешность в нахождении диаметра кластера связана с разрешающей способностью видеокамеры и качеством видеосъемки и составляет 1.5 %.

Диаметр пузырьков  $d$ , образующих кластер, был измерен с погрешностью  $\leq 2\%$  с использованием методов компьютерной обработки видеоданных о движении пузырьков.

Начальная объемная концентрация пузырькового кластера определялась в зоне, расположенной на расстоянии 5 см от концов игл коллектора, по формуле

$$C_V = \frac{\sum_{i=1}^2 N_i d_i^3}{D^3},$$

где  $N_1$  — количество мелких пузырьков, содержащихся в кластере;  $N_2$  — количество крупных пузырьков, содержащихся в кластере.

Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  используемых жидкостей и их растворов с ПАВ определялся в соответствии с ГОСТ на сталагмометре СТ2, принцип работы которого основывается на методе определения объема капель, выдавливаемых на границе жидкость–газ. Значения коэффициента поверхностного натяжения жидкостей на границе с воздухом при концентрациях ПАВ, для которых проведены эксперименты, представлены в табл. 3.

В экспериментах с дистиллированной водой скорость кластера бидисперсных пузырьков определялась до начала формирования двух монодисперсных кластеров и ее величина составляла  $u = (16.3 \div 34.2)$  см/с; относительная погрешность определения скорости —

Таблица 3. Значения  $\sigma$  для растворов исследуемых жидкостей и их растворов с ПАВ

С, г/л	$\sigma$ , мН/м
Дистиллированная вода–ПАВ-1	
0	72.5
0.0011	70.0
0.0032	69.0
0.095	67.3
0.55	57.0
1.91	35.2
Глицерин–ПАВ-2	
0	64.9
0.0287	56.4
0.287	44.3
2.87	36.2

Таблица 4. Диаметры пузырьков в бидисперсном кластере

Дистиллированная вода и растворы воды с ПАВ-1										
$d_1$ , мм	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.65
$d_2$ , мм	2.1	2.3	1.6	1.8	2.1	2.1	2.3	2.4	2.0	2.1
$d_2/d_1$	1.61	1.77	1.23	1.28	1.5	1.4	1.53	1.6	1.25	1.27
Глицерин и растворы глицерина с ПАВ-2										
$d_1$ , мм	1.5	1.5	1.7	2.4	2.4	2.7	2.8	3.1	3.6	3.7
$d_2$ , мм	2.4	3.3	3.6	4.3	5.5	4.8	5.9	4.3	5.5	4.9
$d_2/d_1$	1.6	2.2	2.12	1.79	2.29	1.78	2.1	1.39	1.53	1.32

$\delta u = 2\%$ ; начальная объемная концентрация пузырьков в бидисперсном кластере —  $C_V = 0.0009 \div 0.04$ ; диаметр начального сферического бидисперсного кластера варьировался в диапазоне  $D = (5.8 \div 7.3)$  см.

Величина средней скорости всплытия кластера бидисперсных пузырьков в экспериментах с глицерином измерялась только для пузырьков, соизмеримых по размеру, до момента распада кластера и изменялась в диапазоне  $u = (5.1 \div 6.0)$  см/с. В экспериментах с глицерином начальный диаметр бидисперсного кластера варьировался в диапазоне  $D = (5.0 \div 6.2)$  см, начальная объемная концентрация пузырьков в бидисперсном кластере составляла  $C_V = 0.003 \div 0.02$ .

Общее количество пузырьков в бидисперсном кластере для всех проведенных экспериментов составляло  $(N_1 + N_2) = 80 \div 130$ .

Диаметры  $d_1$  и  $d_2$  пузырьков ( $d_1 < d_2$ ) в каждой из двух фракций бидисперсного кластера, для которых выполнялись эксперименты, приведены в табл. 4. В экспериментах также варьировалось соотношение количества мелких  $N_1$  и крупных  $N_2$  пузырьков в кластере.

В экспериментах число Рейнольдса рассчитывалось по среднеарифметическому значению диаметров пузырьков, входящих в бидисперсный кластер, и варьировалось в диапазонах  $Re = \rho u(d_1 + d_2)/2\mu = 200 \div 600$  (дистиллированная вода) и  $Re = 0.1 \div 50$  (глицерин).

### 3. Результаты экспериментального исследования и их анализ

#### 3.1. Влияние ПАВ на качественную картину всплытия бидисперсного кластера

Качественная картина всплытия бидисперсного пузырькового кластера проанализирована для двух диапазонов чисел Рейнольдса:  $Re = 200 \div 600$  (дистиллированная вода) и  $Re = 0.1 \div 50$  (глицерин). В экспериментах реализованы контактный (наличие столкновений пузырьков друг с другом) и бесконтактный (отсутствие столкновений пузырьков друг с другом) типы всплытия в зависимости от исходной концентрации пузырьков в кластере.

