

Научная статья

УДК 532.5;665.1/.3

DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-3-20-30

## Скорость всплытия и размер пузырей перегретого водяного пара при барботаже в дистилляции мисцеллы подсолнечного масла

А.Н. Лисицын<sup>1</sup>, А.А. Федоров<sup>2</sup>, С.М. Волков<sup>1</sup>, А.В. Федоров<sup>1,2\*</sup>, Н.Н. Романов<sup>3</sup><sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт жиров, Россия, Санкт-Петербург<sup>2</sup>Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, \*afedorov@ifmo.ru<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет ГПС МЧС им. Е.Н. Зиничева  
Россия, Санкт-Петербург

**Аннотация.** Экспериментально определялись динамические и геометрические параметры всплывающих пузырей перегретого водяного пара при барботаже через слой высококонцентрированной мисцеллы подсолнечного масла. Получены данные для диапазонов режимных параметров, соответствующих реальному технологическому процессу дистилляции мисцеллы: температура перегретого водяного пара от 120 до 180°C; массовая концентрация растворителя в мисцелле в пределах 0,0–0,5% масс.; температура мисцеллы в объеме поддерживалась в диапазоне от 108 до 115°C. Представлены формулы для расчета диаметров пузырей и скорости их всплытия, учитывающие концентрацию мисцеллы, диаметр отверстия барботера и температуру перегретого водяного пара. Это позволяет более точно рассчитывать геометрические параметры барботажной зоны дистилляторов и режимы ведения процесса, что в конечном счете предполагает ресурсо- и энергосбережение.

**Ключевые слова:** производство растительного масла; дистилляция мисцеллы; перегретый водяной пар; барботаж; паровой пузырь; всплытие пузырей пара; скорость всплытия пузырей; диаметр пузырей

Original article

## The rate of floating-up and size of superheated water vapor bubbles during bubbling in the sunflower oil miscella distillation

Alexander N. Lisitsyn<sup>1</sup>, Alexey A. Fedorov<sup>2</sup>, Sergey M. Volkov<sup>1</sup>, Alexander V. Fedorov<sup>1,2\*</sup>, Nikolai N. Romanov<sup>3</sup><sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Fats, St. Petersburg, Russia<sup>2</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia, \*afedorov@ifmo.ru<sup>3</sup>St. Petersburg of State Fire Service of Emercom University n.a. E.N. Zinichev St. Petersburg, Russia

**Abstract.** The dynamic and geometrical parameters of floating-up bubbles of superheated water vapor were experimentally determined during bubbling through a layer of highly concentrated miscella of sunflower oil. Experimental data were obtained for the ranges of operating parameters appropriate to the actual technological process of vegetable oil miscella distillation: the temperature of superheated water vapor was from 120°C to 180°C; the mass concentration of the solvent in the miscella was in the range of 0,0–0,55% (w/w); the temperature of the miscella was maintained in the range from 108°C to 115°C. As a result, formulas for calculating the bubbles diameters and their floating-up rate are presented, taking into account the miscella concentration, the diameter of the bubbler holes, and the temperature of superheated water vapor. This allows to calculate the geometric parameters of the bubbling zone for distillation apparatuses and the modes of the process more accurately, which ultimately implies resource and energy saving.

**Keywords:** vegetable oil production; miscella distillation; superheated water vapor; bubbling; steam bubble; floating-up steam bubbles; the rate of floating-up of bubbles; diameter of bubbles

### Введение

В промышленном производстве растительных масел экстракционным способом образуется раствор, называемый мисцеллой. Этот раствор, состоящий из растительного масла и органического растворителя, подвергается тепловому воздействию с целью удаления последнего путем перевода его в газообразное состояние. Как показывает практика, самый ответственный и сложный этап дистилляции мисцеллы – это окончательная стадия удаления растворителя. Здесь, как правило, применяют барботаж – пропускание перегретого водяного пара в виде пузырей через слой высококонцентрированной мисцеллы. В окончательном дистилляторе зону барботажа размещают в нижней его части. Подробное описание барботажных узлов приведено в ряде книг по производству растительных масел [1-6]. Барботаж, как эффективный процесс тепломассообмена, применяется для обеспечения большой

площади межфазной поверхности при прямом контакте взаимодействующих сред. В процессе свободного всплытия паровых пузырей в него из мисцеллы переходит растворитель в газообразной форме, тем самым образуя в нем уже смесь газов. Постепенно двигаясь вверх, пузырь «наполняется» парами растворителя и в итоге покидает слой жидкой фазы. При выборе и обосновании конструкции барботажного узла встают следующие вопросы:

- какова геометрия как самой зоны барботажа, так и барботера;
- как правильно подобрать режимные параметры водяного пара;
- как обеспечить равномерное распределение паровых пузырей по всему объему жидкости при максимальной площади раздела фаз;
- как выбрать время обработки высококонцентрированной мисцеллы. На эти вопросы можно дать ответ только при детальном изучении процессов всплытия пузырей.

