



DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-409-421

EDN: NHSBEF

УДК 504.06

Научная статья / Research article

Определение режима работы эжекционной флотационной установки для очистки сточных вод

Е.С. Антонова  , В.О. Карпикова

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация*

 e.s.antonova@bmstu.ru

Аннотация. Рассмотрены способы повышения качества водовоздушной смеси, генерируемой эжекционной системой аэрации, используемой при флотационной очистке сточных вод, включающие использование эжекторов разных конструкций и диспергирующих устройств, изменение коэффициента эжекции и скорости истечения из сопла, применение пенообразователей. Показано, что для высокоэффективной очистки требуются пузырьки размерами порядка десятков микрометров, имеющих равномерное распределение по камере аэрации. Предложено использование системы аэрации, включающей эжектор, аэратор и диспергатор для более эффективного дробления пузырьков. Проведены эксперименты по определению параметров водовоздушной смеси (размеров пузырьков и интенсивности аэрации) при различных скоростях ее истечения из аэраторов разных конструкций. Определен режим работы, позволяющий генерировать наибольшее количество мелкодисперсных пузырьков размерами 75–115 мкм. При данном режиме работы был использован аэратор кольцевого сечения (внутренний диаметр 4 мм, наружный диаметр 6 мм), скорость истечения составила 13 м/с.

Ключевые слова: флотационная очистка сточных вод, эжектор, скорость истечения, размер пузырьков, интенсивность аэрации

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

История статьи: поступила в редакцию 19.03.2024; доработана после рецензирования 20.05.2024; принята к публикации 14.07.2024.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Антонова Е.С., Карпикова В.О., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Для цитирования: Антонова Е.С., Карпикова В.О. Определение режима работы эжекционной флотационной установки для очистки сточных вод // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 4. С. 409–421. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-409-421>

Definition of the operating mode of ejection flotator for the wastewater treatment

Ekaterina S. Antonova , Veronika O. Karpikova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

 e.s.antonova@bmstu.ru

Abstract. The methods of the quality increase of the air-water mixture generated by ejection system of aeration for the flotation wastewater treatment are considered such as the use of various constructions of ejectors, use of dispersers, operating at different air-water rates and exit nozzle velocities, addition of surfactants. It is shown that for the highly efficient wastewater treatment microbubbles with the sizes less than 100 μm that are equally distributed in the flotation chamber are needed. The use of aeration system that includes ejector, aerator and disperser is offered. The experimental definition of air-water mixture characteristics (bubbles size and superficial gas velocity) was carried out with different exit nozzle velocities and types of aerators. The operating mode that allows the generation microbubbles with average sizes 75–115 μm was defined. At this mode the annular aerator with inside diameter 4 mm and outside diameter 6 mm was used, exit nozzle velocity was 13 m/s.

Keywords: flotation wastewater treatment, ejector, exit nozzle velocity, bubble size, superficial gas velocity

Authors' contribution. All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Article history: received 19.03.2024; revised 20.05.2024; accepted 14.07.2024.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Antonova ES, Karpikova VO. Definition of the operating mode of ejection flotator for the wastewater treatment. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(4):409–421. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-409-421>

Введение

Флотационная очистка сточных вод в настоящее время широко распространена. Сущность метода состоит в следующем: сточная вода насыщается пузырьками воздуха, к которым прилипают гидрофобные загрязнения, и образованный флотокомплекс всплывает, формируя пенный слой на поверхности жидкости [1; 2].

Эффективность флотации зависит от различных параметров: размера и формы пузырьков воздуха, интенсивности перемешивания, температуры воды, присутствия растворенных веществ [3–5]. Для высокой эффективности

требуется получение мелких пузырьков воздуха размерами в десятки микрометров, имеющих равномерное распределение по камере аэрации.

Флотация классифицируется по способу аэрации воды. Наиболее распространенные типы флотации: механическая (пузырьки воздуха достигают размеров 700–1500 мкм), пневматическая (1000–5000 мкм), напорная (30–70 мкм) и электрофлотация (20–40 мкм). Основными недостатками этих способов являются высокие энергозатраты (электрофлотация, механическая, напорная), невысокая эффективность очистки из-за крупных пузырьков (механическая, пневматическая), сложности эксплуатации, связанные с использованием резервуара, работающего под давлением нескольких атмосфер (напорная). В [4] отмечено, что 50–90 % электроэнергии, потребляемой системой очистки, приходится на систему аэрации, а затраты на неё могут составить 15–49 % от общих затрат.

Альтернативным и менее энергозатратным способом является флотация с эжекционной системой аэрации. Применение такого способа аэрации позволяет получить такой же объем воздуха, как и в предыдущих способах, но пузырьки будут меньшего размера в большем количестве [6; 7]. Эжектор – это струйный аппарат, предназначенный для перемещения одной среды другой высокоскоростной средой. Конструкция эжектора простая и надежная, а его использование позволяет исключить из схемы дополнительные устройства (компрессоры, устройства подачи реагента). Эжектор может быть использован в аэротенках, сооружениях биологической очистки, флотационных установках [8]. Однако применение простейших конструкций эжекторов позволяет генерировать пузырьки размерам более 1 мм, что не может обеспечить высокую эффективность очистки.

