

·УДК 536.1; 665.1/.3

Экспериментальное исследование газосодержания в двухфазной системе подсолнечное масло-азот при изменении температурного и расходного режимов

А. С. КУЛЬПИНОВ^{1,2}, канд. хим. наук С. М. ВОЛКОВ², А. В. ЕФИМОВ²,

д-р техн. наук А. В. ФЕДОРОВ^{1,2*}

¹Университет ИТМО

²ВНИИЖиров

*E-mail: afedorov@itmo.ru

В лабораторных условиях на специально созданной экспериментальной установке исследованы гидродинамические характеристики технологической операции барботаж растительного масла инертным для него газом. Эксперименты проводились при высоте слоя жидкости 0,8 м в диапазоне температур от 20 °С до 120 °С и удельном расходе азота от 0,073 л/(мин·кг) до 1,93 л/(мин·кг). Установлена линейная зависимость изменения газосодержания от удельного расхода азота. Определено верхнее граничное значение удельного расхода 1,3–1,4 л/(мин·кг) для достижения наилучшего газосодержания исследуемой двухфазной среды при температурах от 90 °С до 115 °С. Результаты могут быть использованы при создании перспективной техники в масложировом производстве, а также расширяют представления о гидродинамике газожидкостных систем с вязкими жидкостями.

Ключевые слова: двухфазная система, подсолнечное масло, азот, барботаж.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 15.04.2025, одобрена после рецензирования 28.04.2025, принята к печати 12.05.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-92-101

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Кульпинов А. С., Волков С. М., Ефимов А. В., Федоров А. В. Экспериментальное исследование газосодержания в двухфазной системе подсолнечное масло-азот при изменении температурного и расходного режимов. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 2. С. 92–101. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-92-101

Experimental study of gas content in a two-phase system of sunflower oil-nitrogen with changes in temperature and flow rates

A. S. KULPINOV^{1,2}, Ph. D. S. M. VOLKOV², A. V. EFIMOV², D. Sc. A. V. FEDOROV^{1,2*}

¹ITMO University

²All-Russian Scientific Research Institute of Fats

*E-mail: afedorov@itmo.ru

The hydrodynamic characteristics for the technological operation of bubbling vegetable oil with an inert gas were studied in laboratory conditions on a specially made experimental stand. The experiments were carried out at a liquid layer height of 0.8 m in the temperature range of from 20 °C to 120 °C and a specific nitrogen consumption of from 0.073 l/(min·kg) to 1.93 l/(min·kg). A linear dependence of the change in gas content on the specific nitrogen consumption was established. The upper limit value of the specific flow rate of 1.3–1.4 l/(min·kg) was determined to achieve the best gas content of the studied two-phase medium at the temperatures of from 90 °C to 115 °C. The results can be used to create promising equipment in oil and fat production, and also to expand the understanding of the hydrodynamics of gas-liquid systems with viscous liquids.

Keywords: two-phase system, sunflower oil, nitrogen, bubbling.

Article info:

Received 15/04/2025, approved after reviewing 28/04/2025, accepted 12/05/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-92-101

Article in Russian

For citation:

Kulpinov A. S., Volkov S. M., Efimov A. V., Fedorov A. V. Experimental study of gas content in a two-phase system of sunflower oil-nitrogen with changes in temperature and flow rates. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 2. p. 92-101. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-92-101

Введение

В России продолжается устойчивый рост объемов производства растительных масел и страна занимает одну из ведущих позиций на мировом рынке по этой позиции. Конкуренция заставляет производителей обеспечивать высокое качество продукции при постоянно растущих ценах на энергоресурсы и другие расходы, одновременно стремясь минимизировать себестоимость. Разработка новых технологических процессов, способствующих достижению этих целей, является достаточно трудной, но выполнимой задачей, требующей комплексного междисциплинарного подхода к исследованию отдельных процессов на макро- и микроуровнях.

Масложировое производство — это совокупность сложных взаимосвязанных многоступенчатых технологических процессов. Растительное масло извлекается из масличного сырья двумя основными способами: прессованием и экстракцией, реализуемыми либо независимо, либо последовательно. В результате экстракции масла из семян или продуктов их переработки получается мисцелла — раствор растительного масла в органическом растворителе. Экстракционный способ производства растительных масел включает в себя дистилляцию мисцеллы. На завершающем этапе дистилляции следы растворителя из высококонцентрированной мисцеллы (практически готового масла) удаляются с помощью барботажа. Далее для комплексной очистки (рафинации) растительных масел аналогичная процедура производится при дезодорации. В барботаже традиционно используется перегретый водяной пар, как доступная и эффективная газовая среда. Однако получение водяного пара требует больших затрат тепловой энергии, а его применение имеет ряд недостатков. В первую очередь, высокая температура пара вызывает локальные перегревы обрабатываемого масла, что может привести при наличии водяного конденсата к образованию моно- и диглицеридов, которые далее превращаются в глицидиловые эфиры. Кроме того, при барботаже водяной пар непосредственно контактирует с растительным маслом, что требует тщательной подготовки воды и поддержания ее особой химической чистоты для исключения синтеза хлорсодержащих соединений. Также при попадании даже небольшого количества воды в масло при конденсации водяного пара в ходе окончательной дистилляции происходит преждевременная гидратация фосфатидов, ухудшающая теплопередачу через стенки аппарата. Это существенно снижает энергоэффективность процесса барботажа. Ученые и специалисты ищут возможную замену водяному пару в качестве рабочей газовой среды при барботаже. Перспективным для этого является применение газов, инертных по отношению к химическим соединениям растительных масел, позволяющее получать конечный продукт существенно более высокого качества. Например, в работе [1] в качестве альтернативы предлагалось использовать азот для ацетоно-масляных мисцелл. Он является наиболее доступным газом для барботажа, а современные технологии его генерации позволяют получать азот непосредственно на производственном объекте. Многоступенчатое использование азота во всем производстве растительных масел, а также рациональное соотношение расхода азота и обрабатываемого масла с использовани-

ем барботажа при более высоком качестве продукта может сделать технологию применения азота конкурентоспособной. В связи с этим остаются открытыми вопросы о том, как достичь наиболее эффективных режимов барботажа, обеспечивающих достижения максимальной поверхности взаимодействия фаз — F при наибольшем объемном содержании газовой фазы — ϕ , минимально возможном удельном расходе газа и минимально возможной рабочей температуре — t_p , и позволяющих при этом наращивать имеющуюся производительность продукта и его качество.

Для правильной организации процесса барботажа требуется изучить взаимное влияние условий гидродинамики, теплофизики и особенности химической технологии в диапазоне режимных параметров. Следует отметить, что барботаж используется во многих производствах и отраслях: пищевой, химической, металлургической, нефтегазовой, очистке сточных вод и многих других. Причем каждая пара фазовых подсистем в системах жидкость — газ, используемых в различных отраслях промышленности, имеет свои особенности и одновременно общие гидродинамические и теплофизические характеристики.

