ФИЗИКА

УДК 536.1; 665.1/3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ РАСТИТЕЛЬНОЕ МАСЛО-АЗОТ

[1,2]Кульпинов А.С., [1,2]Ракшина А.А., [1,2]Федоров А.В.*, [1]Волков С.М., [2]Федоров А.А.

[1]Всероссийский научно-исследовательский институт жиров
2Национальный исследовательский университет ИТМО

**zd@vniig.org*

Аннотация. Для моделирования процессов тепломассопереноса при барботаже и конструирования оборудования, применяемого в технологиях масложирового производства, получены экспериментальные данные по скоростям всплытия пузырей азота в подсолнечном масле в зависимости от их размера в температурном диапазоне 20–115 °С.

Ключевые слова: температура, двухфазная газо-жидкостная система, подсолнечное масло, азот, барботаж

INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF A TWO-PHASE VEGETABLE OIL-NITROGEN SYSTEM

[1,2]Kulpinov A.S., [1,2]Rakshina A.A., [1,2]Fedorov A.V., [1]Volkov S.M., [2]Fedorov A.A.

[1]All-Russian Scientific Research Institute of Fat
[2] ITMO University

Abstract. *To simulate the processes of heat and mass transfer during bubbling and the design of equipment used in fat and oil production technologies, experimental data were obtained on the rates of ascent of nitrogen bubbles in sunflower oil, depending on their size in the temperature range 20–115 °C.*

Keywords: temperature, two-phase gas-liquid system, sunflower oil, nitrogen, bubbling

Барботаж – пропускание газовой фазы в виде пузырей через слой жидкости давно и успешно применяется во многих отраслях техники. В масложировом производстве перспективным при барботаже растительного масла представляется применение азота вместо используемого перегретого водяного пара [1, 2]. В такой двухфазной системе скорость всплытия пузырей и их размер являются одними из определяющих гидродинамических параметров. Работа [3], представленная Haberman W.L., Morton R.K., на долгие годы стала надёжным ориентиром при интерпретации результатов любой исследовательской программы в этой научной области. На *рисунке 1* приведены экспериментальные данные из этой публикации в оригинальном виде, так как в некоторых обзорных статьях их можно обнаружить с искажения-

ми. Как видно из графиков характер кривых для воды и минерального масла кардинально различен. Это показало необходимость проведения исследований для каждой конкретной задачи.

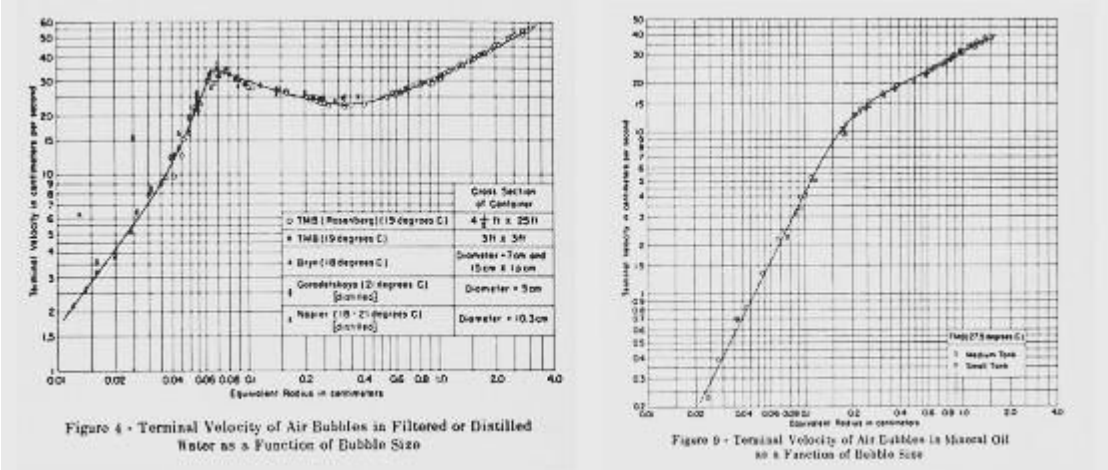

Рисунок 1 – Зависимости скорости всплытия воздушных пузырей от их размера в воде и минеральном масле [3]

