

Развитие нового подхода к исследованию процесса выноса поверхностно-активных веществ всплывающими в жидкости пузырьками газа

М. В. Смирнова^{1,*} И. А. Капустин^{2,†}

¹Волжский государственный университет водного транспорта
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5

²Институт прикладной физики Российской академии наук
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

(Статья поступила 30.06.2018; Подписана в печать 10.09.2018)

В работе проанализированы параметры процесса формирования течений и выноса поверхностно-активных веществ (ПАВ) под действием пузырькового потока, общие для природных и технических систем, а также существующие методики исследования этих параметров. Приведено описание разработанной экспериментальной установки для определения характеристик пузырькового потока оптическими и акустическими методами. Разработаны методики лабораторного моделирования процессов выноса ПАВ пузырьками с использованием современных технических средств и новых подходов.

PACS: 95.30.Lz

УДК: 532.5

Ключевые слова: пузырьковый поток, поверхностно-активные вещества, акустические методы, оптические методы, метод параметрически возбуждаемых волн.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на активное использование процессов выноса примесей пузырьками воздуха во многих технических системах, например, системах водоочистки и водоподготовки, обогащения руд, в пищевом производстве, а также процессах переноса органических веществ на водную поверхность в природных условиях, в частности, при всплытии метановых пузырьков из осадочных донных слоев водоемов, кавитационных пузырьков в корабельных следах и др., эти процессы, в силу их сложности, пока не могут считаться полностью изученными [1–7].

Существует ряд работ, посвященных как теоретическим, так и экспериментальным исследованиям гидродинамики пузырьковых течений, в том числе, динамики пузырьковых цепочек при их всплытии [6–10]. Прикладной аспект этих работ связан, например, с исследованием цепочек пузырьков газа, поднимающихся со дна водоемов [6–8]. Важное практическое применение имеет процесс выноса поверхностно-активных веществ (ПАВ) на поверхность воды пузырьковыми потоками в технических системах, гидродинамика которого также недостаточно изучена. Открытым остается вопрос об оптимальных гидродинамических условиях для сохранения прочной связи и всплытия системы «частица (ПАВ)–пузырек» [1, 11, 12]. Основные принципы формирования вихрей под влиянием всплывающих пузырьков сформулированы в [4, 5], однако до сих пор задача математического описания процессов, протекающих в вихрях, не имеет решения, подтвержденного экспериментально [6]. Весьма актуальным

является и прикладной аспект, связанный с проявлением упомянутых выше природных процессов в виде так называемых сликов — областей концентрирования пленок ПАВ, которые приводят к выглаживанию ветрового волнения, тем самым, приводя к «визуализации» процессов на оптических и радиолокационных панорамах, в том числе, спутниковых, изображениях поверхности океана и внутренних водоемов [13, 14].

Задачи определения характеристик пузырьковых потоков в жидкости и структуры течений, генерируемых всплывающими пузырьками газа, в природных и технических системах решаются различными методами отвлеченно друг от друга, поэтому необходимо развитие новых подходов, применимых как в лабораторных (технических), так и в природных системах. Основным методом исследования в прикладной гидродинамике в настоящее время является численное моделирование, однако, без данных лабораторных экспериментов, дающих конкретные значения параметров для расчетов, постановка численной задачи зачастую становится невозможной [15].

Целью настоящей работы является разработка методики исследования закономерностей выноса ПАВ на поверхность воды и характеристик пузырькового потока в лабораторных условиях с использованием современных методов и технических средств.

На данном этапе исследований выполнен обзор методов исследования характеристик пузырьковых потоков и процесса выноса ими ПАВ на поверхность воды и разработана методика выполнения экспериментов.

Проанализируем параметры процесса формирования течений и выноса ПАВ под действием пузырькового потока, общие для природных и технических систем: концентрация газовой фазы; спектр размеров пузырьков; структура и скорости течений, формируемые всплывающими пузырьками; концентрация ПАВ в толще воды и на ее поверхности.

