

Научная статья

УДК 532.5;536.12, 665.1/.3

DOI: 10.17586/2310-1164-2026-19-3-3-16

Определение функциональных параметров конструктивных элементов и рабочей температуры при барботаже растительного масла азотом

А.В. Федоров^{1,2}, С.М. Волков¹, А.С. Кульпинов^{1,2*}, А.Г. Новоселов², А.А. Федоров²¹ВНИИЖиров, Россия, Санкт-Петербург,²Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург

*askulp@yandex.ru

Аннотация. Проведены аналитико-экспериментальные исследования двухфазной системы «подсолнечное масло – газообразный азот» при барботаже с целью определить численные значения функциональных параметров погружного дырчатого листа (ПДЛ) и рабочей температуры, обеспечивающих повышение эффективности тонкой очистки растительных масел. Эксперименты выполнены в термостатированной стеклянной барботажной камере объемом около 8 л, имеющей форму параллелепипеда, с погружным барботером и сменными ПДЛ. Изучены плоские и сферические ПДЛ диаметром 90 мм с отверстиями 2, 3 и 4 мм. На полученных с помощью цифровой камеры изображениях определяли мгновенное количество всплывающих пузырей в контрольных объемах. В качестве критерия оценки эффективности функционирования ПДЛ в процессе барботажа введен коэффициент дезинтеграции пузырей K_d – кратность увеличения их количества по сравнению с условиями их свободного всплытия. Определено размещение ПДЛ на высоте 60 мм от выходного отверстия барботера и обоснована рабочая температура в 105°C. Максимальное значение $K_d = 4,27$ получено для плоского ПДЛ с отверстиями 3 мм и шагом 10–15 мм для расхода азота 0,8 л/мин. При этом основные характеристики эффективности массообмена между газом и жидкостью двухфазной системы – суммарная площадь и время контакта фаз – увеличились на 57 и 16% соответственно в сравнении со свободным всплытием пузырей. Полученные результаты позволяют создать условия для интенсификации тепломассообмена в технологическом оборудовании для тонкой очистки растительных масел от целевых микрокомпонентов.

Ключевые слова: пищевые производства; барботаж; двухфазная система; интенсификация тепломассообмена; подсолнечное масло; газообразный азот; погружной дырчатый лист

Original article

Thermal and functional-design parameters of equipment for nitrogen bubbling of sunflower oil

Alexander V. Fedorov^{1,2}, Sergey M. Volkov¹, Andrey S. Kulpinov^{1,2*}, Alexander G. Novoselov², Alexey A. Fedorov²¹All-Russian Scientific Research Institute of Fat, St. Petersburg, Russia²ITMO University, St. Petersburg, Russia

*askulp@yandex.ru

Abstract. Analytical and experimental studies of the two-phase system "sunflower oil – gaseous nitrogen" under bubbling conditions have been carried out. The aim was to determine the numerical values of the functional parameters of a submerged perforated sheet (SPS) and the operating temperature, which improve the efficiency of fine purification of vegetable oils. The experiments were performed in a thermostated glass bubbling chamber with a volume of about 8 liters, shaped as a rectangular parallelepiped, equipped with a submerged sparger and replaceable SPS. Flat and spherical SPS with a diameter of 90 mm and orifice diameters of 2, 3, and 4 mm were studied. Using images obtained with a digital camera, the instantaneous number of rising bubbles in the control volumes was determined. As a criterion for evaluating the SPS performance during bubbling, the bubble disintegration coefficient K_d was introduced – the multiplicity of increase in the number of bubbles compared to their free rise conditions. By experimental and analytical means, the position of the SPS at a height of 60 mm above the sparger outlet was determined, and the operating temperature of 105°C was justified. The maximum $K_d = 4.27$ was obtained for a flat SPS with 3 mm orifices spaced 10–15 mm apart at a nitrogen flow rate of 0.8 L/min. Under these conditions, the main mass transfer characteristics between the gas and the liquid in the two-phase system – the total phase contact area and the phase contact duration – increased by 57% and 16%, respectively, compared to free bubble rise. Thus, the obtained results allow creating conditions for intensifying heat and mass transfer in technological equipment for the fine purification of vegetable oils from target microcomponents.

Keywords: food processing; bubbling; two-phase system; heat and mass transfer intensification; sunflower oil; gaseous nitrogen; submerged perforated sheet

Введение

Данная статья носит характер логического продолжения публикаций о ходе комплексных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на создание высокоэффективной промышленной технологии тонкой очистки пищевых растительных масел и разработки технологического оборудования для ее реализации. Наиболее перспективным направлением стало использование газообразного азота в качестве абсорбента микрокомпонентов растительных масел, ухудшающих их качество.

Для достижения эффективного массообмена было предложено использовать барботажный способ аэрации в виде пузырей, пропускаемых через слой масла. Однако известно [1, 2], что газожидкостный поток в пустотелых барботажных колоннах, т. е. в отсутствие каких-либо направляющих устройств в рабочем пространстве, крайне нестабилен. Его стабилизация наступает при больших скоростях жидкой фазы или при установке внутри рабочего объема барботажной колонны специальных устройств, определяющих направление движения движения двухфазной смеси.

Решающее значение процесса барботажа при тонкой очистке растительных масел подтверждено в разработанных и апробированных в производственных условиях дистилляторах мисцеллы с использованием высокотемпературного парообразного абсорбента – перегретого водяного пара. Это позволило обосновать программу следующего этапа исследований – изучение движения массива пузырей инертного, относительно растительного масла, газообразного азота, способного обеспечить снижение рабочей температуры осуществления абсорбции целевых микрокомпонентов в нем.

Проблема управления структурой двухфазного потока «вязкая жидкость – газ» остается в центре внимания исследователей в разных областях техники. В работе [3] предложена новая классификация режимов течения в барботажных колоннах, показана определяющая роль типа газораспределителя и свойств жидкости. Исследователями [4] установлено, что установка внутренних элементов (в том числе перфорированных пластин) существенно изменяет гидродинамическую обстановку и газосодержание. Авторы [5] детально изучили влияние газовой фазы на гидродинамику крупномасштабных барботажных колонн, включая переходы режимов и распределение пузырей по размерам. Разработан метод идентификации режимных границ на основе анализа степени случайности сигналов [6], что особенно важно для систем с вязкими жидкостями.

Для двухфазных систем с высокой вязкостью, к которым относится исследуемая среда «растительное масло – азот», получены следующие результаты. Установлены закономерности всплытия монодисперсного пузырькового кластера в вязкой жидкости в присутствии поверхностно-активных веществ [7]. Исследованы механизмы дробления вязких пузырей в микроканалах, предложены прогностические модели дезинтеграции [8]. Нашим научным коллективом установлены температурные зависимости гидродинамических параметров (скорость всплытия пузырей, газосодержание) в диапазоне 20–115°C [9]; показано, что скорость всплытия пузырей пропорциональна их диаметру в степени 0,34–0,42; впервые применен погружной дырчатый лист для регулируемой дезинтеграции пузырей азота, что позволило увеличить газосодержание в 1,3–1,6 раза [10]; детально исследовано влияние температуры и расхода газа на газосодержание [11]. В данных работах термин «дезинтеграция» использовали для обозначения сложного процесса, включающего последовательность быстропротекающих индивидуально-коллективных трансформаций пузырей в результате внешнего воздействия не только на верхнюю (внешнюю) сторону ПДЛ, но и динамику состояния пузырей на нижней (внутренней). Это гораздо сложнее процесса дробления, как одномоментного распада или деления.