Исследования гидродинамических и теплофизических процессов в двухфазной системы «растительное масло-азот» в интересующем диапазоне температур практически не проводилось. В связи с этим, при составлении плана исследования была использована методология изучения барботажа иных пар жидкостей и газов накопленная в различных отраслях науки. В металлургии [4] продувка инертным газом, в частности аргоном, через погруженное сопло эффективно очищает сталь от газов и включений. Однако пузырьки менее 1 мм остаются в металле, создавая дефекты. А в [5] рассматривается механизм образования пузырьков в соплах и продувочных пробках. В [6] установлено, что увеличение степени разрежения приводит к уменьшению характерного размера пузырьков и изменению скорости их подъема.

Для других пар жидкостей и газов использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) [7, 8] уменьшает подвижность пузырьков, приближает их поведение к твердым частицам. В вязкоупругих средах [9] наблюдается резкое ускорение пузырей при критическом объеме из-за деформации и обратного течения жидкости. Это обусловлено накоплением упругой энергии при растяжении полимерных молекул пузыря, где важно соотношение времен переноса и релаксации. В неньютоновских жидкостях [10] в загущающихся средах крупные пузыри приобретают более сферичную форму, тогда как в разжижающихся – мелкие пузыри теряют сферичность. С использованием видеосъемки и ультразвуковых измерений температурные исследования [11] выявили двойной механизм влияния: в чистой воде изменения обусловлены физико-химическими свойствами, а в ПАВ-содержащих растворах – кинетикой формирования адсорбционных слоев. В исследовании [12] обнаружено необычное фрагментирование паровых пузырей в кольцевых зазорах при низком давлении. Инновационные методы [13, 14], комплексно оценивают скорости течения и газосодержание с 2D и 3D анализом траекторий, скоростей и размеров пузырей. В публикации [15] показано, что добавление частиц уменьшает размер пузырьков за счет их дробления и снижения скорости подъема, а также повышает коэффициент массопереноса. Авторы [16] на основе аналогии теплогидравлики кипения и барботажа получили теоретические зависимости для скорости роста пузырьков при наличии микроподслоя жидкого реагента. Результаты исследования [17] показали, что давление и температура существенно влияют на распределение размеров и динамику пузырьков.

Анализ публикаций и востребованность исследований позволили сформулировать цель настоящей работы – определение температурной зависимости скорости всплытия пузырей азота различного размера в растительном масле.

Методы и объекты исследования

Опыты проводились с самым распространённым в России растительным маслом – подсолнечным (ГОСТ 1129-2013) и газообразным азотом из баллона (ГОСТ 9293-74). В *таблице 1* представлен жирнокислотный состав нерафинированного подсолнечного масла, который определялся в соответствии с ГОСТ 31663 с использованием хроматографа Bruker Scion 436 GC (длина колонки 30 м, диаметр 0,25 мм).

Таблица 1 – Жирнокислотный состав нерафинированного подсолнечного масла

№	Наименование жирной кислоты	Условное обозначение	Содержание жирной кислоты, %
1	Миристиновая	C14:0	0,1
2	Пальмитиновая	C16:0	6,3
3	Пальмитолеиновая	C16:1	0,1
4	Стеариновая	C18:0	3,7
5	Олеиновая	C18:1	21,8
6	Линолевая	C18:2	66,5
7	Линоленовая	C18:3	0,1
8	Арахиновая	C20:0	0,3
10	Гондоиновая	C20:1	0,1
12	Бегеновая	C22:0	0,7
13	Эруковая	C22:1	0,1
14	Лигноцериновая	C24:0	0,2

