Статья поступила в редакцию: 23.09.2026
Статья принята к публикации: 28.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 66.074

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23515

Экспериментальное исследование высоты газовой подушки в зоне смешения абсорбционного аппарата

Каримов Икромали Тожиматович
д-р техн. наук, проф.
Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана

Халилов Исмоил Латифжон угли
независимый искатель, Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
E-mail: halilov.5710@gmail.com

Experimental study of the gas-cushion height in the mixing zone of an absorption apparatus

Karimov Ikromali Tojimatovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Khalilov Ismoil Latifjon ugli
Independent Researcher
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования высоты газовой подушки в зоне смешения новой конструкции тарельчатого барботажного абсорбционного аппарата. Цель работы заключается в экспериментальном определении изменения высоты газовой подушки при изменении диаметра газопередающих отверстий и расхода газа, а также в сопоставлении экспериментальных результатов с расчетными значениями и установлении практических закономерностей для выбора параметров газораспределительного элемента. Исследовано влияние диаметра газопередающих отверстий газораспределительной насадки и расхода газа на формирование газовой подушки при подаче воздуха и воды. В экспериментальной установке использованы отверстия диаметром d_0 = 1; 1,5 и 2 мм при четырех отверстиях каждого диаметра. Расход газа изменяли от 0,15 до 0,55 м³/ч с шагом 0,10

Библиографическое описание: Каримов И.Т., Халилов И.Л.У. Экспериментальное исследование высоты газовой подушки в зоне смешения абсорбционного аппарата // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23515

м³/ч, а расход жидкости составлял 0,023; 0,031 и 0,039 м³/ч. Для каждого режима определяли экспериментальную высоту газовой подушки по показаниям миллиметровой шкалы, установленной на прозрачной измерительной трубке. Полученные значения сопоставлены с теоретическими расчетами по уравнению гидродинамического равновесия в зоне смешения. Показано, что увеличение расхода газа приводит к росту высоты газовой подушки, тогда как увеличение диаметра газопередающего отверстия снижает ее величину за счет уменьшения гидравлического сопротивления. Изменение расхода жидкости в исследованном диапазоне не оказало заметного влияния на высоту газовой подушки. Полученные результаты могут быть использованы при выборе диаметра отверстий и проектировании барботажного патрубка промышленного абсорбционного аппарата.

Abstract

The paper presents the results of an experimental study of gas-cushion height in the mixing zone of a new tray-type bubble absorption apparatus. The aim of the study is to experimentally determine the variation in gas-cushion height with changes in gas-transfer orifice diameter and gas flow rate, compare the experimental results with calculated values, and establish practical relationships for selecting gas-distributor parameters. The effects of the diameter of gas-transfer orifices in the gas distributor and gas flow rate on gas-cushion formation were investigated using air and water. The experimental setup employed four gas-transfer orifices for each diameter of d_0 = 1, 1.5 and 2 mm. The gas flow rate was varied from 0.15 to 0.55 m³/h with an increment of 0.10 m³/h, while the liquid flow rate was set to 0.023, 0.031 and 0.039 m³/h. For each operating condition, the experimental gas-cushion height was determined from a millimeter scale installed on a transparent measuring tube. The measured values were compared with theoretical calculations obtained from the hydrodynamic balance equation for the mixing zone. The results show that increasing the gas flow rate increases the gas-cushion height, whereas increasing the gas-transfer orifice diameter decreases it because of lower hydraulic resistance. Variation of the liquid flow rate within the investigated range had no noticeable effect on the gas-cushion height. The obtained results can be used to select gas-distributor orifice diameters and to design the bubbling nozzle of an industrial absorption apparatus.

Ключевые слова: абсорбер, барботаж, газовая подушка, газораспределитель, диаметр отверстия, расход газа, расход жидкости.

Keywords: absorber, bubbling, gas cushion, gas distributor, orifice diameter, gas flow rate, liquid flow rate.

Введение

Совершенствование абсорбционных аппаратов для газоочистки и интенсификации массообмена связано с одновременным снижением металлоемкости, гидравлического сопротивления и энергетических затрат. Для барботажных аппаратов ключевое значение имеют устойчивое распределение газа в жидкой фазе и развитая поверхность контакта фаз. Современные экспериментальные и численные исследования показывают, что

газосодержание и режим течения чувствительны к скорости газа, характеристикам газогенератора, размерам и конфигурации отверстий, свойствам жидкой фазы и наличию внутренних элементов [1–5, 7, 9, 10].