Добиться более эффективных параметров системы аэрации можно различными способами, например, за счет добавления химических веществ – пенообразователей [9], установки специальных диспергирующих устройств после эжектора [10; 11], изменения конструкции эжекторов [12; 13], изменения коэффициента эжекции и скорости истечения из сопла [14].

Для обеспечения высокой интенсивности аэрации необходимо получить максимальную степень эжекции (отношение расхода подсасываемого воздуха к расходу воды). Однако в работе [14] отмечено, что снижение степени эжекции позволяет добиться уменьшения среднего размера воздушных пузырьков. Таким образом, если при высоком значении степени эжекции происходит генерирование крупнодисперсных пузырьков, то высокая интенсивность аэрации наблюдается локально рядом с эжектором.

В работе [7] приведено сравнение сопла круглого и кольцевого сечений. Применение кольцевого сечения позволило повысить степень эжекции. Увеличение скорости потока (повышение расхода воды) на выходе из сопла с круглым поперечным сечением приводит к возрастанию степени эжекции, причем чем диаметр меньше, тем выше степень эжекции. Проведение эксперимента при одинаковых расходах воды снижает степень эжекции.

Для обеспечения более равномерного распределения пузырьков по камере в работах [12; 13] предложены эжектор с дополнительными наклонными соплами и использование небольших выходных патрубков на выходе водовоздушной смеси из эжектора.

Уменьшение размера пузырьков и их равномерное распределение позволяют повысить эффективность аэрации. Исследуя перечисленные параметры, можно установить режим работы, обеспечивающий более качественную очистку.

В данной работе предложено использование эжекционной системы аэрации с диспергатором, принцип действия которой заключается в том, что вода насыщается пузырьками воздуха в эжекторе, а затем их дробление происходит при истечении из аэратора на высокой скорости и последующем контакте с ребристой поверхностью вращающегося цилиндрического диспергатора. Вращение осуществляется за счет тангенциального подвода струи.

Цель исследования – определение режима работы, обеспечивающего наилучшие характеристики водовоздушной смеси для обеспечения эффективной флотационной очистки сточных вод.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проведены на лабораторной установке, представленной на рис. 1.

Установка работает следующим образом: камера аэрации 1 и резервуар воды 2 предварительно заполняются водопроводной водой. Насос 3 откачивает воду из резервуара 2 и подает в камеру аэрации 1. Проходя через сужение эжектора 7, вода насыщается пузырьками за счет подсасывания воздуха из окружающей среды при возникновении разрежения. Для дробления пузырьков воздуха на более мелкие устанавливаются аэратор 8 и диспергатор 11. В качестве диспергатора использовалось цилиндрическое рифленое тело диаметром 40 мм и длиной 40 мм. В камеру аэрации поступает водовоздушная смесь. Расход воды и воздуха измеряется водосчетчиком 6 и ротаметром 10 соответственно. Камера аэрации разделена на две части тонкослойными перегородками.

Для определения параметров системы аэрации описанная установка была дополнена прямоугольной емкостью с измерительной шкалой 12, USB-микроскопом 13, компьютером 14 и источником света 15.

В ходе работы была проведена серия опытов с применением диспергатора и без его применения для определения характеристик при различных значениях скорости истечения. Были использованы два сопла круглого сечения с диаметрами $d = 4$ мм и $d = 6$ мм, а также аэратор кольцевого сечения с внутренним диаметром $d_{\text{в}} = 4$ мм и наружным диаметром $d_{\text{н}} = 6$ мм.

