

АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА В АЭРИРУЕМЫХ ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

С. А. Гаврильев, М. В. Иванов

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия

Рецензент д-р техн. наук, профессор Н. С. Попов

Ключевые слова: аэрация; дисперсный состав газовой фазы; мониторинг; пассивный акустический метод; флотация.

Аннотация: Предложен пассивный акустический метод мониторинга дисперсного состава пузырьков воздуха, от которого зависит эффективность очистки сточных вод в сооружениях с системами аэрации. Суть метода заключается в определении размеров пузырьков по частотам излучаемых ими акустических сигналов. Принципиальная возможность применения метода продемонстрирована на экспериментальной установке, собранной на базе флотационной колонны. Размеры пузырьков, создаваемых системой аэрации флотационной колонны, определены фотометрическим методом. Показано, что погрешность определения радиусов пузырьков предлагаемым методом относительно фотометрического метода составила не более 17,5 %.

Введение

Согласно данным Росстата [1] за последнее время в России ежегодно сбрасывается 42...50 млрд м³ сточных вод. Треть от этого объема составляют загрязненные сточные воды, сброс которых влечет за собой негативные последствия. Загрязнение вод сказывается и на экологическом состоянии поверхностных вод, атмосферы, почв и других компонентов природной среды. Создается огромная опасность для всех живых организмов, и, в частности, для человека [2 – 5]. Согласно исследованиям Роспотреб-

Гаврильев Степан Андреевич – инженер НИИЭМ, e-mail: Stepan.tab92@yandex.ru, Иванов Михаил Витальевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия

надзора влияние экологии на здоровье человека в России составляет 25 – 50 % от совокупности всех воздействующих факторов и со временем эта доля будет только расти [6]. Поэтому на данный момент до сих пор актуальна проблема очистки сточных вод.

В настоящее время в связи с использованием оборотных систем водоснабжения существенно увеличивается применение физико-химических и биологических методов очистки сточных вод [7 – 9]. Неотъемлемой частью большинства сооружений физико-химической и биохимической очистки являются системы аэрации. Наиболее распространены системы пневматической аэрации, суть работы которых заключается в подаче газа под давлением в аэрируемый объем через различные устройства диспергирования (аэраторы): перфорированные резиновые шланги, мембранные диски, пористые пластины и т.п. Проходя через мельчайшие отверстия, воздух образует большое количество пузырьков определенного размера.

Современные очистные сооружения оборудуются системами контроля и регулирования параметров процесса очистки [10, 11]. Основным контролируемым параметром является эффективность очистки. Мониторинг эффективности проводят либо традиционным методом – периодическим отбором и анализом проб, либо с помощью дорогостоящих систем, позволяющих анализировать эффективность в автоматизированном режиме. Управление в таких системах обеспечивается регулированием режимов работы систем аэрации, расходов очищаемой жидкости и дозированием реагентов.

Известно, что эффективность очистки сточных вод в сооружениях с системами аэрации зависит от размеров и количества пузырьков. Как правило, необходимый размер пузырьков или же распределение пузырьков по размерам учитывается на этапе расчетов и проектирования систем аэрации [12 – 16]. Но в процессе дальнейшей эксплуатации неизбежны засорение, разрушение пор аэраторов и другие процессы, влияющие на непостоянство дисперсного состава пузырьков в воде, что приводит к снижению эффективности очистки. Поэтому в данной работе предлагается применение мониторинга дисперсного состава газовой фазы в очищаемой жидкости пассивным акустическим методом в дополнение к вышеописанным системам контроля и регулирования.

Пассивные акустические методы основаны на том факте, что пузырьки воздуха в воде являются источниками акустических сигналов. Они излучают акустический сигнал из-за переменного давления газа внутри пузырька. Круговая частота акустического сигнала ω_M , рад/с, излучаемого пузырьком газа, зависит от его размера

$$\omega_M = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho}}, \quad (1)$$

где R_0 – средний радиус пузырька, м; γ – коэффициент адиабаты; p_0 – давление в жидкости, Па; ρ – плотность окружающей пузырек жидкости, кг/м³ [17].