Экспериментально выявлено, что в процессе всплытия в дистиллированной воде сферический бидисперсный кластер пузырьков воздуха расслаивается из-за разницы в скорости всплытия фракций. Данный процесс приводит к разделению исходно сферического кластера

на два монодисперсных кластера на некотором расстоянии  $h = h_*$  от места формирования бидисперсного кластера (рис. 3). В экспериментах величина этого расстояния изменялась в диапазоне  $h_* = 42 \div 48$  см. Далее скорость каждого из этих кластеров различна. Монодисперсный кластер, образованный из мелких пузырьков диаметром  $d_1$ , всплывает быстрее, чем монодисперсный кластер, состоящий из крупных пузырьков диаметром  $d_2$ :  $u_1 > u_2$ . Для проведенных экспериментов по всплытию бидисперсного пузырькового кластера в дистиллированной воде в отсутствие ПАВ разница скоростей двух образованных монодисперсных кластеров изменялась в диапазоне  $|u_1 - u_2| = 3 \div 6$  см/с. Наблюдаемую картину всплытия кластера пузырьков можно объяснить по аналогии с динамикой одиночного пузырька. При числах Рейнольдса  $Re > 400$  ( $d > 1.4$  мм) скорость одиночного пузырька воздуха в дистиллированной воде уменьшается по мере роста его диаметра за счет увеличения степени деформации пузырька, связанной с изменением его формы (увеличением диаметра миделева сечения) и с увеличением интенсивности циркуляционной зоны, которая формируется за пузырьком [37].

В присутствии ПАВ в дистиллированной воде бидисперсный кластер также расслаивается при  $h_* = 12 \div 27$  см на два отдельных монодисперсных кластера (рис. 4). При этом в отличие от всплытия кластера в отсутствие ПАВ монодисперсный кластер мелких пузырьков всплывает с меньшей скоростью, чем монодисперсный кластер крупных пузырьков:  $u_1 < u_2$ . Этот эффект можно объяснить тем, что при всплытии кластера пузырьков в присутствии ПАВ возникает касательное напряжение Марангони, приводящее к изменению формы пузырьков (приближение к сферической) и поля скоростей вблизи них; в результате этого пузырьки движутся как твердые сферы [37, 38]. Для проведенных экспериментов по всплытию бидисперсного пузырькового кластера в дистиллированной воде в присутствии ПАВ разница скоростей двух образованных монодисперсных кластеров изменялась в диапазоне  $|u_1 - u_2| = 2 \div 3.6$  см/с.

Расстояние  $h_*$ , на котором наблюдается расслоение бидисперсного кластера на два монодисперсных, детерминируется концентрацией ПАВ в жидкой фазе и безразмерным параметром — соотношением диаметров крупных и мелких пузырьков  $d_2/d_1$  (где  $d_1 < d_2$ ). В качестве

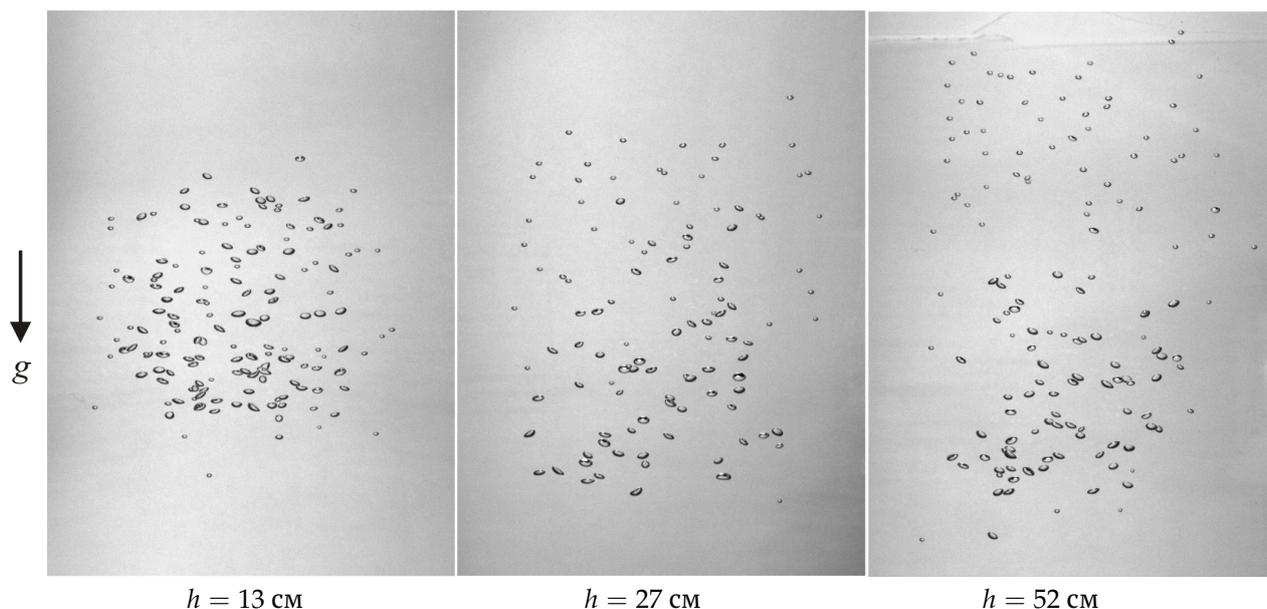


Рис. 3. Фотографии кластера бидисперсных пузырьков воздуха, всплывающих в дистиллированной воде ( $d_1 = 1.3$  мм,  $d_2 = 2.3$  мм,  $D \approx 7$  см)