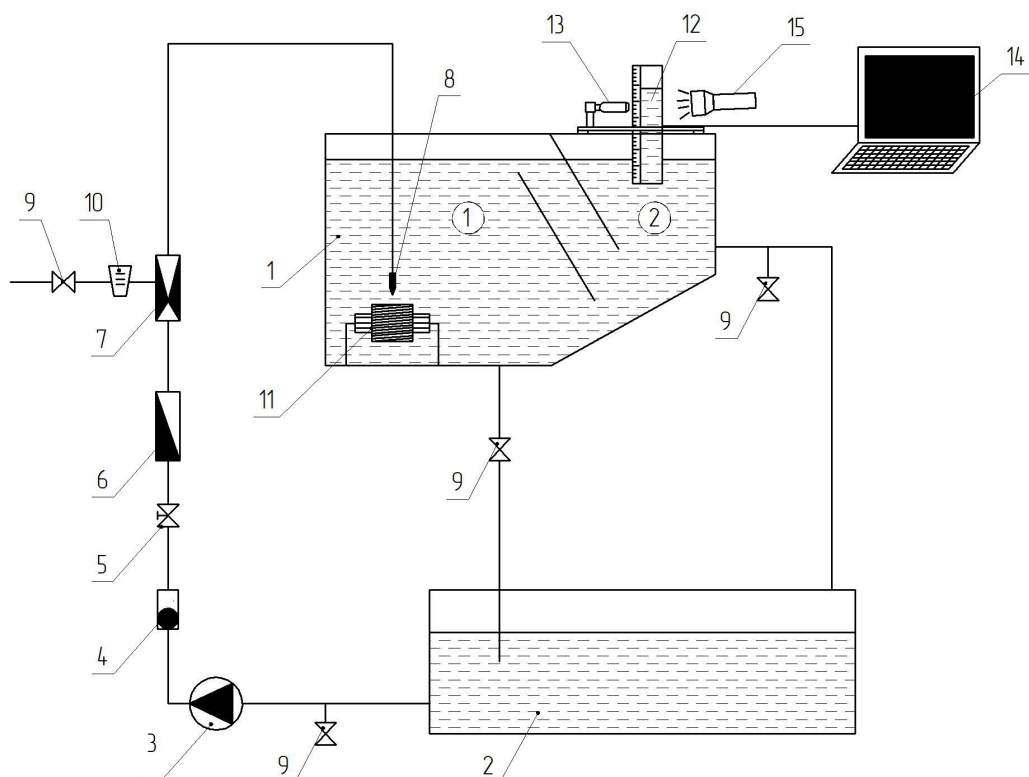


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

1 – камера аэрации; 2 – резервуар воды; 3 – насос; 4 – обратный клапан; 5 – регулирующий вентиль; 6 – водосчетчик; 7 – эжектор; 8 – аэратор; 9 – шаровый кран; 10 – ротаметр; 11 – диспергатор; 12 – прямоугольная емкость с измерительной шкалой; 13 – USB-микроскоп; 14 – компьютер; 15 – источник света; ①, ② – точки отбора проб

Источник: составлено Е.С. Антоновой, В.О. Карпиковой.

Figure 1. Scheme of laboratory set up:

1 – aeration chamber; 2 – water reservoir; 3 – pump; 4 – check valve; 5 – control valve; 6 – water meter; 7 – ejector; 8 – aerator; 9 – ball valve; 10 – rotameter; 11 – disperser; 12 – rectangular container with a measuring scale; 13 – USB microscope; 14 – computer; 15 – light source; ①, ② – sampling points

Source: compiled by E.S. Antonova, V.O. Karpikova.

Эксперимент проводился при постоянном расходе воды.

В ходе эксперимента проведено измерение размеров пузырьков и интенсивности аэрации в двух частях камеры аэрации (точки отбора проб 1 и 2). В камеру аэрации была установлена прямоугольная емкость. В каждом опыте была произведена видеосъемка пузырьков на установленный USB-микроскоп с использованием источника света. Полученные видео были разбиты на кадры (рис. 2), на каждом из которых с учетом масштаба проведены измерения размеров пузырьков.

Измерение интенсивности аэрации осуществлялось по методике, описанной в [15]. Для измерения засекалось время, за которое уровень воды в емкостях с мерной шкалой, установленных в точках замера, опустится на фиксированное расстояние (5 мм).

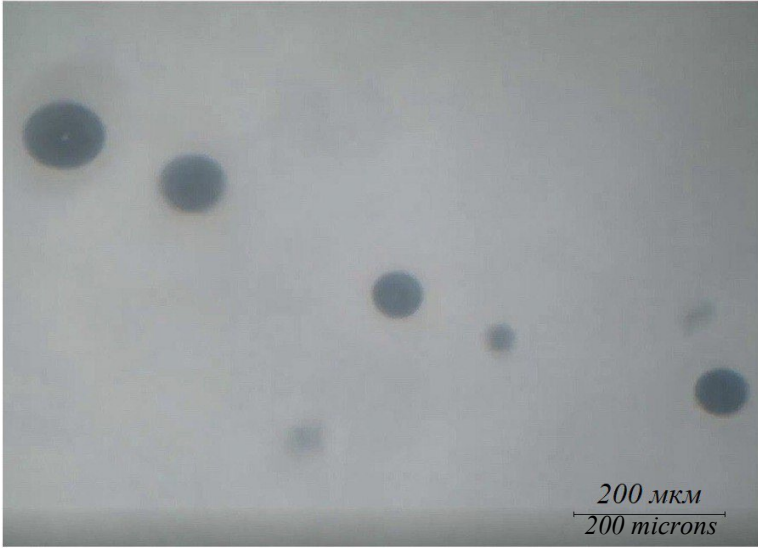


Рис. 2. Снимок воздушных пузырьков

Источник: фото Е.С. Антоновой, В.О. Карпиковой.

Figure 2. Photo of air bubbles

Source: Photo of by E.S. Antonova, V.O. Karpikova.

Результаты и их обсуждение

Было исследовано три режима работы установки, параметры которых представлены в табл. 1. Расход воды составлял 750 л/ч.