Значительный интерес представляют работы, посвященные применению перфорированных пластин и ситчатых тарелок – прямых аналогов ПДЛ. В частности, изучена гидродинамика трехмерной ротационной ситчатой тарелки (TRST) при нисходящем газожидкостном потоке в условиях вращательного движения [12]. Первоначально были охарактеризованы режимы течения в лотке в различных режимах работы, определены три преобладающих режима: пленочный, пузырьковый и вспененный. Последующий анализ был сосредоточен на однородности внутри лотка, что позволило выяснить влияние взаимодействия газа и жидкости на изменение режима течения. Впоследствии тщательно измерили изменения перепада давления в TRST в условиях прокатки, которые показали, что перепады давления во влажном и сухом состоянии находятся в пределах 80 и 180 Па соответственно. С помощью метода факторного

проектирования эти условия проанализировали в интерактивном режиме. На основе экспериментальных данных разработали прогнозирующую гидродинамическую модель, точность которой не превышает 15%. Наконец, в ходе исследования было изучено влияние качения на динамическую задержку жидкости в TRST. Полученные данные [12] указывают на увеличение динамической задержки жидкости на 34,1% с ростом объема газа, что контрастирует с повышением объема жидкости на 28,6% по сравнению с наклонным состоянием.

Выполнены экспериментальные и численные задачи распределения жидкости во вращающейся перфорированной тарелке [13]. С помощью CFD-моделирования проанализировано влияние наклонных и вращательных движений на распределение жидкости [14]. Разработаны методики прямого измерения эффективности тарелок с учетом эффекта «провала» жидкости [15, 16]. Показано, что комбинирование керамической мембраны и перфорированной пластины в эрлифтном реакторе улучшает массообмен между газом и жидкостью. При одинаковом расходе кислорода объемный коэффициент массоотдачи от крупных пузырьков ($d_{32} = 4\text{--}10$ мм) увеличивается на 160% по сравнению с мелкими пузырьками (d_{32} менее 2,5 мм) [17].

В работе [18] представлены современные методы прогнозирования газосодержания в барботажных колоннах с использованием машинного обучения. Предложены передовые модели на основе ансамблевых методов (XGBoost) и глубоких нейронных сетей для прогнозирования газосодержания [19]. Разработана глубокая нейронная сеть и эмпирическая модель для прогнозирования локальных профилей газосодержания [20]. Использована ультразвуковая томография и нейросетевая обработка (LSTM) для прямой оценки газосодержания [21]. Предложен метод обработки изображений на основе глубокого обучения для детектирования, сегментации и реконструкции формы пузырей при высоком газосодержании [22].

В области абсорбции и десорбции газов органическими средами представлен критический обзор по абсорбции летучих органических соединений неводными растворителями [23]. Получены экспериментальные и теоретические данные по захвату CO_2 и N_2 гидрофобными глубокими эвтектическими растворителями при высоких давлениях [24]. Выполнена оптимизация абсорбента для отходящих газов акрилонитрила на основе квантово-химических расчетов [25]. Оптимизирована вентури-система генерации мелких пузырей на основе абсорбции газа [26]. Экспериментально исследовано влияние нанотрубок на гидродинамику барботажной колонны в системе «азот – керосин» [27], что близко по свойствам к системе «азот – масло». Изучены газосодержание, межфазная площадь и распределение пузырей во флотационной колонне пилотного масштаба [28]. Для аппаратов пищевых производств подробный анализ формирования площади контакта фаз приведен в [29].

Анализ приведенных работ показывает, что исследований двухфазной системы «растительное масло – азот» с применением ПДЛ недостаточно. Для формирования требуемого газосодержания, как интегральной характеристики двухфазной системы, необходимо исследование влияния на морфологию пузырей таких геометрических параметров ПДЛ, как диаметры отверстий, расстояния между ними, формы поверхности, расстояния до барботера.

Цель работы – определить численные значения функциональных параметров ПДЛ и рабочей температуры при барботаже растительного масла азотом, создающих перспективу повышения эффективности тонкой очистки растительных масел.

Объекты и методы исследований

Объектом изучения является двухфазная газожидкостная барботажная система с различными ПДЛ, в которой жидкая фаза – подсолнечное масло (нерафинированное, первый сорт, ГОСТ 1129-2013, ООО «Фроловский МаслоЗавод», Россия); газовая фаза – инертный по отношению к компонентам масла газообразный азот (ГОСТ 9293-74), поступающий из баллона. Жирнокислотный состав масла (таблица 1) определяли во ВНИИЖиров на хроматографе Bruker Scion 436 GC (SCION Instruments, США), колонка $L = 30$ м, $D = 0,25$ мм и активной фазой на основе полиэтиленгликоля по ГОСТ 31663. Использовалось подсолнечное масло из той же партии, что в предыдущих исследованиях [9–11], при соблюдении условий хранения.

Таблица 1. Жирнокислотный состав нерафинированного подсолнечного масла
Table 1. Fatty acid composition of unrefined sunflower oil

Наименование жирной кислоты	Условное обозначение	Содержание жирной кислоты, %
Миристиновая	C14:0	0,1
Пальмитиновая	C16:0	6,3
Пальмитолеиновая	C16:1	0,1
Стеариновая	C18:0	3,7
Олеиновая	C18:1	21,8
Линолевая	C18:2	66,5
Линоленовая	C18:3	0,1
Арахидовая	C20:0	0,3
Гондоиновая	C20:1	0,1
Бегеновая	C22:0	0,7
Эруковая	C22:1	0,1
Лигноцериновая	C24:0	0,2

Определение вязкости подсолнечного масла проводили на ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1 (RheoTest Messgerate Medingen, Германия). Плотность устанавливали пикнометрическим методом на основе ГОСТ ISO 6883-2024.

Для исследования барботажа подсолнечного масла азотом был поставлен эксперимент в условиях, максимально приближенных к производственным. Использовали специализированную установку, состоящую из стеклянного сосуда в форме параллелепипеда высотой 500 мм с основанием 140х140 мм, в который помещается рабочий узел. Он состоит из металлического стержня с резьбой диаметром 10 мм, вдоль которого смонтирована трубка для подачи азота в расположенный в нижней части барботер 1 с отверстием диаметром 3 мм (рисунок 1).