Для пузырька воздуха в воде под атмосферным давлением при температуре 20 °С выражение (1) сводится к простому виду

$$v_M = \frac{3,28}{R_0} \times [M \times \Gamma\text{ц}]. \quad (2)$$

Приведенные выше выражения отражают обратную зависимость радиуса пузырька к частоте звука, излучаемого пузырьком:

$$R_0 = \frac{3,28}{v_M} \times [M \times \Gamma\text{ц}]. \quad (3)$$

Материалы и методы

Чтобы продемонстрировать принципиальную возможность мониторинга дисперсного состава газовой фазы в воде проведена серия экспериментов на лабораторной установке, собранной на базе флотационной колонны. Экспериментальная установка состоит из прозрачной флотационной колонны 1 высотой 1200 мм и диаметром 50 мм, мелкопузырчатого пористого аэратора 2, баллона со сжатым воздухом 3, регулировочного вентиля 4, гидрофона типа 8103 Bruel&Kjaer 5, многоканального анализатора сигналов ВКPulseLAN-XI 6, ПК с ПО LabShop 7 (рис. 1). Гидрофон расположен на 50...100 мм выше положения мелкопузырчатого аэратора по высоте колонны. Связка «гидрофон и многоканальный анализатор сигналов» позволяет проводить измерения в широком диапазоне частот (0...102,4 кГц) с частотой дискретизации 131 кГц. Программное обеспечение LabShop проводит обработку измеряемых сигналов в режиме реального времени (1 – 1/24 октавный анализ, вычисление спектров и т.д.).

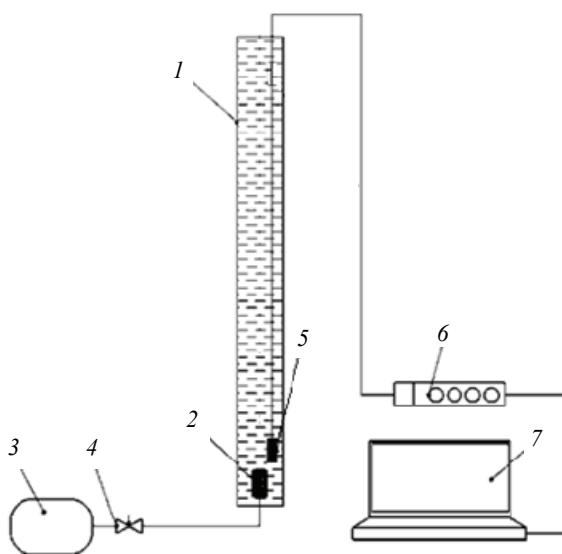


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Проведено три серии экспериментов. Для каждой серии экспериментов режим работы установки выставлялся отличным от предыдущего. Для первой серии экспериментов значение расхода воздуха, подаваемого через аэратор, составляло – 0,5 л/мин; второй – 0,4; третьей – 0,3. Акустический сигнал, излучаемый пузырьками воздуха, регистрировался измерительной системой. Частотный анализ сигналов проводился по спектрам, полученным быстрым преобразованием Фурье в ПО LabShop. Размеры пузырьков рассчитывались по выражению (3). В процессе экспериментов делалась серия фотоснимков пузырьков во флотационной колонне, которые обрабатывались ПО BubbleWizard для того, чтобы оценить размер пузырьков фотометрическим способом (рис. 2).



Рис. 2. Фотография пузырьков воздуха во флотационной колонне

Принцип работы данного метода представлен в работе [18].

Результаты

Спектры зарегистрированных сигналов показаны на рис. 3. Анализ спектров показал, что с уменьшением расхода воздуха, подаваемого через аэратор, снижался общий уровень шума, так как уменьшалось и количество пузырьков. Частота самых высоких пиков на спектре увеличивалась, что соответствовало уменьшению радиусов пузырьков. На первом спектре частота самого высокого пика – 2 507 Гц, втором – 3 421 Гц, третьем – 3 516 Гц. Результаты определения размеров пузырьков фотометрическим и акустическим методами представлены в табл. 1. Значения радиусов