Таблица 1. Параметры режимов работы установки

Аэратор	Скорость истечения из аэратора м/с	Расход воздуха л/ч	Степень эжекции –	Частота вращения диспергатора об/мин	Интенсивность аэрации	
					точка 1 м³/(м²·с)	точка 2 м³/(м²·с)
–	–	–	–	–	–	–
Сопло $d = 4$ мм	16,6	15	0,020	без диспергатора	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$
				966	$< 10^{-8}$	$< 10^{-8}$
Кольцевой аэратор $d_s = 4$ мм, $d_n = 6$ мм	13,0	42,8	0,057	без диспергатора	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$
				648	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$
Сопло $D = 6$ мм	7,4	42,8	0,057	без диспергатора	$8,8 \cdot 10^{-6}$	–
				588	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$

Примечание. Прочерк (–) означает, что пузырьки не зафиксированы.

Источник: составлено Е.С. Антоновой, В.О. Карпиковой.

Table 1. Operating modes parameters

Aerator	Exit nozzle velocity m/s	Air flowrate l/h	Air-water ratio –	Dispersant rotation frequency rpm	Superficial gas velocity	
					point 1 m³/(m²·s)	point 2 m³/(m²·s)
–	–	–	–	–	–	–
Nozzle $d = 4$ mm	16.6	15	0.020	without disperser	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$5.2 \cdot 10^{-7}$
				966	$< 10^{-8}$	$< 10^{-8}$
Annular aerator $d_s = 4$ mm, $d_n = 6$ mm	13.0	42.8	0.057	without disperser	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-7}$
				648	$4.5 \cdot 10^{-6}$	$8.3 \cdot 10^{-7}$
Nozzle $d = 6$ mm	7.4	42.8	0.057	without disperser	$8.8 \cdot 10^{-6}$	–
				588	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$

Note. – no bubbles were fixed.

Source: compiled by E.S. Antonova, V.O. Karpikova.

Скорость истечения при уменьшении диаметра возрастает. Уменьшение диаметра аэратора приводит к снижению степени эжекции, что согласуется с результатами [7].

При использовании сопла с диаметром 6 мм в опыте без диспергатора получаются очень крупные воздушные пузырьки, которые выделяются непосредственно над диспергатором (точка 1) и не распространяются дальше. В опыте с соплом диаметром 4 мм и диспергатором получаются очень мелкие пузырьки воздуха, но при этом интенсивность аэрации минимальна. Диспергатор позволяет повысить равномерность распределения и уменьшить размеры получаемых пузырьков.

При статистической обработке данных, согласно [16], были получены функции плотностей распределения пузырьков (ФПР) по размерам. На рис. 3 представлены ФПР при использовании аэратора кольцевого сечения с диспергатором. Распределение является полидисперсным, и из него может быть выделено несколько групп пузырьков, описываемых функцией нормального распределения (на графиках показана линией). Точками обозначены экспериментальные данные.

Функции плотностей распределения пузырьков при тех же условиях без диспергатора для сравнения приведены на рис. 4.

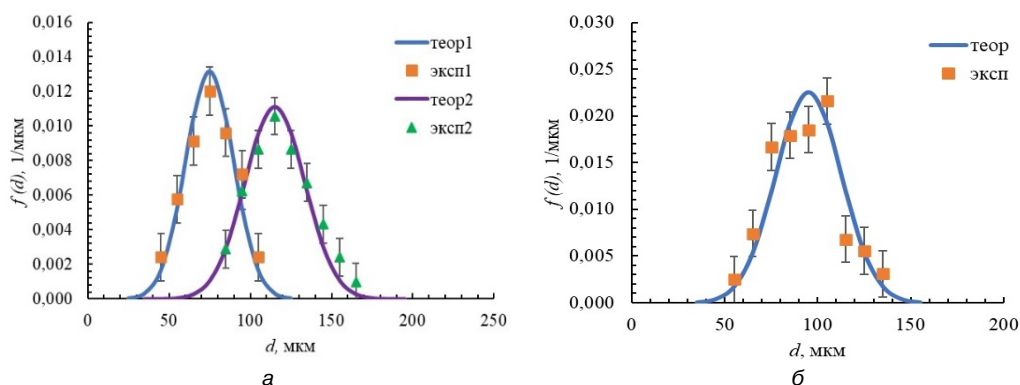


Рис. 3. Функции плотностей распределения пузырьков при работе установки с аэратором кольцевого сечения с диспергатором: а – точка 1; б – точка 2

Источник: составлено Е.С. Антоновой, В.О. Карпиковой.

