

Научная статья

УДК 532.5;665.1/.3

DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24

## Гидрогазодинамика всплытия пузырей перегретого водяного пара в подсолнечном масле в процессе барботажа

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.** Определяли основные закономерности протекания тепловых, гидрогазодинамических и массообменных процессов, происходящих при барботаже в производстве растительных масел. Экспериментально изучалось всплытие одиночных пузырей перегретого водяного пара с температурой 140–165°C через слой растительного масла с температурой 120–125°C. С помощью фотофиксации установлено, что снижение температуры перегретого водяного пара до 140°C не приводит к заметному уменьшению пузырей, а значит и площади межфазной поверхности, как на начальной стадии, так и по всей траектории всплытия. При этом амплитуда спиралевидной траектории всплытия пузырей соответственно уменьшается с 12–15 мм до 5–10 мм. Опыты с отверстиями барботера диаметром от 1 до 4 мм показали существенное изменение размеров пузырей перегретого водяного пара соответственно в 1,5–2,0 раза. Зафиксированы разнообразные формы пузырей. Сформулированы предварительные рекомендации для энергетически выгодного построения процесса барботажа растительного масла: возможно снижение температуры перегретого водяного пара до 140°C, диаметры отверстий барботера должны быть не больше 4 мм, а шаг между ними соответственно нужно выдерживать размером не менее чем в 10–12 раз больше этих отверстий.

**Ключевые слова:** гидрогазодинамика; теплообмен; массообмен; производство растительного масла; перегретый водяной пар; барботажа; паровой пузырь; всплытие пузырей пара

Original article

## Hydro-gas dynamics of bubbles of superheated water vapor in sunflower oil during bubbling

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 aim of the study was to identify the dependencies of thermal, hydro-gas dynamic, and mass transfer processes during bubbling in the production of vegetable oils. The rising of single bubbles in superheated water vapor with a temperature of 140–165°C through a layer of vegetable oil with a temperature of 120–125°C was experimentally studied. A decrease in the temperature of superheated water vapor to 140°C does not lead to a significant decrease in the size of the bubbles, and consequently the area of the interfacial surface, both at the initial stage and along the entire rising trajectory, which was established using photo fixation. At the same time, the amplitude of the spiral trajectory of the bubbles decreases accordingly from 12–15 mm to 5–10 mm. Experiments with bubbler holes of a diameter from 1 to 4 mm showed a significant change in the size of superheated water vapor bubbles by 1.5–2.0 times respectively. Various shapes of bubbles have been recorded. Preliminary recommendations are formulated for the energetically advantageous construction of the vegetable oil bubbling process: it is possible to reduce the temperature of superheated water vapor to 140°C, the diameters of the bubbler holes should be no more than 4 mm, and the step between them, respectively, should be maintained at least 10–12 times larger than these holes.

**Keywords:** hydro-gas dynamics; heat exchange; mass transfer; vegetable oil production; superheated water vapor; bubbling; steam bubble; rising steam bubbles

## Введение

Барботаж — процесс пропускания газа или пара через слой жидкости, который применяется в различных видах техники давно и успешно. В пищевой промышленности, в том числе в масложировой отрасли, барботаж доказал свою результативность. В ряде случаев он стал практически незаменимой процедурой в процессах производства и переработки растительных масел. Это эффективный контактный способ теплообмена, при котором достигаются целевые трансформации жидких сред. В реальном производстве, казалось бы, все достаточно отработано, и нет необходимости вносить какие-либо критические изменения в конфигурацию и режимы барботажа, но специалисты ищут и находят пути улучшения этого процесса для повышения качества конечных продуктов и снижения энергетических затрат. В масложировом производстве барботаж применяется для удаления из масла следов растворителя и других сопутствующих веществ. Эти вещества, присутствующие в масле в малых количествах, испаряются внутрь всплывающих пузырей перегретого водяного пара и транспортируются к поверхности жидкости. Требуемые показатели качества готового продукта при барботаже, как правило, достигаются опытным путем. Практически неизменяемыми, постоянными характеристиками, считаются геометрия системы, входные и выходные параметры обрабатываемого продукта, а подбираются расход и температура перегретого водяного пара. Сложности заключаются в создании максимально благоприятных условий свободного всплытия большого количества пузырей. Это значит равномерно распределить их по объему обрабатываемой жидкости, сформировать их выгодные размеры, форму, обеспечив максимально возможную частоту их отрыва от барботирующего устройства. Иными словами, нужно достичь максимального значения площади поверхности раздела фаз в единицу времени.

С позиций классических канонов физики, а точнее гидрогазодинамики и теплофизики, барботаж — это двухфазная динамическая газожидкостная система, имеющая несколько порядков движения и взаимодействия фаз: неразвитый пузырьково-конвективный, пузырьковый и факельный режимы [1]. Конечно, может применяться и другая терминология, но суть процессов от этого не меняется. Пузырьково-конвективный режим не обеспечивает большой суммарной поверхности взаимодействия фаз. Факельный режим ведет к перерасходу теплоносителя, водяного пара, потому что часть его проходит вблизи оси факела с большой скоростью, не взаимодействуя с обрабатываемой жидкостью. В производстве растительных масел также есть свои особенности барботажа. Это возможный локальный перегрев масла, вызывающий негативные химические превращения в нем. Или преждевременная конденсация водяного пара и как следствие обводнение и гидратация.

Самыми информативными и значимыми исследованиями барботажа стали работы по визуальному наблюдению. Однако, это возможно в оптически прозрачных средах и при использовании специальных средств фото и видеофиксации. Эксперименты в этом направлении активно начались только в 50-е годы XX века практически одновременно в нескольких странах. Этапными считаются работы [2–4]. В последствии развивались исследования в нескольких научных школах [5–7]. С совершенствованием лабораторной техники, систем фото- и видеофиксации, обработки и передачи данных, компьютерной техники, а самое главное в связи с потребностью совершенствования промышленных технологий, публикуются все новые интересные и содержательные работы по барботажу. Сформировались два подхода к его изучению. В одном исследовании фокусируются на подробном изучении гидродинамики и теплообмена одиночных пузырей. В другом барботаж рассматривается как взаимодействие с жидкостью некоего интегрального массива или ансамбля пузырьков, как некоей агломерации. Оба подхода имеют свои преимущества и недостатки. Нами был выбран первый, дающий возможности более глубокого понимания сути процессов, а значит открывающего вероятность новых путей построения рациональных схем ведения процесса барботажа.

Наибольшие успехи в исследовании барботажа заметны в нефтегазовой, электроэнергетической, химической, пищевой и биотехнологической отраслях, где изучено множество комбинаций газожидкостных комплексов. Однако, фундаментальное понимание динамики процессов все еще не носит всеобъемлющего характера. Причин тому много, но главная — это большое количество быстро изменяющихся взаимосвязанных параметров, их нелинейность, сложность геометрии рассматриваемой трехмерной системы. Наиболее заметные успехи в создании теоретических основ барботажа достигнуто в двухфазных системах, состоящих из воды и водяного пара. В работе [8],

ставшей классическим пособием для нескольких поколений исследователей, предложены модели и расчетные формулы, позволяющие вычислять гидродинамические характеристики в процессе барботаж. Авторы исследований барботажа при аэрации жидкости [9] предложили несколько универсальных расчетных формул, а обобщающий материал по барботированию представлен в [10]. Конечно, состав и свойства двухфазных систем с растительным маслом отличаются от чисто пароводяных, но критериальное представление расчетных соотношений и формул позволяет с определенными ограничениями использовать для рассматриваемых нами сред. Также интересны для повторения и методики экспериментов.