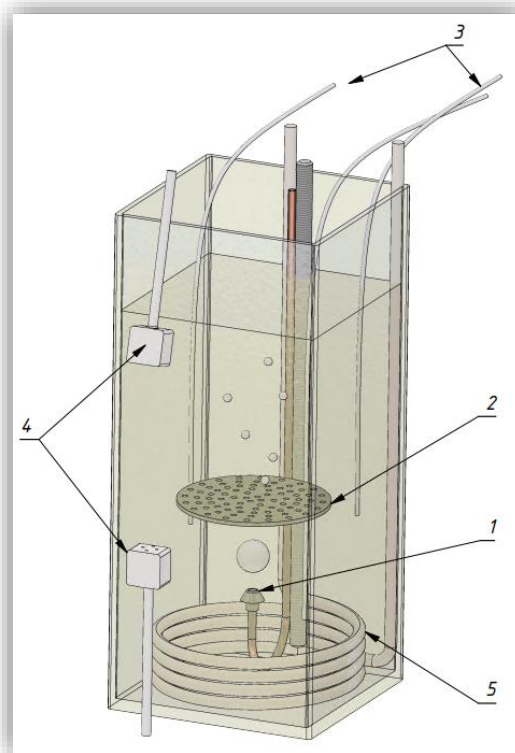


Рисунок 1. Схема рабочего узла установки для исследования барботажа: 1 – барботер, 2 – ПДЛ, 3 – термодатчики, 4 – камеры для фото-видео фиксации, 5 – контур жидкостного нагревателя

Figure 1. The working unit for the bubbling research: 1 – sparger, 2 – submerged perforated sheet (SPS), 3 – temperature sensors, 4 – cameras for photo and video recording, 5 – liquid heater circuit

На стержне с резьбой установлен подвижный кронштейн 2 для крепления съемного ПДЛ, что позволяет фиксировать его строго горизонтально на заданной высоте перпендикулярно траектории всплывания пузырей. Внутри объема сосуда установлены два термодатчика 3 для измерения температуры подсолнечного масла, с точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Съемка изображений осуществлялась двумя камерами 4 Olympus OM-D E M5 Mark III 5184x3888 пикселей с подсветкой галогеновыми и LED осветителями световым потоком 7000 лм. Внутри сосуда помещен силиконовый жидкостной нагреватель 5 длиной 3 м и диаметром трубки 14 мм, в который подается высокотемпературный теплоноситель от термостата для обеспечения заданного температурного режима.

Система подачи азота в рабочий узел включает баллон со сжатым газом, редуцирующий узел, блок расходомеров типа РМ-А-0,035ГУЗ, РМ-А-0,16ГУЗ, РМ-А-0,25ГУЗ, градуированные на N_2 , электрический подогреватель, запорные и регулирующие клапаны, соединительные трубки, манометры и датчики температуры.

Сигнал от всех термодатчиков (термопар типа К) поступал в аппаратно-программный комплекс (АПК), разработанный в лаборатории автоматизации и вычислительной техники ВНИИЖиров, который описан ранее [11]. В таблице 2 представлены основные технические характеристики данной экспериментальной установки.

Таблица 2. Основные технические характеристики экспериментальной установки
Table 2. Main technical characteristics of the experimental setup

Наименование	Величина
Линейные размеры барботажной камеры, мм	140x140x500
Объем барботажной камеры, л	8
Максимальная глубина погружения барботера, мм	420
Диаметр ПДЛ, мм	90
Расстояние от отверстия барботера до ПДЛ, мм	40–150
Температура в объеме жидкости, $^{\circ}\text{C}$	20–125
Температура подаваемого в барботер азота, $^{\circ}\text{C}$	20–150
Расход подаваемого в барботер азота, л/мин	0,01–2,00
Мощность системы термостатирования, Вт	3000
Мощность электронагревателя системы подачи азота, Вт	1000

Процедуру эксперимента осуществляли следующим образом. К кронштейну рабочего узла, расположенному на стержне с резьбой, крепили исследуемый ПДЛ. В емкость до отметки уровня заливали около восьми литров масла так, чтобы барботажный слой был не менее 450–470 мм. Масло нагревали до заданной температуры при умеренной скорости нагрева $1\text{--}2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ с периодическим перемешиванием. Одновременно выводили на заданный температурный режим электрический подогреватель азота, после чего азот подавали в барботер, и систему выводили на устойчивый расходный и температурный режимы. Затем рабочий узел опускали в исследуемое подсолнечное масло. После установления стационарного режима производили съемку цифровой камерой и фиксировали параметры опыта.

Таблица 3. Геометрические параметры ПДЛ и результаты экспериментов
Table 3. Geometric parameters of the SPS and experimental results

Форма поверхности	Диаметр, мм; кол-во отверстий, шт	Марка пищевого алюминия ГОСТ 11069-2019	Диаметр/ толщина, мм	Обозначение
Плоская	0	A5	90/2	ПДЛ ₀
Плоская	2x71	A5	90/2	ПДЛ ₂
Плоская	3x60	A5	90/2	ПДЛ ₃
Плоская	4x43	A5	90/2	ПДЛ ₄
Выпуклая вверх*	3x60	AK7	90/2	ПДЛ _{3CB}
Выпуклая вниз*	3x60	AK7	90/2	ПДЛ _{3CH}

*Радиус кривизны 350 мм

Программа исследований включала шесть типов ПДЛ, различающихся формой поверхности, диаметром и количеством отверстий (таблица 3). Плоские ПДЛ (ПДЛ₀, ПДЛ₂, ПДЛ₃, ПДЛ₄) изготовлены из пищевого алюминия марки А5 (ГОСТ 11069-2019) в виде дисков диаметром 90 мм и толщиной 2 мм. ПДЛ₀ – сплошная пластина без отверстий; ПДЛ₂ имел 71 отверстие диаметром 2 мм; ПДЛ₃ – 60 отверстий диаметром 3 мм; ПДЛ₄ – 43 отверстия диаметром 4 мм. Расстояние между отверстиями во всех плоских ПДЛ составляло не менее 10 мм. Полусферические ПДЛ с радиусом кривизны 350 мм и аналогичными 60 отверстиями диаметром 3 мм изготовлены из алюминиевого сплава АК7 в двух вариантах: ПДЛ_{3св} – выпуклостью вверх, ПДЛ_{3сн} – выпуклостью вниз. Шаг между отверстиями во всех ПДЛ составлял 10–15 мм.

Контрольным объемом для подсчета пузырей служил виртуальный цилиндрический газожижкостный слой высотой 60 и диаметром 90 мм (рисунок 2).

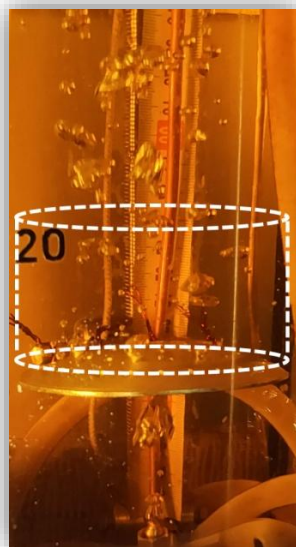


Рисунок 2. Всплытие пузырей с применением ПДЛ: белый пунктир – контрольный объем в виде цилиндра 90х60 мм
Figure 2. Bubble rise using a submerged perforated sheet (SPS); the control volume, shown with a white dashed line – 90х60 mm

В качестве параметра, характеризующего процесс дезинтеграции, ввели коэффициент K_d – отношение среднего значения количества пузырей над верхней поверхностью ПДЛ, прошедших через его отверстия, к среднему значению количества пузырей при свободном всплытии в одинаковых контрольных объемах. Численные значения K_d для различной конфигурации ПДЛ, определялись по формуле