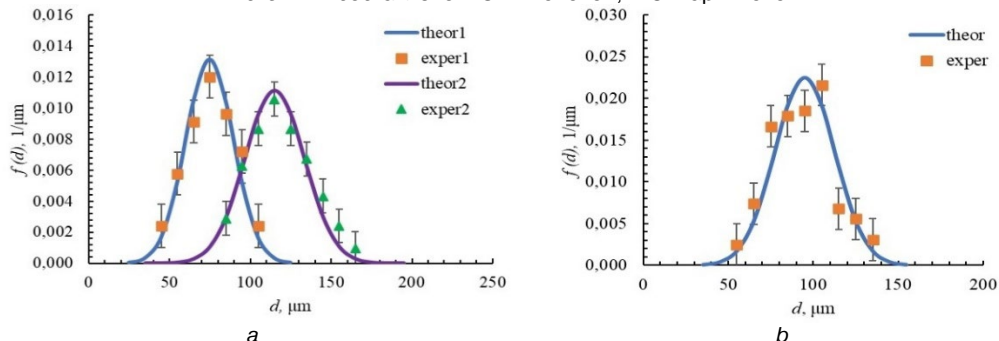


Figure 3. Distribution density function of bubbles during operation of the unit with annular aerator with disperser: a – point 1, b – point 2

Source: compiled by E.S. Antonova, V.O. Karpikova.

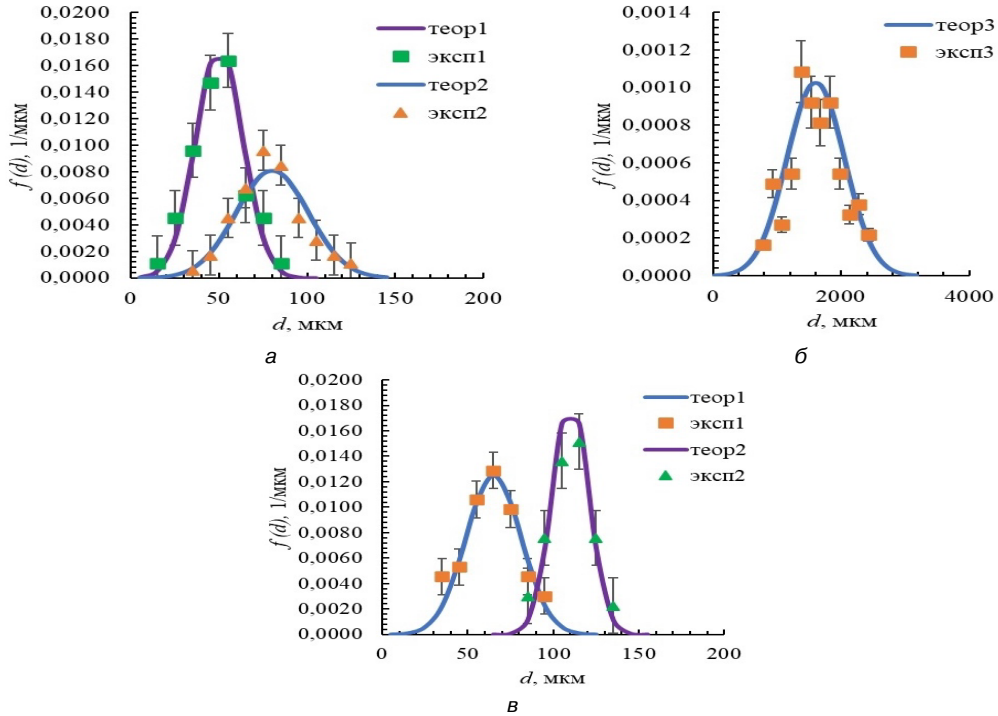


Рис. 4. Функции плотностей распределения пузырьков при работе установки с аэратором кольцевого сечения без диспергатора:

а – мелкодисперсные пузырьки в точке 1, б – крупнодисперсные пузырьки в точке 1, в – точка 2
Источник: составлено Е.С. Антоновой, В.О. Карпиковой.