Достаточно много результатов глубоких исследований представлено в области барботажа в металлургической отрасли. В статье [2] использовалась методика, позволяющая отслеживать изменения в составах фаз систем при барботаже газа восстановителя. Использовались циклические расчеты, которые учитывают состав образовавшихся газов и металлической фазы. А в работе [3] рассматривается состояние знаний о динамике пузырьков в масштабе пузырьков в жидких металлах. Обсуждается механизм образования пузырьков в соплах и продувочных пробках. Авторы [4] рассматривают теоретические положения по формированию пузырьков газа при гетерогенной реакции твердое тело — жидкость — газ. На основе аналогии теплогидравлики кипения и барботажа получены теоретические зависимости для скорости роста пузырьков при наличии микроподслоя жидкого реагента. Аналитические зависимости, полученные в данной работе, качественно соотносятся с эмпирическими соотношениями других авторов.

В статье [5] рассматриваются механизмы и факторы, влияющие на стабильность пузырьков воздуха в свежем бетоне. Обсуждаются процессы образования и схлопывания пузырьков, а также влияние поверхностного натяжения на их стабильность. Подчеркивается, что на стабильность пузырьков влияют прочность пленки и скорость диффузии воздуха через мембрану.

В работе [6] автор делает вывод, что применение проточных биореакторов вертикальной конструкции с барботажным типом перемешивания позволяет сократить энергоемкость и повысить интенсивность производства биогаза. В исследовании [7] изучались пузырьки, поднимающиеся в неньютоновских жидкостях в наклонной трубе. Эксперименты проводились с разными углами наклона и концентрациями бентонита, а также с использованием воды. Результаты показали, что скорость пузырьков увеличивается с углом наклона и уменьшается с вязкостью жидкости, а длина пузырьков уменьшается при увеличении скорости и вязкости потока. Обна-

ружено, что скорость пузырька не зависит от его длины. Разработана новая корреляция для расчета скорости дрейфа пузырьков, которая показала хорошую точность предсказаний как для текущих, так и для предыдущих данных. В работе [8] обсуждается влияние числа Рейнольдса Re на турбулентность, вызванную движением пузырьков в спокойной ньютоновской жидкости при малом Re . Исследование показывает, что при значениях Re порядка 100 нормализованные энергетические спектры теряют зависимость от объемной доли газа, что подтверждается анализом скорости и корреляции.

Большой вклад вносят исследования в области барботажа в химической промышленности. В работе [9] проведены эксперименты по наблюдению за динамикой одиночного кавитационного пузырька на границе раздела нефти и воды, с сопутствующим моделированием. Исследованы детали взаимодействия пузырьков с этой границей, включая деформацию и проникновение. Установлено, что пузырьки стремятся к границе раздела в легкой жидкости и удаляются от нее в более плотной. Автор работы [10] описывает численное исследование всплытия газового пузырька в вязкой жидкости с растворенными поверхностно-активными веществами (ПАВ). Исследует влияние сил вязкого трения и поверхностного натяжения на гидродинамические и диффузионные процессы. В тексте статьи [11] рассматриваются физико-химические процессы, происходящие при барботаже газа и адсорбции биогенных поверхностно-активных веществ (ПАВ) на поверхности пузырьков в морской воде. Установлено, что биогенные ПАВ снижают коэффициент поверхностного натяжения, что уменьшает скорость движения газовой фазы и незначительно влияет на коэффициент массопередачи, но увеличивает общую поверхность массообмена. Также отмечается, что в условиях коалесценции и дробления пузырьков, уменьшение их объема приводит к преобладанию дробления над коалесценцией, что способствует увеличению поверхности массообмена за счет роста числа пузырьков.

В работе [12] доказано определяющее влияние температуры опресненной воды в зоне барботажа на производительность опреснительных установок с контактным испарителем. Получена поправка, позволяющая при расчете цикла работы установки учесть исходную соленость воды и рассола. А в статье [13] экспериментально исследовалось влияние барботирования на рост всходов семян. Представлен большой массив полученных данных по взаимодействию многокомпонентной жидкости (вода с примесями) с воздухом. При высоких температурах система растительное масло-азот имеет схожие физические характеристики. Эффективность применения барботажа показано в работе [14], где доказано, что при оптимальном соотношении газовой и жидкой фазы достигается максимальный эффект.

В последние годы наращивают обороты исследования в пищевой промышленности. Например, в статье [15] представлен опыт применения углекислого газа для очистки смесей эфиров жирных кислот от щелочного гомогенного катализатора путем реакции карбонизации. А в работе [16] приведены рекомендации по рациональной организации процесса барботажа в производстве подсолнечных масел. Рассмотрена зависимость устойчи-

вости гидродинамического режима от диаметра отверстий, а также свободного всплытия соседних пузырей по своей траектории от шага отверстий. Как итог, в исследовании [17] получены эмпирические соотношения для расчета диаметра и скорости всплытия пузырей перегретого водяного пара в высококонцентрированной мисцелле для маслоэкстракционного производства. Используя формулы, можно определять такие технологические параметры зоны барботажа, как количество пузырей, время взаимодействия.

Очень широкие возможности открывает изучение двухфазных барботажных систем с помощью оптических методов, как это представлено в [18]. С уменьшением поверхностного натяжения и уменьшением вязкости размер пузырьков уменьшается. Причем добавление в исследованную систему глицерина или поверхностно-активного вещества не оказались полезными для массопереноса из пузырьков CO_2 в жидкость.

В работе [19] представлены экспериментальные данные по барботажу при $Re=200-600$ в присутствии ПАВ и новые зависимости для определения скоростей всплытия пузырей в критериальном виде, которые можно использовать при моделировании барботажа в растительном масле. При производстве биотоплива [20] также применяется барботаж, как эффективное средство активизации тепломассообменных процессов. Более детальное изучение барботажа на микроуровне представлено в работе [21], что позволило авторам сформировать карту режимных параметров. В работах [22, 23] авторы, изучая отдельные пузыри и, соответственно, их цепочки всплытия обосновали образование спиралевидных траекторий, пульсации пузырей и их деформацию, что расширило представления о процессах движения пузырей при свободном всплытии.