Chen и Brooks показали, что изменение поверхностной скорости газа отражается на локальном распределении газовой фазы, общем газосодержании и поле скоростей жидкой фазы [1]. Gong и соавт. установили влияние рабочих условий и характеристик газогенератора на газосодержание пузырьковой колонны [2]. Haydar и соавт. показали, что свойства жидкой фазы и геометрические условия канала влияют на газосодержание и переходы между режимами течения [3]. Современные исследования также подтверждают влияние внутренних элементов и геометрии газораспределительных устройств на гидродинамику газожидкостных систем [4, 7, 8]. Эти результаты обосновывают необходимость экспериментальной оценки высоты газовой подушки в локальной зоне смешения конкретного барботажного аппарата.

Цель настоящего исследования заключается в экспериментальном определении изменения высоты газовой подушки в зоне смешения тарельчатого барботажного абсорбционного аппарата при изменении диаметра газопередающих отверстий и расхода газа, а также в сопоставлении экспериментальных результатов с расчетными значениями и установлении практических закономерностей для выбора параметров газораспределительного элемента.

Материалы и методы

В результате теоретического анализа гидродинамики аппарата получена зависимость для расчета высоты газовой подушки в зоне смешения. Она учитывает сопротивление газоподающего отверстия, скорость газа, плотность фаз, коэффициент пульсации и сопротивление элементов, расположенных в зоне смешения [6].

$$h = \xi_o \frac{[K w_o]^2 \rho_г}{2g\Delta\rho} - (\xi_1 + \xi_2 + \xi_{вх}) \frac{\rho_c \cdot w_c^2}{2g\Delta\rho} \quad (1)$$

В расчетной зависимости ξ_0 — коэффициент сопротивления отверстия барботажной трубки; ω_0 — расходная скорость газа при прохождении через отверстие, м/с; $\rho_г$ — плотность газа, кг/м³; K — коэффициент пульсации; ξ_1 и ξ_2 — коэффициенты сопротивления первой и второй мелкоперфорированных тарелок в зоне смешения; $\xi_{вх}$ — коэффициент сопротивления при входе абсорбента в барботажный патрубок; ρ_c — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, 9,8 м/с²; Δρ — разность плотностей фаз, кг/м³.

Для проверки расчетной зависимости был изготовлен экспериментальный образец абсорбционного аппарата. На рисунке 1 приведена схема экспериментальной установки, а на рисунке 2 — ее общий вид. Газ и жидкость подавались в зону смешения через газораспределительный элемент с четырьмя отверстиями выбранного диаметра. Высоту газовой подушки определяли в прозрачной измерительной трубке с миллиметровой шкалой.