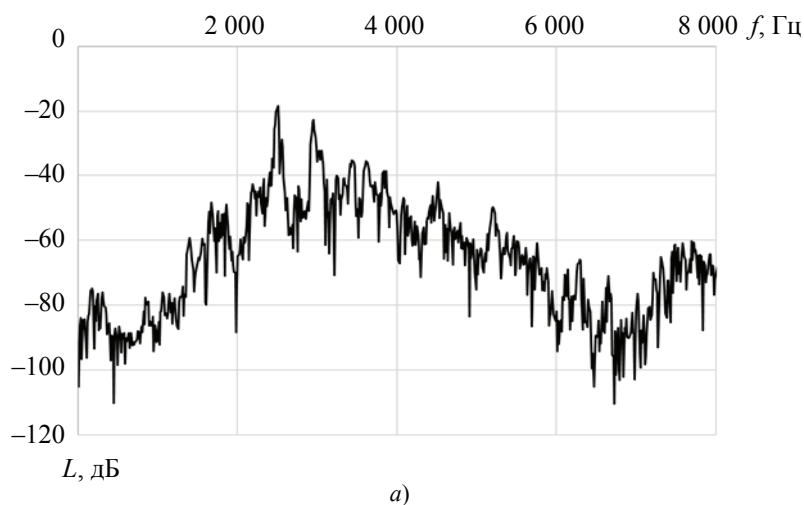


Рис. 3. Спектр сигнала, записанного в процессе первой (а) серии экспериментов (начало)

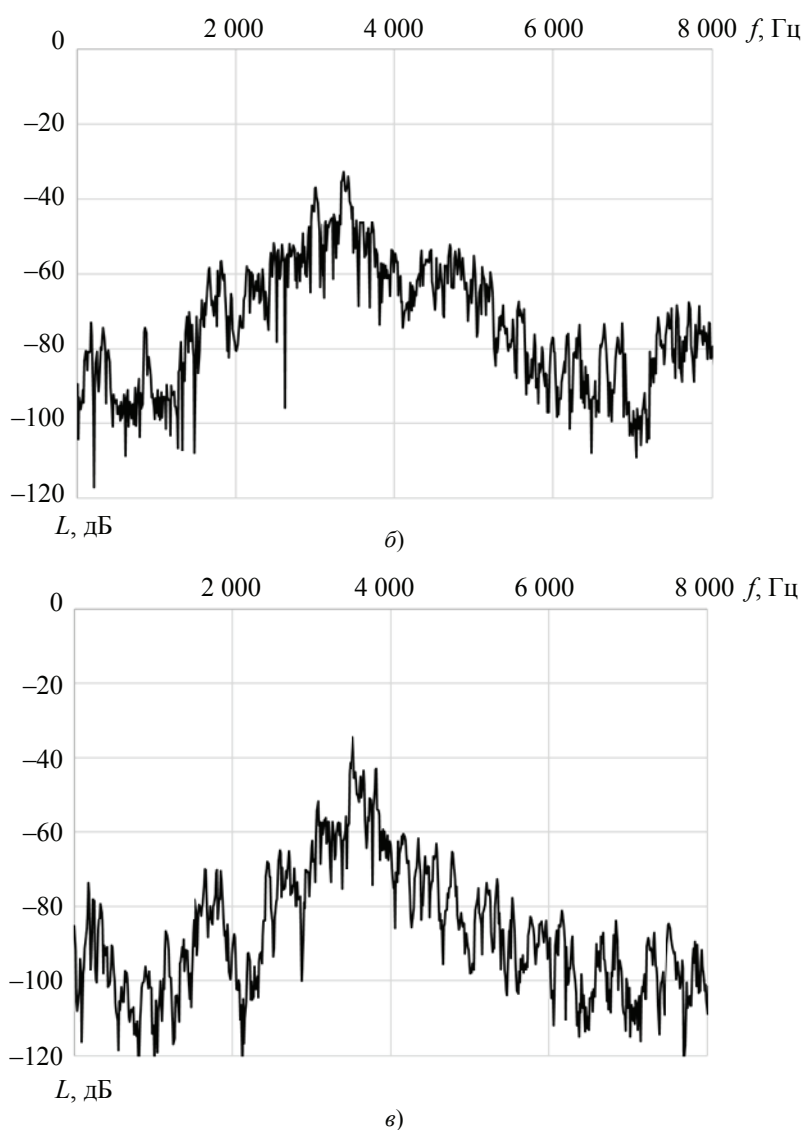


Рис. 3. Окончание: второй (б) и третьей (в) серии экспериментов

Таблица 1

**Результаты определения размеров пузырьков
фотометрическим и акустическим методами**

Номер серии экспериментов	Фотометрический	Акустический	
	Радиус пузырьков, мм	Радиус пузырьков, мм	Относительная погрешность измерений, %
1	1,48	1,31	-11,6
2	1,15	0,96	-16,6
3	1,13	0,93	-17,4

пузырьков, полученные акустическим методом, во всех трех сериях экспериментов оказались меньше радиусов, определенных фотометрическим методом. Относительная погрешность определения радиусов пузырьков воздуха во флотационной колонне, наполненной водой, акустическим методом по сравнению с фотометрическим составила не более 17,5 %. Учитывая постоянство знака погрешности и сходимость характеров изменения размеров пузырьков, можно предположить, что отклонения результатов, полученных акустическим и фотометрическими методами, обусловлены неопределенностями калибровки фотометрического метода.