В публикации [11], которую можно отметить как этапную, приведены результаты исследований, позволившие серьезно изменить представления о процессе всплытия одиночного пузыря, принимаемого как полость в жидкости. Путем численного решения уравнения Навье–Стокса определены границы нарушения сферичности газовых полостей и образования вихрей в их кормовой части. Применяемая на тот момент техника визуализации не позволяла достаточно точно передать изменение формы пузырей, как это выполняется в современных работах, поэтому авторы сделали упор на глубокую расчетно-теоретическую проработку, которая была развита в последующих работах другими учеными.

В практической работе [12] по смазывающе-охлаждающим жидкостям с компонентами растительного происхождения, применяемыми для металлообработки, рассматривается интенсификация теплообмена путем создания двухфазного потока, что в итоге влияет на снижение механических нагрузок при обработке металлов. Авторы экспериментально установили, что наибольший эффект оказали нерафинированное рапсовое и подсолнечное масла, предварительно насыщенные азотом. Они лишь высказали предположение об изменении структуры верхнего слоя металла. Насыщение зоны резания кислородом приводит к ухудшению условий резания из-за появления оксидных пленок. Растительные масла также влияют на контактные процессы, обладая повышенной смазочной способностью и содержащие в своем составе ПАВ, возможно лучше проникают в зазоры.

В работе [13] представлена задача о сферически-симметричном поле температур в вязкой жидкости, которая окружает схлопывающийся кавитационный пузырек. С учетом вязкой диссипации, как и в большинстве подобных задач, применен численный метод. Расчеты продемонстрировали, что температура жидкости вблизи пузырька увеличивается примерно на  $10^{\circ}\text{C}$ , а это существенно. Авторы [14] приводят данные по изучению пузырькового течения в вертикальной прозрачной трубе диаметром 20 мм. Ими установлен эффект сдерживания турбулентных пульсаций, но движение потока осуществлялось при малых числа Рейнольдса. В работе [15] приведены результаты экспериментов по изучению отрывных диаметров пузырей. Установлены границы перехода от дискретного (пузырькового) режима к струйному или факельному режиму при выходе из капилляра диаметром 0,14 мм в канале квадратного сечения 10 x 10 мм и длиной 600 мм. Подтверждено, что отрывной диаметр пузырей слабо зависит от размера отверстия, а при увеличении расхода газа в пять раз отрывной диаметр увеличивался всего в 1,2 раза. В своих следующих работах [16] авторы представили результаты экспериментов отрыва одиночного пузыря уже в глицерине. Получены формулы для определения среднего размера пузыря в зависимости от режимных параметров и геометрии капилляра. Отмечено наличие коалесценции при большой частоте отрыва пузырей. Определено понятие монодисперсных и бидисперсных структур. Использовался канал круглого сечения диаметром 15 мм и длиной 800 мм, диаметры отверстий 0,15 и 0,5 мм, диапазон расхода газа 2–100 мл/мин, что для рассматриваемых диаметров является очень большим.

В работе [17] определены формы и конечные скорости пузырьков, поднимающихся в вязких жидкостях. Показано, что коэффициент лобового сопротивления и форма пузырька являются функциями числа Рейнольдса. Поле скоростей потока вокруг поднимающегося пузырька было визуализировано. Результаты получены для чисел Рейнольдса меньше 150 и Мортон в пределах от  $7,4 \cdot 10^{-4}$  до 850. Объектом исследования был водород и сахарный раствор, который в диапазоне представленных концентраций и температур относится к вязким жидкостям. Установлено, что пузырьки следовали ламинарными тороидальными траекториями. Оригинальность экспериментов была в том, что посредством вертикального движения съемочной камеры с той же скоростью, что и скорость всплытия пузырей, были получены так называемые линии тока жидкости, образующиеся вокруг них.

В работе [18] рассматривается модель всплытия одиночных пузырей аргона и метана в воде, то есть так называемые газогидраты. Наличие газовых пузырей в водной среде может быть природным и техногенным. При моделировании авторы исходили из того, что на поверхности пузырька образуется гидратная корка. Это оригинальная и смелая идея, которая может быть применена для многокомпонентных систем. Процессы, происходящие в воде, достаточно медленные, расчеты ведутся при высоте слоя жидкости от 800 до 1500 мм.

В другой работе [19] авторами еще раз показано, что функционально существует множество неопределенностей взаимного влияния свойств сред, участвующих в гидродинамических процессах при всплытии пузырей. В результате численных экспериментов было установлено, что скорость всплытия мало изменяется от увеличения диаметра пузыря, начиная с 2 мм.

В вязких жидкостях процессы идут принципиально иначе. В работе [20] рассмотрена динамика всплывающего одиночного воздушного пузырька в глицерине. Авторы сосредоточили свое внимание на деформации пузырей, которая связана с их скоростью всплытия и размером для чисел Рейнольдса от 0,033 до 1,8. Установлено наличие линий тока обтекания всплывающего пузыря с образованием рециркуляции между восходящим потоком перед пузырьком и потоком в следе сбоку от пузыря. Эта область рециркуляции расширяется с увеличением объема пузыря. Так называемый след за пузырем возрастает с увеличением размера пузыря. Авторы объяснили этот факт тем, что мелкие пузыри сохраняют форму по всему объему, близкую к сферической, а крупные имеют ярко выраженное плоское дно. Деформация происходит примерно при объеме пузырей более 500–700 мм<sup>3</sup>, что соответствует эквивалентному диаметру пузыря 8–10 мм.