Обзор работ по применению барботажа в технологии жиров показал, что имеются единичные разрозненные эксперименты по практическому использованию азота для дезодорации и удаления растворителя из растительного масла. При этом исследований гидродинамики двухфазной системы растительное масло-азот в технологическом интервале температур, а тем более барботажа растительного масла, содержащего растворитель, не проводилось. Поэтому получение системных экспериментальных данных по основным параметрам барботажа для пары контактирующих сред растительное масло-азот в технологическом диапазоне температур является актуальной задачей. Причем на начальном этапе таких системных исследований целесообразно изучение гидродинамической обстановки с выявлением фундаментальных, ключевых параметров именно без присутствия растворителя в системе растительное масло — азот. Так как это позволит экспериментально изучать изменения этих гидродинамических и тепловых параметров барботажа с использованием применяющихся конструктивных элементов для более простой по составу компонентов двухфазной системы. Только после получения такого рода данных можно решать задачу поиска и применения новых конструктивных элементов, обеспечивающих увеличение поверхности контакта жидкости и газа с увеличением времени их контакта при минимальных значениях температуры и удельного расхода газовой фазы — азота.

Методы и объекты исследования

Объект исследования — это двухфазная система, состоящая из растительного масла и газообразного азота. Подсолнечное масло производится в России в наибольшем количестве, поэтому в экспериментах использовали нерафинированное подсолнечное масло, моделирующее процесс барботажа в его реальном производстве. В качестве газовой фазы при барботаже растительного масла использовался азот. Показатели качества подсолнечного масла представлены в табл. 1. Жирнокислотный состав определялся по ГОСТ 31663 и ГОСТ 31665 с помощью хроматографа Bruker Scion 436 GC. Капиллярная колонка: длина 30 м, диаметр 0,25 мм с активной фазой на основе полиэтиленгликоля.

Экспериментальная установка для изучения барботажа (БИУ2) состоит из рабочего участка, вспомогательных узлов, блоков и элементов, а также измерительно-регистрирующего комплекса. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис 1.

Рабочий участок представляет собой вертикальный цилиндрический прозрачный стеклянный сосуд из двух одинаковых секций, соединенных фланцами, общей высотой 1000 мм и внутренним диаметром 49 мм. В нижней части рабочего участка имеется барботер змеевикового типа с четырьмя отверстиями диаметром 2 мм, а в верхней — узел отвода газовой фазы. Предусмотрены штуцеры для ввода исследуемой жидкости, взятия проб и опорожнения рабочего участка в конце эксперимента. Такая конструкция рабочего участка позволяет вести непрерывное визуальное наблюдение и фото-видео фиксацию гидродинамической обстановки во время эксперимента. Это очень важно при исследовании двухфазных систем.

Таблица 1
Показатели качества подсолнечного масла

Fatty acid composition of highly oleic refined vegetable oils			
№	Наименование жирной кислоты	Условное обозначение	Содержание жирной кислоты, %
1	миристиновая	C14:0	0,1
2	пальмитиновая	C16:0	6,3
3	пальмитолеиновая	C16:1	0,1
4	стеариновая	C18:0	3,7
5	олеиновая	C18:1	21,8
6	линолевая	C18:2	66,5
7	линоленовая	C18:3	0,1
8	арахиновая	C20:0	0,3
10	гондоиновая	C20:1	0,1
12	бегеновая	C22:0	0,7
13	эруковая	C22:1	0,1
14	лигноцериновая	C24:0	0,2

На стеклянной поверхности имеются метки — уровни на высоте 200, 400, 600 и 800 мм от входа и линейная шкала с ценой деления 1 мм. Рабочий участок имеет пассивную и активную теплоизоляцию, включающую несколько локальных жидкостных и электрических подогревателей, для обеспечения стабильной температуры в процессе опытов.

Жидкостные нагреватели представляют собой гибкие силиконовые шланги, через которые прокачивается высокотемпературный теплоноситель, поступающий от термостатов.

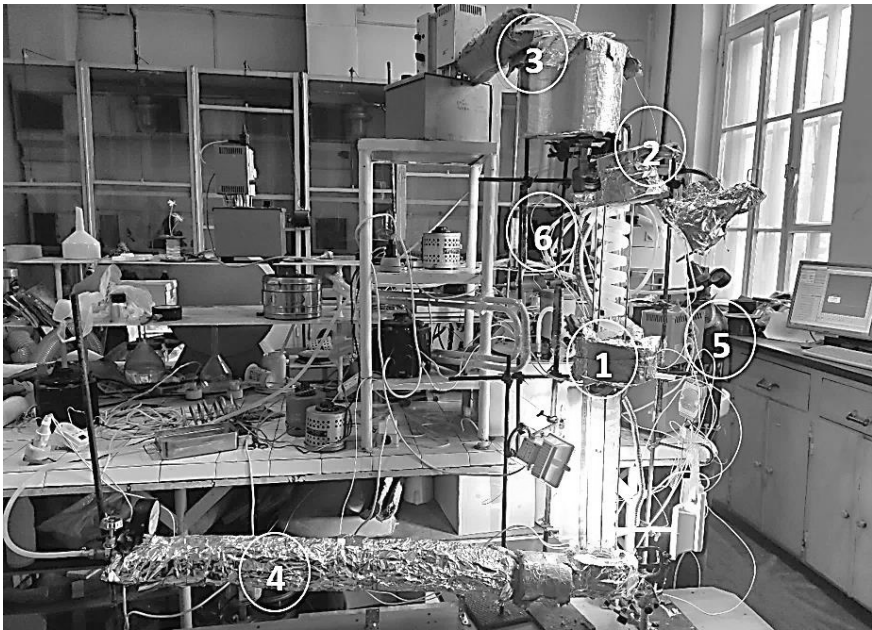


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования барботажа растительного масла: 1 — рабочий участок, 2 — узел отвода газовой фазы, 3 — блок подготовки и подачи исследуемой жидкости, 4 — система подачи и подогрева газовой фазы, 5 — аппаратно-программный комплекс, 6 — блок измерения расхода газа

Fig. 1. Experimental stand for studying bubbling of vegetable oil: 1 — working section, 2 — gas phase removal unit, 3 — block for preparing and feeding the studied liquid, 4 — gas phase feeding and heating system, 5 — hardware and software complex, 6 — gas flow measurement unit

Вспомогательные узлы включают несколько элементов: термостатирующий узел подготовки жидкости с теплоизолированной емкостью и жидкостным нагревателем; система подачи и подогрева газообразного азота; газоотводные и сливные линии.

Измерительная часть экспериментальной установки включает аппаратно-программный комплекс (АПК), разработанный в лаборатории автоматизации и вычислительной техники ВНИИЖиров. АПК позволяет подключать широкий набор внешних устройств сбора и обработки данных УСО (устройство цифро-аналогового преобразования), с использованием модулей семейств I-7000 и M-7000). Связь с устройствами удаленного доступа осуществляется по сети стандарта RS-485. Разработанная программа предоставляет возможность выбора количества каналов и подключения необходимого внешнего оборудования с заданием длительности эксперимента и необходимой частоты дискретизации. Предоставлена возможность подготовки формул параметрических расчетов, выполняемых в режиме online.