Заключение

На примере флотационной колонны продемонстрирована принципиальная возможность мониторинга дисперсного состава пузырьков воздуха в воде пассивным акустическим методом. Внедрение данного метода в системы автоматического контроля и регулирования процесса очистки сточных вод позволит в режиме реального времени управлять процессом аэрации по ключевому параметру, влияющему на эффективность очистки, – дисперсному составу пузырьков воздуха в воде, что приведет к увеличению производительности очистных сооружений, уменьшению габаритов установок, сокращению расходов на их операционное обслуживание, снижению экологического ущерба от сброса недоочищенных сточных вод в окружающую среду.

Список литературы

1. Охрана окружающей среды в России. 2018 : стат. сб. / К. Э. Лайкам, А. Д. Думнов, Т. Р. Жемчугова [и др.]. – М. : Федер. служба гос. статистики, 2018. – 125 с.
2. Васильева, М. В. Факторы химической природы, ответственные за развитие экологически обусловленных заболеваний / М. В. Васильева, А. А. Натарева // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 2 (24). – С. 43 – 45.
3. Влияние городских ливневых сточных вод в загрязнении почвы населенных мест и воды открытых водоемов / Ф. А. Салимова, Е. Г. Степанов, М. А. Шафиков [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 8. – С. 104 – 107.
4. Святченко, А. В. Очистка ливневых стоков автозаправочных станций от нефтепродуктов и взвешенных веществ / А. В. Святченко, Ж. А. Сапронова // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2020. – № 2 (76). – С. 23 – 34. doi: 10.17277/voprosy.2020.02.pp.023-034
5. Очистка и утилизация поверхностных сточных вод с территорий промышленных предприятий / Е. Л. Войтов, Ю. Л. Сколубович, А. А. Цыба [и др.] // Экономика строительства и природопользования. – 2019. – № 2 (71). – С. 60 – 66.
6. Влияние окружающей среды на здоровье человека. – Текст : электронный // ФБУЗ «Центр гигиенического образования населения» Роспотребнадзора. – URL : <http://cgon.rospotrebnadzor.ru/content/62/781/> (дата обращения: 30.06.2021).
7. Кириленко, В. И. Струйно-аэрационная флотационная установка для очистки нефтесодержащих сточных вод военных объектов / В. И. Кириленко, В. К. Тучков, Ю. В. Коженев // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2020. – № 9 (10). – С. 174 – 183.

8. Ксенофонтов, Б. С. Флотационная очистка технологического конденсата на ТЭЦ / Б. С. Ксенофонтов, Е. С. Антонова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 5. – С. 41 – 46. doi: 10.35776/MNP.2020.05.07
9. Ksenofontov, B. S. Water Systems Flotation Treatment. Wastewater and Soil Flotation Treatment / B. S. Ksenofontov. – LAP Lambert, 2011. – 196 p.
10. Лавриненко, А. А. Устройства для контроля и регулирования параметров процесса флотации / А. А. Лавриненко, В. П. Топчаев, Г. В. Федин // Горный информ.-аналит. бюллетень (науч.-техн. журнал). – 2015. – № S1. – С. 271 – 277.
11. Малышева, А. В. Исследование перспектив перехода на автоматическое управление процессом флотации калийной руды / А. В. Малышева, А. В. Затонский // Автоматизация. Современные технологии. – 2019. – Т. 73, № 3. – С. 119 – 127.
12. Ксенофонтов, Б. С. Определение оптимальных гидравлических режимов работы блока расходящихся пластин флотоотстойника и отстойника / Б. С. Ксенофонтов, Е. В. Сеник // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2020. – № 5 (149). – С. 38 – 41.
13. Лаптев, А. Г. Модель определения эффективности очистки жидкостей флотацией / А. Г. Лаптев, А. Х. Шакирова, М. М. Башаров // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 5 (85). – С. 25 – 28.
14. Ксенофонтов, Б. С. Очистка сточных вод: Кинетика флотации и флотокомбайны / Б. С. Ксенофонтов. – М. : Форум, 2015. – 256 с.
15. Wastewater Treatment by Flotation with Modern System of Aeration / D. Sazonov, B. S. Ksenofontov, E. Antonova, V. Yushinov // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference and Expo 2014 (SGEM 2014), 17 – 26 June, 2014, Albena, Bulgaria. – NY, 2015. – Vol. 1. – P. 815 – 820.
16. Saththasivam, J. An Overview of Oil–Water Separation using Gas Flotation Systems / J. Saththasivam, K. Loganathan, S. Sarp // Chemosphere. – 2016. – Vol. 144. – P. 671 – 680.
17. Minnaert, M. On Musical Air-Bubbles and the Sounds of Running Water / M. Minnaert // London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1933. – Vol. 16. – P. 235 – 248.
18. Developing Photo Analyzing and Bubble Processing Program on Python Language / M. V. Ivanov, S. A. Gavriliev, J. M. Tyurina [et al.] // Lecture Notes in Engineering and Computer Science : Proceedings of the World Congress on Engineering 2019, 3 – 5 July, 2019, London. – U.K., 2019. – P. 299 – 303.