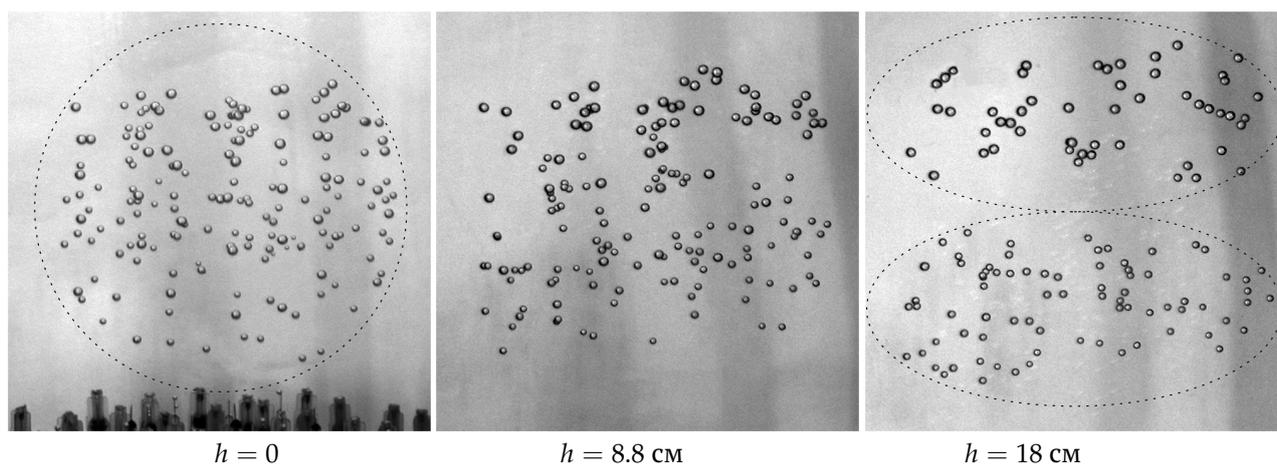


Рис. 4. Фотографии кластера бидисперсных пузырьков воздуха, всплывающих в растворе дистиллированная вода–ПАВ-1 ( $d_1 = 1.5$  мм,  $d_2 = 2.3$  мм,  $D \approx 6$  см,  $C = 0.095$  г/л)

примера значения  $h_*$  для бидисперсного пузырькового кластера диаметром  $D = 6$  см, всплывающего в растворе дистиллированная вода–ПАВ-1, приведены на рис. 5. По мере увеличения концентрации ПАВ в воде расстояние  $h_*$ , на котором формируются два монодисперсных кластера, уменьшается. Однако, при концентрации ПАВ в воде  $C \geq 0.55$  г/л величина  $h_*$  возрастает. Это связано с изменением градиента концентрации ПАВ на границе раздела фаз и формы пузырьков.

По мере увеличения разницы в значениях диаметров пузырьков, входящих в бидисперсный кластер (увеличения соотношения  $d_2/d_1$ ), расстояние  $h_*$  уменьшается. На рис. 6 приведены экспериментальные данные, осредненные по 5 ÷ 10 дублирующим опытам, для расстояния  $h_*$  в зависимости от соотношения  $d_2/d_1$  диаметров пузырьков воздуха в бидисперсном кластере, всплывающем в дистиллированной воде при разной концен-

трации ПАВ. Из рис. 6 следует, что по мере увеличения соотношения диаметров  $d_2/d_1$  в кластере расстояние  $h_*$  уменьшается.

Ключевым фактором, определяющим характер всплытия бидисперсного кластера в глицерине при варьировании концентрации ПАВ, является тип взаимодействия между пузырьками (контактный или бесконтактный).

При бесконтактном всплытии после отделения от капилляров пузырьки диаметром  $d_1$  и  $d_2$  формируют два пространственно разделенных монодисперсных кластера. Данные кластеры демонстрируют независимую динамику всплытия, что свидетельствует об отсутствии существенного гидродинамического взаимодействия между ними [39]. Таким образом, при бесконтактном всплытии пузырьков бидисперсный кластер не формируется.

При контактном всплытии бидисперсного пузырькового кластера в глицерине в присутствии и в отсутствие ПАВ в зависимости от соотношения диаметров и количества пузырьков в кластере экспериментально выявлены следующие сценарии всплытия (достоверность результатов обеспечена проведением не менее 15 повторных опытов для каждой серии экспериментов):