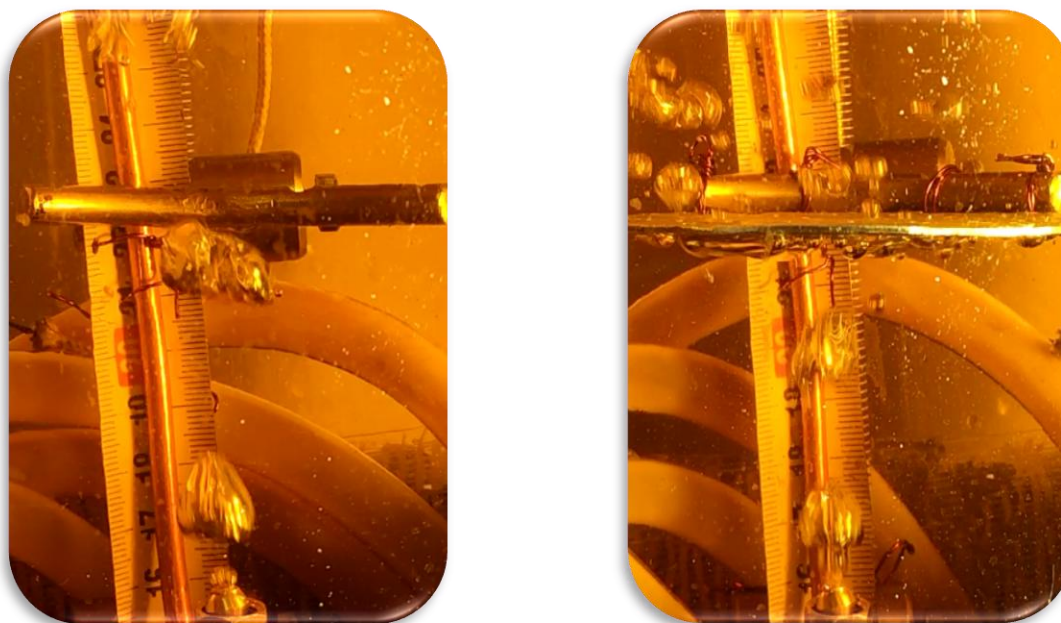
$$K_d = \frac{N_{\text{ПДЛ}}}{N_{\text{св}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ПДЛ}}$ – среднее количество пузырей в контрольном объеме над ПДЛ;

$N_{\text{св}}$ – среднее количество пузырей при свободном всплытии в контрольном объеме без применения ПДЛ.

На рисунке 3 представлены характерные изображения всплывающих пузырей азота при свободном движении и с применением ПДЛ.

Фракционный состав всплывающих пузырей разнообразен. В работе [10] пузыри были разделены на семь фракций (групп). Для исследования технологий барботаж требуется более простое деление на фракции, поэтому выбрали четыре фракции: микропузыри (до 1 мм), мелкие пузыри (1–3 мм), средние пузыри (4–11 мм) и крупные пузыри (12–20 мм). Подсчет среднего количества вторичных пузырей, образующихся на поверхности ПДЛ и относящихся к разным фракциям, позволил определить их процентное соотношение с точностью $\pm 2\%$.



А

Б

Рисунок 3 – Всплытие пузырей: А – свободное без ПДЛ; Б – с применением ПДЛ

Figure 3. Bubble rise: А – free rise without SPS; Б – with SPS

Результаты и их обсуждение

Результаты изучения влияния температуры на гидрогазодинамику барботажной системы масло–азот представлены в работах [9–11]. При построении технологического процесса, реализующего тонкую очистку растительных масел газообразным азотом в производственных условиях, необходимо определить диапазон рабочих температур. Нижний уровень температуры должен располагаться выше температуры кипения экстракционных растворителей, применяемых для получения растительного масла из маслосодержащего материала. К примеру, гексан, составляющий основу промышленных растворителей, имеет температуру кипения 68°C , а температура кипения отдельных фракций находится в интервале $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$, поэтому с учетом температурной депрессии можно принять рабочую температуру барботажа не ниже 90°C . Верхнее значение температуры выбирается из условия сохранения качества вырабатываемого масла. Многолетний промышленный и лабораторный опыт процессов маслодобыwania и маслопереработки, в том числе, использования барботажа острым водяным паром, показывает, что необходимая эффективность этих процессов и высокие показатели качества готового продукта достигаются при температурах 125°C . Снижение рабочей температуры вызвано необходимостью сократить удельные энергозатраты, экономия которых в масштабах больших производств обеспечивает существенную часть потенциала их развития. Кроме того, это способствует улучшению качества готового масла за счет снижения риска локальных и кратковременных перегревов. Однако, при уменьшении температуры подсолнечного масла увеличиваются его вязкость и плотность, что отрицательно сказывается на массообмене. С другой стороны, при этом возрастает сопротивление росту и движению пузырей, сокращаются отрывные диаметры и скорость их всплытия, следовательно, увеличивается суммарная площадь и продолжительность взаимодействия фаз. Принимая во внимание эти противоположные тенденции, влияющие на эффективность процесса барботажа, возникает необходимость определения рабочей температуры при использовании азота.

Как показали исследования [9–11], согласующиеся с результатами других авторов [30–32], для подсолнечного масла, представленного в таблице 1, в диапазоне температур $95\text{--}125^{\circ}\text{C}$ динамическая вязкость изменялась от 8,2 до 4,6 мПа·с, плотность – от 869,3 до 850,8 кг/м³, а средняя скорость всплытия пузырей, по представленным в [10] данным, изменялась от 0,27 до 0,36 м/с. При температурах выше 115°C наблюдались негативные изменения в структуре двухфазной системы в виде образующейся пены [11]. Повышенное пенообразование фиксировали и при расходах азота свыше 1,2 л/мин. С учетом проведенного ранее подробного экспериментально-теоретического изучения

теплоемкости растительных масел [33], выбран интервал температуры 95–105°C, а расход азота – менее 1 л/мин. Таким образом, в настоящих экспериментах приняли численное значение рабочей температуры 105°C, а расход азота 0,8 л/мин. Реализация возможности снижения рабочей температуры может быть достигнута в дальнейшем при изучении эффективности абсорбции целевых компонентов из масла в барботажной системе на уровне исследования узла аппарата (рисунок 1).

Для решения поставленных задач гидрогазодинамики необходимо изучить движение пузырей в «большом объеме» после выхода из одиночного отверстия барботера без ПДЛ. Понятие «большой объем» в двухфазных системах — это условия, когда размер пузырей несоизмеримо мал в сравнении с объемом всей жидкости без ее вынужденного движения.