Сравнительно немного работ опубликовано по исследованию подобных двухфазных композиций, имеющих в масложировом производстве. В публикации [21] рассматривается изменение качественных показателей трех растительных масел (соевого, кукурузного, хлопкового), происходящее при нагревании в течение 30–180 мин газовой средой с температурой 180°C. Газовой средой был перегретый водяной пар и воздух. Кислотное число, пероксидное число и вязкость масел, нагретых в перегретом паре, были ниже, чем у масел, нагретых воздухом. В работе [22] рассматривается всплытие пузырьков воздуха и капель спирта в подсолнечном масле. Проводились эксперименты всплытия одиночного пузырька воздуха, капли метанола и капли этанола в вертикальном стеклянном сосуде с рафинированным подсолнечным маслом при температурах 25, 30, 40 и 50°C. Приводятся результаты видеонаблюдения с фотофиксацией. При числах Рейнольдса  $Re = 0,07–16$  для пузырьков воздуха,  $Re = 0,02–13,43$  для капель метанола и  $Re = 0,017–11,18$  для капель этанола. Авторы воспользовались корреляциями расчета скоростей и сопротивлений, которые применяются для несмешивающихся жидкостей. Результаты для воздуха были положительные, а вот для спиртов имеются расхождения, которые по мнению исследователей вызваны растворением спиртов в масле. Авторы предложили полуэмпирические зависимости. В статье еще раз со ссылкой на первоисточники подтверждается, что растительные масла, например, хлопковое, оливковое, лесного ореха, кукурузное, подсолнечное, рапсовое и соевое ведут себя как ньютоновские жидкости при 5–50°C. Однако, наблюдалось и неньютоновское поведение, например, отмечено, что его вязкость увеличивается со временем из-за термического разложения при более высокой температуре. В исследованиях применялась стеклянная трехсекционная колонна с внутренними диаметрами 145 и 35 мм и общей длиной 600 мм. Внешняя оболочка заполнялась растительным маслом для минимизации оптических искажений. Пузыри подавались из капилляров диаметром 75 и 150 мкм. Пузырьки воздуха, поднимающиеся со своей предельной скоростью в подсолнечном масле, при различных температурах имели сферическую форму диаметром до 2 мм. Затем они приобретают сплюснутую эллипсоидальную форму. Когда диаметр становился больше 6 мм, а температура свыше 50°C, пузыри теряли правильную геометрическую форму. Авторы предложили полуэмпирические зависимости, которые неплохо описывают скорости всплытия и так называемые коэффициенты лобового сопротивления.

Самые интересные результаты получаются, когда комплексно изучаются процессы переноса массы и тепловой энергии. В работе [23] предложена методика расчета, апробированная при проектировании и испытании барботажного устройства для создания воздухобензиновой смеси. Она используется в лабораторной установке, предназначенной для улавливания паров бензина в емкостях. Лабораторное

устройство – стальной сосуд в форме цилиндра. Его диаметр 400 мм и высота 700 мм. Авторы получили результаты, которые однозначно увязывают высоту барботажного слоя не только со скоростью всплытия пузырей, но и с расходом, то есть количественным соотношением жидкости и газа

$$h = \frac{\left( \frac{M}{P_6} V t_{bc} \right)}{S},$$

где  $P_6$  – плотность бензина;

$V$  – объемный расход воздуха;

$S$  – площадь сечения барботажного устройства;

$M$  – масса бензина находящегося в барботажном устройстве в данный момент времени  $t_{bc}$ .

В работе [24] изучены всплытия одиночных пузырьков воздуха в воде, бутаноле и гексане. Авторы подтвердили, что для пузырей сферической формы, которая наблюдается только для мелких пузырей – до 2 мм, возможен расчет коэффициентов лобового сопротивления. А далее, по мере увеличения размеров пузырей, ни одна из формул не работает. Для экспериментов использовался стеклянный сосуд квадратного сечения с толщиной стенок 5 мм. Барботер, расположенный в нижней части сосуда, имел насадки 2, 4 и 6 мм. Оригинальность экспериментальной установки в использовании подвижной каретки для видеофиксации, которая движется вертикально вместе с всплывающим пузырьком. Авторы предложили полуэмпирические зависимости для расчета коэффициента лобового сопротивления, которые учитывают равновесие поверхностной энергии с работой деформации. Получены соотношения для расчетов скорости всплытия при числе Рейнольдса  $5 < Re < 180$ .

Важными для понимания сути процессов барботажа в вязких средах могут быть работы по изучению процессов в минеральных маслах. Таких работ много в области электротехники. В исследовании [25] представлены результаты применения барботажа для охлаждения силовых трансформаторов. Газовая среда – электротехнический газ (элегаз), а точнее гексафторид серы ( $SF_6$ ), не имеет цвета и запаха, инертен и при отсутствии в нем примесей абсолютно безвреден для человека. Чистый элегаз не разлагается до температуры  $800^\circ C$  и не взаимодействует с металлами до высокой температуры. Эксперименты проводились в емкости радиусом 0,125 м и высотой 0,3 м, заполненной трансформаторным маслом. Подача газа осуществлялась в нижнюю часть сосуда через керамические распределители. Результаты показали, что барботажная система охлаждения в несколько раз эффективнее однофазной.

Наряду с этим интересно исследование австралийских специалистов практической электротехники [26], в котором изучалось образование пузырей водяного пара в системах изоляции трансформаторов, изготовленных из специальной целлюлозы. Диэлектрики на основе растительных масел представляют интерес как заменитель обычно используемых минеральных масел. К известным положительным свойствам относятся биоразлагаемость, более высокая температура возгорания и более высокая гигроскопичность, чем у минерального масла. При повышении температуры вода десорбируется целлюлозой. Считается, что пузыри пара образуются именно на поверхности, а не в самом масле, поэтому этот процесс очень сходен с барботажем. Авторы подтвердили, что растительное масло растворяет больше воды, чем минеральное – примерно 1000 и 50 частей на миллион соответственно при комнатной температуре. Однако концентрации эти незначительны в сравнении с тем, что бумага поглощает несколько процентов.

В работе [27] исследуется динамика одиночных пузырьков в растворе глицерина. Пузырьки остаются сферическими и поднимаются прямолинейно, когда их диаметр достаточно мал. Далее пузырьки начинают деформироваться до эллипсоидальной, сплюснутой эллипсоидальной формы или формы колпачка. Двигаются они с сильным колебанием поверхности и продолжают всплывать зигзагообразно, по спирали. Происходят периодические колебания скорости и удлинение пузырьков. Более того, существует обратная зависимость: большая деформация, то есть малое соотношение размеров по осям приводит к высокой скорости и наоборот. Авторы определили расстояние 150–200 мм от сопла как начало устойчивого всплытия пузырей, а при всплытии по спирали в воде установили так называемую горизонтальную скорость всплытия пузырей. Исследование [28] вносит вклад

в накопление информации и раскрывает некоторые важные аспекты проблемы при числах Рейнольдса  $Re < 1$ . Оригинальность предложенных балансовых соотношений и модели заключаются в том, что кроме основного набора сил (инерции, Архимеда и сопротивления), действующих на пузырь, учитывается так называемая сила Бассе, которая по мнению авторов сильно влияет на начальном участке всплытия пузыря вплоть до 0,1 с от старта.

Австралийские ученые [29] исследовали свободное всплытие пузырей в вязкой жидкости путем математического моделирования с применением сеточных решений. При сравнении результатов с данными экспериментов других ученых, получена весьма хорошая сходимость. Удалось смоделировать не только деформацию формы от сферы к диску или чашке, но и рассчитать среднюю толщину «юбки» и спутниковых микропузырей. Но точность расчета пока неудовлетворительная. Установлено, что нижняя поверхность больших пузырьков, всплывающих в жидкости, склонна к значительной деформации из-за наличия в следе восходящей струи жидкости, которая затем как бы пробивает верхнюю поверхность.

В процессе всплытия пузырей в вязкой жидкости происходит эволюция не только его формы, но и траектории всплытия. К примеру, в [30] приведены общие иллюстрации, удачно комментирующие явления при всплытии пузырей. Динамика пузыря состоит из двух отдельных стадий: переходной и конечной. Пузырь претерпевает деформацию формы до тех пор, пока не достигнет своей равновесной формы, а затем колеблется вокруг равновесной формы. Авторы установили, что с увеличением концентрации глицерина уменьшаются колебания пузырей. По их мнению, это объясняется так называемым затуханием следа в траектории всплытия пузыря.