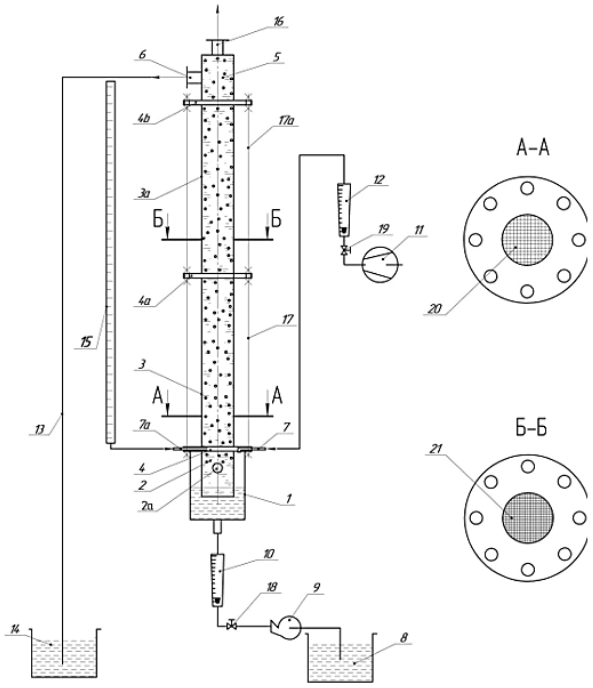

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

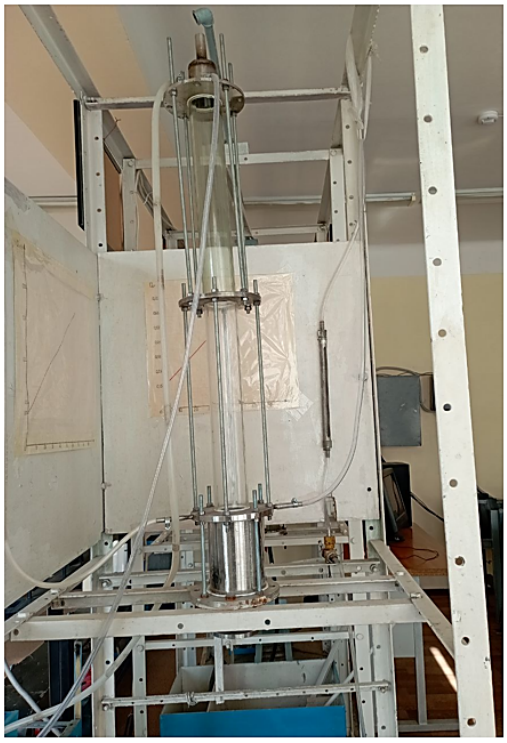

Рисунок 2. Общий вид экспериментальной установки

1 — газораспределительный блок; 2 — газораспределительная насадка; 2а — газопередающее отверстие; 3 — нижняя секция; 3а — верхняя секция; 4, 4а, 4б — фланцы; 5 — разделительная часть; 6 — трубопровод насыщенного абсорбента; 7 — газоподводящий канал; 8 — емкость для абсорбента; 9 — насос; 10 — ротаметр; 11 — компрессор; 12 — ротаметр газа; 13 — емкость насыщенного абсорбента; 14 — трубопровод отвода абсорбента; 15 — соединительная трубка; 16 — трубопровод очищенного газа; 17 — стяжные шпильки; 18 — вентиль абсорбента; 19 — газовый вентиль; 20 — крупная сетка; 21 — мелкая сетка

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования выполнены при следующих основных варьируемых параметрах.

Диаметр газопередающих отверстий газораспределительной насадки составлял d_0 = 1; 1,5 и 2 мм, число отверстий — 4 для каждого диаметра, шаг изменения диаметра — 0,5 мм. Расход газа $Q_г$ изменяли от 0,15 до 0,55 м³/ч с шагом 0,10 м³/ч. В качестве газовой фазы использовали воздух, а в качестве абсорбента — воду. Расход жидкости Q_c изменяли в диапазоне 0,023; 0,031 и 0,039 м³/ч с шагом 0,008 м³/ч.

На первом этапе открывали отверстие d_0= 1 мм и устанавливали постоянный расход жидкости Q_c = 0,023 м³/ч. При расходах газа $Q_г$ = 0,15; 0,25; 0,35; 0,45 и 0,55 м³/ч экспериментальная высота газовой подушки h составляла соответственно 19; 24; 40; 57 и 80 мм. Измерение выполняли по миллиметровой шкале на прозрачной трубке, установленной в зоне распределения газа (рисунок 3).