- «Циркуляция крупных пузырьков с уносом мелких пузырьков» — этот сценарий реализуется при соотношении диаметров пузырьков в кластере  $d_2/d_1 > 1.56$  и  $N_1/N_2 \leq 0.4$  (количество крупных пузырьков составляет более 70 % от общего количества пузырьков в бидисперсном кластере). При этом после подачи воздуха формируется бидисперсный кластер, в котором происходит циркуляция периферийных пузырьков по аналогии с динамикой всплытия монодисперсного кластера [40]. В процессе циркуляции мелкие пузырьки постепенно отстают от бидисперсного кластера. Стоит отметить, что наличие циркуляционного движения периферийных пузырьков свидетельствует об отсутствии влияния стенок на динамику пузырькового кластера [32].
- «Циркуляция мелких пузырьков с уносом крупных пузырьков» — данный режим реализуется при  $d_2/d_1 < 1.82$  и  $N_1/N_2 \geq 15.7$  (количество крупных пузырьков составляет не более 6 % от общего количества пузырьков в бидисперсном кластере). Процесс всплытия бидисперсного кластера аналогичен характеру всплытия монодисперсного кластера, заключающегося в циркуляции периферийных пузырьков в направлении, противоположном движению пузырьков [40].
- «Отсутствие кластера» — режим реализуется при  $d_2/d_1 > 2.13$  и  $N_1/N_2 \geq 15.7$ . После отрыва пузырьков от капилляров не наблюдается формирование бидисперсного кластера и по аналогии с бесконтактным всплытием реализуется всплытие двух отдельных монодисперсных кластеров.

### 3.2. Влияние ПАВ на скорость всплытия бидисперсного кластера

Как следует из вышеизложенного, после отрыва от капилляров бидисперсный кластер пузырьков в глицерине ( $Re = 0.1 \div 50$ ) может либо разделиться на два монодисперсных кластера, либо продолжить всплытие как единое целое со скоростью преобладающей фракции. В связи с этим основной объем экспериментов был выполнен для случая всплытия кластеров в дистиллированной воде и ее растворов с ПАВ-1.

Экспериментально выявлено, что скорость бидисперсного кластера зависит от соотношения количества пузырьков  $N_1/N_2$  в кластере (рис. 7). Скорость кластера определяется фракцией с наибольшим количеством пузырьков, при этом она падает по мере увеличения количества крупных пузырьков (диаметром  $d_2 > 1.4$  мм),

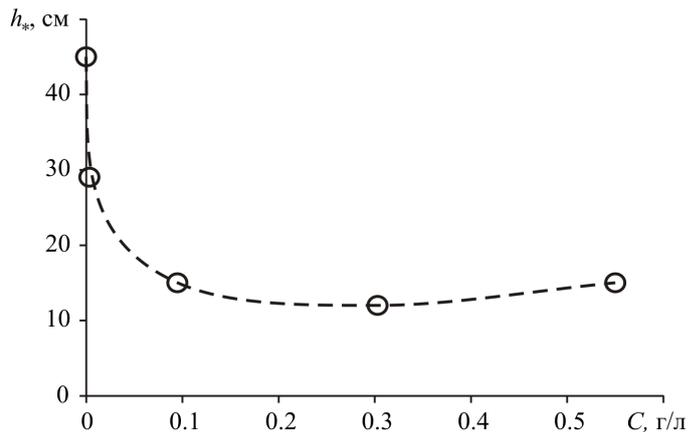


Рис. 5. Осредненные экспериментальные данные по зависимости  $h_*(C)$  для бидисперсного пузырькового кластера ( $d_1 = 1.5$  мм,  $d_2 = 2.1$  мм)

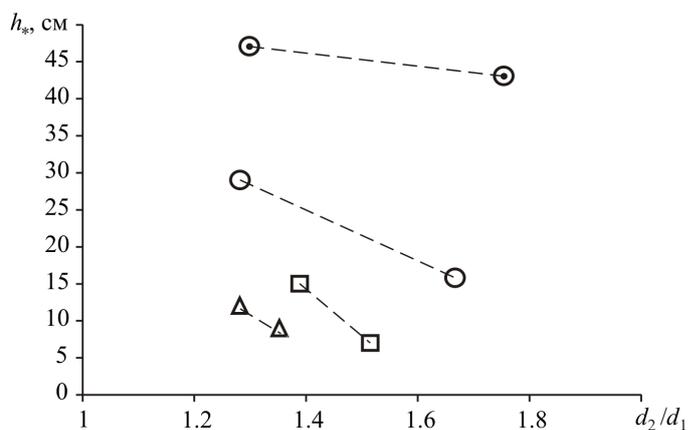


Рис. 6. Экспериментальные данные по зависимости  $h_*$  от  $d_2/d_1$ :  $\odot$  —  $C = 0$ ;  $\circ$  —  $C = 0.0032$  г/л;  $\square$  —  $C = 0.095$  г/л;  $\triangle$  —  $C = 0.3$  г/л ( $C_V = 0.002 \div 0.004$ )

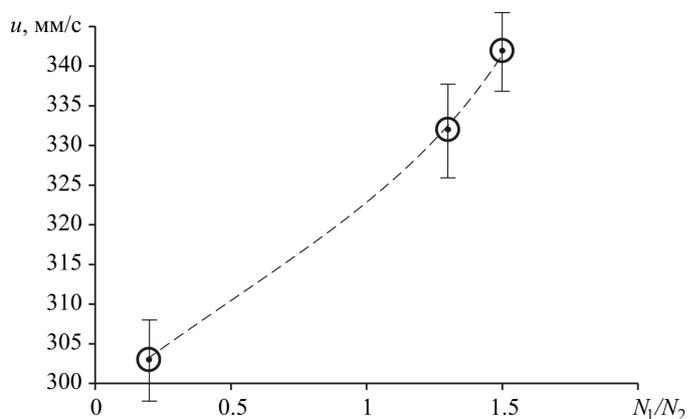


Рис. 7. Экспериментальные данные по зависимости скорости всплытия бидисперсного пузырькового кластера в дистиллированной воде от соотношения количества пузырьков  $D \approx 73$  мм,  $d_1 = 1.3$  мм,  $d_2 \approx 2$  мм)