Барботаж как газожидкостная система имеет несколько режимов, как это, например, представлено в [7]: конвективно-пузырьковый, пузырьковый и факельный или канальный. Наиболее эффективным является пузырьковый режим, когда в жидкости всплывает большое количество пузырей пара примерно равного размера, что называется «группой» или «ансамблем». При факельном режиме пузыри, выходящие из одного отверстия, сливаются вместе как бы в единый канал, по которому фактически начинает двигаться пар. При этом, большей частью он просто «прошивает» слой обрабатываемой жидкости и вырывается на поверхность, активно не взаимодействуя с мисцеллой, а вот начальный режим барботажа (конвективно-пузырьковый) не создает нужной совокупной поверхности раздела фаз. При барботаже мисцеллы возможен излишний перегрев масла, а также его обводнение за счет преждевременной конденсации водяного пара. Водяной пар должен быть перегретым и сухим. Кроме того, водяной пар напрямую контактирует с растительным маслом, поэтому требования к его качеству очень высоки. Все это определяет затраты на подготовку такого водяного пара, и в конечном счете его удельный расход на единицу продукции, что влияет на ее себестоимость.

Нашим научным коллективом подробно изучается процесс барботажа растительного масла. В своих публикациях, и частности в [8], мы приводили подробный обзор исследований по этой теме, поэтому остановимся еще на некоторых интересных работах, не вошедших в предыдущий обзор и подтверждающих актуальность темы выбранного нами исследования. Есть как теоретические проработки, так и результаты экспериментов.

В публикации [9] представлена так называемая гибридная модель на основе метода сеточных уравнений Больцмана и уравнения теплопроводности. Получены зависимости частоты отрыва и отрывного диаметра пузыря в зависимости от лиофобной зоны. Показано, что частота отрыва пузыря увеличивается с температурным перегревом.

В работе [10] разработана и протестирована одномерная кинетическая модель на основе экспериментальных данных из литературы по паровой газификации масла и паровой газификации биомассы в двух отдельных газификаторах с барботажным псевдооживленным слоем. Увеличение коэффициента рециркуляции повышает конверсию воды и химическую эффективность за счет снижения конверсии углерода и тепловой эффективности процесса газификации биомассы. Авторы показали, что при интегрированном процессе возможна дополнительная эффективность более 30%.

Глубиной исследований отличаются работы в области нефтехимии. В публикации [11] приведены результаты, позволяющие эффективно воздействовать на процесс пенообразования при добыче так называемой тяжелой нефти. В работе [12] авторами было обнаружено, что увеличение расхода газа способствовало увеличению размера образующихся пузырьков, в то время как вязкость жидкости оказывала ингибирующее влияние на увеличение размера образующихся пузырьков. Кроме того, рассматривалось изменение скорости подъема пузырька и проведен анализ силы его подъема. Там же предложена новая модель коэффициента лобового сопротивления, применимая к жидкостям на нефтяной основе. Наконец, были измерены изменения количества растворенного кислорода в жидкости для анализа характеристик массопереноса.

В статье [13] приводятся результаты определения скорости вращения газожидкостных смесей при гидролизе растительного сырья, как источника биотоплива.

В одной из последних диссертаций [14] в области применения барботаж в металлургии показано, что наиболее термодинамически эффективным вариантом метода является насыщение расплава оксидными включениями при взаимодействии с кислородом. В процессе продувки в расплаве формируются кислородные пузыри, покрытые непроницаемой для водорода оксидной пленкой. При всплытии происходит адсорбция водорода на внешней поверхности пленки. Возможно, предложенная автором модель может быть апробирована и для условий барботажа высококонцентрированной мисцеллы.

Активно продолжают исследования по изучению взаимодействия газожидкостных сред при флотации сточных вод [15]. В области биотехнологий ученые стали заметно больше уделять внимания физическим основам газожидкостных систем. Так в работе [16] приводится математическая модель такой системы, позволяющая рационально управлять биотехнологическим процессом.

Наиболее близкой к теме нашего исследования является публикация [17], в которой описывается процесс окончательной дистилляции ацетоно-масляных мисцелл в технологии очистки фосфатидных концентратов с азотом.

Явление коалесценции изучалось в работе [18], в которой исследование диаметров газовых пузырьков проводилось методом теневой фотосъемки. Были получены значения среднего диаметра и скорости пузырьков в зависимости от угла наклона трубы. Построена карта режимных параметров, при которых пузырьки газа образуют устойчивую структуру — цепочку пузырьков одинакового диаметра.

В исследовании [19] отмечено, что характеристика одиночного пузырька в двухфазном потоке газ–жидкость является важнейшей, но нерешенной проблемой как в науке, так и в промышленности. Полученные данные указывают на то, что с увеличением вязкости жидкости скорость подъема пузырька уменьшается, и он имеет тенденцию колебаться. Коэффициент деформации пузырька и степень флуктуации повышаются с увеличением начального диаметра пузырька и уменьшаются с увеличением вязкости жидкой фазы. Кроме того, по мере снижения поверхностного натяжения жидкости пузырь становится более склонным к разрыву, и количество разрывов увеличивается. Поле течения внутри пузырька можно разделить на три категории: «тип двойного основного вихря», «тип двойного основного вихря с разделенным вихрем» и «тип двойного основного вихря с рассеянным вихрем». Скорость достигает своего максимума в центре каждого типа вихря, а скорость на границе раздела изменяется по мере изменения формы границы раздела пузырьков. Такие работы закладывают основу для изучения поля течения внутри пузырька и повышает предсказуемость проектирования газожидкостного оборудования.