Для экспериментов использовалась установка БИУ2, подробно описанная в нашей предыдущей публикации [2]. Установка позволяет создавать условия барботажа максимально приближенные к реальным производственным. Жидкость находилась внутри стеклянной цилиндрической емкости. Высота столба жидкости около 800 мм, диаметр 49 мм. Внутри жидкости располагалась метрическая шкала ценой деления 1 мм (ГОСТ 427-75). Изображения были получены камерой Olympus OM-D E M5 Mark III с максимальным разрешением 5184×3888. Пузыри азота выпускали снизу из игл диаметрами от 0,4 до 2,4 мм. Еще одной особенностью опытов было то, что из игл каждого диаметра пузыри запускались сериями продолжительностью 60–120 секунд с и интервалами в 10–20 секунд. Такой способ формирования динамики газовой фазы позволил получить большой набор данных по размерам пузырей в интересующем температурном диапазоне от 20 до 115 °C. В этом диапазоне происходят заметные изменения в структуре масел, определяющие их теплофизические и реологические свойства, что ранее было установлено экспериментально нами и другими исследователями. Мелкие пузыри имели форму шара, а более крупные были близки к сфероиду с меньшим диаметром по вертикали, как видно на *рисунке 2*.

Рисунок 2 – Два последовательных изображения (кадра) всплытия пузырей

Для таких пузырей в качестве размера принимался так называемый эквивалентный радиус

$$R_3 = \frac{\sqrt[2]{D^2 * d}}{2},, \quad (1)$$

где D и d – больший и меньший диаметры сфероида, м.

Полученный видеоряд изображений в процессе всплытия раскладывался на кадры (*рисунок 2*), выбирался пузырь и определялись его геометрические размеры. Далее фиксировались координаты пузыря в кадрах и вычислялась скорость

$$w = \frac{(z_{i+1} - z_i)}{\Delta\tau_i(n-1)}, \quad (2)$$

где z_i и z_{i+1} – начальная и конечная координаты положения пузыря в кадрах, м, $\Delta\tau$ – время между кадрами, с, n – количество используемых в расчете кадров.

Результаты и обсуждение

В опытах установлено, что при каждой подаче азота в импульсе различались три последовательные группы (*рисунок 3*): начальная – «первые» пузыри; группа «ансамбль» пузырей с разными скоростями, с коалесценцией и распадом; замыкающая группа – пузыри с одинаковой скоростью, образующие «цепочку».

Рисунок 3 – Всплытие пузырей азота: а) первые; б) ансамбль, в) цепочка

Практический интерес представляет ансамбль пузырей, как реализуемый при барботаже растительного масла. Результаты определения скоростей всплытия в зависимости от температуры и размера представлены на *рисунках 4–6*. Можно отметить, что характер зависимостей аналогичен, тому который был для системы минеральное масло-воздух и показан на *рисунке 1*.

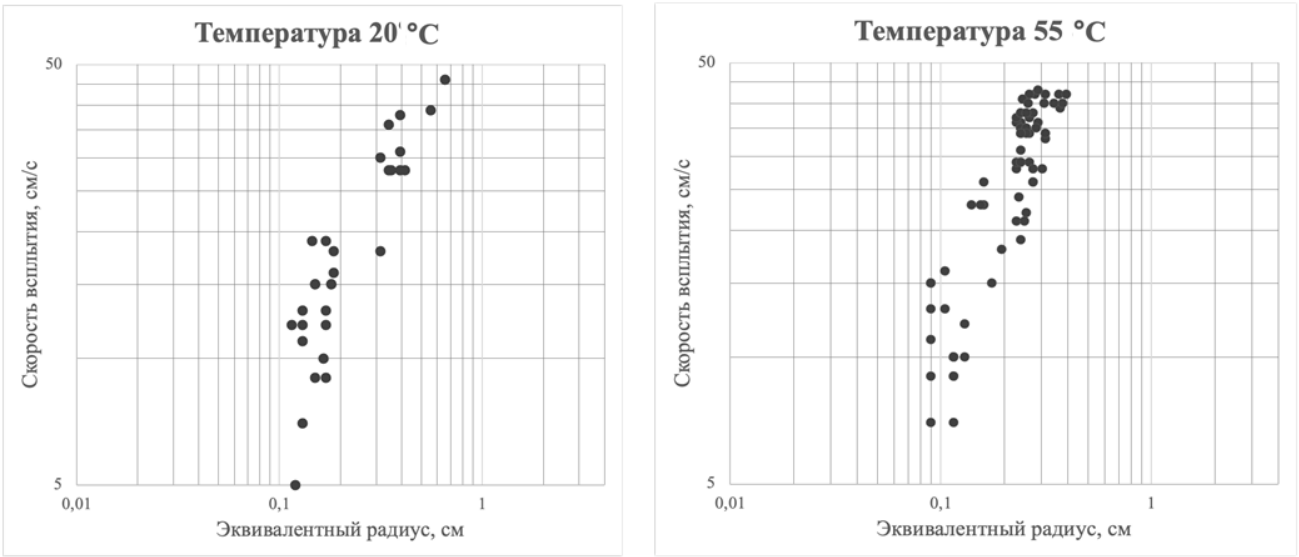

Рисунок 4 – Скорости всплытия пузырей азота в зависимости от их размеров при температурах 20 и 55 °С