*E-mail: igoninam@yandex.ru

†E-mail: kapustin-i@yandex.ru

1. КОНЦЕНТРАЦИЯ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

При определении концентрации газовой фазы необходимо знать, относительно какого объема ее оценивать. В теории двухфазных течений существует понятие истинного объемного газосодержания [16]. Это отношение площади поперечного сечения, занятой газом, к общей площади поперечного сечения потока. Истинное объемное газосодержание позволяет учесть скольжение газа относительно жидкой фазы, что особенно важно в случаях, когда газовый поток формируется в неподвижной жидкости.

Однако понятие истинного объемного газосодержания применимо к газожидкостным потокам в ограниченном объеме — в трубопроводах, теплообменниках, контактных колоннах, где газожидкостный поток наблюдается во всем поперечном сечении аппарата и у него есть четкие границы в виде стенок. В природных системах газожидкостный поток наблюдается в отдельной, сравнительно малой части поперечного сечения водоема, при этом отсутствует четкая граница между газожидкостным потоком и объемом воды вокруг него. То же касается и многих технических систем (флотации, аэрации и др.), где газожидкостный поток формируется не во всем объеме аппарата, а только в его части.

Одним из способов определения границы зоны газосодержания в таких случаях может быть условное очерчивание факела пузырькового потока конусообразной поверхностью, отделяющей зону, свободную от пузырьков от зоны аэрации. Экспериментально эту границу можно определить, например, путем просвечивания пузырькового потока лазерным лучом и сравнения полученных фотоэлементом усредненных интенсивностей светового потока в зоне, свободной от пузырьков, и в зоне аэрации [17].

2. СПЕКТР РАЗМЕРОВ ПУЗЫРЬКОВ

Интенсивность выноса ПАВ на поверхность воды зависит от площади и времени контакта газовой фазы с ПАВ в толще воды и от гидродинамических условий в зоне контакта, влияющих на прочность связи и всплытие системы «частица (ПАВ) — пузырек» [1, 11, 12]. Поэтому для многих технических систем важной задачей является поиск оптимального соотношения размера пузырьков и гидродинамического режима их всплытия.

Экспериментальное определение диаметра пузырьков усложняется тем, что, начиная с некоторого размера пузырька, его форма отличается от сферической. Так, при характерном диаметре пузырьков от 3 и до 8 мм их форма при всплытии быстро меняется, а при диаметре свыше 12 мм пузырьки принимают форму плоского купола, практически не меняющегося при всплытии. По некоторым данным, сферическая форма пузырька сохраняется вплоть до диаметра 2.7 мм [5].

При этом область ламинарного всплытия единичного пузыря ограничивается значениями числа Рейнольдса $Re = 200$, что соответствует характерному диаметру пузыря 1 мм [6].

Для экспериментального определения размеров пузырьков в лабораторных условиях в настоящее время используются методы фото- и видеосъемки позволяющие определять его характерный, или эквивалентный, радиус, вычисленный по объему пузырька [18]. В исследованиях природных систем прямое измерение размеров пузырьков осложнено необходимостью погружения измерительной аппаратуры под воду. В таких случаях, средний диаметр пузырьков можно определить лишь косвенным способом — расчетом по эмпирическим формулам, по скорости их всплытия, оцененной эхолотом [8, 19]. Определить радиус и объем пузырьков напрямую с помощью применяемых для этих целей однолучевых эхолотов невозможно, поскольку они не позволяют провести измерение сечения рассеяния пузырька [8].

Существует ряд работ, посвященных лабораторным исследованиям распределения пузырьков по размерам. [7, 18, 19]. Однако, даже применяемые в [18] методы двумерной фотосъемки не позволяют достаточно точно оценить размер крупных пузырьков вследствие сильного искажения их формы. Поэтому существует необходимость развития более точных методов определения формы и размеров пузырьков.

3. СТРУКТУРА И СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫЕ ВСПЛЫВАЮЩИМИ ПУЗЫРЬКАМИ

Для оценки влияния пузырькового потока на структуру течений были проанализированы два выполненных ранее эксперимента: эксперимент в неограниченном объеме, соответствующий процессам в природных системах [14], и эксперимент в ограниченном объеме, соответствующий процессам, протекающим в технических системах [10] (рис. 1, 2).