Скорость азота в отверстии барботера 1,6–1,8 м/с. При выходе наблюдалось формирование пузырей правильной формы, которые отрывались с частотой 3–5 Гц. Они быстро ускорялись и свободно всплывали. На всей траектории происходили коалесценция и самопроизвольный распад пузырей. При этом во всем объеме масла образовывались микропузыри шарообразной формы, которые при движении не дробились и не коалесцировали и имели наименьшие скорости всплытия. Образующиеся микропузыри в результате преобладания сил поверхностного натяжения над силами, стремящимися их деформировать, принимали форму идеальной сферы. Скорость всплытия микропузырей, имеющих жесткую сферическую форму и размер меньше 1 мм при значении числа Рейнольдса (Re) меньше единицы, рассчитывали по известной формуле Стокса [1, 2]

$$v = \frac{gd^2(\rho_m - \rho_a)}{18\mu}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

d – диаметр пузыря, м;

ρ_m – плотность масла, кг/м³;

ρ_a – плотность азота, кг/м³;

μ – коэффициент динамической вязкости подсолнечного масла, Па/с.

Микропузыри не достигали поверхности слоя масла, не обладая достаточной подъемной силой для направленного движения вверх. Их движение характеризовалось непредсказуемостью, вызванной турбулентностями жидкости. Расчеты по формуле (2) показывают, что при рабочей температуре 105°C скорость движения микропузырей очень незначительна и находится в пределах 0,01–0,05 м/с. Объемная доля микропузырей в общем газосодержании невелика и не учитывалась в расчетах K_d .

Ранее в результате экспериментальных исследований [9] для мелких, средних и больших пузырей установлена зависимость скоростей их всплытия v от размера и температуры. При рабочей температуре 105°C предлагается эмпирическая формула для расчета скорости всплытия v (м/с)

$$v = 2,13d^{0.34}, \quad (3)$$

где d – диаметр пузыря, м.

Образующиеся мелкие пузыри, в отличие от микропузырей, уже обладали достаточной подъемной силой для выхода на поверхность слоя масла, но были чувствительны к движению турбулентных токов жидкости и имели рассчитанную по формуле (3) среднюю скорость всплытия 0,2–0,3 м/с. Установлено, что преимущественно мелкие пузыри провоцируют образование пены. Средние пузыри в большинстве своем имели правильную симметричную форму и в отсутствии ПДЛ меньше подвержены распаду, всплывали со средней скоростью 0,33–0,46 м/с, рассчитанной по формуле (3). Большие пузыри обладали подъемной силой, обеспечивающей более высокие скорости всплытия до 0,47–0,56 м/с, рассчитанные по формуле (3).

Длительность контакта фаз в барботажном слое вычисляется формулой

$$\tau = \frac{h}{v}, \quad (4)$$

где h – расстояние от поверхности ПДЛ до верхнего уровня жидкости, м.

Подставляя (3) в (4), получается соотношение вида

$$\tau = 0,47hd^{-0.34}. \quad (5)$$

Установлено, что выходящие из отверстия барботера пузыри на начальном участке длиной 40–60 мм образовывали цепочки в виде зигзага с амплитудой 5–10 мм, а затем всплывали по неразвитой спиралевидной траектории, с амплитудой 10–15 мм. Эта форма траектории сохранялась до верхнего уровня жидкости, что аналогично результатам, полученным авторами [34], для водной среды. Такая геометрия траектории всплывающих пузырей послужила обоснованием для выбора ПДЛ в виде пластины в форме круга диаметром 90 мм для «попадания» в него всех пузырей цепочки.

Сравнительные подсчеты в контрольных объемах на высоте от 40; 60; 80 и 100 мм показали, что количество пузырей $N_{\text{св}}$ изменялось от 14254 до 15607 шт/м³. Изменение удельного количества пузырей составило не более 10%. Исходя из этого, для рационального использования объема рабочего пространства расположение ПДЛ принято на высоте 60 мм от среза выходного отверстия сопла.

В ходе экспериментов были получены данные по количеству, фракционному составу пузырей в контрольных объемах, а также определены коэффициенты дезинтеграции K_d для соответствующих ПДЛ, которые представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты расчетов фракционного состава пузырей и коэффициента дезинтеграции
Table 4. Results of calculating the bubble fractional composition and the disintegration coefficient

Форма поверхности	Обозначение	Диаметр, мм; кол-во отв., шт	Удельн. кол-во пузырей, шт/м ³	Фракционный состав, %			K_d
				мелкие	средние	большие	
без ПДЛ	—	—	14783	46	26	28	1,00
плоская без отверстий	ПДЛ ₀	0	—	—	—	—	—
плоская*	ПДЛ ₂	2х71	—	—	—	—	—
плоская	ПДЛ ₃	3х60	63170	43	50	7	4,27
плоская	ПДЛ ₄	4х43	54048	36	57	7	3,66
выпуклая вверх	ПДЛ _{3св}	3х60	60392	43	50	7	4,09
выпуклая вниз	ПДЛ _{3сн}	3х60	41392	45	49	6	2,81

*Пузыри, двигаясь по нижней поверхности пластины, не проходили через отверстия, а всплывали через ее край

Эксперименты с ПДЛ₀ показали, что каждый из всплывающих со скоростью около 0,6 м/с пузырей после контакта с нижней поверхностью пластины распадался на отдельные, не равные друг другу фрагменты, движущиеся от ее центральной части радиально в разные стороны к периферии. К этим фрагментам добавлялись последующие, образуя концентрические фронты. Достигая края пластины, фронты фрагментов первичных пузырей огибали край и распадалась на большое количество вторичных пузырей более мелких размеров. Однако, кольцеобразное распределение в слое масла цепочек этих пузырей над ПДЛ₀ не удовлетворяет условиям равномерного заполнения барботажного объема. При этом данные опыты позволили установить картину газожидкостной смеси на его нижней поверхности без возможных искажений, вызванных проходом газовой фазы через отверстия на других типах ПДЛ.

В опытах с ПДЛ₂ наблюдался такой же характер структуры газожидкостной смеси на его нижней поверхности, как и в ПДЛ₀. Но через двухмиллиметровые отверстия ПДЛ₂ проходило около 3–5% вторичных пузырей от их общего количества. Можно предположить, что в отверстиях ПДЛ₂ силы поверхностного натяжения превышают подъемные силы формирующихся вторичных пузырей. Возможно, это происходит из-за недостаточной скорости «подпитки» газообразным азотом в вертикальном направлении через отверстия, вследствие интенсивного горизонтального движения концентрических фронтов фрагментов первичных пузырей по нижней поверхности ПДЛ₂.

В экспериментах с ПДЛ₃ наблюдалось формирование аналогичных концентрических волнообразных структур на его нижней поверхности. При этом 95–97% от общего количества вторичных пузырей формировалось через трехмиллиметровые отверстия. В экспериментах с ПДЛ₄ практически 100% вторичных пузырей образовывалось в четырехмиллиметровых отверстиях.

Затем были проведены опыты по изучению влияния полусферической формы поверхности на дезинтеграцию пузырей. При ориентации ПДЛ_{3св} выпуклостью вверх, пузыри сосредотачивались снизу, преимущественно в центральной части, и имели более сложный характер движения, включающий циркуляции по фронту волнообразных структур. Из-за этого вторичные пузыри образовывались

неравномерно по площади ПДЛ_{3св}. При ориентации ПДЛ_{3сн} выпуклостью вниз из центральной ее части выходило всего около 30% от общего количества образующихся вторичных пузырей, остальные формировались на краях так же, как на ПДЛ₀.