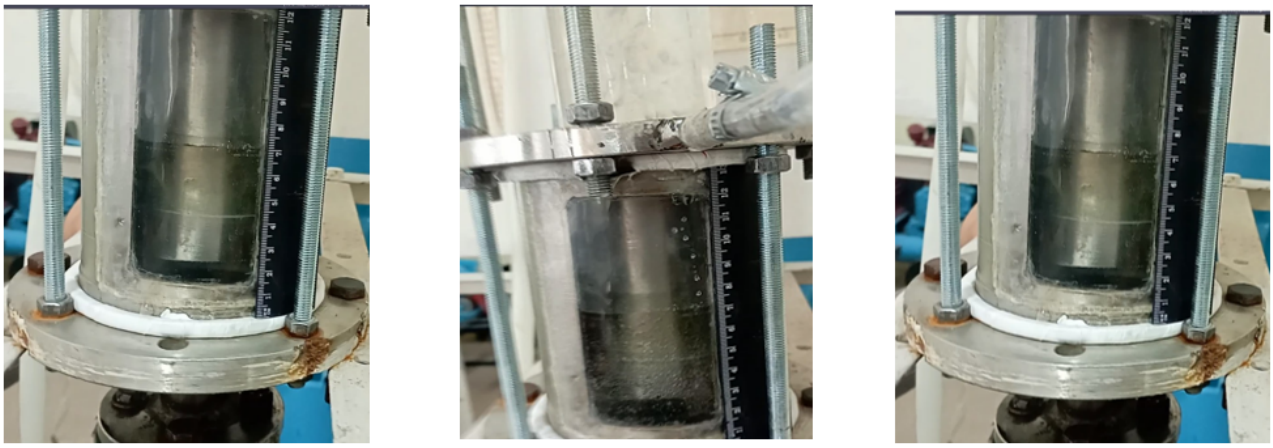

Рисунок 3. Экспериментальный метод определения высоты газовой подушки

При увеличении расхода жидкости до Q_c = 0,031 м³/ч при тех же расходах газа получены те же значения высоты газовой подушки: h = 19; 24; 40; 57 и 80 мм. Изменение расхода жидкости до Q_c = 0,039 м³/ч также не привело к заметному изменению результатов. Следовательно, в исследованном диапазоне режимов влияние расхода жидкости на высоту газовой подушки оказалось незначительным.

На следующем этапе отверстие d_0 = 1 мм закрывали и открывали отверстие d_0 = 1,5 мм. При последовательном увеличении расхода газа от 0,15 до 0,55 м³/ч высота газовой подушки изменялась от 6 до 74 мм: h = 6; 14; 31; 52 и 74 мм соответственно.

Затем отверстие d_0 = 1,5 мм закрывали и открывали отверстие d_0 = 2 мм. При тех же расходах газа получили значения h = 2; 10; 26; 40 и 60 мм соответственно. Сопоставление режимов показало, что увеличение диаметра газопередающего отверстия приводит к уменьшению высоты газовой подушки. Дополнительные перфорированные тарелки с отверстиями d = 1; 1,5 и 2 мм не оказали заметного влияния непосредственно на высоту газовой подушки. Их основная роль заключается в дополнительном диспергировании пузырьков и увеличении поверхности контакта фаз, тогда как увеличение количества внутренних элементов может сопровождаться ростом гидравлического сопротивления и изменением макрогидродинамики [5, 7].

При прохождении газа через отверстия он диспергируется в жидкой фазе и в виде пузырьков поднимается вверх под действием разности плотностей. Движение пузырьков турбулизирует жидкость и увеличивает площадь межфазного контакта. Высота газовой подушки определяется, прежде всего, сопротивлением газоподающих отверстий и условиями движения фаз. Увеличение диаметра отверстия уменьшает отношение толщины стенки к диаметру δ/d и, как следствие, снижает сопротивление прохождению газа.

Теоретические значения высоты газовой подушки для исследованных режимов рассчитаны по уравнению (1). Ниже приведен пример расчета для отверстия диаметром d_0 = 1 мм.

Пример расчета

Для примера принимаем d_0 = 1 мм, скорость газа ω_0 = 13,2 м/с, скорость жидкости ω_c = 0,021 м/с, коэффициент сопротивления отверстия ξ_0 = 1,9. Подстановка исходных данных в уравнение (1) дает расчетную высоту газовой подушки $h_{теор}$ = 19,76 мм.

$$h = \xi_o \frac{[Kw_o]^2 \rho_г}{2g\Delta\rho} - (\xi_1 + \xi_2 + \xi_{вх}) \frac{\rho_c \cdot w_c^2}{2g\Delta\rho} == 1,9 \cdot \frac{[1 \cdot 13,2]^2 \cdot 1,29}{2 \cdot 9,8 \cdot 998,71} - (1,3 + 0,46 + 0,46) \cdot \frac{1000 \cdot (0,021)^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 998,71} = 19,76$$

Экспериментальное значение составило $h_{экс}$ = 19 мм. Относительное расхождение между расчетным и экспериментальным значениями составило Δ = 4 %, что подтверждает приемлемость расчетной зависимости для исследованного режима.

Экспериментальные данные обработаны с использованием компьютерной программы, после чего построен график зависимости высоты газовой подушки h_0 от расхода газа $Q_г$ (рисунок 4).