Таблица 5. Результаты экспериментов по всплыванию бидисперсных кластеров в растворе дистиллированная вода–ПАВ-1 ( $D \approx 60$  мм)

$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$d_2/d_1$	$N_1$	$N_2$	$N_1/N_2$	$u$ , мм/с	$u_1$ , мм/с	$u_2$ , мм/с
1.65	2.1	1.3	81	53	1.5	206±4	183±4	211±4
1.5	2.1	1.4	85	48	1.8	177±4	165±3	191±3
1.6	2.0	1.5	41	56	0.7	180±4	172±4	198±4
1.4	2.1	1.5	57	57	1.0	186±4	167±3	189±43

что связано со снижением скорости отдельного пузырька, входящего в кластер, ввиду увеличения диаметра его миделева сечения, и возникновением циркуляционной зоны в тыловой части пузырька.

Анализ полученных результатов по всплыванию бидисперсного пузырькового кластера в дистиллированной воде показал, что по мере увеличения начальной объемной концентрации кластера при заданном значении  $N_1/N_2$  его скорость возрастает незначительно. В частности, скорость бидисперсного кластера с начальным диаметром  $D = 70$  мм и диаметром входящих в него пузырьков  $d_1 = 1.3$  мм и  $d_2 = 1.6$  мм для  $N_1/N_2 = 0.7$  при  $C_V = 0.0009$  составляет  $u = 316 \pm 5.2$  мм/с, а при  $C_V = 0.002$  —  $u = 321 \pm 6.7$  мм/с.

Результаты экспериментов, осредненные по 10 дублирующим опытам, по всплыванию бидисперсных кластеров в дистиллированной воде с различным содержанием ПАВ-1 приведены в табл. 5. В данной таблице представлены экспериментальные скорости всплывания двух монодисперсных кластеров (из пузырьков диаметров  $d_1$  и  $d_2$ ), образовавшихся в результате расслоения исходного бидисперсного скопления. Скорости  $u_1$  и  $u_2$  измерялись на участке от точки начала расслоения до конца резервуара.

Зависимость скорости всплывания бидисперсного кластера от концентрации ПАВ-1 носит немонотонный характер. Первоначальное снижение скорости с ростом концентрации сменяется ее увеличением после достижения порогового значения  $C \geq 0.55$  г/л (рис. 8). Данное явление объясняется изменением формы пузырьков:

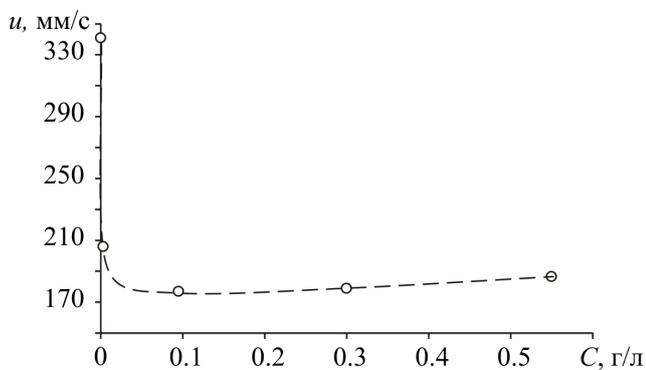


Рис. 8. Экспериментальная скорость всплывания бидисперсного пузырькового кластера в зависимости от концентрации ПАВ-1 в дистиллированной воде ( $d_1 = 1.3$  мм,  $d_2 = 2.1$  мм,  $D = 60$  мм,  $N_1/N_2 = 1.5$ ,  $C_V = 0.0035$ ), осредненная по 10 дублирующим опытам

под действием изменяющегося градиента концентрации ПАВ-1 на межфазной границе они вновь приобретают форму сплющенного эллипсоида вращения, что и приводит к ускорению всплывания.

#### 4. Заключение

Анализ результатов экспериментального исследования процесса всплывания бидисперсного кластера пузырьков позволяет сделать следующие выводы.

В дистиллированной воде ( $Re > 200$ ) бидисперсный пузырьковый кластер сферической формы в процессе всплывания расслаивается на два монодисперсных кластера на расстоянии  $h_*$  от места его формирования независимо от наличия ПАВ. Ключевое различие проявляется в скорости всплывания образующихся кластеров: в чистой жидкости выполняется условие  $u_1 > u_2$ , а в растворе ПАВ —  $u_1 < u_2$ . Экспериментально подтверждено, что расстояние расслоения  $h_*$  монотонно уменьшается при увеличении как концентрации ПАВ, так и безразмерного параметра  $d_2/d_1$ .

Проведенные исследования выявили зависимость скорости всплывания бидисперсного кластера от состава среды и параметров кластера. В дистиллированной воде (в отсутствие ПАВ) скорость кластера монотонно возрастает с увеличением как соотношения количества пузырьков  $N_1/N_2$ , так и начальной объемной концентрации пузырьков. Введение ПАВ приводит к снижению скорости всплывания при идентичных значениях  $N_1/N_2$  и начальной объемной концентрации пузырьков.