Из анализа данных, представленных в таблице 4, видно, что K_d над ПДЛ₃ больше почти на 17%, чем K_d над ПДЛ₄. При этом фракционный состав вторичных пузырей над ПДЛ₃ создает большую поверхность контакта фаз, обеспечивая лучшие условия массообмена, чем над ПДЛ₄. Так как, при помощи ПДЛ₃ формировались вторичные пузыри преимущественно с меньшим диаметром по сравнению с ПДЛ₄, то из (5) следует, что длительность их контакта фаз соответственно больше.

При сравнении результатов установлено, что у ПДЛ плоской формы K_d больше на 4%, чем у ПДЛ сферической формы, при практически одинаковом фракционном составе. Учитывая, что полусферическая форма ПДЛ менее технологична в изготовлении и обслуживании, ее применение представляется недостаточно перспективным.

Известно [1, 2], что эффективность массообмена между газом и жидкостью определяется площадью и временем контакта фаз. Соотношение площадей контакта фаз без ПДЛ и с ПДЛ зависит от K_d , определяемого по формуле (1), и вычисляется следующим образом

$$\frac{S_2}{S_1} = K_d^{0,4}, \quad (6)$$

где S_1 – площадь контакта фаз без ПДЛ, м²;

S_2 – площадь контакта фаз с ПДЛ, м².

Соотношение длительностей контакта фаз с ПДЛ и без ПДЛ зависит от K_d и с учетом (5) может быть выражена формулой

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = K_d^{0,1}, \quad (7)$$

где τ_1 – время контакта фаз без ПДЛ, с;

τ_2 – длительность контакта фаз с ПДЛ, с.

Расчеты, выполненные по формулам (6) и (7) с использованием данных таблицы 4, показали, что выбранные значения параметров функциональных узлов улучшили количественный и качественный состав всплывающих пузырей при барботаже. Так площадь контакта фаз при использовании ПДЛ увеличивается на 57% и длительность контакта фаз на 16%.

Заключение

При барботаже газообразным азотом подсолнечного масла экспериментально-аналитическим путем определено размещение ПДЛ на высоте 60 мм от выходного отверстия барботера и обоснована рабочая температура в 105°C. Введен новый параметр – коэффициент дезинтеграции K_d в качестве критерия количественной оценки эффективности функционирования ПДЛ в процессе барботажа. Установлена эффективность применения плоской ПДЛ с диаметрами отверстий 3 мм, с шагом 10–15 мм, обеспечивающая для коэффициента дезинтеграции K_d численное значение 4,27. При этом площадь контакта фаз увеличивается на 57%, а длительности контакта фаз на 16%.

Полученные результаты по дезинтеграции пузырей являются основой повышения эффективности процесса тонкой очистки растительных масел за счет абсорбции газообразным азотом при барботаже в аппаратах масложирового производства.

Литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.
2. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.
3. Besagni G., Inzoli F. Bubble column fluid dynamics: A novel perspective for flow regimes and comprehensive experimental investigations. *International Journal of Multiphase Flow*. 2021, V. 135, article 103510. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103510
4. Mahmood A.N., Abdulrahman A.A., Sabri L.S., Sultan A.J., Majdi H.S., Al-Dahhan M.H. Flow regime characterization in bubble column equipped with internals. *AIP Conference Proceedings*. 2025, V. 3169, no. 1, article 040010. DOI: 10.1063/5.0255986

5. Ferrario A., Varallo N., Besagni G., Mereu R. Influence of the gas phase on a large-scale bubble column fluid dynamics: Gas holdup, flow regime transitions, and bubble size distributions. *Chemical Engineering Science*. 2025, V. 302, Part A, article 120792. DOI: 10.1016/j.ces.2024.120792
6. Nedeltchev S., Top Y., Hlawitschka M.W., Schubert M., Bart H.-J. Identification of the regime boundaries in bubble columns based on the degree of randomness in the signals. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2019, V. 98, no. 7, pp. 1607–1621. DOI: 10.1002/cjce.23719
7. Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А. Закономерности всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости в присутствии поверхностно-активного вещества // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30. № 6. С. 1121–1124.
8. Hu J., Zhang W., Xu X., Gao F., Hou Y. Breakup dynamics of viscous bubbles in heart-shaped microchannel: Mechanisms and predictive models. *Chemical Engineering Science*. 2025, V. 312, article 121666. DOI: 10.1016/j.ces.2025.121666
9. Кульпинов А.С., Ракишина А.А., Федоров А.В., Волков С.М., Федоров А.А. Исследование температурной зависимости гидродинамических параметров двухфазной системы растительное масло-азот // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2025. Т. 15. № 3. С. 5–11. DOI: 10.31143/2221-7789-2025-3-5-11
10. Кульпинов А.С. Лисицын А.Н., Волков С.М., Федоров А.В., Ракишина А.А. Особенности барботаж азотом подсолнечного масла с регулируемой дезинтеграцией пузырей // Вестник ВСГУТУ. 2026. № 1. С. 112–122. DOI: 10.53980/24131997_2026_1_112
11. 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. 53–56. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-92-101
12. Guo Z., Wang D., Liu Y., Wang R., Bai J., Zhang S., Tang M. Hydrodynamics of a tridimensional rotational flow sieve tray with gas–liquid concurrent downflow under roll motion. *Separation and Purification Technology*. 2025, V. 364, Part 1, article 132183. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.132183
13. Yan F., Wang D., Liu Y., Wang R., Hu B., Zhang S., Zhang W., Tang M. Experimental and simulated studies on the distribution law of rotational–perforated fluid in tridimensional rotational flow sieve tray. *Chemical Engineering Science*. 2024, V. 286, article 119658. DOI: 10.1016/j.ces.2023.119658
14. Guo Z., Wang D., Liu Y., Wang R., Bai J., Zhang S., Tang M. CFD simulation study on the effects of inclined and rolling motions on the liquid flow distribution of tridimensional rotational flow sieve tray. *Chemical Engineering Journal*. 2025, V. 511, article 166673. DOI: 10.1016/j.cej.2025.166673
15. Marchini S., Vishwakarma V., Schubert M., Brunazzi E., Hampel U. Direct tray and point efficiency measurements including weeping effects. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021, V. 60, no. 6, pp. 2600–2612. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c05962
16. Marchini S., Vishwakarma V., Schubert M., Brunazzi E., Hampel U. Effects of non-uniform weeping distributions on tray and point efficiencies. *Results in Engineering*. 2023, V. 19, article 101238. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101238
17. Zhang Y., Lu Z., Qiao Y., Guo K., Li W., Liu H., Li X., Liu C. Gas holdup, bubble size distribution, and mass transfer in an airlift reactor with ceramic membrane and perforated plate distributor. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2023, V. 101, no. 8, pp. 4567–4580. DOI: 10.1002/cjce.24907
18. Hazare S.R., Patil C.S., Vala S.V., Joshi A.J., Joshi J.B., Vitankar V.S., Patwardhan A.W. Predictive analysis of gas hold-up in bubble column using machine learning methods. *Chemical Engineering Research and Design*. 2022, V. 184, pp. 724–739. DOI: 10.1016/j.cherd.2022.06.007
19. Shahhoseyni S., Rahmani M., Sivaram A. Advanced modeling techniques for predicting gas holdup in bubble columns using machine learning. *Fuel*. 2025, V. 388, article 134449. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134449
20. Uribe S., Alalou A., Cordero M.E., Al-Dahhan M. Development of a deep neural network and empirical model for predicting local gas holdup profiles in bubble columns. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2024, V. 103, Is. 6, pp. 2918–2936. DOI: 10.1002/cjce.25556
21. Hu J., Li N., Wang L., Yang P., Yang Y., Quan Y. Direct estimation of gas holdup in gas–liquid bubble column reactors using ultrasonic transmission tomography and artificial neural processing. *Meas Sci Technol*. 2022, V. 33, no. 7, article 074004. DOI: 10.1088/1361-6501/ac5d78
22. Cui Y., Li C., Zhang W., Ning X., Shi X., Gao J., Lan X. A deep learning-based image processing method for bubble detection, segmentation, and shape reconstruction in high gas holdup sub-millimeter bubbly flows. *Chemical Engineering Journal*. 2022, V. 449, article 137859. DOI: 10.1016/j.cej.2022.137859
23. Biard P.-F. Volatile organic compounds absorption in non-aqueous solvents: a critical review based on hydrodynamics and mass transfer considerations. *Chemical Engineering Journal*. 2025, V. 512, article 162413. DOI: 10.1016/j.cej.2025.162413
24. Al-Bodour A., Alomari N., Liew S.K., Aparicio S., Springstead J., Atilhan M. Experimental and theoretical insights into CO₂ and N₂ capture using natural hydrophobic deep eutectic solvents at high pressures. *ACS Omega*. 2025, V. 10, no. 23, pp. 24675–24696. DOI: 10.1021/acsomega.5c01533