Самыми значимыми остаются немногочисленные работы именно по растительным маслам. В обоснование теоретических представлений барботажа при дезодорации растительных масел большой вклад внесли исследования под руководством профессора В.В. Белобородова, и в первую очередь, это монография [31]. Учеными получено соотношение для расчета коэффициента насыщения паровой фазы компонентами, отгоняемыми из масел при дезодорации. Важно, что учитывалось гидростатическое давление по высоте барботажного слоя. По дезодорации было разработано много оригинальных технических решений, к примеру тех, в которых организовали импульсную подачу перегретого водяного пара в барботер с отверстиями 1,5–3 мм с частотой 5–15 с., что позволило увеличить производительность дезодоратора растительного масла на 10–15%. Интересной представляется работа ученых [32], рассматривающая теплоотдачу в потоке хлопкового масла и водорода. Этот процесс происходит при гидрировании растительных масел в присутствии катализатора. Авторы провели эксперименты и получили интегральные значения теплоотдачи в зависимости от режимных параметров и структуры течения двухфазного потока именно для растительных масел. Установлено значительное изменение интенсивности теплоотдачи.

Большое число опубликованных работ с разнообразными сочетаниями жидких и газовых сред при барботаже показывает значимость проблемы создания единой теории этих процессов. Однако, пока идет накопление данных и попытки моделировать процессы для конкретных условий. Все направлено на решение прикладных задач. И этот опыт чрезвычайно полезен для масложировых технологий, так как направленных исследований очень мало, а работ по исследованию всплытия пузырьков перегретого водяного пара практически нет. Барботаж является ключевым процессом на финишной стадии производства растительных масел. Это достаточно энергоемкая, а значит дорогая процедура, и рациональное ведение процесса во многом определяет себестоимость продукции. В связи с этим было решено провести экспериментальное исследование барботажа с целью выявить основные закономерности протекания тепловых, гидрогазодинамических и массообменных процессов и обосновать рекомендации по выбору режимных параметров и конфигурации элементов оборудования.

## **Материалы, оборудование и методы исследования**

Комплексным объектом исследования выступил процесс барботажа нерафинированного подсолнечного масла перегретым водяным паром. В рамках эксперимента рассматривалось всплытие пузырей из одиночного отверстия барботера. Опыты проводились только для пузырькового режима движения газовой фазы, как наиболее предпочтительного для использования в реальных производственных

процессах. На форму, размеры, траекторию всплытия и частоту отрыва пузырей оказывают влияние несколько факторов. Нами, как наиболее важные с технологической точки зрения, были выбраны диаметр выходного отверстия барботера, температура перегретого водяного пара и его расход, а также температура самого растительного масла. В течение каждого опыта осуществлялась фотофиксация процесса барботажа.

Стадии, условия и параметры всплытия пузырей рассматривались в трех сериях опытов. Первая серия – начальная стадия образования пузырей, вторая серия – влияние размера отверстия барботера, третья серия – траектория всплытия пузырей.

Основные характеристики исследуемой жидкости, нерафинированного подсолнечного масла линолевого типа, приведены в таблице 1. В зависимости от сырья подсолнечные масла имеют различный жирнокислотный состав, который определяет их физико-химические и теплофизические свойства. В связи с этим жирнокислотный состав является необходимой информацией, позволяющей идентифицировать, какое именно подсолнечное масло использовалось в исследовании и воспроизвести результаты эксперимента. Температура изучаемой жидкости поддерживалась в диапазоне от 110 до 150°C. Исследуемая газообразная среда – перегретый водяной пар в диапазоне от 120 до 200°C. Жирнокислотный состав образцов был получен в соответствии с ГОСТ 31663–2012 при помощи капиллярного газо-жидкостного хроматографа Scion 436-GC (Bruker Chemical Analysis B.V., Нидерланды) с использованием колонки  $d = 0,25$  мм и полиэтиленгликоля (ПЭГ) в качестве активной фазы.

Таблица 1. Жирнокислотный состав нерафинированных подсолнечных масел  
Table 1. Fatty acid composition of unrefined edible vegetable oil

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

Для исследования гидродинамики и теплообмена была создана экспериментальная установка, состоящая из следующих основных блоков, узлов и элементов, изображенных на рисунке 1. Испытательная емкость – стеклянный сосуд в форме параллелепипеда с размерами 180 x 180 x 650 мм, толщиной стенок 6 мм, обеспеченный снаружи эффективной фольгированной теплоизоляцией. За процессом образования и всплытия пузырей осуществляется визуальное наблюдение, а также фото и видеофиксация камерой Olympus OM-D E M5 Mark III с максимальным разрешением 5184 x 3888 пикселей в режиме макросъемки через оптически прозрачную переднюю стенку сосуда. На задней стенке сосуда смонтирована линейная полупрозрачная вертикальная шкала с ценой деления 1 мм. Система подсветки состоит из галогеновых и светодиодных ламп, обеспечивающих световой поток не менее 4000 лм и цветовую температуру не менее 5000 К. Сквозь боковые противоположные стенки сосуда, через уплотнения, введена барботажная горизонтальная трубка диаметром 18 мм. На боковой поверхности трубки есть отверстия диаметром 1; 2 и 4 мм для выхода перегретого водяного пара в обрабатываемую жидкость. Барботажная трубка с одной стороны соединена с системой генерации пара, с другой с конденсатоотводчиком со сбросным клапаном. Система генерации пара состоит из парогенератора MSC-2001 и пароперегревателя собственной разработки. Основные технические характеристики этой системы представлены в таблице 2. Для измерения массового расхода пара парогенератор установлен на аналитических лабораторных весах ВК-1500.1.