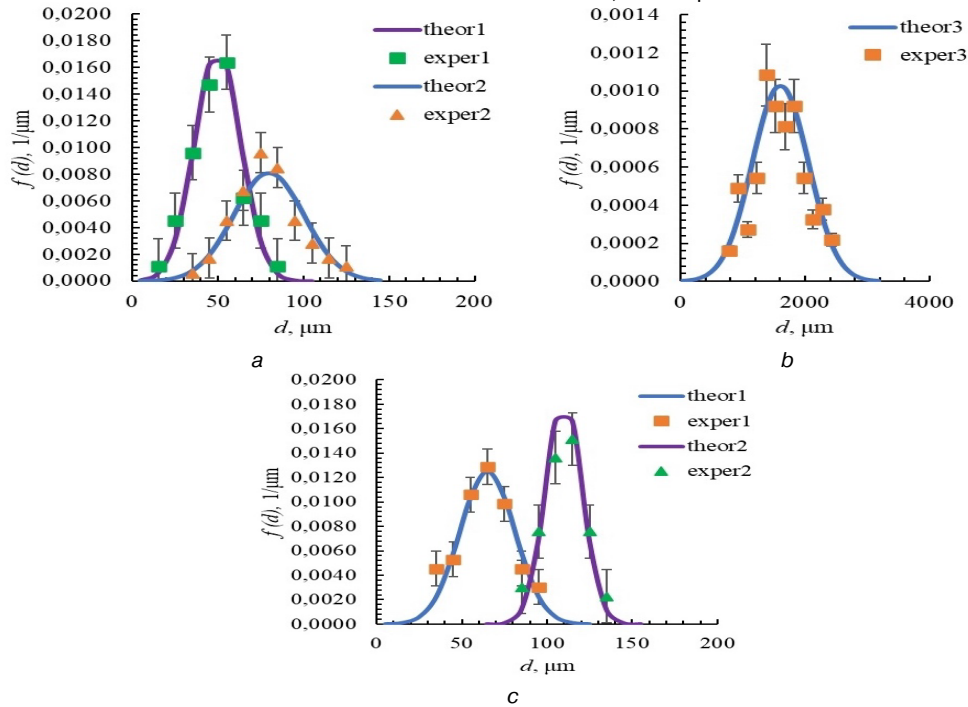


Figure 4. Distribution density function of bubbles during operation of the unit with annular aerator without disperser:

a – small bubbles in point 1, b – large bubbles in point 1, c – point 2
Source: compiled by E.S. Antonova, V.O. Karpikova.

Аналогичная обработка данных проведена для каждого эксперимента. Размеры получаемых пузырьков со среднеквадратическими отклонениями (с.к.о.) и их доля представлены в табл. 2.

Использование сопла с диаметром 6 мм показало худший результат. В опыте без диспергатора не было получено распределение во второй точке, так как все пузырьки всплывали непосредственно над выходом из аэратора из-за своего размера (более 50 % пузырьков имели размеры свыше 1 мм). Использование диспергатора позволило уменьшить размеры получаемых пузырьков до десятков мкм, однако крупные пузырьки все равно присутствовали. В виде крупных пузырьков выделялось более 90 % воздуха.

При сопле с диаметром 4 мм генерировались самые мелкие пузырьки, но появилась проблема иного характера: на этом режиме эжектор имел низкую степень эжекции $\Theta = 0,02$. Крупнодисперсных пузырьков не наблюдалось.

Аэратор кольцевого сечения обеспечил генерирование мелкодисперсных пузырьков со средними размерами 75–115 мкм и их наиболее равномерное распределение в камере аэрации.

Таблица 2. Распределение пузырьков по размерам

Аэратор	Точка	№ группы	Средний размер, мкм	Доля пузырьков	С.к.о., мкм
Без диспергатора					
Сопло $d = 4$ мм	1	1	35	0,18	10,58
		2	70	0,22	11,23
		3	105	0,17	16,16
		4	1000	0,43	308,74
	2	1	35	0,27	7,57
		2	65	0,35	10,51
		3	85	0,39	13,79
Кольцевой аэратор $d_a = 4$ мм, $d_n = 6$ мм	1	1	50	0,34	13,40
		2	80	0,25	20,60
		3	1600	0,41	450,77
	2	1	65	0,51	16,21
		2	110	0,49	10,57
Сопло $d = 6$ мм	1	1	50	0,31	17,34
		2	102,5	0,10	14,50
		3	1000	0,40	328,87
		4	1900	0,10	268,68
		5	2200	0,09	209,92
С диспергатором					
Сопло $d = 4$ мм	1	1	12,5	0,34	3,51
		2	32,5	0,48	5,64
		3	55	0,18	7,43
	2	1	12,5	0,30	4,39
		2	32,5	0,34	6,62
		3	52,5	0,35	5,77
Кольцевой аэратор $d_a = 4$ мм, $d_n = 6$ мм	1	1	75	0,49	14,72
		2	115	0,51	18,45
	2	1	95	1,00	17,70
Сопло $d = 6$ мм	1	1	65	0,71	21,55
		2	215	0,29	57,11
	2	1	65	0,89	22,30
		2	290	0,11	22,30

Источник: составлено Е.С. Антоновой, В.О. Карпиковой.

Table 2. Bubble size distribution

Aerator	Point	Group number	Average size, μm	Proportion	Standard deviation, μm
Without disperser					
Nozzle <i>d</i> = 4 mm	1	1	35	0.18	10.58
		2	70	0.22	11.23
		3	105	0.17	16.16
		4	1000	0.43	308.74
	2	1	35	0.27	7.57
		2	65	0.35	10.51
3		85	0.39	13.79	
Annular aerator <i>d_i</i> = 4 mm, <i>d_o</i> = 6 mm	1	1	50	0.34	13.40
		2	80	0.25	20.60
		3	1600	0.41	450.77
	2	1	65	0.51	16.21
		2	110	0.49	10.57
Nozzle <i>d</i> = 6 mm	1	1	50	0.31	17.34
		2	102.5	0.10	14.50
		3	1000	0.40	328.87
		4	1900	0.10	268.68
		5	2200	0.09	209.92
With disperser					
Nozzle <i>d</i> = 4 mm	1	1	12.5	0.34	3.51
		2	32.5	0.48	5.64
		3	55	0.18	7.43
	2	1	12.5	0.30	4.39
		2	32.5	0.34	6.62
		3	52.5	0.35	5.77
Annular aerator <i>d_i</i> = 4 mm, <i>d_o</i> = 6 mm	1	1	75	0.49	14.72
		2	115	0.51	18.45
	2	1	95	1.00	17.70
Nozzle <i>d</i> = 6 mm	1	1	65	0.71	21.55
		2	215	0.29	57.11
	2	1	65	0.89	22.30
		2	290	0.11	22.30

Source: compiled by E.S. Antonova, V.O. Karpikova.