В первом эксперименте для формирования двумерной картины течений был использован лоток с глубиной воды 25 мм, шириной 30 мм и длиной более 3000 мм. В поперечном сечении лотка была сформирована плоская пузырьковая пелена с нулевой начальной скоростью всплытия пузырьков, газосодержанием порядка 1% и средним диаметром пузырька 4.2 мм. Течение, образованное плоской пузырьковой пеленой, в эксперименте имело структуру в виде двух симметричных вихрей, расположенных по обе стороны пузырьковой завесы, поэтому на рис. 1 представлена структура только одного вихря.

Во втором эксперименте в поперечном сечении цистерны с размерами 1230x1640x1005 мм, возле одной из стенок была сформирована плоская пузырьковая пелена с ненулевой начальной скоростью всплытия пузырьков, газосодержанием порядка 5% и средним диа-

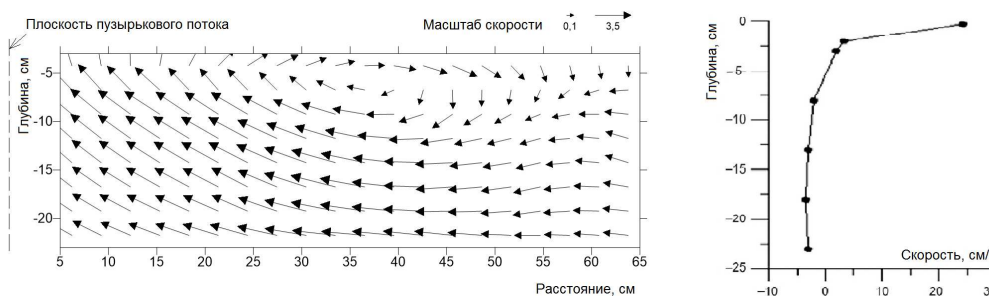


Рис. 1: Распределение средних скоростей течений в продольном сечении лотка и профиль горизонтальной составляющей скорости на расстоянии 40 см от плоскости пузырькового потока

метром пузырька 5.6 мм.

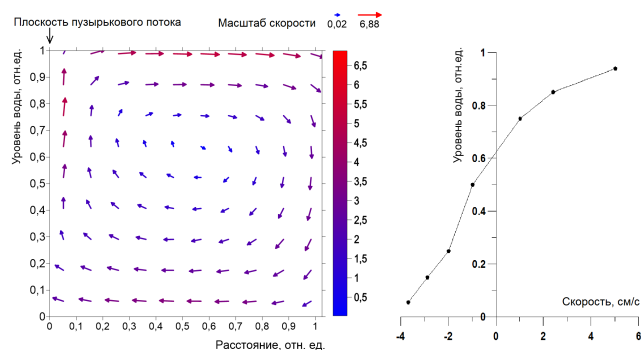


Рис. 2: Распределение средних скоростей течений в цистерне ограниченного объема и профиль горизонтальной составляющей скорости на расстоянии 0.6 относительных единиц от плоскости пузырькового потока (расстояния указаны в долях относительно уровня воды в цистерне, равного 1005 мм)

Анализ полученных профилей скоростей течений показал, что в обоих экспериментах течение сильно неоднородно по вертикали с многократным увеличением средних скоростей к поверхности воды, а в случае с ограниченным объемом — еще и ко дну цистерны. В обоих случаях, независимо от интенсивности аэрации, то есть содержания газовой фазы и начальной скорости всплытия пузырьков, наблюдается циркуляционный поток. Однако, в случае неограниченного объема поток прижат к поверхности воды, а в ограниченном объеме он расположен ближе к центру цистерны и является практически симметричным.

Средние скорости течений, индуцированных пузырьковой пеленой, в эксперименте с неограниченным объемом и нулевой начальной скоростью всплытия пузырьков достигали максимума в 3.5 см/с в приповерхностном слое воды. Скорости течений на поверхности воды, определенные с помощью видеосъемки движения измельченных частиц положительной плавучести, оказались на порядок выше и составляли порядка 30 см/с. В ограниченном объеме при расчетной скорости выхода воздуха из отверстий 18.9 м/с средние скорости течений достигали максимальных значе-

ний также в приповерхностном слое воды и достигали 6.8 см/с. Измерение скоростей течения на поверхности воды не проводилось.

Проведенный анализ указывает на существенные различия в структуре циркуляционного течения, формируемого пузырьковым потоком в системах ограниченного и неограниченного объемов, но значительное подобие скоростных режимов, а, следовательно, и интенсивности выноса ПАВ.