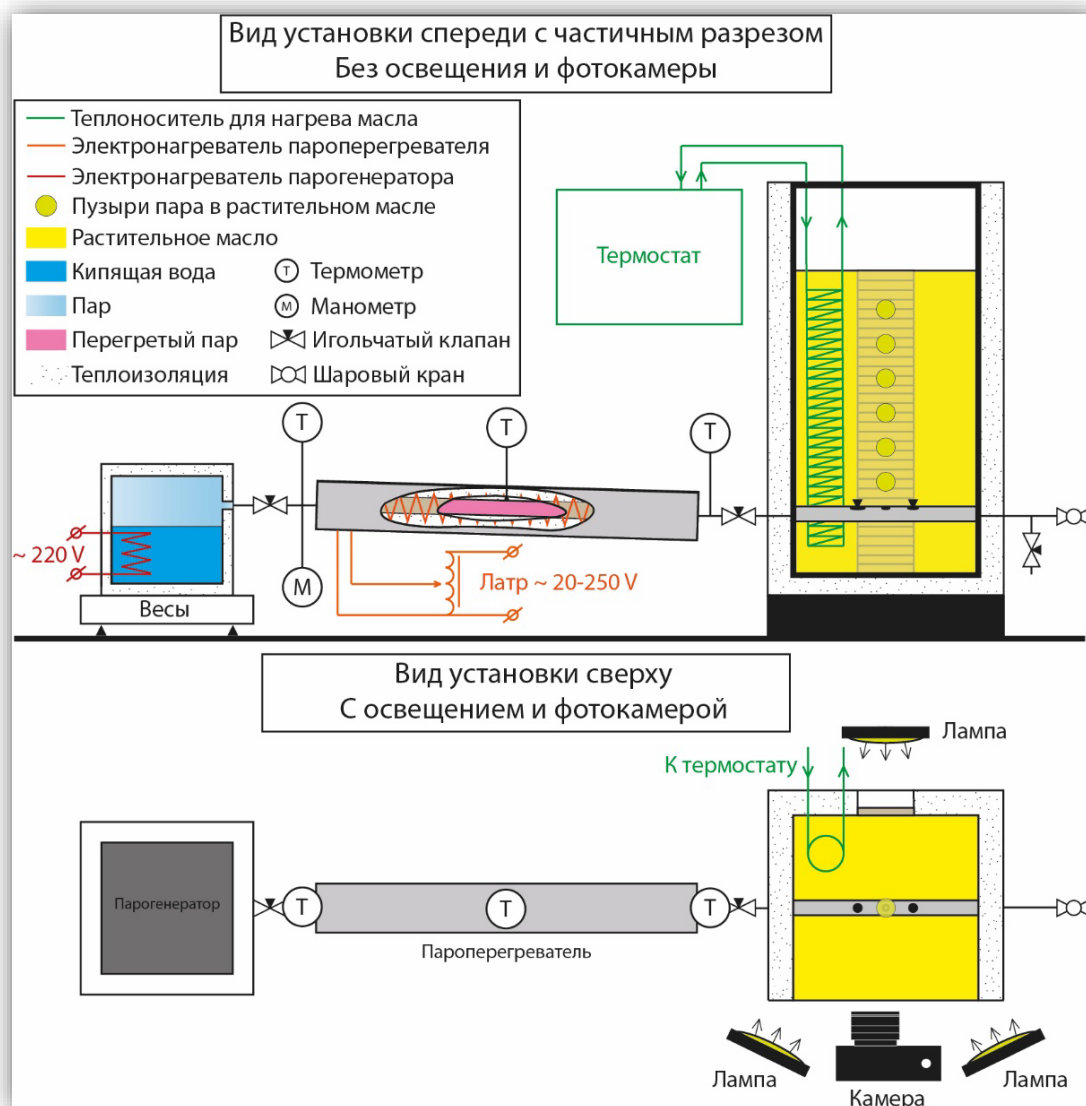


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки  
Figure 1. Scheme of the experimental unit

В паровой системе есть несколько регулирующих клапанов, вентилях для изменения расхода пара. Подогрев жидкости в сосуде осуществляется эффективным змеевиковым трубчатым теплообменником, через который циркулирует высокотемпературный (максимальная температура нагрева 160°C) теплоноситель из термостата WBR2350. В установке смонтировано несколько датчиков температуры типа ТА-288 и ХК-термопар, а также манометры типа ТМ.

Таблица 2. Технические характеристики системы выработки пара  
Table 2. Technical data of the steam generation system

Характеристика	Парогенератор (ПГ)	Пароперегреватель (ПП)
электрическая мощность, Вт	900	100–500
входная (начальная) температура, °C	–	105–120
выходная температура, °C	105–120	110–180
максимальная температура внутренней стенки устройства, °C	140	400
максимальное давление, бар	3	3
максимальный начальный объем воды, мл	250	–
расход водяного пара, мг/с	20–75	20–75
габариты устройства, длина, ширина, высота, мм/ масса, кг	150 x 150 x 220/2,7	120 x 1000 x 120/4,2



Процедура эксперимента была следующей. В испытательную емкость заливали исследуемую жидкость, растительное масло объемом 6,5–7 л и подогревали до заданной температуры с помощью системы термостатирования. Одновременно проводили прогрев и выход на рабочий режим системы генерации водяного пара. Осуществляли сквозную продувку системы через сбросной вентиль-конденсатоотводчик для исключения попадания воды в испытуемую жидкость — масло. С помощью системы клапанов установили устойчивую подачу перегретого водяного пара в исследуемую жидкость через одно из отверстий барботера. После выхода на устойчивый режим барботажа включили систему подсветки и осуществляли измерение температур, наблюдали и фотофиксировали процесс всплытия пузырей. Выдержка во время съемок варьировалась в пределах 1/8000–1/2000 с. Обработывали несколько десятков кадров в каждом режиме. Всего в результате экспериментов при различных условиях было получено около трех тысяч изображений. Для их обработки использовали специальные и стандартные компьютерные средства. Фиксировали значения температуры и давления внутри и снаружи системы. Измеряли массу парогенератора вместе с теплоносителем для каждого режима, откуда определяли массовый расход по формуле

$$G_{\Pi} = \frac{m_k + m_n}{\tau_0},$$

где  $m_k$  и  $m_n$  – конечная и начальная масса парогенератора вместе с теплоносителем, кг;

$\tau_0$  – время опыта, с.

### Результаты и их обсуждение

Первая серия – опыты по изучению начального участка траектории всплытия пузырей – стадия формирования и отрыва – представлена на рисунке 2.

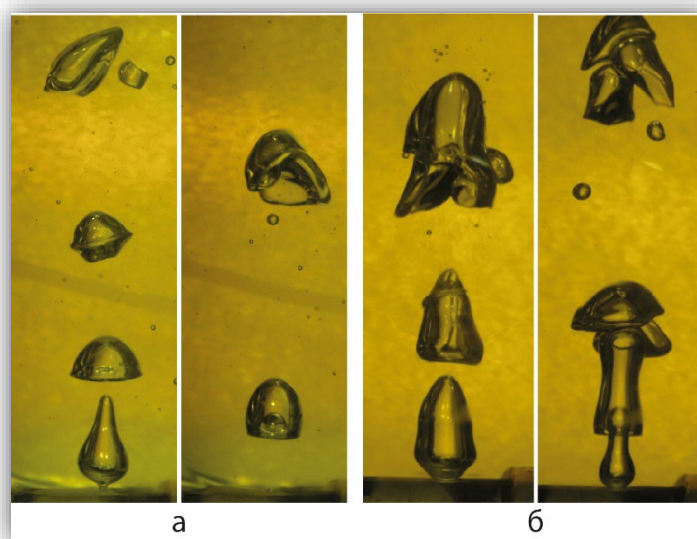


Рисунок 2. Начальная стадия формирования пузырей при температуре подсолнечного масла 110°C, диаметр отверстия 1 мм, при расходе 34 мг/с и температурах перегретого водяного пара 140°C (а) и 185°C (б)

Figure 2. The initial stage of bubble formation at a sunflower oil temperature of 110°C, hole diameter of 1 mm, flow rate of 34 mg/s and the temperatures of superheated water vapor of 140°C (a) and 185°C (b)

Установлено, что пузыри при начальном росте и до отрыва имеют ярко выраженную вытянутую форму. Затем они начинают резко деформироваться в форму чашки или снаряда. При повышении температуры пара размер пузырей тоже увеличивается. Так как большинство пузырей имеет несферическую форму, размер пересчитывается на эквивалентный диаметр

$$d_3 = \sqrt[3]{6 \frac{V_{\Pi}}{\pi}},$$

где  $V_{\Pi}$  – объем пузыря, м<sup>3</sup>.