Сравнивая аэраторы по интенсивности аэрации и распределению пузырьков, установлено, что аэратор кольцевого сечения является наиболее эффективным.

Установлено, что повышение скорости выхода водовоздушной смеси из аэратора приводит к уменьшению размера формирующихся пузырьков воздуха и увеличению их количества. Для использованного в работе эжектора по результатам проведенного эксперимента был определен наилучший режим работы при расходе воды 750 л/ч, расходе воздуха 42,8 л/ч. Повышение скорости (более 13 м/с) обуславливает снижение эффективности работы эжектора. Соответственно, дальнейшее повышение скорости неэффективно.

Заключение

На основе анализа литературных источников установлено, что эффективность эжекционной флотации зависит от ряда параметров, таких как геометрические параметры эжектора, скорость выхода водовоздушной смеси из аппарата, геометрия выходного сопла аэратора. Как и другие способы

флотации, эжекционная флотация эффективна при ограниченном диапазоне размеров воздушных пузырьков.

В результате проведенных экспериментальных исследований подобран наилучший режим работы, исходя из условий формирования мелкодисперсных пузырьков, равномерного их распределения в камере аэрации и высокой интенсивности аэрации. Наиболее эффективным вариантом оказалось использование аэратора кольцевого сечения ($d_b = 4$ мм, $d_n = 6$ мм) при скорости истечения 13 м/с совместно с диспергатором.

Список литературы

- [1] Ксенофонт Б.С. Флотационная очистка сточных вод. М.: Новые технологии, 2003. 144 с.
- [2] Зубарева Г.И. Флотация в технологических схемах очистки промышленных сточных вод // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. № 4. С. 67–77. <http://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.4.07>
- [3] Журавлев Р.Г., Борисов Б.Н. Выявление факторов, влияющих на работу систем аэрации в аэротенках // Наука, образование и культура. 2021. № 1 (56). С. 21–24.
- [4] Drewnowski J., Remiszewska-Skwarek A., Duda S., Łagód G. Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant. Review of solutions and methods of process optimization // Processes. 2019. Vol. 7. No. 5. P. 311–332. <http://doi.org/10.3390/pr7050311>
- [5] Гаврильев С.А., Иванов М.В. Акустический мониторинг дисперсного состава пузырьков воздуха в аэрируемых процессах очистки сточных вод // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2021. № 3 (81). С. 14–22. <http://doi.org/10.17277/voprosy.2021.03.pp.014-022>
- [6] Антонова Е.С. Интенсификация процесса очистки сточных вод пищевого комбината с использованием флотационной машины с эжекционной системой аэрации с диспергатором // Научные труды КубГТУ. 2017. № 7. С. 63–70.
- [7] Лебян Ю.П., Селивончик В.В., Щербакова М.К. Применение струйной аэрации для повышения эффективности очистки воды в системе оборотного водоснабжения литейного цеха // Литье и металлургия. 2008. № 4 (49). С. 161–164.
- [8] Murtazayev F.A., Mirzayev M. Analysis of wastewater aeration methods in aeration tanks // Journal of new century innovations. 2022. Vol. 17, Issue 2. P. 136–141.
- [9] Han Y., Zhu J., Shen L., Zhou W., Ling Y., Yang X., Wang S., Dong Q. Bubble size distribution characteristics of a jet-stirring coupling flotation device // Minerals. 2019. Vol. 9. No. 6. P. 369. <https://doi.org/10.3390/min9060369>
- [10] Ксенофонт Б.С., Антонова Е.С. Исследование дисперсного состава водовоздушной смеси, генерируемой эжекционной системой аэрации, в процессе флотационной очистки сточной воды // Безопасность в техносфере, 2016. Т. 5. № 4. С. 38–44. <http://doi.org/10.12737/23760>
- [11] Антонова Е.С. Исследование процесса очистки воды от нефтепродуктов во флотационной установке с эжекционной системой аэрации с диспергатором // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности, 2017. Т. 25. № 4. С. 548–561. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-4-548-561>
- [12] Zavodyanov I.I., Kapitonova S.N., Ksenofontov B.S. Using an ejection system for supplying water and reagent in combined flotation apparatus // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ekaterinburg, 2020. Vol. 864. P. 1–6. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/864/1/012059>

- [13] Ткачева Л.Т., Бренч М.В., Демченко А.В. Улучшение качества воды для нужд сельскохозяйственного производства с применением газожидкостного эжектора // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции. Минск: БГАТУ, 2019. С. 219–221.
- [14] Grinis L., Lubashevsky N., Ostrovski Y. Influence of the flow rate ratio in a jet pump on the size of air bubbles // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 2015. Vol. 9. No. 7. P. 1161–1164.
- [15] Сазонов Д. В. Влияние типа насоса на параметры пневмогидравлической системы аэрации во флотационных аппаратах // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 10. С. 40–45.
- [16] Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1999. 497 с.