4. КОНЦЕНТРАЦИЯ ПАВ В ВОДЕ И НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

Исследованию процесса выноса ПАВ на поверхность воды под действием газовых пузырьков посвящено большое количество работ [1, 3, 12], однако, большинство рассматривают системы с большими концентрациями ПАВ в воде, что соответствует процессам водочистки, разделения водонефтяной смеси, флотационного разделения руд и пр. В то же время в природных системах даже незначительные концентрации биогенных ПАВ могут формировать обильную пену на поверхности воды при ее сильной турбулизации в следах надводных судов, пропуске воды через турбины ГЭС, или просто при интенсивном волнении. Формирующейся природной пленки ПАВ на поверхности воды оказывается достаточно для гашения коротких ветровых волн, а, следовательно, и дистанционной диагностики зон загрязнения водоемов [13, 20].

Концентрация ПАВ в адсорбционном слое на несколько порядков выше, чем в объеме жидкости, поэтому даже при ничтожно малом содержании в воде (0.01–0.1% по массе) ПАВ могут существенно снижать поверхностное натяжение воды на границе с воздухом. Для моделирования процессов, протекающих с ПАВ в водных системах используются вещества, содержащие в своем составе жирные кислоты, спирты, эфиры, которые обладают высокой поверхностной активностью и при нанесении на воду сильно понижают коэффициент поверхностного натяжения [13].

Для взятия проб пленок с поверхности воды может быть использован сеточный метод [21], основанный на

погружении в поверхностный слой воды капроновой сетки с последующей экстракцией ПАВ спиртом высокой очистки. Для восстановления характеристик пленки ПАВ на поверхности воды хорошо зарекомендовал себя метод параметрически возбуждаемых волн [13].

5. НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЗЫРЬКОВЫХ ПОТОКОВ

В настоящее время для измерения динамических параметров потоков используются две группы методов — акустические (acoustic Doppler velocimetry, ADV) [8, 10, 14] и оптические (particle image velocimetry, PIV, и particle tracking velocimetry, PTV) [22]. Для измерения характеристик пузырьков также используется метод PIV [17, 18, 23].

Авторами разработан новый подход, заключающийся в одновременном применении оптических (PIV/PTV) и акустических (ADV) методов измерения течений в жидкости, а также применение стереосъемки для определения формы и размеров всплывающих пузырьков, с целью повышения точности определения газосодержания и анализа влияния формы пузырьков на эффективность процесса выноса ПАВ.

Для определения структуры и скоростей течений, формируемых пузырьковым потоком, планируется одновременное использование акустических и оптических методов: ADV, позволяющим оценивать вихревые структуры средних размеров, и PIV, позволяющим оценивать мелкомасштабные турбулентные структуры. Также для визуализации траекторий жидких частиц и оценки масштабов турбулентных вихрей будет использован метод PTV при большем времени экспозиции.

Определение средних скоростей течений будет выполняться с помощью лабораторного акустического доплеровского velocimetра ADV (16 MHz), позволяющего измерять три компоненты скорости жидкости в заданной точке при рассеянии акустического сигнала на специально введенных в воду полимерных частицах нейтральной плавучести со средним диаметром 10 мкм. Для определения поля скоростей во всем объеме лотка зонд ADV должен устанавливаться на различных расстояниях от пузырькового слоя с постоянным шагом от 3 до 5 см. В силу конструктивных особенностей использование ADV для измерения скоростей течений возможно, начиная лишь с глубин около 2–3 см, поэтому измерение скоростей в верхнем слое жидкости должно проводиться по данным видеосъемки движения измельченных частиц положительной плавучести с последующим анализом отдельных кадров видеозаписи.

Система PIV будет использована для визуализации мелких вихревых структур, образующихся под влиянием пузырькового потока. Она включает видеокамеру высокого разрешения VS-285/Д-2001, лазер подсветки мощностью 300 мВт и генерируемой длиной волны

532 нм, оптическую систему для преобразования лазерного пучка в «ножевой» и управляющий импульсный генератор Г5-60.