В ходе экспериментов [20] изучалось взаимодействие двух параллельных неравномерных пузырьков в вязкоупругой жидкости в сочетании с моделью поверхностного натяжения для отслеживания границы раздела газ–жидкость. Было исследовано влияние диаметра пузырьков, начального расстояния между пузырьками и реологических свойств жидкости на подъем, разделение и сближение двух пузырьков. Изучены свойства поля течения и распределение вязкоупругих напряжений вокруг пузырьков. По мере увеличения расстояния между пузырьками максимальная и конечная скорости двух пузырьков увеличиваются, а относительное положение пузырьков изменяется, когда они соприкасаются. При увеличении времени релаксации время контакта пузырьков снижается, маленькие пузырьки, как правило, имеют перевернутую каплевидную форму, а большие пузырьки имеют меньшую деформацию и отсутствие острого хвоста. По мнению авторов, время релаксации непосредственно влияет на накопление вязкоупругого напряжения, приводя к изменению скорости пузырьков при контакте, и их максимальная и конечная скорости увеличиваются. Сделан интересный вывод, что пузырьки в высокоэластичных жидкостях более подвержены негативным следовым явлениям.

Работа [21] хотя и посвящена газожидкостным системам при несколько других условиях, а именно в узких каналах, представляет методический интерес. Ее результаты могут оказать влияние на формирование физических представлений о процессе барботажа при дистилляции мисцеллы растительного масла. Авторы провели сравнительный анализ влияния потока газа и концентрации NaCl на форму, размер, орбиту движения, скорость и расстояние по вертикали между пузырьками и создали математическую модель слияния пузырьков неправильной формы разных размеров. Был исследован механизм коалесценции пузырьков при перемешивании с донным дутьем и проанализирована согласованность между предсказанными моделью и экспериментальными результатами, чтобы

определить диапазоны, в которых модель может быть применена. При высоком расходе газа, низкой концентрации жидкости и высоких скоростях первого и последующих пузырьков двухфазный поток газ–жидкость был более хаотичным, и вероятность столкновения между пузырьками была больше; следовательно, слияние происходило раньше. Авторы создали математическую модель слияния пузырьков для анализа их движения после слияния. Результаты, предсказанные с использованием модели, на 70–78% соответствовали экспериментальным данным.

Ряд ученых представили [22] алгоритм трехмерной реконструкции на основе лазерного сканирования для достижения простых и эффективных измерений в вертикальном пузырьковом потоке. Серия изображений срезов снималась высокоскоростной камерой, а затем предлагался модифицированный двумерный алгоритм взаимной корреляции для достижения выделения пузырьков и сопоставления. На основе реконструированных структур течения пузырькового потока измерялись скорости пузырьков и их распределение в различных циклах сканирования. По статистике, размеры пузырьков в основном сосредоточены в пределах 1,8–2,2 мм. Доли пустот рассчитывались для различных скоростей потока газа с относительными погрешностями, в основном, в пределах  $\pm 10\%$ . При сравнении экспериментальных и теоретических результатов относительные погрешности средней доли пустот составляли менее 8%, что указывает на более высокую точность реконструкции. Обобщение результатов исследований в области барботажа вошли в монографии, вышедшие в 2023 году [23, 24].

Все изложенное подтверждает актуальность темы исследования, однако, как уже было отмечено в предыдущей работе [8], пока идет накопление данных и попытки моделировать процессы для конкретных условий, а проведение экспериментальных исследований дает наиболее точную информацию об особенностях процесса барботажа для различных условий. Таким образом, цель данной работы – исследование барботажа мисцеллы подсолнечного масла перегретым водяным паром для определения динамических и геометрических параметров всплывающих пузырей.

### Материалы, оборудование и методы исследования

Объектом исследования в рамках данной работы выступил процесс барботажа мисцеллы подсолнечного масла перегретым водяным паром.



Рисунок 1. Общий вид экспериментальной установки для исследования барботажа  
Figure 1. General view of the experimental unit for the study of bubbling

При проведении экспериментов использовалась установка, созданная ранее специалистами ВНИИ Жиров, Университета ИТМО и Университета ГПС МЧС РФ. Общий вид установки представлен на рисунке 1. В рамках исследования рассматривалось всплытие пузырей перегретого пара из одиночного отверстия барботера. Определялись размеры пузырей, дистанция между ними и скорость их всплытия в зависимости от режимных параметров: концентрации мисцеллы, температуры перегретого водяного пара, диаметра отверстий барботера. Температура мисцеллы в объеме поддерживалась в диапазоне

108–115°C. Температура перегретого водяного пара была в пределах от 120 до 180°C. После выхода на устойчивый режим барботажа осуществляли фото и видео фиксацию процесса всплытия пузырей. Полученные графические материалы обрабатывали при помощи специальных и стандартных компьютерных средств. Подробное описание и принцип работы экспериментальной установки, а также метод обработки экспериментальных данных (фото- и видеоматериалов) представлены в публикации [8].

Для приготовления мисцеллы использовалось подсолнечное масло. Один из определяющих его качество физико-химических показателей, а именно жирнокислотный состав, приведен в таблице. В качестве растворителя использовался гексан, который вводился в холодном режиме в заданном количестве при тщательном перемешивании. Относительная мольная доля масла  $x_m$  была в диапазоне 0,955–1,000, что соответствовало диапазону массовой концентрации растворителя в мисцелле в пределах 0,0–0,5% масс. Именно в этом диапазоне проводились исследования, так как он соответствует реальному процессу при дистилляции мисцеллы. Под мольной долей принимается величина, определяемая формулой

$$x_m = \frac{1}{1 + \frac{M_m}{M_p} \cdot \frac{(100 - C_m)}{C_m}}$$

где  $M_m$  – средняя молекулярная масса подсолнечного масла, принимается 880 г/моль;

$M_p$  – молекулярная масса гексана, 86,2 г/моль;

$C_m$  – массовая концентрация масла в мисцелле, % масс.