Экспериментальное исследование контактного всплывания в глицерине ( $Re < 50$ ) показало, что устойчивое существование бидисперсного пузырькового кластера возможно в двух диапазонах параметров: при соотношении диаметров  $1.56 < d_2/d_1 < 1.82$  и преобладании мелких пузырьков ( $N_1 \gg N_2$ , где доля крупных пузырьков не превышает 6 %); при  $d_2/d_1 > 1.56$  и преобладании крупных пузырьков ( $N_1 < N_2$ ), где доля мелких пузырьков составляет менее 30 %.

Стабильность кластера в этих условиях обусловлена взаимодействием гидродинамических полей пузырьков. В противоположность этому при бесконтактном всплывании, а также при контактном всплывании с соотношением  $d_2/d_1 > 2.13$  и долей крупных пузырьков не более 6 %, бидисперсный кластер не формируется, вместо этого наблюдается независимое всплывание двух монодисперсных образований.

## Список литературы / References

- [1] Левич ВГ. *Физико-химическая гидродинамика*. М.: Государственное издательство физико-математической литературы; 1959. 700 с. Levich VG. *Physical and chemical hydrodynamics*. M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-khimicheskoy literaturi; 1959. 700 p. (in Russian)
- [2] Clift R, Grace JR, Weber M. *Bubble, drops and particles*. London: Academic Press; 1978. 380 p.
- [3] Филиппов ГА, Салтанов ГА, Кукушкин АН. *Гидродинамика и тепло-массообмен в присутствии ПАВ*. М.: Энергоатомиздат; 1988. 184 с. Filippov GA, Saltanov GA, Kukushkin AN. *Hydrodynamics and heat and mass transfer in the presence of surfactants*. M.: Energoatomizdat; 1988. 184 p. (In Russian)
- [4] Griffith R. The effect of surfactants on the terminal velocity of drops and bubbles. *Chemical Engineering Science*. 1962;17:1057–1070. DOI: 10.1016/0009-2509(62)80084-0
- [5] Davis R, Acrivos A. The influence of surfactants on the creeping motion of bubbles. *Chemical Engineering Science*. 1966;21:681–685. DOI: 10.1016/0009-2509(66)80017-9
- [6] Bel Fdhila R, Duineveld PC. The effect of surfactants on the rise of a spherical bubble at high Reynolds and Peclet numbers. *Physics of Fluids*. 1996;8:310–321. DOI: 10.1063/1.868787
- [7] Takemura F. Adsorption of surfactants onto the surface of a spherical rising bubble and its effect on the terminal velocity of the bubble. *Physics of Fluids*. 2005;17(4):048104. DOI: 10.1063/1.1879712
- [8] Zhang Y, Finch A. A note on single bubble motion in surfactant solutions. *Journal of Fluid Mechanics*. 2001;429:63–66. DOI: 10.1017/S0022112000002755
- [9] Духин СС, Буйков МВ. Теория динамического адсорбционного слоя движущихся сферических частиц. *Журнал физической химии*. 1964;38(12):3011–3013. Dukhin SS, Buikov MV. Theory of dynamic adsorption layer of moving spherical particles. *Russian Journal of Chemical Chemistry A*. 1964;38(12):3011–3013. (in Russian)
- [10] Bratukhin YuK, Kostarev KG, Viviani A, Zuev AL. Experimental study of Marangoni bubble migration in normal gravity. *Experiments in Fluids*. 2005;38(5):594–605. DOI: 10.1007/s00348-005-0930-7
- [11] Архипов ВА, Васенин ИМ, Усанина АС. Динамика всплывающего пузырька в присутствии поверхностно-активных веществ. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2016;(2):142–151. EDN: VVNQCB Arkhipov VA, Vasenin IM, Usanina AS. Dynamics of bubble rising in the presence of surfactants. *Fluid Dynamics*. 2016;51(2):266–274. DOI: 10.1134/S0015462816020137
- [12] Roghair I, Lau YM, Deen NG, et al. On the drag force of bubbles in bubble swarms at intermediate and high Reynolds numbers. *Chemical Engineering Science*. 2011;66:3204–3211. DOI: 10.1016/j.ces.2011.02.030
- [13] Simonnet M, Gentric C, Olmos E, Midoux N. Experimental determination of the drag coefficient in a swarm of bubbles. *Chemical engineering Science*. 2007;62:858–866. DOI: 10.1016/j.ces.2006.10.012
- [14] Marrucci G. Communication. Rising Velocity of Swarm of Spherical Bubbles. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*. 1965;5:224–225. DOI: 10.1021/i160014a022
- [15] Olmos E, Gentric C, Vial Ch, Wild G, Midoux N. Numerical simulation of multiphase flow in bubble column reactors. Influence of bubble coalescence and break-up. *Chemical Engineering Science*. 2001;56:6359–6365. DOI: 10.1016/S0009-2509(01)00204-4
- [16] Zhang L, Zhang J, Deng J. Numerical investigation on the collapse of a bubble cluster near a solid wall. *Physical Review E*. 2019;99:043108. DOI: 10.1103/PhysRevE.99.043108