Для измерения и контроля температуры установлено 12 термодатчиков — термопар типа ХК (ТА-288).

Система измерения расхода азота включает блок ротаметров типа РМ-А-0,035 ГУЗ, РМ-А-0,16 ГУЗ, РМ-А-0,25 ГУЗ, при этом давление в газовой линии контролируется манометрами типа ТМ.

Фото-видео фиксация проводилась цифровой камерой Olympus OM-D E M5 Mark III с максимальным разрешением 5184×3888 пикселей в режиме макросъемки с освещением тремя LSD светильниками со световым потоком не менее 5000 лм и цветовой температурой не менее 4500 К.

При проведении эксперимента 1500 г подсолнечного масла помещали в теплоизолированную емкость и в мягком режиме подогревали до заданной температуры вне рабочего участка. Одновременно с этим разогревался рабочий участок и подогреватель азота. Затем азот подавался через барботер в рабочий участок и вслед за этим туда заливалось нагретое подсолнечное до уровня 800 мм. После гидродинамической и тепловой стабилизации двухфазной среды производились необходимые измерения параметров и фотофиксация.

При барботаже принято различать несколько основных режимов: пузырьковый, факельный и пенный. Наиболее выгодным по физическим принципам направленной массопередачи при абсорбции считается пузырьковый режим, в котором происходит свободное всплытие пузырей, содержащих удаляемый компонент жидкой фазы, обеспечивается максимальная поверхность раздела фаз F и свободное активное перемешивание жидкости. К тому же предпочтительно иметь пузыри как можно меньшего размера. Это создает наибольшую F при одинаковом интегральном (общем) объеме газовой фазы $V_{г-ж}$, то есть отношение площадей F в двух сравниваемых режимах, обратно-пропорционально отношению размеров пузырей D :

$$F_1/F_2 = D_2/D_1. \quad (1)$$

Согласно исследованиям, проведенным нами ранее для подсолнечного масла [17], и по результатам работ для других жидкостей, например, в [24] установлено, что ско-

рость всплытия w крупных газовых пузырей выше, а значит время взаимодействия пузыря с жидкостью меньше.

Важным обобщенным параметром, характеризующим гидродинамическую обстановку при барботаже, является газосодержание двухфазной системы, которое выражается в виде:

$$\phi = \frac{V_{г-ж}}{V_{г-ж}}, \quad (2)$$

где $V_{г-ж}$ — объем газожидкостной смеси, m^3 .

Этот параметр фактически характеризует мгновенное содержание газовой фазы в системе и однозначно связан через размеры пузырей и их количество с площадью F и со скоростями их всплытия w , то есть характеризует эффективность газожидкостной системы.

В настоящей работе ставилась задача определения объемного газосодержания. Так как рабочий участок имеет по всей длине одинаковый диаметр, то для вычисления ϕ по формуле (2) достаточно знать высоты (уровни) столбов жидкости $h_{ж}$ и газожидкостной среды $h_{г-ж}$. Уровень $h_{ж}$ определяется при выключении подачи газа.

Результаты и обсуждение

Для заданных температур масла и азота в диапазоне 20–115 °С производится подача азота расходом G_N в диапазоне 0,10–2,67 л/мин. Для каждого измеряемого значения расхода фиксируется уровень газожидкостной среды $h_{г-ж}$, который позволяет вычислять газосодержание:

$$\phi = \frac{h_{г-ж} - h_{ж}}{h_{г-ж}}. \quad (3)$$

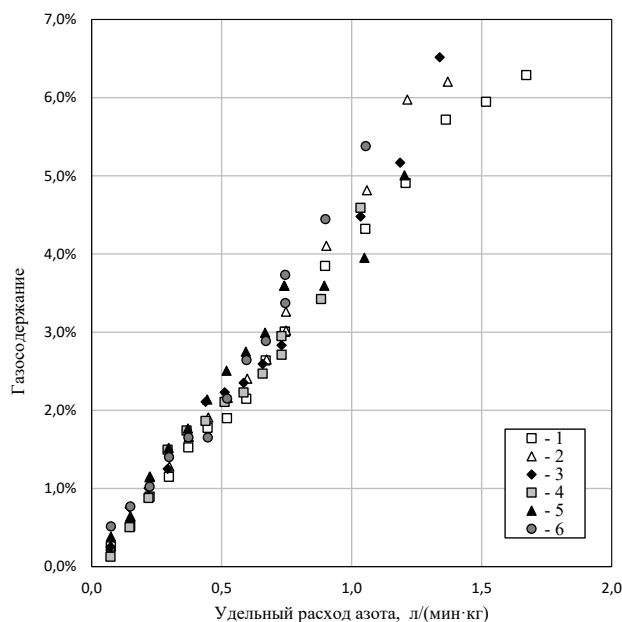


Рис. 2. Зависимость газосодержания от удельного расхода азота при барботаже через слой подсолнечного масла при различных температурах: 1 — $t = 20$ °С; 2 — $t = 55$ °С; 3 — $t = 80$ °С; 4 — $t = 90$ °С; 5 — $t = 100$ °С; 6 — $t = 115$ °С

Fig. 2. Dependence of gas content on the specific nitrogen consumption during bubbling through a layer of sunflower oil at different temperatures: 1 — $t = 20$ °С; 2 — $t = 55$ °С; 3 — $t = 80$ °С; 4 — $t = 90$ °С; 5 — $t = 100$ °С; 6 — $t = 115$ °С