Таблица. Физико-химический показатель качества нерафинированного подсолнечного масла – жирнокислотный состав

Table. Physico-chemical indicator of the quality of unrefined sunflower oil – fatty acid composition

Название жирной кислоты	Условное обозначение	Подсолнечное масло линолевого типа, %
миристиновая	C 14:0	0,1
пальмитиновая	C 16:0	6,2
пальмитолеиновая	C16:1	0,1
стеариновая	C 18:0	3,3
олеиновая	C18:1	27,7
линолевая	C 18:2	61,2
линоленовая	C 18:3	0,1
арахиновая	C 20:0	0,3
гондоиновая	C 20:1	0,2
эйкозодиеновая	C 20:2	–
бегеновая	C 22:0	0,7
эруковая	C 22:1	–
лигноцериновая	C 24:0	0,1

## Результаты и их обсуждение

Весь объем, в котором осуществляется барботажа мисцеллы перегретым водяным паром, можно разделить на условные зоны:

- «Стартовая» – у поверхности барботера вблизи отверстия, в которой происходило начало образования пузырей, их рост и отрыв от барботера;
- «Начальная» или «ускорения» – набор скорости всплытия пузырей;
- «Активная» – начинается после зоны ускорения и заканчивается вблизи поверхности жидкости;
- «Поверхностная» – у поверхности жидкости, включает вскрытие и собственно выход пара в пространство над жидкостью.

Каждая из этих зон представляет интерес для исследований. В настоящей работе представлены результаты, относящиеся к «активной» зоне – это примерно 90–95% от всей высоты слоя жидкости, характерные изображения пузырей показаны на рисунке 2.

При изучении процесса барботажа мисцеллы отмечено, что пузыри могут принимать различные формы, в некоторых случаях деформированные и «неправильные» (в сравнении со сферическим пузырем). Это, вероятно, вызвано неравномерностью концентраций растворителя на поверхности раздела фаз,

который возникает при барботаже мисцеллы наряду с градиентом температур, что несомненно требует дополнительного изучения.

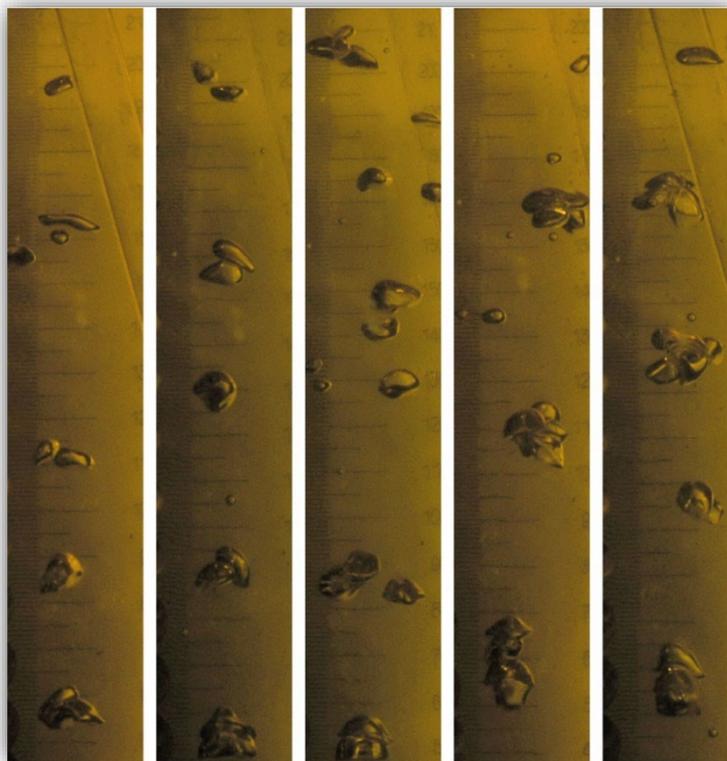


Рисунок 2 – Характерные форма, размеры и дистанция при всплытии пузырей в активной зоне в мисцелле концентрацией растворителя 0,25% масс., диаметр отверстия 2 мм, температуре мисцеллы 110°C, температура пара 160°C

Figure 2. Characteristic shape, size and distance when bubbles floating-up in active zone in a miscella with a solvent concentration of 0.25% (w/w), hole diameter of 2 mm, miscella temperature of 110°C, and steam temperature of 160°C

При обработке опытных данных принималась схема всплытия, показанная на рисунке 3. Большинство пузырей при развитом пузырьковом режиме имеют форму, хотя и симметричную, но отличающуюся от идеального шара. За основу был взят эллипсоид — это симметричная геометрическая фигура сфероид или «сплюснутый шар». За эквивалентный диаметр пузырей  $d$  принимается диаметр шара, объем которого равен объему эллипсоида. Формула для расчета выглядит так

$$d = \sqrt[3]{L^2 \cdot l},$$

где  $L$  – ось сфероида (горизонтальная);

$l$  – малая ось сфероида (вертикальная).