25. Wei Y., Jin Z., Wang L., Li S., Zhang G., Cai Z., Li Y., Fu B. Optimization of acrylonitrile exhaust gas absorbent based on experimental and quantum computational chemistry. *Journal of Molecular Liquids*. 2025, V. 429, article 127569. DOI: 10.1016/j.molliq.2025.127569
26. Toma G., Alcántara Avila J.R. Experimental optimization of a venturi-type fine bubble generation system based on gas absorption rate. *Fluids*. 2025, V. 10, no. 2, article 25. DOI: 10.3390/fluids10020025
27. Barati-Harooni A., Jamialahmadi M. Experimental investigation and correlation of the effect of carbon nanotubes on bubble column fluid dynamics: Gas holdup, flow regime transition, bubble size and bubble rise velocity. *International Journal of Multiphase Flow*. 2021, V. 142, article 103647. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103647
28. Panjipour R., Karamoozian M., Albijanic B. Investigations of gas holdup, interfacial area of bubbles and bubble size distributions in a pilot plant flotation column. *Minerals Engineering*. 2021, V. 164, article 106819. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106819
29. Кисс В.В. Теоретическое описание величины поверхности контакта фаз при интенсивном барботаже // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2. С. 13.
30. Сияхаков С.М., Маджидов Х., Сафаров М.М., Нематов А. Плотность подсолнечного масла в зависимости от температуры и давления // Вестник Педагогического университета. 2012. № 6. С. 45–49. С. 45–49.
31. Клейменова Н.Л., Болгова М.А., Копылов М.В., Болгова И.Н. Анализ плотности и реологических характеристик растительных масел в технологическом диапазоне температур // Известия ТулГУ. 2023. № 4. С. 155–159. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-155-160
32. Остриков А.Н., Клейменова Н.Л., Болгова И.Н., Копылов М.В. Исследование теплофизических и реологических свойств пищевых растительных масел // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 36–43. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.005
33. Крылов В.А., Волков С.М., Баранов И.В., Тамбулатова Е.В., Федоров А.В. Изучение изменений удельной теплоемкости нерафинированных растительных масел от жирнокислотного состава и температуры // Вестник ВСГУТУ. 2025. № 1. С. 100–111. DOI: 10.53980/24131997_2025_1_100
34. 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

References

1. Kasatkin A.G. *Basic processes and apparatuses of chemical engineering*. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 752 p. (In Russian)
2. Ramm V.M. *Absorption of Gases*. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 656 p. (In Russian)
3. Besagni G., Inzoli F. Bubble column fluid dynamics: A novel perspective for flow regimes and comprehensive experimental investigations. *International Journal of Multiphase Flow*. 2021, V. 135, article 103510. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103510
4. Mahmood A.N., Abdulrahman A.A., Sabri L.S., Sultan A.J., Majdi H.S., Al-Dahhan M.H. Flow regime characterization in bubble column equipped with internals. *AIP Conference Proceedings*. 2025, V. 3169, no. 1, article 040010. DOI: 10.1063/5.0255986
5. Ferrario A., Varallo N., Besagni G., Mereu R. Influence of the gas phase on a large-scale bubble column fluid dynamics: Gas holdup, flow regime transitions, and bubble size distributions. *Chemical Engineering Science*. 2025, V. 302, Part A, article 120792. DOI: 10.1016/j.ces.2024.120792
6. Nedeltchev S., Top Y., Hlawitschka M.W., Schubert M., Bart H.-J. Identification of the regime boundaries in bubble columns based on the degree of randomness in the signals. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2019. V. 98, no. 7. pp. 1607–1621 DOI: 10.1002/cjce.23719
7. Arkhipov V.A., Usanina A.S., Churkin R.A. Laws of the monodispersed bubble cluster ascent in a viscous liquid in the presence of surfactant. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2023, no. 6, pp. 1121. (In Russian)
8. Hu J., Zhang W., Xu X., Gao F., Hou Y. Breakup dynamics of viscous bubbles in heart-shaped microchannel: Mechanisms and predictive models. *Chemical Engineering Science*. 2025, V. 312, article 121666. DOI: 10.1016/j.ces.2025.121666
9. Kulpinov A.S., Rakshina A.A., Fedorov A.V., Volkov S.M., Fedorov A.A. Investigation of the temperature dependence of hydrodynamic parameters of a two-phase vegetable oil-nitrogen system. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2025, no. 3, pp. 5–11. DOI: 10.31143/2221-7789-2025-3-5-11. (In Russian)
10. Kulpinov A.S., Lisitsyn A.N., Volkov S.M., Fedorov A.V., Rakshina A.A. Special aspects of nitrogen bubbling of sunflower oil with regulated bubble disintegration. *ESSUTM Bulletin*. 2026, no. 1, pp. 112–122. DOI: 10.53980/24131997_2026_1_112. (In Russian)
11. 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 International Academy of Refrigeration*. 2025, no. 2, pp. 53–56. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-92-101. (In Russian)