При изменении температуры пара от 140 до 185°C, то есть в 1,3 раза, эквивалентный отрывной диаметр тоже увеличивается, но незначительно, примерно в 1,15 раза.

Во второй серии опыты проводились с разными диаметрами отверстий барботера – 1; 2 и 4 мм. Результаты представлены на рисунке 3. Температура масла была установлена на отметке 110°C, температура перегретого водяного пара 140°C во всех опытах. При этом для каждого отверстия увеличивали расход перегретого водяного пара примерно вдвое.

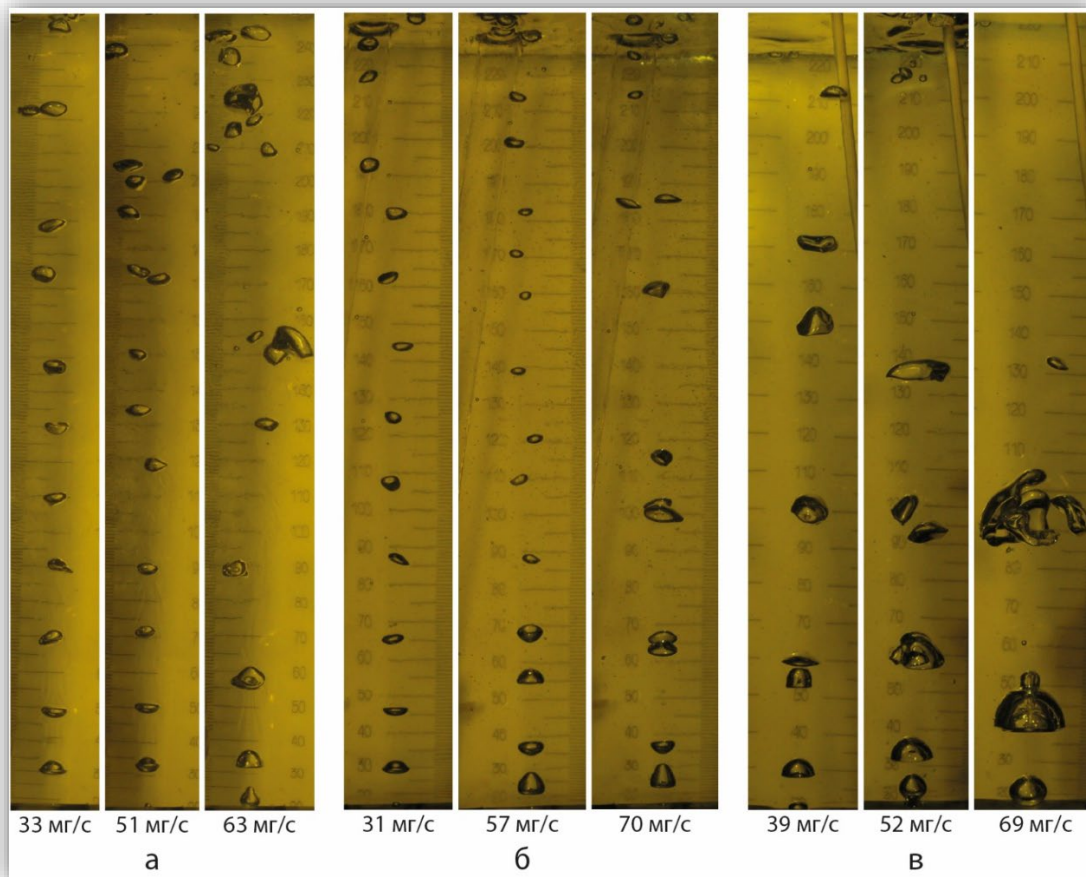


Рисунок 3. Изменение структуры пузырей: температура подсолнечного масла 110°C, температура перегретого водяного пара 140°C, при различных расходах, диаметры отверстия барботера – 1 мм (а); 2 мм (б); 4 мм (в)

Figure 3. Changes in the structure of bubbles: the temperature of sunflower oil is 110°C, the temperature of superheated water vapor is 140°C, at different flow rates, the diameter of the bubbler hole – 1 mm (a); 2 mm (б); 4 mm (в)

Начальный или отрывной диаметр пузыря зависит от диаметра отверстия. Для меньших отверстий, диаметром 1 и 2 мм, изменение не существенно, примерно в 1,10–1,15 раза при увеличении диаметра отверстия в 2 раза. Следует учитывать, что площадь выходного сечения различается при этом в 4 раза. А вот такое же изменение диаметра и площади отверстия от 2 до 4 мм дает увеличение отрывного диаметра в 2,5–3,0 раза. Для диаметров 2 и 4 мм при усилении расхода пара с 33 до 63 мг/с увеличивается и отрывной диаметр пузырей в 1,5–2 раза. Одновременно происходят изменения в частоте отрыва пузырей, которая увеличивается, затем становится практически неизменной и далее даже уменьшается. При этом происходит активная коалесценция с образованием больших пузырей неправильной формы, распадающихся по мере всплытия. Можно сделать вывод, что существует некий критический диаметр отверстия в диапазоне 2–4 мм, при котором происходит коренное изменение геометрии и динамики пузырей пара в растительном масле.

Третья серия – это опыты по изучению влияния температуры пара на траекторию всплытия пузырей, результаты которых представлены на рисунке 4. Опыты проводились для отверстия одного диаметра 1 мм в масле с температурой 110°C. Расход теплоносителя 55 г/с. Температуру пара изменяли от 140 до 165°C.



Рисунок 4. Изменение структуры пузырей на основной траектории: диаметр отверстия 1 мм, температура подсолнечного масла 110°C, температура перегретого водяного пара 140°C (а), 150°C (б), 165°C (в)

Figure 4. Changes in the structure of bubbles along the main trajectory: hole diameter is 1 mm, sunflower oil temperature is 110°C, superheated water vapor temperature is 140°C (a), 150°C (б), and 165°C (в)

Траектория всплытия цепочки пузырей имела спиралевидный характер во всех опытах. Повышение температуры пара от 140 до 165°C приводило к увеличению средних эквивалентных диаметров пузырей в 1,15–1,20 раза и амплитуды траектории в 2,0–2,5 раза. При температуре пара 160°C максимальная амплитуда траектории достигала 12–15 мм, а вот частота отрыва пузырей практически не изменялась. Также установлено, что маленькие пузыри самостоятельно сразу не покидали жидкость, а накапливались снизу у ее поверхности. Затем они коалесцировали, образуя большие пузыри, и достигнув какого-то критического размера, вскрывали зеркало поверхности жидкости и покидали ее.

Для всех трех серий экспериментов пузыри перегретого водяного пара имели самую разнообразную форму: сферические, продолговато-эллипсоидные, сферические с открытым или закрытым верхом, в виде диска, чашки, снаряда, а также пузыри с гладкой или волнистой юбкой. У пузырей с плоской нижней частью есть значительное углубление у основания. Выявление закономерностей развития и преобразования формы пузырей требует дальнейших исследований.