Скорость всплытия пузырей прямо пропорциональна их размеру. Влияние температуры на скорость всплытия пузырей более ощутимо (на 10–15 %) при температурах 20–55 °С, чем при 75–115 °С. Скорости всплытия в рамках этих диапазонов изменяются незначительно. Объяснение может быть таким, что изменение температуры влияет на физические свойства, определяющие действующие на пузырь силы, вектора которых в свою очередь могут компенсировать друг друга.

Кроме того, установлено, что скорость всплытия первого пузыря в импульсе в 1,3–1,6 раза ниже, чем у остальных пузырьков в ансамбле практически во всем исследуемом диапазоне температур. Объяснение этого возможно лишь на основе гипотез. В ансамбле, при всплытии пузыря, вокруг него происходил разрыв жидкости и, соответственно, межмолекулярных связей с последующей релаксацией. Масло, в котором всплывают последующие пузыри, возможно, сохраняло неопределенную структуру, гораздо менее плотную и упорядоченную, чем в исходном состоянии.

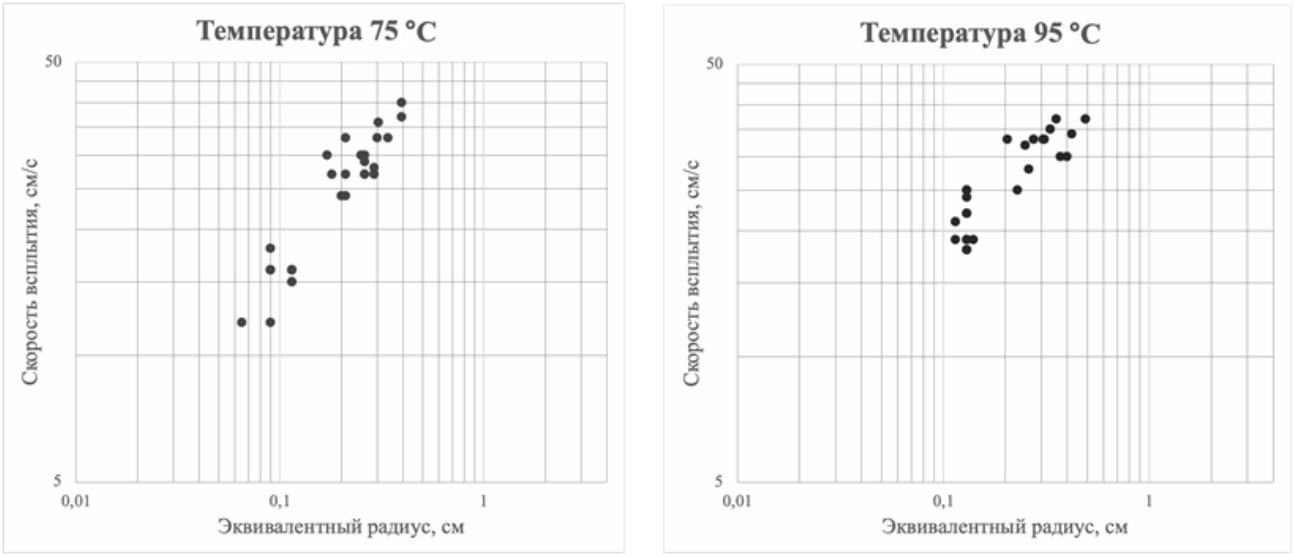

Рисунок 5 – Скорости всплытия пузырей азота в зависимости от их размеров при температурах 75 и 95 °С