Лазерная подсветка в виде ножевого пучка позволит также получить изображения сечений пузырьков и грубо оценить объем газа, используя аппроксимацию изображения осесимметричной геометрической фигурой (окружность, овал, цилиндр и др.). Для получения стереоизображения пузырьков система PIV будет дополнена второй видеокамерой высокого разрешения (рис. 3). Стереосъемка имеет несомненную ценность для решения данной задачи, т.к. она позволяет наблюдать предметы объемно, и в случае сложной несимметричной формы пузырьков, вводить поправки в измеренный объем пузырька. Для системы стереосъемки будет использовано диффузное освещение. Расчеты будут производиться с использованием специально разработанного для этих целей программного обеспечения.

Оценка концентрации и структуры пленки ПАВ на поверхности очищенной водопроводной воды будет определяться с использованием двух современных методик: методики измерения коэффициента затухания бегущих вдоль лотка поверхностных волн на пленке ПАВ с помощью 3-канального струнного волнографа [14]; и методики отбора сеточных проб пленки ПАВ на различных расстояниях от пузырькового слоя и последующего восстановления характеристик пленки методом параметрически возбуждаемых волн [13]. Последний позволяет по измеренным длине волны и коэффициенту затухания поверхностных гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) восстановить значения коэффициента поверхностного натяжения и упругости пленки. Основным преимуществом сеточной методики является ее сочетание с методом параметрически возбуждаемых волн, позволяющим измерить «коэффициент переноса ПАВ» сеткой и реконструировать в лабораторных условиях даже пленки с концентрациями, соответствующими природным условиям.

Разработанный подход обладает значительной новизной, это, в частности, относится к одновременному применению стереосъемки для определения формы и размеров всплывающих пузырьков, оптических (PIV/PTV) и акустических (ADV) методов измерений течений в жидкости, а также сеточной методики отбора проб ПАВ и методов бегущих и параметрически возбуждаемых волн для восстановления структуры и концентрации ПАВ на поверхности воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты работы:

- Проанализированы параметры процесса формирования течений и выноса ПАВ под действием пузырькового потока, общие для природных и технических систем, а также существующие методики исследования этих параметров;

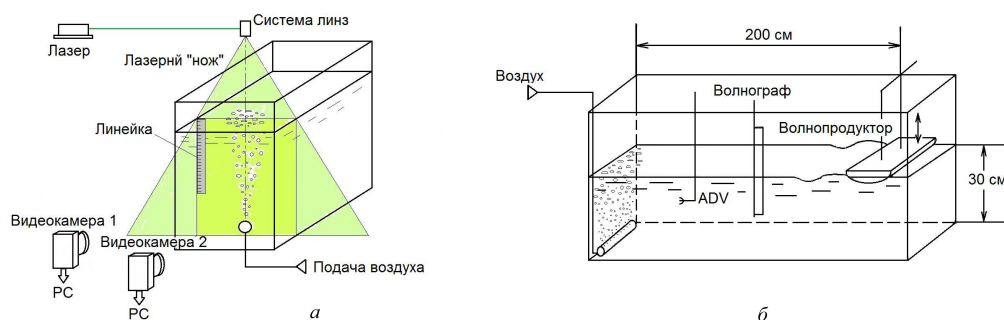


Рис. 3: Общая схема экспериментальной установки: *а* — для определения характеристик пузырьков; *б* — для определения средних скоростей течений и одновременного восстановления характеристик пленки ПАВ на поверхности воды

- Разработана экспериментальная установка для определения параметров пузырькового потока оптическими и акустическими методами;
- Разработаны методики лабораторного моделирования процессов выноса ПАВ пузырьками с использованием современных устройств и новых подходов;
- Впервые характеристики пузырькового потока будут оценены одновременно двумя методами — ADV, позволяющим оценивать вихревые структуры средних размеров, и PIV, позволяющим оценивать мелкомасштабные турбулентные

структуры;

- Для оценки характеристик пленок ПАВ, выносимых на поверхность воды пузырьками, будут использованы: сеточная методика отбора проб [13], метод параметрических волн для восстановления характеристик пленок [13], а также измерения коэффициента затухания бегущих вдоль лотка поверхностных волн на пленке ПАВ с помощью 3-канального струнного волнографа [14].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-38-00861 мол_а).