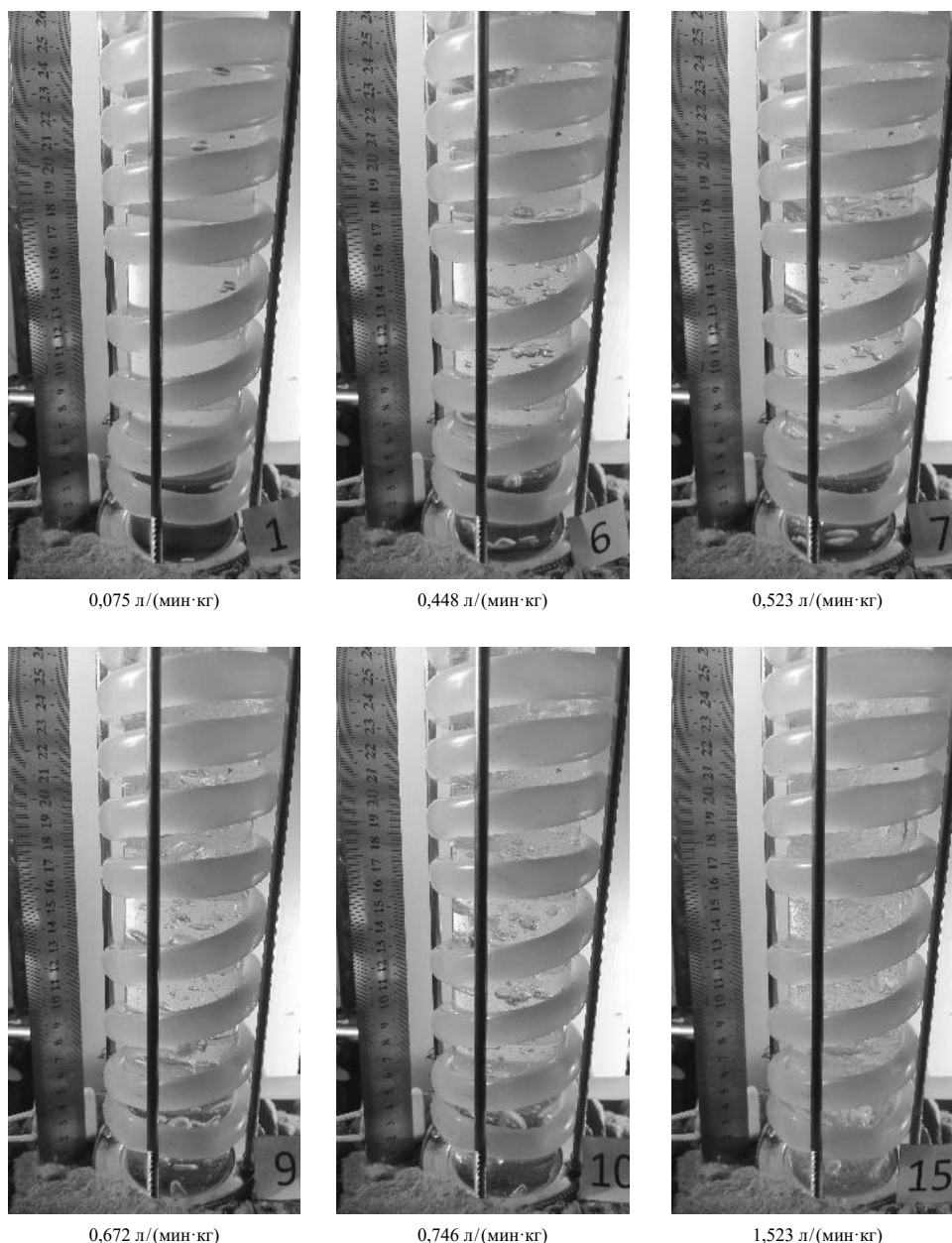


Рис. 3. Эволюция структуры двухфазной системы подсолнечное масло — азот при температуре 95 °С с увеличением расхода газовой фазы

Fig. 3. Evolution of the structure of the two-phase system sunflower oil — nitrogen at a temperature of 95 °C with an increase in the flow rate of the gas phase

Для анализа полученных результатов используется понятие удельного расхода газа, то есть отнесенного к единице массы обрабатываемой жидкости с размерностью л/(мин·кг). Это удобнее для практического применения данных в технологических расчетах систем барботажа. Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 2.

В результате исследований установлено, что газосодержание слабо зависит от температуры взаимодействующих сред и изменяется всего в 1,05–1,15 раза при изменении температуры в почти два раза от 60 °С до 115 °С.

Установлено, что газосодержание существенно зависит от расхода подаваемого газа — азота и эта зависимость носит ярко выраженный линейный характер. При увеличении удельного расхода на 0,5 л/(мин·кг) газосодержание возрастает примерно на 1,0%, а при изменении

удельного расхода от 0,5 до 1,6 л/(мин·кг) газосодержание в 2–2,5 раза.

При фиксированных удельных расходах азота были получены фотоизображения, представленные на рис. 3, по которым отслеживается эволюция структуры двухфазной среды.

В классической монографии А. Г. Касаткина [25] приведен так называемый коэффициент перемешивания при барботаже, характеризующий интенсивность этого процесса:

$$k = \frac{G_r}{F_{пж}} P, \quad (4)$$

где G_r — объемный расход газа, м³/мин; $F_{пж}$ — поверхность спокойной жидкости в аппарате, м²; P — давление газа, бар.

При слабом перемешивании $k=0,24-0,30$, при малоинтенсивном $0,35-0,50$ и интенсивном $0,45-0,60$.

При малых и средних удельных расходах азота $0,075-0,448$ л/(мин·кг) наблюдался характерный пузырьковый режим, при этом размер пузырей колеблется от 3–5 мм до 8–10 мм. Пузыри всплывают свободно по своим траекториям, коалесценции и распада не наблюдается. Происходит слабое перемешивание, так как коэффициент k лежит в диапазоне $0,05-0,32$.

В следующем интервале удельных расходов исследуемого диапазона $0,523-0,672$ л/(мин·кг) наблюдалось увеличение количества пузырей и размеров отдельных пузырей до 10 мм. При этом практически все пузыри двигались вверх единым комплексом. Далее при увеличении удельного расхода в диапазоне начиналась активная коалесценция и одновременный распад пузырей, провоцирующие образование пузырей неправильной и даже рваной формы. Наблюдалось большое разнообразие пузырей. Появлялись очень мелкие пузыри размером менее 1 мм, которые двигались медленно во всех направлениях, даже вниз, увлекаемые хаотичными течением жидкой фазы. Коэффициент перемешивания k лежит в диапазоне $0,37-0,48$, что соответствует малоинтенсивному перемешиванию.

В конце исследуемого диапазона в диапазоне удельных расходов $0,746-1,523$ л/(мин·кг) формировалась сложная структура с пузырями всех размеров. Наблюдалась особо крупные пузыри до 15–20 мм и большое количество мелких до 1 мм, заполнявших практически весь барботажный слой жидкости. В этом диапазоне расходов коэффициент перемешивания k изменяется от $0,53-0,76$, значит имеет место интенсивное перемешивание.

Отдельно следует отметить эксперименты при температуре 20°C . На границе верхнего среза жидкости образовывались отдельные очень крупные пузыри до 25–30 мм. Аналогичная картина наблюдалась при температурах $45-55^\circ\text{C}$, хотя и не в такой яркой форме. Это дает информацию для расширения представлений о физике процесса формирования двухфазной системы, но темпе-

ратурные режимы ниже 70°C не могут применяться для реальной технологии дистилляции мисцеллы, так как температура кипения его основных фракций лежит в пределах $65-69^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что при расходах $0,7-1,2$ л/(мин·кг) над верхним срезом газожидкостной среды при пузырьковом режиме образовывалась мелкая пена. Характерный процесс пенообразования показан на рис. 4.