Эквивалентный объем пузыря определяется по формуле

$$V_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot d^3}{6}.$$

В расчетах участвуют и другие параметры, например отрезок времени  $\Delta\tau$ , за который пузырь проходит расстояние  $\Delta H$ . По значению этих величин вычисляется скорость всплытия пузырей

$$w = \frac{\Delta H}{\Delta\tau}.$$

Дистанция  $\Delta h$  – это расстояние от верхнего края предыдущего пузыря до нижнего края следующего.  $\Delta\tau_{\text{ф}}$  – это отрезок времени роста пузыря от зарождения до отрыва.

$$\Delta\tau_{\text{ф}} = \frac{\Delta h}{w}.$$

Дистанция между краями пузырей связана с шагом  $\Delta H$  между ними следующим образом

$$\Delta h = \Delta H - d.$$

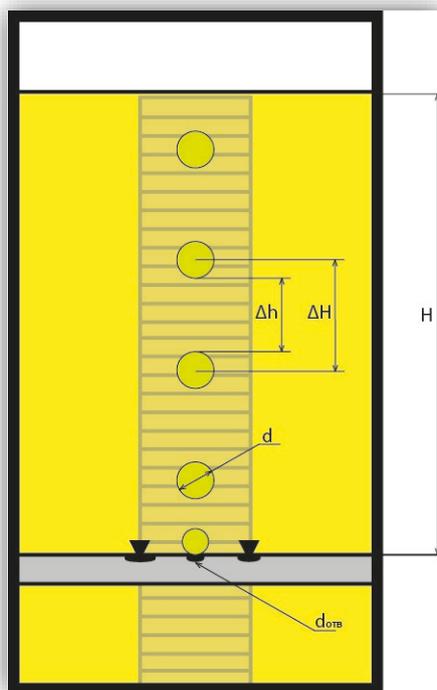
Объемный расход пара, вычисленный через объем пузырей и скорость всплытия, определяется формулой

$$G_V = \frac{V_{\text{п}} \cdot w}{\Delta H}.$$

Такой важный параметр, как скорость прохода пара через отверстие определяется формулой

$$w_{\text{отв}} = \frac{4 \cdot V_{\text{п}} \cdot w}{\pi \cdot d_{\text{отв}}^2 \cdot \Delta h}.$$

Когда дистанция между пузырями значительно больше их диаметра, ее можно считать равной шагу между ними, но это крайне редкий случай движения пузырей, характерный для малых расходов.



*Рисунок 3. Схема всплытия пузырей перегретого водяного пара из одного отверстия в мисцелл: H – высота слоя жидкости, ΔH – шаг между пузырями, Δh – дистанция между соседними пузырями, d –средний диаметр всплывающих пузырей. d<sub>отв</sub> – диаметр отверстия барботера*

*Figure 3. The scheme of floating-up of bubbles of superheated water vapor from one hole in the miscella: H is the height of the liquid layer, ΔH is the step between the bubbles, Δh is the distance between adjacent bubbles, d is the average diameter of the pop-up bubbles. d<sub>отв</sub> – diameter of the bubbler hole*

Изменение размеров пузырей, полученное на основе обработки экспериментальных данных, представлены на рисунке 4, из которого видно, что при увеличении диаметра отверстия диаметр пузырей увеличивается. Кроме того, при увеличении температуры перегретого водяного пара размер пузырей увеличивается, а вот при увеличении мольной доли масла в мисцелле размер пузырей уменьшается.

После обработки экспериментальных данных получены графические зависимости изменения скорости всплытия пузырей с учетом их размера и температуры пара, представленные на рисунке 5.