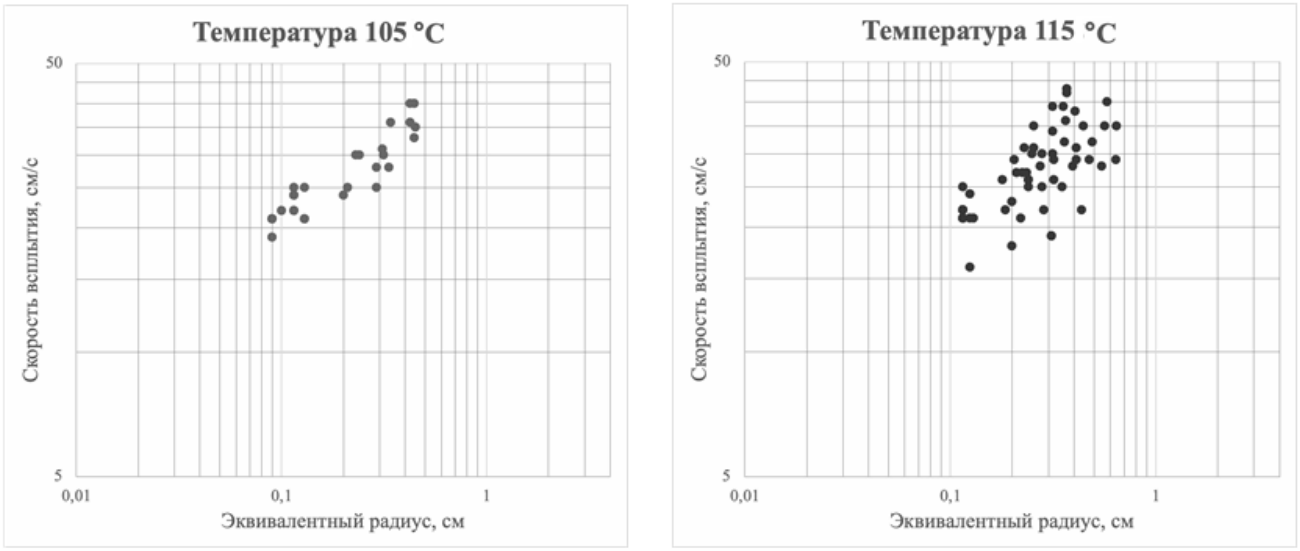

Рисунок 6 – Скорости всплытия пузырей азота в зависимости от их размеров при температурах 105 и 115 °С

Нами ранее уже было установлено проявление признаков неньютоновского характера растительных масел, что подтверждается и другими исследователями [18]. При этом у нижеследующих пузырей появляется возможность догонять предшествующие пузыри и коалесцировать с последующим распадом на более устойчивые формы. Кроме того, при объединении отдельных пузырей в тесно связанную группу в ансамбле происходит формирование виртуального структурированного пузыря с внутренними

границами, имеющего суммарный объём из образующих его более мелких пузырей, скорость всплытия которого выше, что опытно подтверждено. При сравнении с данными, полученными нами ранее, установлено, что пузыри азота всплывают в 1,3–1,5 раза медленнее пузырей перегретого водяного пара. В первую очередь, это объясняется разницей в плотностях 0,87 и 0,52 кг/м^3 азота и перегретого водяного пара соответственно, а значит и в подъемной силе (архимедовой силе). Также возможно влияет меньшая вязкость подсолнечного масла вблизи поверхности пузырей из-за более высокой температуры пузырей перегретого водяного пара (120–160 °С) чем азота (105–115 °С). Влияние может оказывать и диффундирование молекул воды в масло при кратковременной конденсации и вторичное испарение их, образуя микроциркуляцию, но это пока лежит в плоскости предположений, требующих практического подтверждения.

Заключение

Экспериментально определена прямо пропорциональная зависимость скорости всплытия пузырей от их размера, что согласуется с результатами других авторов для иных жидкостей. Установлено, что скорости всплытия пузырей азота одного и того же размера в температурном интервале 20–55 °С выше примерно на 10–15 %, чем в температурном интервале 55–115 °С. При этом внутри каждого температурного интервала скорости всплытия отличаются мало.