Однако при температурах среды меньше 50°C пенообразование незначительно. Для других температурных режимов от 50 до 115°C пена при увеличении удельного расхода газа появлялась не сразу, но после $0,7$ л/(мин·кг) начинала быстро увеличиваться в объеме. И в конце концов пена заполняла больший объем рабочего участка.

Относительное содержание пены ϕ_n в двухфазной системе, образующейся при барботаже, можно выразить следующим образом:

$$\phi_n = \frac{V_n}{V_{г-ж} + V_n}, \quad (5)$$

где V_n — объем пены, м^3

Данные по процентному содержанию пены получены аналогично данным по газосодержанию. То есть измерялась высота пены и высота газожидкостной смеси в рабочем участке. На рис. 5 представлена зависимость относительного содержания пены от исходных параметров, таких как расход и температура.

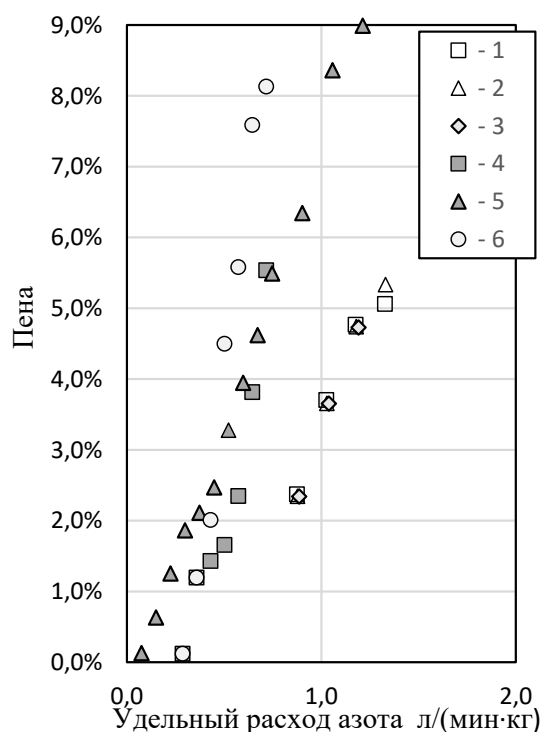


Рис. 5. Содержание пены при барботаже в зависимости от удельного расхода азота при температурах: 1 — 20°C ; 2 — 55°C ; 3 — 80°C ; 4 — 90°C ; 5 — 100°C ; 6 — 115°C

Fig. 5. Foam content during bubbling depending on the specific nitrogen consumption at the temperatures: 1 — 20°C ; 2 — 55°C ; 3 — 80°C ; 4 — 90°C ; 5 — 100°C ; 6 — 115°C



Рис. 4. Процесс пенообразования в двухфазной системе подсолнечное масло-азот

Fig. 4. Foaming process in the two-phase sunflower oil-nitrogen system

Было определено, что при удельных расходах азота более чем 1,3 л/(мин·кг) пена начинала слишком активно влиять на структуру газовой фазы в обрабатываемой жидкости (объеме барботажа) и нарушаются основные принципы свободного движения газовой фазы в жидкости и свободного выхода ее и особенно мелких пузырьков, которые скапливались на границе жидкости и фактически пополняли пену. Большие пузыри, движущиеся с более высокой скоростью «пробивали» пену, увлекая за собой частицы жидкости и образуя брызги.

Развитый пузырьковый режим с интенсивным пенообразованием лежит за пределами организации эффективного технологического режима. При высоком уровне барботажного слоя требуются дополнительные конструктивные элементы для сепарации газожидкостной среды.

Для каждой температуры рабочей среды при увеличении удельного расхода азота наступает такой момент, когда структура переходит в пузырьково-пенную.

В результате экспериментов установлено, что можно считать предельными значения удельного расхода газовой фазы 1,3–1,4 л/(мин·кг), при температурах 90–115 °С при этом содержание пены над барботажным слоем должно быть не более 5–7%.

Заключение

В результате проведенных исследований, на специально созданной экспериментальной установке была разработана и применена методика определения газосодержания при барботаже растительного масла азотом. Таким образом начато комплексное исследование в этой области и первый шаг по гидродинамике сделан. Изуче-

но влияние рабочей температуры и расхода газовой фазы при барботаже растительного масла азотом. Установлено, что газосодержание существенно зависит от расхода подаваемого газа — азота и эта зависимость носит ярко выраженный линейный характер при изменении удельного расхода от 0,073 л/(мин·кг) до 1,93 л/(мин·кг) в экспериментах газосодержание увеличивается от 2% до 5%, то есть примерно в 2–2,5 раза.

Установлены значения удельного расхода азота начиная с 0,36 л/(мин·кг), для температурного интервала от 80 до 115 °С, вызывающие переход пузырькового режима барботажа в двухфазной системе нерафинированное подсолнечное масло — азот в пузырьково-пенный. Определено верхнее технологическое значения удельного расхода азота в 1,3–1,4 л/(мин·кг), при котором происходит быстрая эволюция умеренного пузырьково-пенный режим в высоко турбулентный пузырьково-пенный режим.

Был определен коэффициент перемешивания k , характеризующий интенсивность происходящего при барботаже процесса. В исследованном условиях численные значения k изменялись от 0,05 до 0,76, что соответствует слабому и малоинтенсивному режимам перемешивания, при котором обеспечивается свободное всплытие пузырь газовой фазы.

Таким образом, экспериментальная методика, позволила выявить качественно новые закономерности исследуемых явлений. Информация важна при конструировании аппаратов масложирового производства и полезна для дальнейших исследований в области барботажных двухфазных систем с вязкими жидкостями и в других отраслях техники.