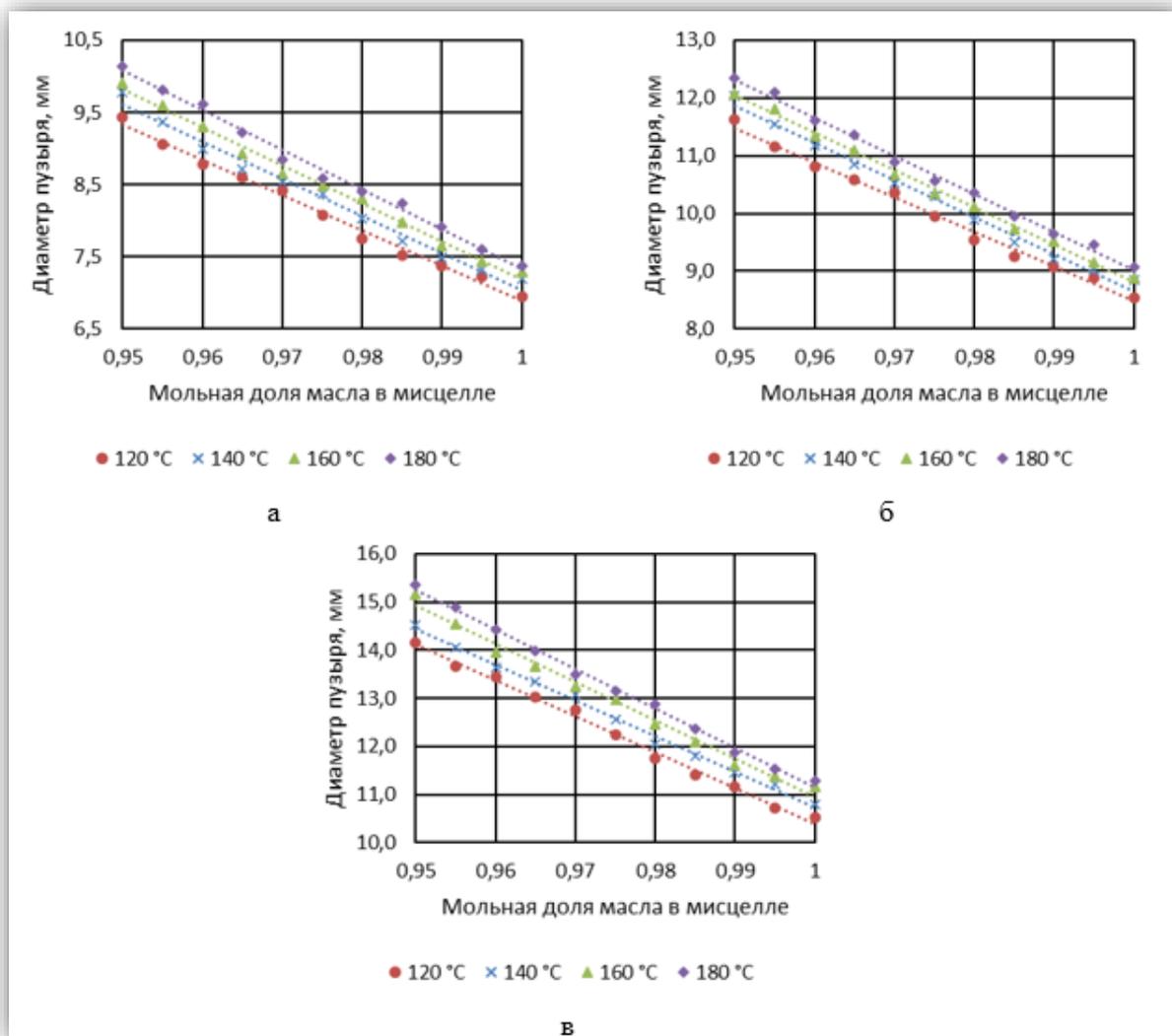


Рисунок 4. Зависимости размера пузырей от мольной доли масла в мисцелле от 0,95 до 1,00 и температуры перегретого водяного пара от 120 до 180 °С для разных диаметров отверстий барботера: 1 мм (а), 2 мм (б) и 4 мм (в)  
 Figure 4. Dependence of the bubble size on the molar fraction of oil in the miscella from 0.95 to 1.00 and the temperature of superheated water vapor from 120 to 180 °С for different diameters of the bubbler holes: 1 mm (a), 2 mm (б) and 4 mm (в)

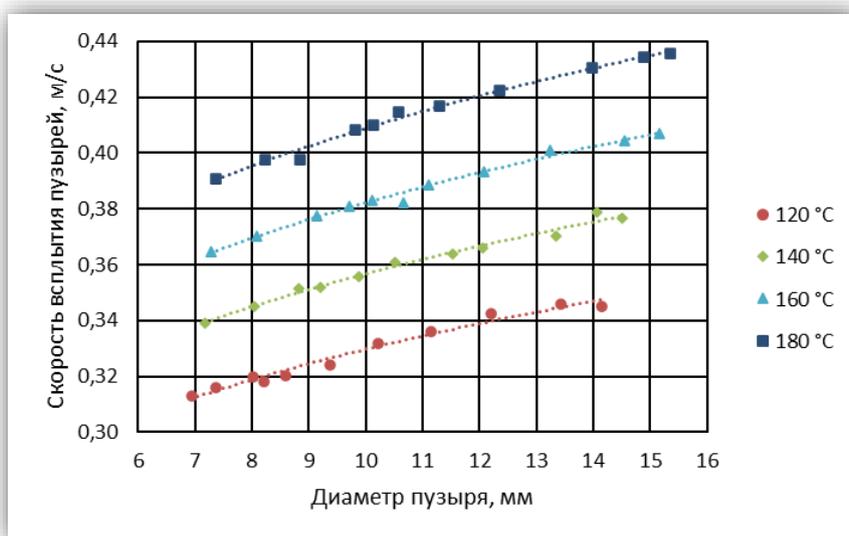


Рисунок 5. Зависимость скорости всплытия пузырей от их размера  
 Figure 5. Dependence of the bubble ascent rate on their size

Скорость всплытия пузырей возрастает при увеличении диаметра пузырей. Косвенно она соответственно зависит от тех же параметров, что и размер пузырей, то есть от температуры, мольной доли масла в мисцелле и температуры перегретого водяного пара.

Практически все известные формулы для расчета размеров пузырей и скорости всплытия предлагают использовать несколько параметров, которые включают важнейшие теплофизические свойства. По мере всплытия парового пузыря происходит изменение количественного состава мисцеллы и газовой фазы внутри пузыря, а также изменение температуры, поэтому теплофизические свойства существенно меняются. Наличие ПАВ в растительном масле усложняет определение параметров, в связи с чем целесообразно взять за основу несколько формул, получивших широкое распространение, в которые возможно внесение соответствующих коррективов, используя полученные экспериментальные данные по барботажу мисцеллы в настоящей работе. В результате получены формулы для расчета среднего диаметра  $d$  (м) и скорости всплытия  $w$  (м/с) пузырей перегретого водяного пара в мисцелле подсолнечного масла, имеющей температуру 108–115°C:

$$d = 0,00278 \frac{T_n^{0,5} \cdot d_o^{0,3}}{x_m^6},$$
$$w = (0,00271 \cdot T_n - 0,4084) \cdot d^{0,15},$$

где  $T_n$  – температура перегретого водяного пара, К;

$d_o$  – диаметр отверстия барботера, м;

$x_m$  – мольная доля масла в мисцелле на входе в барботажную зону.