## Заключение

Определено, что при барботаже подсолнечного масла характерна несимметричная деформация формы паровых пузырей. В первую очередь это объясняется наличием значительных вихрей или турбулентностей в кормовой части из-за высокой вязкости жидкости. Эти же турбулентности приводят к потере устойчивого прямолинейного всплытия пузырей и переходу к криволинейной волнообразной траектории, напоминающей спираль или пружину. В некоторых случаях выявлено наличие импульсного режима выброса серии пузырей через промежутки времени. При увеличении расхода перегретого водяного пара в режиме близком к факельному, имеется множество пузырей разного размера и формы. У крупных пузырей эта форма неправильная и быстро изменяющаяся: наблюдается многократная коалесценция, разделение и дробление. Установленные гидродинамические особенности пока не имеют полностью законченного объяснения и требуют дальнейшей проработки.

Однако, на основе полученных данных уже можно дать предварительные рекомендации по рациональной организации процесса барботажа в производстве подсолнечных масел. Снижение температуры перегретого водяного пара до 140°C не приводит к заметному уменьшению пузырей,

а значит и площади межфазной поверхности как на начальной стадии, так и по всей траектории всплытия. А хорошо известно, что снижение температуры теплоносителя существенно влияет на качество готового масла и энергозатраты. Увеличение диаметра отверстия барботера, а точнее свыше 4 мм, приводит к неустойчивому гидродинамическому режиму и усложняет управление технологическим процессом барботажа. Шаг между отверстиями барботера должен быть не меньше размера равного 10–12 диаметров этих отверстий, что обеспечит свободное всплытие соседних пузырей по своей траектории. Новые данные могут использоваться в расчетах для модернизации узлов масложирового оборудования и корректировки режимных параметров в реальном производстве.

## Литература

1. 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.
2. Haberman W.L., Morton R.K. *An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids*. David Taylor Model Basin Washington DC, 1953.
3. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидравлика газо-жидкостных систем. М.: Госэнергоиздат, 1958. С. 232.
4. Кутателадзе С.С., Боршанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.: Госэнергоиздат, 1959. С. 414.
5. Лантева Е.А., Лантев А.Г. Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики. Казань: Печать Сервис XXI век, 2015. С. 236.
6. Ягов В.В., Лабунцов Д.А. Механика двухфазных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2007. С. 384.
7. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984. С. 301.
8. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 367.
9. Лукс А.Л., Крестин Е.А., Матвеев А.Г., Шабанова А.В., Кутаев А.И. Исследование скорости всплытия пузыря газа в процессе барботажа при различных режимах // Градостроительство и архитектура. 2016. Т. 6. № 1. С. 34–40. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.01.6
10. Лантева Е.А., Лантев А.Г. Гидродинамика барботажных аппаратов. Казань: Центр инновационных технологий, 2017. С. 190.
11. Волков П.К., Чиннов Е.А. Стационарное всплытие одиночного пузыря в неограниченном объеме жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 1989. № 1. С. 94–99.
12. Джемалядинов Р.М., Ракитсопуло С.Л. Влияние модифицированных технологических сред растительного происхождения на силовые характеристики при осевой обработке // Проблемы современной науки и образования. 2019. № 1. С. 36–39.
13. Васильев А.П. Температурное поле в вязкой жидкости вокруг схлопывающегося кавитационного пузырька // Вестник Оренбургского государственного университета. 2000. № 3. С. 87–89.
14. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Богословцев Г.В. Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускного пузырькового течения // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 4. С. 635–643.
15. Воробьев М.А., Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Чинак А.В. Формирование мелкодисперсной газовой фазы в восходящем и опускном потоке жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2012. № 4. С. 75–81.
16. Воробьев М.А., Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Чинак А.В. Режимы формирования пузырьковых потоков в вязкой жидкости // Труды Института механики им. Р.П. Мавлютова УНЦ РАН. 2016. Т. 11. № 2. С. 254–262. DOI: 10.21662/uim2016.2.037
17. Bhaga D., Weber M.E. Bubbles in viscous liquids: shapes, wakes and velocities. *Journal of fluid Mechanics*. 1981, V. 105, pp. 61–85. DOI: 10.1017/S002211208100311X
18. Русинов А.А., Александров Е.В. Математическая модель процесса всплытия одиночного пузырька газа в водной среде // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2017. № 2. С. 54–62.
19. Козелков А.С., Ефремов В.Р., Дмитриев С.М., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Тарасова Н.В., Стрелец Д.Ю. Исследование особенностей всплытия пузырьков воздуха и твердых сфер // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 4. С. 73–85. DOI: 10.7868/S2073667318040093
20. Frank X., Funfschilling D., Midoux N., Li H.Z. Bubbles in a viscous liquid: lattice Boltzmann simulation and experimental validation. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006, V. 546, pp. 113–122. DOI: 10.1017/S0022112005007135
21. Amatsubo T., Nagura Y., Suzuki K. The effect of superheated steam treatment on the quality of vegetable oils. *Food Science and Technology Research*. 2006, V. 12, no. 2, pp. 114–118. DOI: 10.3136/fstr.12.114
22. Duangsuwan W., Tuzun U., Sermon P.A. The dynamics of single air bubbles and alcohol drops in sunflower oil at various temperatures. *AIChE Journal*. 2011, V. 57, no. 4, pp. 897–910. DOI: 10.1002/aic.12324

23. Лавров Н.А. Моделирование процесса насыщения газовых пузырей парами жидкости в барботажной колонне // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1. С. 5–8. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-580
24. Подоплелов Е.В., Семенов И.А., Ульянов Б.А. Моделирование динамики газовых пузырьков в жидкостях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3. С. 126–129.
25. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Хуснутдинова И.Г. Применение барботаж в системе охлаждения силовых трансформаторов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2014. № 3. С. 29–32.
26. Perkasa C.Y., Wijaya J., Lelekakis N., Martin D. Preliminary study of bubble formation in vegetable oil filled power transformer. *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2013, pp. 551–554. DOI: 10.1109/CEIDP.2013.6748294
27. Liu L., Yan H., Zhao G. Experimental studies on the shape and motion of air bubbles in viscous liquids. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015, V. 62, pp. 109–121. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.11.018
28. Архипов В.А., Васенин И.М., Ткаченко А.С., Усанина А.С. О нестационарном всплытии пузырька в вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2015. № 1. С. 86–94.
29. Gumulya M., Joshi J.B., Utikar R.P., Evans G.M., Pareek V. Bubbles in viscous liquids: Time dependent behaviour and wake characteristics. *Chemical Engineering Science*. 2016, V. 144, pp. 298–309. DOI: 10.1016/j.ces.2016.01.051
30. Kong G., Mirsandi H., Buist K.A., Peters E.A.J.F., Baltussen M.W., Kuipers J.A.M. Oscillation dynamics of a bubble rising in viscous liquid. *Experiments in Fluids*. 2019, V. 60, article 130. DOI: 10.1007/s00348-019-2779-1
31. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел. М.: Пищевая промышленность. 1966. 478 с.
32. Банных О.П., Гилевская О.В., Евстифеева А.А. Исследование процесса теплоотдачи при гидрировании растительных масел в стационарном слое катализатора // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. № 4. С. 134–140. DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-4-134-140