References

- [1] Ksenofontov BS. *Flotation wastewater treatment*. Moscow: New technologies; 2003. (In Russ.).
- [2] Zubareva GI. Flotation in technological schemes for industrial wastewater treatment. *Bulletin of PNRPU. Construction and architecture*; 2019;(4):67–77. (In Russ.). <http://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.4.07>
- [3] Zhuravlev RG, Borisov BN. Identification of factors influencing the operation of aeration systems in aeration tanks. *Science, education and culture*, 2021;(56): 21–24. (In Russ.).
- [4] Drewnowski J, Remiszewska-Skwarek A, Duda S, Łagód G. Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant. Review of solutions and methods of process optimization. *Processes*, 2019;7(5):311–332. <https://doi.org/10.3390/pr7050311>
- [5] Gavril'ev SA, Ivanov MV. Acoustic monitoring of the dispersed composition of air bubbles in aerated wastewater treatment processes. *Issues of modern science and practice. University named after V.I. Vernadsky*, 2021;(81):14–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.17277/voprosy.2021.03.pp.014-022>
- [6] Antonova ES. Intensification of the wastewater treatment process of a food plant using a flotation machine with an ejection aeration system with a dispersant. *Scientific works of KubSTU*, 2017;(7):63–70. (In Russ.).
- [7] Ledyan YUP, Selivonchik VV, Shcherbakova MK. Application of jet aeration to increase the efficiency of water purification in the recycling water supply system of a foundry. *Casting and metallurgy*. 2008;(49):161–164. (In Russ.).
- [8] Murtazayev FA, Mirzayev M. Analysis of wastewater aeration methods in aeration tanks. *Journal of new century innovations*. 2022;17(2):136–141.
- [9] Han Y, Zhu J, Shen L, Zhou W, Ling Y, Yang X, Wang S, Dong Q. Bubble size distribution characteristics of a jet-stirring coupling flotation device. *Minerals*, 2019;9(6):369. <https://doi.org/10.3390/min9060369>
- [10] Ksenofontov BS, Antonova ES. Research of Disperse Composition of Air-and-Water Mix Generated by Ejector Aeration System During Wastewater Flotation Treatment. *Safety in the technosphere*. 2016;5(4):38–44. (In Russ.). <http://doi.org/10.12737/23760>
- [11] Antonova ES. Investigation of oily wastewater treatment process in a flotation set up with ejection system of aeration with disperse. *Bulletin of RUDN university. Series: Ecology and life safety*. 2017;25(4):548–561. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-4-548-561>

- [12] Zavodyanov II, Kapitonova SN, Ksenofontov BS. Using an ejection system for supplying water and reagent in combined flotation apparatus. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Ekaterinburg. 2020;864:1–6. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/864/1/012059>
- [13] Tkacheva LT, Brench MV, Demchenko AV. Improving the quality of water for the needs of agricultural production using a gas-liquid ejector. *Technical and personnel support of innovative technologies in agriculture: materials of the International Scientific and Practical Conference*. Minsk: BSATU; 2019. p. 219–221. (In Russ.).
- [14] Grinis L, Lubashevsky N, Ostrovski Y. Influence of the flow rate ratio in a jet pump on the size of air bubbles. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. 2015;9(7):1161–1164.
- [15] Sazonov DV. Influence of the pump type on the parameters of the pneumatic-hydraulic aeration system in flotation apparatus. *Water supply and sanitary technic*. 2017;10:40–45. (In Russ.).
- [16] Gmurman VE. *Theory of Probability and Mathematical Statistics*. Moscow: Higher school; 1999. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Антонова Екатерина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1. ORCID: 0000-0003-4632-7984; SPIN-код: 4540-2715. E-mail: e.s.antonova@bmstu.ru

Карпикова Вероника Олеговна, студент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1. E-mail: karpikova01@mail.ru

Bio notes:

Ekaterina S. Antonova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, 5, bldg 1, 2nd Baumanskaya St, Moscow, 105005, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-4632-7984; SPIN-code: 4540-2715. E-mail: e.s.antonova@bmstu.ru

Veronika O. Karpikova, student, Bauman Moscow State Technical University, 5, bldg 1, 2nd Baumanskaya St, Moscow, 105005, Russian Federation. E-mail: karpikova01@mail.ru