Величина достоверности аппроксимации уравнения для расчета среднего диаметра  $d$  составляет  $R^2 = 0,99$ , а для скорости всплытия  $w$  –  $R^2 = 0,98$ .

## Заключение

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, площадь межфазной поверхности, что в свою очередь позволяет определять:

- геометрические параметры дистилляторов при конструировании;
- время взаимодействия фаз;
- площади межфазных поверхностей;
- температурное поле в барботажной зоне.

Таким образом, появляется возможность создавать оборудование с рациональным использованием энергетических ресурсов и минимальной металлоемкостью, обеспечивающее заданное качество производимого экстракционного масла.

## Литература

1. Руководство по технологии получения и переработки растительных масел и жиров. В 6 т. Т. 1. Книга 1. Прием, послеуборочная обработка и хранение масличных семян. Подготовительные операции при переработке масличных семян. Прессовый способ производства растительных масел / под ред. А.Г. Сергеева. Л.: ВНИИЖ, 1975. 382 с.
2. Руководство по технологии получения и переработки растительных масел и жиров. В 6 т. Т. 1. Книга 2. Экстракционный способ производства растительных масел / под ред. А.Г. Сергеева. Л.: ВНИИЖ, 1974. 331 с.
3. Щербаков В.Г. Технология получения растительных масел. М.: Колос, 1992. 206 с.
4. Калошин Ю.А. Технология и оборудование масложировых предприятий. М.: Academia : ИРПО, 2002. 360 с.
5. Мхитарьянц Л.А., Корнена Е.П., Мартовщук Е.В., Мустафаев С.К. Технология отрасли (Производство растительных масел). СПб.: ГИОРД, 2009. 352 с.
6. Кошевой Е.П. Технологическое оборудование пищевых производств. Расчетный практикум. М.: Изд-во Юрайт, 2023. 203 с.
7. Тышкевич А.А., Лузгачев В.А., Точка В.Н. Исследование режимов протекания газа через слой жидкости // Вестник Тамбовского университета Серия: естественные и технические науки. 2001. Т. 6. № 1. С. 89–90.
8. 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

9. Федосеев А.В., Сальников М.В., Остапченко А.Е. Моделирование динамики всплытия одиночного пузыря методом решеточных уравнений Больцмана // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26. № 1. С. 191–200. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.117
10. Hejazi B. Heat integration and waste minimization of biomass steam gasification in a bubbling fluidized bed reactor. *Biomass and Bioenergy*. 2022, V. 159, article 106409. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106409
11. Zhao F., Wang K., Li G., Zhu G., Liu L., Jiang Y. A review of high-temperature foam for improving steam flooding effect: mechanism and application of foam. *Energy Technology*. 2022, V. 10, no. 3, article 2100988. DOI: 10.1002/ente.202100988
12. Mei L., Chen X., Liu B., Zhang Z., Hu T., Liang J., Wei X., Wang L. Experimental study on bubble dynamics and mass transfer characteristics of coaxial bubbles in petroleum-based liquids. *ACS Omega*. 2023, V. 8, no. 19, pp. 17159–17170. DOI: 10.1021/acsomega.3c01526
13. 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
14. Шеффер А.А. Формирование композиционного материала методом продувки гидрогенизированного расплава на основе алюминия кислородом: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2023. 147 с.
15. Антонова Е.С., Карпикова В.О. Применение эжекционной системы аэрации при флотационной очистке поверхностных сточных вод // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 2. С. 96. DOI: 10.23670/IRJ.2023.128.96
16. Болдырева В.Г., Скичко А.С. Математическое моделирование массообменных процессов при культивировании хлореллы в фотобиореакторе с аэрацией // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 11. С. 20–22.
17. Схалыхов А.А., Блягоз Х.Р., Кошевой Е.П., Верещагин А.Г. Процесс окончательной дистилляции ацетоно-масляной мисцеллы с инертным компонентом // Новые технологии. 2011. № 2. С. 46–49.
18. 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, V. 15, no. 3, article 560. DOI: 10.3390/w15030560
19. 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
20. 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
21. Chen R., Gao Ch., Li Sh., Liu Z., Meng J., Xu J., Wang H. Mechanism of bottom-blown bubble coalescence in narrow channels. *International Journal of Multiphase Flow*. 2023, V. 158, article 104305. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104305
22. Li S., Xue T., Li Z. A simple 3D reconstruction algorithm based on laser scanning: Research on flow characteristics of bubbles rising vertically in liquid phase. *Chemical Engineering Science*. 2023, V. 276, no. 10, article 118796. DOI: 10.1016/j.ces.2023.118796
23. Терехов Л.Д., Воловник Г.И., Терехова Е.Л. Методы очистки воды. М.: Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 320 с.
24. Бакин И.А. Процессы и аппараты пищевых производств. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 208 с.