- [17] Krishna R, Urseanu MI, Ellenberger J. Rise velocity of a swarm of large gas bubbles in liquids. *Chemical Engineering Science*. 1999;54:171–183. DOI: 10.1016/S0009-2509(98)00245-0
- [18] Parisien V, Farrell A, Pjontek D, McKnight C, Wiens J. Bubble swarm characteristics in a bubble column under high gas holdup conditions. *Chemical Engineering Science*. 2017;157:88–98. DOI: 10.1016/j.ces.2016.04.051
- [19] Трушин АМ, Дмитриев ЕА, Носырев МА, Тарасова ТА, Кузнецова ИК. Определение скорости стесненного движения сферических газовых частиц в жидкости в поле силы тяжести. *Теоретические основы химической технологии*. 2013;47(4):434–440. DOI: 10.7868/S0040357113040167 Trushin AM, Dmitriev EA, Nosyrev MA, Tarasova TA, Kuznetsova IK. Determining the velocity of the hindered motion of spherical gas particles through liquid in a gravity field. *Theoretical foundations of chemical engineering*. 2013;47(4):368–374. DOI: 10.1134/S0040579513040337
- [20] Takagi S, Toshiyuki O, Masato F, Yoichiro M. Surfactant effect on the bubble motions and bubbly flow structures in a vertical channel. *Fluid Dynamics Research*. 2009;41(6):065003. DOI: 10.1088/0169-5983/41/6/065003
- [21] Lu J, Corvalan CM, John Chew YM, Huang J-Y. Coalescence of small bubbles with surfactants. *Chemical engineering science*. 2019;196:493–500. DOI: 10.1016/j.ces.2018.11.002
- [22] Sugiyama K, Takagi S, Matsumoto Y. Multi-scale analysis of bubbly flows. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2001;191:689–704. DOI: 10.1016/S0045-7825(01)00309-7
- [23] Струминский ВВ, Гуськов ОБ, Кульбицкий ЮН. Гидродинамика дисперсных и газожидкостных потоков. *Доклады Академии Наук СССР*. 1984;278(1):65–68. EDN: RUELXT Struminskii VV, Gus'kov OB, Kul'bitskii YuN. Hydrodynamics of disperse and gas-liquid flows. *Soviet Physics. Doklady*. 1984;29(9):719–721. EDN: RUEMSN
- [24] Gal-Or B, Waslo B. Hydrodynamics of an ensemble of drops (or bubbles) in the presence or absence of surfactants. *Chemical Engineering Science*. 1968;23:1431–1446. DOI: 10.1016/0009-2509(68)89053-0
- [25] Архипов ВА, Усанина АС, Басалаев СА, Каличкина ЛЕ, Мальков ВС. Динамика всплывающего кластера пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2020;(1):104–112. DOI: 10.31857/S0568528120010028 Arkhipov VA, Usanina AS, Basalaeв SA, Kalichkina LE, Mal'kov VS. Dynamics of bubble cluster rising in the presence of a surfactant. *Fluid Dynamics*. 2020;55(1):103–110. DOI: 10.1134/S0015462820010024
- [26] Lane CD, Parisien V, Macchi A, Donaldson AA. Investigation of bubble swarm drag at elevated pressure in a contaminated system. *Chemical Engineering Science*. 2016;(152):381–391. DOI: 10.1016/j.ces.2016.06.017
- [27] Mach J, Wiens J, Adjaye J, Donaldson AA, Macchi A. Effect of pressure on the drag coefficient of individual bubbles in a contaminated polydisperse swarm. *Chemical Engineering Science*. 2020;223:115728. DOI: 10.1016/j.ces.2020.115728
- [28] Crowe CT, Sommerfeld M, Tsuji Y. *Multiphase flows with droplets and particles*. New York. Washington – London: CRC Press, Boca Raton – Boston. 1998. 327 p.
- [29] Roghair I, Baltussen MW, Van Sint Annaland M, Kuipers JAM. Direct numerical simulations of the drag force of bi-disperse bubble swarms. *Chemical engineering science*. 2013;95:48–53. DOI: 10.1016/j.ces.2013.03.027
- [30] Goz M, Sommerfeld M. Analysis of bubble interactions in bidisperse bubble swarms by direct numerical simulations. *Bubbly flows, analysis, modeling and calculation*. Berlin: Springer. 2004:175–190. DOI: 10.1007/978-3-642-18540-3\_14
- [31] Serrano-Garcia JC, Mendez-Diaz S, Zenit R. Average properties of bidisperse bubbly flows. *Physical Review Fluids*. 2018;3(3):034306. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.3.034306
- [32] Гуськов ОБ, Струминский ВВ. Динамика дисперсных потоков в присутствии границ. *Доклады Академии наук СССР*. 1985;285(4):832–835. EDN: RUEKWB Gus'kov OB, Struminskii VV. Dynamics of disperse streams in the presence of boundaries. *Soviet Physics. Doklady*. 1985;30(12):995–997. EDN: RUENQT
- [33] Mylyk A, Meile W, Brenn G, Ekiel-Jezewska ML. Break-up of suspension drops settling under gravity in a viscous fluid close to a vertical wall. *Physics of Fluids*. 2011;23(6):063302. DOI: 10.1063/1.3600660