12. Guo Z., Wang D., Liu Y., Wang R., Bai J., Zhang S., Tang M. Hydrodynamics of a tridimensional rotational flow sieve tray with gas–liquid concurrent downflow under roll motion. *Separation and Purification Technology*. 2025, V. 364, Part 1, article 132183. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.132183
13. Yan F., Wang D., Liu Y., Wang R., Hu B., Zhang S., Zhang W., Tang M. Experimental and simulated studies on the distribution law of rotational–perforated fluid in tridimensional rotational flow sieve tray. *Chemical Engineering Science*. 2024, V. 286, article 119658. DOI: 10.1016/j.ces.2023.119658
14. Guo Z., Wang D., Liu Y., Wang R., Bai J., Zhang S., Tang M. CFD simulation study on the effects of inclined and rolling motions on the liquid flow distribution of tridimensional rotational flow sieve tray. *Chemical Engineering Journal*. 2025, V. 511, article 166673. DOI: 10.1016/j.cej.2025.166673
15. Marchini S., Vishwakarma V., Schubert M., Brunazzi E., Hampel U. Direct tray and point efficiency measurements including weeping effects. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021, V. 60, no. 6. pp. 2600–2612. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c05962
16. Marchini S., Vishwakarma V., Schubert M., Brunazzi E., Hampel U. Effects of non-uniform weeping distributions on tray and point efficiencies. *Results in Engineering*. 2023. V. 19, article 101238. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101238
17. Zhang Y., Lu Z., Qiao Y., Guo K., Li W., Liu H., Li X., Liu C. Gas holdup, bubble size distribution, and mass transfer in an airlift reactor with ceramic membrane and perforated plate distributor. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2023, V. 101, no. 8, pp. 4567–4580. DOI: 10.1002/cjce.24907
18. Hazare S.R., Patil C.S., Vala S.V., Joshi A.J., Joshi J.B., Vitankar V.S., Patwardhan A.W. Predictive analysis of gas hold-up in bubble column using machine learning methods. *Chemical Engineering Research and Design*. 2022, V. 184, pp. 724–739. DOI: 10.1016/j.cherd.2022.06.007
19. Shahhoseyni S., Rahmani M., Sivaram A. Advanced modeling techniques for predicting gas holdup in bubble columns using machine learning. *Fuel*. 2025, V. 388, article 134449. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134449
20. Uribe S., Alalou A., Cordero M.E., Al-Dahhan M. Development of a deep neural network and empirical model for predicting local gas holdup profiles in bubble columns. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2024, V. 103, Is. 6, pp. 2918–2936. DOI: 10.1002/cjce.25556
21. Hu J., Li N., Wang L., Yang P., Yang Y., Quan Y. Direct estimation of gas holdup in gas–liquid bubble column reactors using ultrasonic transmission tomography and artificial neural processing. *Meas Sci Technol*. 2022, V. 33, no. 7, article 074004. DOI: 10.1088/1361-6501/ac5d78
22. Cui Y., Li C., Zhang W., Ning X., Shi X., Gao J., Lan X. A deep learning-based image processing method for bubble detection, segmentation, and shape reconstruction in high gas holdup sub-millimeter bubbly flows. *Chemical Engineering Journal*. 2022, V. 449, article 137859. DOI: 10.1016/j.cej.2022.137859
23. Biard P.-F. Volatile organic compounds absorption in non-aqueous solvents: a critical review based on hydrodynamics and mass transfer considerations. *Chemical Engineering Journal*. 2025, V. 512, article 162413. DOI: 10.1016/j.cej.2025.162413
24. Al-Bodour A., Alomari N., Liew S.K., Aparicio S., Springstead J., Atilhan M. Experimental and theoretical insights into CO₂ and N₂ capture using natural hydrophobic deep eutectic solvents at high pressures. *ACS Omega*. 2025, V. 10, no. 23, pp. 24675–24696. DOI: 10.1021/acsomega.5c01533
25. Wei Y., Jin Z., Wang L., Li S., Zhang G., Cai Z., Li Y., Fu B. Optimization of acrylonitrile exhaust gas absorbent based on experimental and quantum computational chemistry. *Journal of Molecular Liquids*. 2025, V. 429, article 127569. DOI: 10.1016/j.molliq.2025.127569
26. Toma G., Alcántara Avila J.R. Experimental optimization of a venturi-type fine bubble generation system based on gas absorption rate. *Fluids*. 2025, V. 10, no. 2, article 25. DOI: 10.3390/fluids10020025
27. Barati-Harooni A., Jamialahmadi M. Experimental investigation and correlation of the effect of carbon nanotubes on bubble column fluid dynamics: Gas holdup, flow regime transition, bubble size and bubble rise velocity. *International Journal of Multiphase Flow*. 2021, V. 142, article 103647. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103647
28. Panjipour R., Karamoozian M., Albijanic B. Investigations of gas holdup, interfacial area of bubbles and bubble size distributions in a pilot plant flotation column. *Minerals Engineering*. 2021, V. 164, article 106819. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106819
29. Kiss V.V. Theoretical description of the phase contact surface area during intense bubbling. *Processes and Food Production Equipment*. 2014, no. 2. (In Russian)
30. Siyakhakov S.M., Madzhidov Kh., Safarov M.M., Nematov A. Density of sunflower oil depending on temperature and pressure. *Herald of the Pedagogical University*. 2012, no. 6, pp. 45–49. (In Russian)
31. Kleymenova N.L., Bolgova M.A., Kopylov M.V., Bolgova I.N. Analysis of density and rheological characteristics of vegetable oils in the technological temperature range. *Izvestiya Tula State University*. 2023, no. 4, pp. 155–159. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-155-160 (In Russian)
32. Ostrikov A.N., Kleymenova N.L., Bolgova I.N., Kopylov M.V. Study of thermophysical and rheological properties of edible vegetable oils. *Polzunovskiy vestnik*. 2021, no. 2, pp. 36–43. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.005 (In Russian)

33. Krylov V.A., Volkov S.M., Baranov I.V., Tambulatova E.V., Fedorov A.V. Study of changes in specific heat capacity of unrefined vegetable oils depending on fatty acid composition and temperature. *ESSUTM Bulletin*. 2025, no. 1, pp. 100–111. DOI: 10.53980/24131997_2025_1_100 (*In Russian*)
34. Kozelkov A.S., Efremov V.R., Dmitriev S.M., Kurkin A.A., Pelinovskiy E.N., Tarasova N.V., Strelets D.Yu. Study of features of rising of air bubbles and solid spheres. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, no. 4, pp. 73–85. DOI: 10.7868/S2073667318040093. (*In Russian*)

Информация об авторах

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

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

Андрей Сергеевич Кульпинов – аспирант, ведущий инженер

Александр Геннадьевич Новоселов – д-р техн. наук, доцент образовательного центра Энергоэффективные инженерные системы

Алексей Александрович Федоров – канд. техн. наук, доцент факультета биотехнологий

Information about the authors

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

Sergey M. Volkov, Ph.D. (Chem), Senior Researcher of the Department of Fat Research

Andrey S. Kulpinov, Postgraduate Student, Lead Engineer

Alexander G. Novoselov, Dr. Sc. (Eng), Associate Professor of Educational Center Energy Efficient Engineering Systems

Alexey A. Fedorov, Ph.D. (Eng), Associate Professor

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

Статья поступила в редакцию 26.05.2026

Одобрена после рецензирования 08.07.2026

Принята к публикации 10.07.2026

The article was submitted 26.05.2026

Approved after reviewing 08.07.2026

Accepted for publication 10.07.2026