## References

1. Guidelines for the technology of obtaining and processing vegetable oils and fats. 6 V. In ed. Sergeev A.G. *Reception, post-harvest processing and storage of oilseeds. Preparatory operations for processing oil seeds. Press method for the production of vegetable oils*. V. 1, book 1. Leningrad, VNIIZH Publ., 1975 382 p. (In Russian)
2. Guidelines for the technology of obtaining and processing vegetable oils and fats. 6 V. In ed. Sergeev A.G. *Extraction method for the production of vegetable oils*. V. 1. Book 2. Leningrad, VNIIZH Publ., 1975 331 p. (In Russian)
3. Shcherbakov V.G. *Technology for the production of vegetable oils*. Moscow, Kolos Publ., 1992. 206 p. (In Russian)
4. Kaloshin Y.A. *Technology and equipment of fat-and-oil enterprises*. Moscow, Academia : IRPO Publ., 2002. 360 p. (In Russian)
5. Mkhitar'yants L.A., Kornena E.P., Martovshchuk E.V., Mustafaev S.K. *Technology of the industry (Production of vegetable oils)*. St. Petersburg, GIORP Publ., 2009. 352 p. (In Russian)
6. Koshevoy E.P. *Technological equipment of food production. Calculation workshop: a textbook for universities*. Moscow: Yurayt Publ., 2023. 203 p. (In Russian)
7. Tyshkevich A.A., Luzgachev V.A., Tochka V.N. Investigation of gas flow modes through a liquid layer. *Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences*. 2001. V. 6. no. 1. pp. 89–90. (In Russian)
8. Lisitsyn A.N., Fodorov 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. *Processes and Food Production Equipment*. 2022, no. 4, pp. 11–24. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24. (In Russian)
9. Fedoseev A.V., Sal'nikov M.V., Ostapchenko A.E. Modeling of a single bubble dynamics at boiling by lattice Boltzmann method. *Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki*, 2023, V. 26, no. 1, pp. 191–200. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.117. (In Russian)
10. Hejazi B. Heat integration and waste minimization of biomass steam gasification in a bubbling fluidized bed reactor. *Biomass and Bioenergy*. 2022, V. 159, article 106409. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106409
11. Zhao F., Wang K., Li G., Zhu G., Liu L., Jiang Y. A review of high-temperature foam for improving steam flooding effect: mechanism and application of foam. *Energy Technology*. 2022, V. 10, no. 3, article 2100988. DOI: 10.1002/ente.202100988

12. Mei L., Chen X., Liu B., Zhang Z., Hu T., Liang J., Wei X., Wang L. Experimental study on bubble dynamics and mass transfer characteristics of coaxial bubbles in petroleum-based liquids. *ACS Omega*. 2023, V. 8, no. 19, pp. 17159–17170. DOI: 10.1021/acsomega.3c01526
13. 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. *Khvoynye Boreal'noi Zony*. 2022. V. 40, no. 3, pp. 219–226. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-3-219-226. (In Russian)
14. Schaefer A.A. Formation of a composite material by purging a hydrogenated melt based on aluminum with oxygen. *Candidate's thesis*. Ekaterinburg, 2023. 147 p. (In Russian).
15. Antonova E.S., Karpikova V.O. The application of aeration ejector system for flotation treatment of surface wastewater. *International Research Journal*. 2023, no. 2. DOI: 10.23670/IRJ.2023.128.96. (In Russian)
16. Boldyreva V.G., Skichko A.S. The mathematical modeling of mass transfer processes accompanying chlorella growth in a photobioreactor with aeration. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2019, V. 33, no. 11. pp. 20–22. (In Russian)
17. Skhalyakhov A.A., Blyagoz X.R., Koshevoi E.P., Vereshchagin A.G. The process of a final acetone-oil miscella distillation with inert component. *New Technologies*. 2011, no. 2, pp. 46–49. (In Russian)
18. 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, V. 15, no. 3, article 560. DOI: 10.3390/w15030560
19. 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
20. 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
21. Chen R., Gao Ch., Li Sh., Liu Z., Meng J., Xu J., Wang H. Mechanism of bottom-blown bubble coalescence in narrow channels. *International Journal of Multiphase Flow*. 2023, V. 158, article 104305. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104305
22. Li S., Xue T., Li Z. A simple 3D reconstruction algorithm based on laser scanning: Research on flow characteristics of bubbles rising vertically in liquid phase. *Chemical Engineering Science*. 2023, V. 276, no. 10, article 118796. DOI: 10.1016/j.ces.2023.118796
23. Terekhov L.D., Volovnik G.I., Terekhova E.L. Methods of water purification. Moscow, Vologda : Infra-Engineering Publ., 2023. 320 p. (In Russian)
24. Bakin I.A. *Processes and food production equipment*. Vologda: Infra-Engineering Publ., 2023. 208 p. (In Russian)

#### Информация об авторах

Александр Николаевич Лисицын – д-р техн. наук, директор

Алексей Александрович Федоров – аспирант факультета биотехнологий

Сергей Михайлович Волков – канд. хим. наук, старший научный сотрудник

Александр Валентинович Федоров – д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе

Николай Николаевич Романов – канд. техн. наук, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности

#### Information about the authors

Alexander N. Lisitsyn, D. Sc. (Eng.), Director

Aleksey A. Fedorov, Graduate student of the Department of Biotechnology

Sergey M. Volkov, Ph. D. (Chem.), Senior Researcher

Alexander V. Fedorov, D. Sc. (Eng.), Deputy Director for Research

Nikolay N. Romanov, Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Physical and Technical Foundations of Fire Safety

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 05.08.2023

Одобрена после рецензирования 18.09.2023

Принята к публикации 20.09.2023

The article was submitted 05.08.2023

Approved after reviewing 18.09.2023

Accepted for publication 20.09.2023