Литература

1. Схалыхов А. А., Блягоз Х. Р., Кошевой Е. П., Верещачин А. Г. Процесс окончательной дистилляции ацетоно-масляной мисцеллы с инертным компонентом // Новые технологии. 2011. № 2. С. 46–49.
2. Вусихис А. С., Леонтьев Л. И., Сергеева С. В. Термодинамическое моделирование фьюмингования шлака медной плавки продуктами конверсии метана кислородом, водяным паром и углекислым газом // Расплавы. 2022. № 5 С. 469–476. DOI: 10.31857/S0235010622050103.
3. Haas T. Schubert C. Eickhoff M. Pfeifer H. A review of bubble dynamics in liquid metals // Metals. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 664. DOI: 10.3390/met11040664.
4. Мешалкин В. П. Панченко С. В., Дли М. И., Бобков В. И., Черновалова М. В. Механизм интенсификации гетерогенной реакции восстановления с выделением пузырьков газа // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 2. С. 192–201. DOI: 10.31857/S0040357120020104.
5. Zeng X. et al. A review on bubble stability in fresh concrete: Mechanisms and main factors // Materials. 2020. Vol. 13. No. 8. pp. 18–20. DOI: 10.3390/ma13081820
6. Прокопеня И. Н. Проточные ферментеры вертикальной конструкции // Энергетика Беларуси. 2022. С. 81–86.
7. Liu Y., Upchurch E. R., Ozbayoglu E. M. Experimental study of single taylor bubble rising in stagnant and downward flowing non-newtonian fluids in inclined pipes // Energies. 2021. Vol. 14. No. 3. pp. 578. DOI: 10.3390/en14030578

References

1. Skhalyakhov A.A., Blagoz H.R., Koshevoi E.P., Vereshchagin A.G. The process of final distillation of acetone-oil miscella distillation with an inert component. New technologies. 2011. No. 2. pp 46-49.
2. Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Sergeeva S.V. Thermodynamic Modeling of the Fuming of Copper Smelting Slag by the Products of Methane Conversion by Oxygen, Water Vapor, and Carbon Dioxide. Russian Metallurgy (Metally). 2022. No. 2. pp. 469-140. DOI: 10.31857/S0235010622050103 (in Russian)
3. Haas T. Schubert C. Eickhoff M. Pfeifer H. A review of bubble dynamics in liquid metals. Metals. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 664. DOI:10.3390/met11040664.
4. Meshalkin V.P. Panchenko S.V., Dli M.I., Bobkov V.I., Chernovalova M.V. Mechanism of the intensification of a heterogeneous reduction reaction with the liberation of gas bubbles. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2020. Vol. 54. No. 2. pp. 304-312. DOI: 10.1134/S0040579520020104 (in Russian)
5. Zeng X. et al. A review on bubble stability in fresh concrete: Mechanisms and main factors. Materials. 2020. Vol. 13. No. 8. pp. 18-20. DOI: 10.3390/ma13081820
6. Prokopenya I. Flow fermenters of vertical design. Energetika Belarusi. 2022. pp. 81-86.
7. Liu Y., Upchurch E. R., Ozbayoglu E. M. Experimental study of single taylor bubble rising in stagnant and downward flowing non-newtonian fluids in inclined pipes. Energies. 2021. Vol. 14. No. 3. pp. 578. DOI: 10.3390/en14030578

8. Ravisankar M., Zenit R. Velocity fluctuations for bubbly flows at small Re // Journal of Fluid Mechanics. 2024. Vol. 1001. pp. A34. DOI: 10.1017/jfm.2024.1123
9. Orthaber U., Zevnik J., Petkovšek R., Dular M. Cavitation bubble collapse in a vicinity of a liquid-liquid interface — Basic research into emulsification process // Ultrasonics sonochemistry. 2020. Vol. 68. pp. 105224. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105224
10. Борзенко Е. И., Усанина А. С., Шрагер Г. Р. Влияние поверхностно-активного вещества на скорость всплытия пузырька в вязкой жидкости // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 84. С. 81–92. DOI: 10.17223/19988621/84/7
11. Дядик А. Н., Кича М. А., Маловик Д. С. Динамика газовой фазы при барботаже в морской воде, содержащей поверхностно-активные вещества // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4–1. С. 167–172. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.019
12. Козлова М. В., Банников А. В., Банникова С. А. Исследование работы термической опреснительной установки с контактным испарителем и компрессией паровоздушной смеси // Вестник ИГЭУ. 2024. № 5. С. 21–30. DOI: 10.17588/2072–2672.2024.5.021–030
13. Богатов Н. А., Болдырев В. С., Савина А. С., Пентюхин Е. И. Применение инфразвукового воздействия в предпосевной обработке семян как альтернатива барботажу // Нанохимия и современные нанотехнологии. 2024. С. 15–17.
14. Патрикеев Е. Э., Китаев Д. А., Константинов И. В. Модернизация процесса зачистки резервуаров для АВИАГСМ // Актуальные вопросы развития естественных и технических наук. 2023. С. 138–140.
15. Косолапова С. М., Завадская М. С., Качина Ю. М. оптимизация процесса очистки эфиров жирных кислот углекислым газом // Технологии переработки отходов с получением новой продукции. 2022. С. 49–52.
16. Лисицын А. Н., Федоров А. А., Волков С. М., Федоров А. В., Романов Н. Н. Гидрогазодинамика всплытия пузырей перегретого водяного пара в подсолнечном масле в процессе барботажа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2022. № 4. С. 11–24. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24.
17. Лисицын А. Н., Федоров А. А., Волков С. М., Федоров А. В., Романов Н. Н. Скорость всплытия и размер пузырей перегретого водяного пара при барботаже в дистилляции мисцеллы подсолнечного масла // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2023. № 3. С. 20–30. DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-3-20-30.
18. Kováts P., Thévenin D., Zähringer K. Influence of viscosity and surface tension on bubble dynamics and mass transfer in a model bubble column // International Journal of Multiphase Flow. 2020. vol. 123. p. 103174. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103174
19. Архипов В. А., Усанина А. С. Экспериментальное исследование влияния природы поверхностно-активного вещества на динамику всплытия группы монодисперсных пузырьков в маловязкой жидкости // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97, № 4. С. 874–883.
20. Кустов А. В., Гончарова Я. С., Межов В. Г., Заболотская Е. А. Исследование скорости газо-жидкостной смеси на ректификационных ступенях при переработке растительного сырья // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 3. С. 219–226. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-3-219-226.
21. Gorelikova A. E., Randin V. V., Chinak A. V., Kashinsky O. N. The effect of the angle of pipe inclination on the average size and
8. Ravisankar M., Zenit R. Velocity fluctuations for bubbly flows at small Re. Journal of Fluid Mechanics. 2024. Vol. 1001. pp. A34. DOI: 10.1017/jfm.2024.1123
9. Orthaber U., Zevnik J., Petkovšek R., Dular M. Cavitation bubble collapse in a vicinity of a liquid-liquid interface—Basic research into emulsification process. Ultrasonics sonochemistry. 2020. Vol. 68. pp. 105224. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105224
10. Borzenko E.I., Usanina A.S., Shrager G.R. Effect of surfactant on bubble rising velocity in viscous liquid. Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 2023. No. 84. pp. 81-92. DOI: 10.17223/19988621/84/7 (in Russian)
11. Dyadik A.N., Kicha M.A., Malovik D.S. Dynamics of the gas phase during barbotage in seawater containing surfactants. Marine intelligent technologies. 2024. No. 4-1. pp. 167-172. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.019 (in Russian)
12. Kozlova M.V., Bannikov A.V., Bannikova S.A. Study of operation of thermal desalination plant with contact evaporator and compression of vapor-air mixture. Vestnik IGEU. 2024. No. 5. pp. 21-30. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.5.021-030 (in Russian)
13. Bogatov N., Boldyrev V., Savina A., Pentyukhin E. The use of infrasound exposure in pre-sowing seed treatment as an alternative to bubbling. Nanochemistry and modern nanotechnology. 2024. pp. 15-17. (in Russian)
14. Patrikeev E.E., Kitaev D.A., Konstantinov I.V. Modernization of the process of cleaning tanks for aviation fuel. Current issues of the development of natural and technical sciences. 2023. pp. 138-140. (in Russian)
15. Kosolapova S. M., Zavadskaya M. S., Kachina Yu. M. Optimizatsiya protsessa ochistki efirov zhirnykh kislot uglekislym gazom // Tekhnologii pererabotki otkhodov s polucheniyem novoy produktsii. 2022. pp. 49-52.
16. Lisitsyn A.N., Fedorov A.A., Volkov S.M., Fedorov A.V., Romanov N.N. Hydro-gas dynamics of bubbles of superheated water vapor in sunflower oil during bubbling. Scientific journal NRU ITMO. Series “Processes and Food Production Equipment”. 2023. No. 4. pp. 11-24. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24 (in Russian)
17. Lisitsyn A. N., Fedorov A.A. , Volkov S. M., Fedorov A. V., Romanov N. N. The rate of floating-up and size of superheated water vapor bubbles during bubbling in the sunflower oil miscella distillation. Scientific journal NRU ITMO. Series “Processes and Food Production Equipment”. 2023. No. 3. pp. 20-30. DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-3-20-30. (in Russian)
18. Kováts P., Thévenin D., Zähringer K. Influence of viscosity and surface tension on bubble dynamics and mass transfer in a model bubble column. International Journal of Multiphase Flow. 2020. Vol. 123. pp. 103174. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103174
19. Arkhipov V.A., Usanina A.S. 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. Engineering and Physics Journal. 2024. Vol. 97. No. 4. pp. 859-868.
20. Kustov A.V., Goncharova Ya.S., Mezhev V.G., Zabolotskay E.A. Investigation of the speed of a gas-liquid mixture during processing of plant raw materials. Conifers of the boreal zone. 2022. Vol. 40, No. 3, pp. 219–226. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-3-219-226. (in Russian)
21. Gorelikova A.E., Randin V.V., Chinak A.V., Kashinsky O.N. The effect of the angle of pipe inclination on the average size and velocity of gas bubbles injected from a capillary into a liquid. Water. 2023. Vol. 15, No. 3, article 560. DOI: 10.3390/w15030560