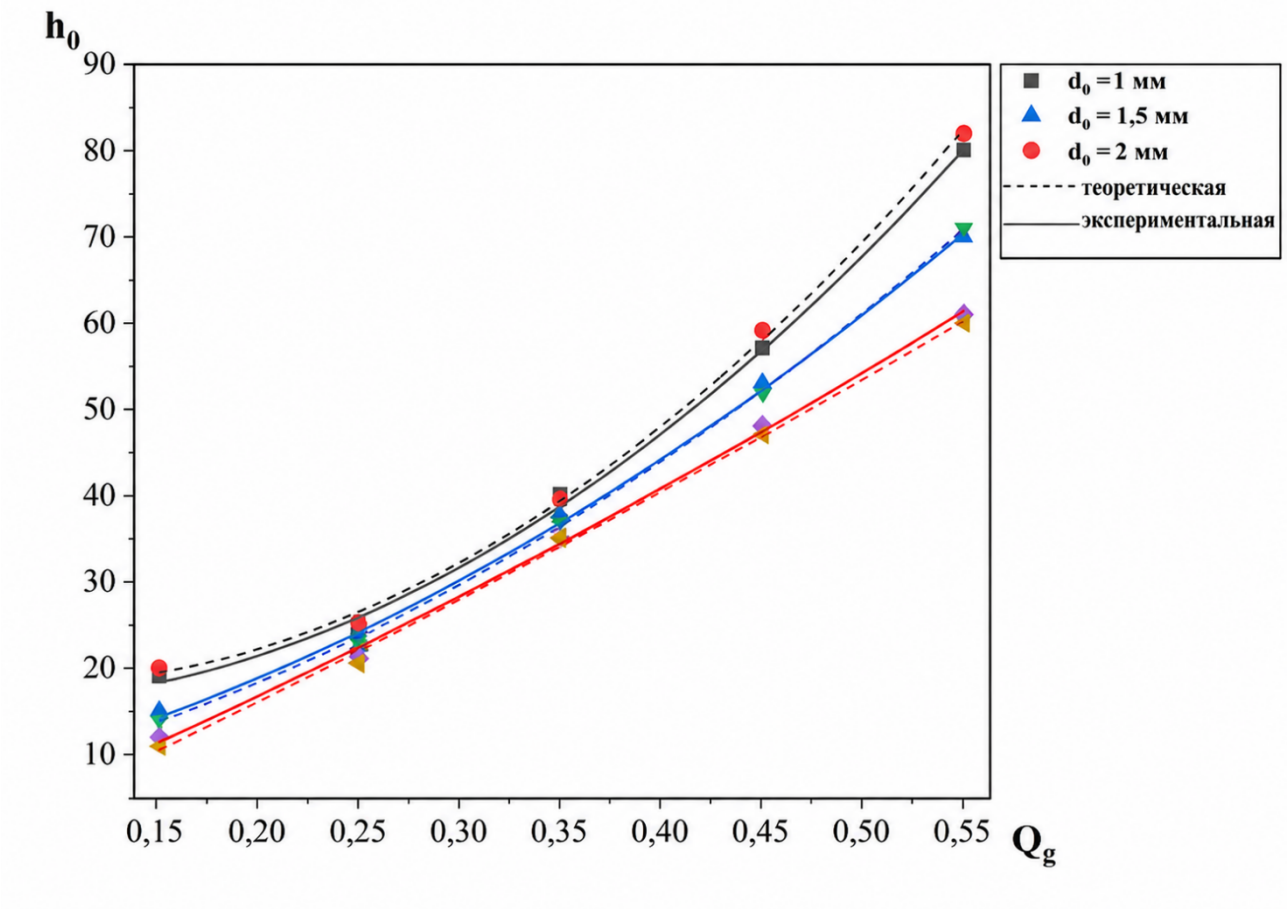

Рисунок 4. Зависимость высоты газовой подушки h 0 от расхода газа Q г : сравнение теоретических и экспериментальных значений

Полученные регрессионные зависимости

$$y = 155x - 10{,}25 \quad R^2 = 0{,}9587$$
$$y = 140{,}5x - 9{,}575 \quad R^2 = 0{,}9842$$
$$y = 125x - 8{,}35 \quad R^2 = 0{,}9957$$

Как видно из рисунка 4, с увеличением расхода газа высота газовой подушки закономерно возрастает. При увеличении диаметра газопередающего отверстия высота газовой подушки, напротив, уменьшается. Такое поведение объясняется снижением гидравлического сопротивления отверстия при увеличении его диаметра, что облегчает прохождение газового потока в зону смешения. Полученная закономерность согласуется с современными исследованиями влияния параметров газораспределителя, размеров пузырьков и скорости газа на газосодержание и гидродинамику пузырьковых аппаратов [2, 5, 7, 9, 10].