Такой значимый параметр тепломассообмена, как время контакта фаз при использовании азота вместо перегретого водяного пара, может быть повышен почти на 45 % за счет меньшей скорости всплытия пузырей. Если дополнить факторами отсутствие в азоте ухудшающих качество растительного масла примесей, молекул воды и более низкий уровень рабочих температур, то применение новой технологии барботажа становится еще более перспективным.

Результаты проведённых исследований, имея очевидное прикладное значение в расчетах процесса барботажа растительного масла азотом, могут быть использованы при дальнейшем развитии фундаментальных разделов теории гидрогазодинамики барботажных систем.

Библиография

1. Схаляхов А.А., Блягоз Х.Р., Кошевой Е.П., Верещагин А.Г. Процесс окончательной дистилляции ацетоно-масляной мисцеллы с инертным компонентом // Новые технологии. 2011. №. 2. С. 46–49.

2. 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 (95). С. 53–56.

3. Haberman W.L., Morton R.K. An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids. Washington: Navy Department the D.W. Taylor model basin, 1953. 57 p.

4. Хан А., Спиридонов Е.К., Хабарова Д.Ф., Санаулла Х., Бахадар А., Звави М., Алгарни М., Фелембан Б. Экспериментальное исследование погруженной в резервуар с водой двухфазной (воздух-вода) пузырьковой струи, моделирующей процесс непрерывного литья // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61, № 4. С. 84–95.

5. Haas T., Schubert C., Eickhoff M., Pfeifer H. A review of bubble dynamics in liquid metals // Metals. 2021. V. 11, N 4. P. 664.

6. Мурашов В.А., Строгонов К.В., Борисов А.А., Львов Д.Д. Дегазация стали в сталеплавильных агрегатах непрерывного действия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 1. С. 140–147.

7. Архипов В.А., Усанина А.С., Басалаев С.А., Каличкина Л.Е., Мальков В.С. Динамика всплытия кластера пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2020. № 1. С. 104–112.

8. Борзенко Е.И., Усанина А.С., Шрагер Г.Р. Влияние поверхностно-активного вещества на скорость всплытия пузырька в вязкой жидкости // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 84. С. 81–92.

9. Bothe D., Koebe M., Schmidt A., Warnecke H.-J. On the molecular mechanism behind the bubble rise velocity jump discontinuity in viscoelastic liquids // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2022. V. 302. P. 104748.

10. Battistella A., Tosco T., Seth J.R., Van der Schaaf J. On the terminal velocity of single bubbles rising in non-Newtonian power-law liquids // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2020. V. 278. P. 104249.

11. Borkowski M., Zawala J. Influence of temperature on rising bubble dynamics in water and n-pentanol solutions // Minerals. 2021. V. 11, N 10. P. 1067.

12. Дехтярь Р.А., Овчинников В.В. Экспериментальное исследование движения и формы парового пузыря, всплывающего в кольцевом канале при субатмосферном давлении // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 6. С. 1111–1120.

13. Гордиенко М.Р., Прибатурин Н.А., Меледин В.Г., Лобанов П.Д. Многоинформационная методика для экспериментального изучения двухфазных пузырьковых течений // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Т. 8, № 1. С. 111–119.

14. Тимкин Л.С., Горелик Р.С. Локальная скорость скольжения пузырьков в опускном ламинарном течении в трубе // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 2. С. 269–279.

15. Sastaravet P., Boonvanich B., Wongsuchoto P., Charinpanitkul T. Relative effect of additional solid media on bubble hydrodynamics in bubble column and airlift reactors towards mass transfer enhancement // Processes. 2020. V. 8, N 6. P. 713.

16. Мешалкин В.П., Панченко С.В., Дли М.И., Бобков В.И., Черновалова М.В. Механизм интенсификации гетерогенной реакции восстановления с выделением пузырьков газа // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54, № 2. С. 192–201.

17. Leonard C., Ferrasse J.-H., Lefevre S., Viand A., Boutin O. Bubble rising velocity and bubble size distribution in columns at high pressure and temperature: From lab scale experiments to design parameters // Chemical Engineering Research and Design. 2021. V. 173. P. 108–118.

18. Zenit R., Feng J.J. Hydrodynamic interactions among bubbles, drops, and particles in non-Newtonian liquids // Annual review of fluid mechanics. 2018. V. 50. N 1. P. 505–534.