- [1] Русанов А. И., Левичев С. А., Жаров В. Т. Поверхностное разделение веществ: теория и методы. Л.: Химия, 1981.
- [2] Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959.
- [3] Кафаров В. В. Основы массопередачи. Уч. пос. для ВУЗов. М., 1972.
- [4] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Перев. с нем. М.: Наука, 1974.
- [5] Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.
- [6] Бялко А. В. Доклады Академии наук. 2011. **436**, № 6. С. 747.
- [7] McGinnis D. F., Greinert J., Artemov Yu., Beaubien S. E., Wuest A. J. of Geophys. Res. Oceans. 111. C09007. DOI 10.1029/2005JC003183.
- [8] Диденкулов И. Н., Муякин С. И., Стромков А. А., Фикс Г. Е. Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 5(3). С. 43.
- [9] Смирнова (Игонина) М. В., Васькин С. В. Труды 15-го Междун. науч.-пром. форума «Великие реки 2013». Материалы науч.-метод. конф. Н. Новгород. ВГАВТ, 2013. С. 73.
- [10] Васькин С. В., Этин В. Л., Смирнова (Игонина) М. В. Вестник ВГАВТ. 2016. Вып. 48. С. 73.
- [11] Van Vuuren L. R. Water Res. 2. С. 177.
- [12] Wang L. K., Wang M. H. S., Yaksich S., Granstrom M. L. Water treatment with multiphase flow reactor and cationic surfactants. 1978.
- [13] Ермаков С. А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010.
- [14] Ермаков С. А., Капустин И. А., Лазарева Т. Н., Калимуллин Р. Р. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. **10**, № 4. С. 298.
- [15] Чебан Е. Ю., Смирнова (Игонина) М. В., Капустин И. А., Мошков А. А. Речной транспорт (XXI век). 2015. № 5 (76). С. 42.
- [16] Чисхолм Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках: Пер. с англ. М.: Недра, 1986.
- [17] Гизатулин Р. А. Вестник ЮУрГУ. Сер. «Металлургия». 2006. № 10, Вып. 7. С. 63.
- [18] Lau Y. M., Thiruvalluvan Su. K., Gaeini M., Deen N. G., Kuipers J. A. M. Chemical Engineering Science. 2013. № 98. С. 203.
- [19] Ostrovsky I., McGinnis D. F., Lapidus L., Eckert W. Limnol. Oceanography. 2008. N 6. P. 105.
- [20] Ermakov S., Kapustin I., Lazareva T. Proc. SPIE 2014. **9240**. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters and Large Water Regions. 92400N (14 October 2014); doi: 10.1117/12.2067367; https://doi.org/10.1117/12.2067367.
- [21] Da Silva J. C., Ermakov S. A., Robinson I. S., Jeans D. R. G., Kijashko S. V. J. Geophys. Res. 1998. **103**,

№ С4. Р. 8009.

[22] *Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J.* Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Berlin, 2007.

[23] *Белоусов А. П., Белоусов П. Я., Борыняк Л. А.* Автометрия. 2015. **51**, № 6. С. 47.

Development of a new approach to the study of the process of removal of surfactants by floating gas bubbles in fluid

M. V. Smirnova^{1,a}, I. A. Kapustin^{2,b}

¹*Department of hydrodynamics, the theory of the ship and environmental safety of vessels, Volga state university of water transport*

Nizhny Novgorod, 603950, Russia

²*Department of radiophysical methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the RAS*

Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: ^aigoninam@yandex.ru, ^bkapustin-i@yandex.ru

The paper analyzes the parameters of the process of formation of flows and removal of surface-active substances (SAS) under the action of bubble flow, common to natural and technical systems, as well as existing methods for studying these parameters. The description of the developed experimental setup for determining the parameters of the bubble flow by optical and acoustic methods are given. The methods of laboratory modeling of processes of SAS removal by bubbles with the use of modern technical means and new approaches are developed.

PACS: 95.30.Lz

Keywords: bubble flow, surfactants, acoustic methods, optical methods, parametric wave method.

Received 30 June 2018.

Сведения об авторах

1. Смирнова Мария Валерьевна — канд. техн. наук, доцент; e-mail: igoninam@yandex.ru.

2. Капустин Иван Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: kapustin-i@yandex.ru.