- velocity of gas bubbles injected from a capillary into a liquid. // Water. 2023, V. 15, no. 3, article 560. DOI: 10.3390/w15030560
22. Li Y., Yang N., Xiao X., Jiang B., Sun Y., Zhang L. Numerical study of the geometric characteristics and kinetic behavior of single bubble rise processes in different liquids. // Physics of Fluids. 2023, V. 35, Is. 7, article 073310. DOI: 10.1063/5.0150547
 23. Liu Z., Li Sh., Ji J. Numerical simulation of the rise of two parallel unequal bubbles in a viscoelastic fluid. Multiphase Science and Technology. 2023. DOI: 10.1615/MultScienTechn.2023047889
 24. Федосеев А. В., Сальников М. В., Остапченко А. Е. Моделирование динамики всплывания одиночного пузыря методом решеточных уравнений Больцмана // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26. № 1. С. 191–200. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.117
 25. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов, 10-е изд., стереотипное, доработанное. Перепеч. с изд. 1973 г. М.: Альянс, 2004. 753 с.
 22. Li Y., Yang N., Xiao X., Jiang B., Sun Y., Zhang L. Numerical study of the geometric characteristics and kinetic behavior of single bubble rise processes in different liquids. Physics of Fluids. 2023, Vol. 35, Is. 7, article 073310. DOI: 10.1063/5.0150547
 23. Liu Z., Li Sh., Ji J. Numerical simulation of the rise of two parallel unequal bubbles in a viscoelastic fluid. Multiphase Science and Technology. 2023. DOI: 10.1615/MultScienTechn.2023047889
 24. Fedoseev A.V., Sal'nikov M.V., Ostapchenko A.E. Modeling of a single bubble dynamics at boiling by lattice Boltzmann method. Siberian Journal of Industrial Mathematics. 2023. Vol. 26, No. 1, pp. 191-200. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.117. (in Russian)
 25. Kasatkin A.G. Basic processes and devices of chemical technology: Textbook for universities, 10th ed., stereotyped, modified. Repechage. since the 1973 edition, Moscow: Alliance, 2004. 753 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Кульпинов Андрей Сергеевич

Аспирант образовательного центра
«Энергоэффективные инженерные системы»
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9; ведущий инженер ВНИИЖиров, 191119,
Санкт-Петербург, ул. Черняховского, 10, askulp@yandex.ru.
ORCID: 0009-0007-2006-342X

Волков Сергей Михайлович

К. х. н., старший научный сотрудник отдела исследования
жиров ВНИИЖиров, 191119, Санкт-Петербург,
ул. Черняховского, 10, volkovsm@vniig.org

Ефимов Андрей Владимирович

ВНИИЖиров, 191119, Санкт-Петербург, ул. Черняховского, 10,
efimov@vniig.org.
ORCID: 0000-0003-1137-3665

Федоров Александр Валентинович

Д. т. н., доцент факультета биотехнологий
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9, ВНИИЖиров, 191119,
Санкт-Петербург, ул. Черняховского, 10,
afedorov@itmo.ru

Information about authors

Kulpinov Andrey S.

Postgraduate student of Educational Center «Energy Efficient
Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St.
Petersburg, Lomonosov str., 9; Lead engineer of All-Russian
Research Institute of Fats, 191119, Russia, St. Petersburg,
Chernyakhovskogo str. 10, askulp@yandex.ru.
ORCID: 0009-0007-2006-342X

Volkov Sergey M.

Ph. D., Senior researcher of the Department of Fat Research
of All-Russian Research Institute of Fats, 191119, Russia, St.
Petersburg, Chernyakhovskogo str. 10, volkovsm@vniig.org

Efimov Andrey V.

All-Russian Research Institute of Fats, 191119, Russia, St.
Petersburg, Chernyakhovskogo str. 10, efimov@vniig.org.
ORCID: 0000-0003-1137-3665

Fedorov Aleksandr V.

D. Sc., Associate professor of the Faculty of Biotechnology of
ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov
str., 9, Fat Research of All-Russian Research Institute of Fats,
191119, Russia, St. Petersburg, Chernyakhovskogo str. 10,
afedorov@itmo.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»