- [34] Архипов ВА, Усанина АС, Перфильева КГ, Костюшин КВ, Басалаев СА, Поленчук СН. *Способ получения пузырькового кластера заданной конфигурации*. Пат. № 2796910 Российская Федерация. 2023. Arkhipov VA, Usanina AS, Perfil'yeva KG, Kostyushin KV, Basalaev SA, Polen'chuk SN. *Method for obtaining a bubble cluster of a given configuration*. Patent № 2796910 The Russian Federation. 2023. (in Russian)
- [35] Архипов ВА, Басалаев СА, Евсеев НС, Костюшин КВ, Усанина АС. *Программа для управления установкой генерации пузырькового кластера заданной конфигурации*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024685776. Российская Федерация. 2024. Arkhipov VA, Basalaev SA, Evseev NS, Kostyushin KV, Usanina AS. *Program for controlling the installation of generating a bubble cluster of a given configuration*. Certificate of state registration of the computer program No. 2024685776 The Russian Federation. 2024. (in Russian)
- [36] Архипов ВА, Усанина АС. Экспериментальное исследование влияния природы поверхностно-активного вещества на динамику всплытия группы монодисперсных пузырьков в маловязкой жидкости. *Инженерно-физический журнал*. 2024;97(4):874–883. EDN: DAOOTP  
Arkhipov VA, Usanina AS. Experimental study of the influence of the nature of a surfactant on the dynamics of rise of a group of monodisperse bubbles in a low-viscosity liquid. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2024;97(4):859–868. DOI: 10.1007/s10891-024-02955-6
- [37] Борзенко ЕИ, Усанина АС, Шрагер ГР. Экспериментально-теоретическое исследование влияния растворенного поверхностно-активного вещества на динамику всплытия газового пузырька. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2024;(4):108–122. DOI: 10.31857/S1024708424040094  
Borzenko EI, Usanina AS, Shrag'er G.R. Experimental and theoretical investigation of the effect of dissolved surfactant on the dynamics of gas bubble floating-up. *Fluid Dynamics*. 2024;59(4):741–755. DOI: 10.1134/S0015462824603073
- [38] Борзенко ЕИ, Усанина АС, Шрагер ГР. Влияние поверхностно-активного вещества на скорость всплытия пузырька в вязкой жидкости. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2023;84:81–92. Borzenko EI, Usanina AS, Shrag'er GR. Effect of surfactant on bubble rising velocity in viscous liquid. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2023;84:81–92. (in Russian) DOI: 10.17223/19988621/84/7
- [39] Бошнятов БВ, Гуськов ОБ. Гидродинамическое взаимодействие сферических частиц в потоке невязкой жидкости. *Доклады Академии наук*. 2011;438(5):626–28. EDN: NWDDIP  
Guskov OB, Boshenyatov BV. Hydrodynamic interaction of spherical particles in an inviscid-fluid flow. *Doklady Physics*. 2011;56(6):352–354. DOI: 10.1134/S1028355811060073
- [40] Архипов ВА, Усанина АС, Чуркин РА. Закономерности всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости в присутствии поверхностно-активного вещества. *Теплофизика и аэромеханика*. 2023;30(6):1121–1134. EDN: HMSYDJ  
Arkhipov VA, Usanina AS, Churkin RA. Laws of the monodispersed bubble cluster ascent in a viscous liquid in the presence of surfactant. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2023;30(6):1061–1072. DOI: 10.1134/s0869864323060094

## Сведения об авторах / Information about the Authors

### Владимир Афанасьевич Архипов

доктор физ.-мат. наук, профессор  
Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, НИИ ПММ ТГУ, Томск, Россия

### Сергей Александрович Басалаев

кандидат физ.-мат. наук  
Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, НИИ ПММ ТГУ, Томск, Россия

### Кирилл Владимирович Костюшин

кандидат физ.-мат. наук  
Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, НИИ ПММ ТГУ, Томск, Россия

### Анна Сергеевна Усанина

кандидат физ.-мат. наук, доцент  
Национальный исследовательский Томский государственный университет, ТГУ, Томск, Россия

### Vladimir Afanasyevich Arkhipov

Sc.D. (Physics & Mathematics), Prof.  
Tomsk State University Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk, Russia  
[leva@niipmm.tsu.ru](mailto:leva@niipmm.tsu.ru)  
ORCID: 0000-0001-6777-2505

### Sergey Aleksandrovich Basalaev

Ph.D. (Physics & Mathematics)  
Tomsk State University Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk, Russia  
[tarm12376@gmail.com](mailto:tarm12376@gmail.com)  
ORCID: 0000-0002-8964-179X

### Kirill Vladimirovich Kostyushin

Ph.D. (Physics & Mathematics)  
Tomsk State University Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk, Russia  
[kostushink@niipmm.tsu.ru](mailto:kostushink@niipmm.tsu.ru)  
ORCID: 0000-0002-9913-8469

### Anna Sergeevna Usanina

Ph.D. (Physics & Mathematics), Associate Professor  
Tomsk State University, Tomsk, Russia  
[usaniaanna@mail.ru](mailto:usaniaanna@mail.ru)  
ORCID: 0000-0002-8575-0083