При проектировании промышленного варианта аппарата значение высоты газовой подушки может быть принято, как один из расчетных параметров, определяющих конструктивные размеры и режим работы барботажного патрубка. Практически это позволяет увязать диаметр газопередающих отверстий с требуемой интенсивностью подачи газа и допустимым гидравлическим сопротивлением.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить закономерности изменения высоты газовой подушки в зоне смешения тарельчатого барботажного абсорбционного аппарата. При увеличении расхода газа от 0,15 до 0,55 м³/ч высота газовой подушки возрастала для всех исследованных диаметров отверстий. При изменении диаметра газопередающего отверстия от 1 до 2 мм высота газовой подушки уменьшалась, что связано со снижением сопротивления прохождению газового потока. Изменение расхода жидкости в диапазоне 0,023–0,039 м³/ч не оказало заметного влияния на полученные значения. Расчетное значение для рассмотренного режима составило 19,76 мм при экспериментальном значении 19 мм и расхождении 4 %. Полученные результаты подтверждают применимость исследуемой расчетной зависимости и могут быть использованы при выборе параметров газораспределительного элемента и проектировании барботажного патрубка.

Список литературы

1. Chen J., Brooks C.S. Experiments and CFD simulation of mass transfer and hydrodynamics in a cylindrical bubble column // Chemical Engineering Science. – 2021. – T. 234. – Art. 116435. – DOI: 10.1016/j.ces.2020.116435.
2. Gong C.-K., Xu X., Yang Q. Gas holdup at dynamic equilibrium region of a bubble column: Effect of bubble generator performance // Chemical Engineering Journal. – 2022. – T. 443. – Art. 136382. – DOI: 10.1016/j.cej.2022.136382.
3. Haydar A., Blel W., Marec H., Gentric C. Gas holdup and flow regimes in a thin-gap bubble column with Newtonian and non-Newtonian liquid phase // Chemical Engineering & Technology. – 2023. – T. 46, № 6. – P. 1218–1227. – DOI: 10.1002/ceat.202200561.

4. Heydari N., Larachi F., Kipping R. et al. Mass transfer performance and hydrodynamics of a bubble column reactor at offshore floating conditions // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2023. – T. 62, № 31. – P. 12183–12190. – DOI: 10.1021/acs.iecr.3c01600.
5. Jonach T., Ruzova T., Jordan C., Harasek M., Haddadi B. The Influence of the Geometric Properties on the Gas Holdup and Phase Surface Area for Single-Orifice Gas Distributors in a Bubble Column // ChemEngineering. – 2025. – T. 9, № 2. – DOI: 10.3390/chemengineering9020029.
6. Karimov I.T., Isomiddinov A.S., Madaminova G.I., Xalilov I.L. Gazlift apparati: Patent of the Republic of Uzbekistan No. IAP 7727. – Tashkent, 2024. (In Russ.).
7. Liu S., Liang J., Li Q., Yu H., Wang H., Li X., Yang C. Effects of internals on macroscopic fluid dynamics in a bubble column // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2025. – T. 77, № 1. – P. 19–29. – DOI: 10.1016/j.cjche.2024.10.005.
8. Orlando A.E. Jr., Barca L.F., Heindel T.J., Klein T.S., Medronho R.A. Gas holdup and flow regime in a bubble column that includes enhanced oil recovery chemicals // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – T. 204. – Art. 108675. – DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108675.
9. Wang L.-H., Liao H.-L., Zheng L., Fan Z.-X., Zou H.-K., Luo Y. Microbubble swarm in a HiGee-aided bubble column reactor: Size, gas holdup, and effective interfacial area // AIChE Journal. – 2025. – T. 71, № 6. – DOI: 10.1002/aic.18804.
10. Wen J., Tian R., Tan S., Wang B. et al. Numerical simulation of gas holdup in nocoalescence media of industrial-scale bubble column // Progress in Nuclear Energy. – 2022. – T. 146. – Art. 104172. – DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104172.