## References

1. 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)
2. Haberman W.L., Morton R.K. *An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids*. David Taylor Model Basin Washington DC, 1953.
3. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Hydraulics of gas-liquid systems*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1958. 232 p. (In Russian)
4. Kutateladze S.S., Borishansky V.M. *Handbook of heat transfer*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1959. 414 p. (In Russian)
5. Lapteva E.A., Laptev A.G. *Applied aspects of transfer phenomena in devices of chemical technology and heat power engineering*. Kazan', Pechat' Servis XXI vek Publ., 2015. 236 p. (In Russian)
6. Labuntsov D.A., Yagov V.V. *Mechanics of two-phase systems*. Moscow, MEI Publ., 2007. 384 p. (In Russian)
7. Kutateladze S.S., Nakoryakov V.E. *Heat and mass transfer and waves in gas-liquid systems*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 301 p. (In Russian)
8. Kutateladze S.S. *Heat transfer and hydrodynamic resistance*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 367 p. (In Russian)
9. Louks A.L., Krestin E.A., Matveev A.G., Shabanova A.V., Kitaev A.I. Rate of gas (vapor) bubble floating up during the process of bubble aeration at different modes. *Urban Construction and Architecture*. 2016, no. 1, pp. 34–40. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.01.6. (In Russian)
10. Lapteva E.A., Laptev A.G. *Hydrodynamics of barbotage apparatuses*. Kazan, Center for Innovative Technology Publ., 2017. 190 p. (In Russian)
11. Volkov P.K., Chinnov E.A. Stationary ascent of a single bubble in an unlimited volume of liquid. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 1989, no. 1, pp. 94–99. (In Russian)
12. Dzhemalyadinov R.M., Rakitsopulo S.L. Effect of modified technological environments on force characteristics during axial machining. *Problems of Modern Science and Education*. 2019, no. 1, pp. 36–39. (In Russian)
13. Vasiliev A.P. Temperature field in a viscous liquid around a collapsing cavitation bubble. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2000, no. 3, pp. 87–89. (In Russian)
14. Kashinsky O.N., Randin V.V., Lobanov P.D., Bogoslovtssev G.V. The effect of the dispersion of the gas phase on the characteristics of the descending bubble flow. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2005, V. 12, no. 4, pp. 637–643. (In Russian)
15. Vorobyev M.A., Kashinsky O.N., Lobanov P.D., Chigak A.V. Formation of a finely dispersed gas phase in the ascending and descending fluid flow. *Izvestia RAN, Mekhanika Zhidkosti i Gaza*. 2012, no. 4, pp. 75–81. (In Russian)
16. Vorobyev M.A., Kashinskiy O.N., Lobanov P.D., Chinak A.V. Bubble flow formation regimes in viscous liquid. *Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics*. 2016, V. 11, no. 2, pp. 254–262. DOI: 10.21662/uim2016.2.037. (In Russian)

17. Bhaga D., Weber M.E. Bubbles in viscous liquids: shapes, wakes and velocities. *Journal of fluid Mechanics*. 1981, V. 105, pp. 61–85. DOI: 10.1017/S002211208100311X
18. Rusinov A.A., Aleksandrov E.V. The mathematical model of process ascent a single bubble gas in water environment. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*. 2017, V. 2, pp. 54–62. (In Russian).
19. Kozelkov A.S., Efremov V.R., Dmitriev S.M., Kurkin A. A., Pelinovsky E.N., Tarasova N.V., Strelets D.Y. Study of the features of rising of air bubbles and solid Spheres 73. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, V. 11, no. 4, pp. 73–85. DOI: 10.7868/S2073667318040093. (In Russian)
20. Frank X., Funfschilling D., Midoux N., Li H.Z. Bubbles in a viscous liquid: lattice Boltzmann simulation and experimental validation. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006, V. 546, pp. 113–122. DOI: 10.1017/S0022112005007135
21. Amatsubo T., Hagura Y., Suzuki K. The effect of superheated steam treatment on the quality of vegetable oils. *Food Science and Technology Research*. 2006, V. 12, no. 2, pp. 114–118. DOI: 10.3136/fstr.12.114
22. Duangsuwan W., Tuzun U., Sermon P.A. The dynamics of single air bubbles and alcohol drops in sunflower oil at various temperatures. *AIChE Journal*. 2011, V. 57, no. 4, pp. 897–910. DOI: 10.1002/aic.12324
23. Lavrov N.A. Simulation of the process of gas bubbles saturation with liquid vapors in bubble column. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013, no. 1, pp. 5–8. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-580 (In Russian)
24. Podoplelov E.V., Semenov I.A., Ulyanov B.A. Modeling of the dynamics of gas bubbles in liquids. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2013, no. 3, pp. 126–129. (In Russian)
25. Bashirov M.G., Hismatullin A.S., Khusnutdinova I.G. Application of bubbling in the cooling system of power transformers. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2014, no. 3, pp. 29–32. (In Russian).
26. Perkasa C.Y., Wijaya J., Lelekakis N., Martin D. Preliminary study of bubble formation in vegetable oil filled power transformer. *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2013, pp. 551–554. DOI: 10.1109/CEIDP.2013.6748294
27. Liu L., Yan H., Zhao G. Experimental studies on the shape and motion of air bubbles in viscous liquids. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015, V. 62, pp. 109–121. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.11.018
28. Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Tkachenko A.S., Usanina A.S. Unsteady rise of a bubble in a viscous fluid at small reynolds numbers. *Fluid Dynamics*. 2015, V. 50, no. 1, pp. 79–86. (In Russian)
29. Gumulya M., Joshi J.B., Utikar R.P., Evans G.M., Pareek V. Bubbles in viscous liquids: Time dependent behaviour and wake characteristics. *Chemical Engineering Science*. 2016, V. 144, pp. 298–309. DOI: 10.1016/j.ces.2016.01.051
30. Kong G., Mirsandi H., Buist K.A., Peters E.A.J.F. Baltussen M.W., Kuipers J.A.M. Oscillation dynamics of a bubble rising in viscous liquid. *Experiments in Fluids*. 2019, V. 60, article 130. DOI: 10.1007/s00348-019-2779-1
31. Beloborodov V.V. *The main processes of vegetable oil production*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1966. 478 p. (In Russian)
32. Bannykh O.P., Gilevskaya O.V., Evstifeeva A.A. Investigation of the heat recovery process during the hydrogenation of vegetable oils in fixed-bed catalytic reactors. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2018, V. 8, no. 4, pp. 134–140. DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-4-134-140. (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., Director

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

Sergey M. Volkov, Ph. D., Senior Researcher

Alexander V. Fedorov, D. Sc., Deputy Director for Research

Nikolay N. Romanov, Ph. D., 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 20.10.2022

Одобрена после рецензирования 21.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

The article was submitted 20.10.2022

Approved after reviewing 21.11.2022

Accepted for publication 30.11.2022