References

1. Laykam K.E., Dumnov A.D., Zhemchugova T.R. [et al.] *Okhrana okruzhayushchey sredy v Rossii. 2018: statisticheskiy sbornik* [Environmental protection in Russia. 2018: statistical collection], Moscow: Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki, 2018, 125 p. (In Russ.)
2. Vasil'yeva M.V., Natarova A.A. [Chemical factors responsible for the development of ecologically caused diseases], *Mashinostroyeniye i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Mechanical engineering and life safety], 2015, no. 2 (24), pp. 43-45. (In Russ.)
3. Salimova F.A., Stepanov Ye.G., Shafikov M.A. [et al.] [Influence of urban storm waste waters in soil pollution of populated areas and water of open reservoirs], *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Successes of modern natural science], 2004, no. 8, pp. 104-107. (In Russ.)

4. Svyatchenko A.V., Saprionova Zh.A. [Storm runoff cleaning at filling stations from petroleum products and suspended solids], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2020, no. 2 (76), pp. 23-34, doi: 10.17277/voprosy.2020.02.pp.023-034 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Voytov Ye.L., Skolubovich Yu.L., Tsyba A.A., Razuvayeva K.I., Belonogov D.Ye. [Treatment and utilization of surface waste water from the territories of industrial enterprises], *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya* [Economics of construction and environmental management], 2019, no. 2 (71), pp. 60-66. (In Russ., abstract in Eng.)
6. <http://cgon.rospotrebnadzor.ru/content/62/781/> (accessed 30 June 2021).
7. Kirilenko V.I., Tuchkov V.K., Kozhenov Yu.V. [Jet-aeration flotation installation for purification of oily waste water from military facilities], *Aktual'nyye problemy voyenno-nauchnykh issledovaniy* [Actual problems of military scientific research], 2020, no. 9 (10), pp. 174-183. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Ksenofontov B.S., Antonova Ye.S. [Flotation cleaning of technological condensate at CHP], *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2020, no. 5, pp. 41-46, doi: 10.35776/MNP.2020.05.07 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Ksenofontov B.S. *Water Systems Flotation Treatment. Wastewater and Soil Flotation Treatment*, LAP Lambert, 2011, 196 p.
10. Lavrinenko A.A., Topchayev V.P., Fedin G.V. [Devices for control and regulation of parameters of the flotation process], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)], 2015, no. S1, pp. 271-277. (In Russ.)
11. Malysheva A.V., Zatonkiy A.V. [Study of the prospects for the transition to automatic control of the process of flotation of potassium ore], *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii* [Automation. Modern technologies], 2019, vol. 73, no. 3, pp. 119-127. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Ksenofontov B.S., Senik Ye.V. [Determination of optimal hydraulic operating modes of the block of diverging plates of the flotation tank and settler], *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye* [Water purification. Water treatment. Water supply], 2020, no. 5 (149), pp. 38-41. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Laptsev A.G., Shakirova A.Kh., Basharov M.M. [Model for determining the efficiency of cleaning liquids by flotation], *Energoberezheniye i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment], 2013, no. 5 (85), pp. 25-28. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Ksenofontov B.S. *Ochistka stochnykh vod: Kinetika flotatsii i flotokombayny* [Waste water treatment: Kinetics of flotation and flotation combines], Moscow: Forum, 2015, 256 p.
15. Sazonov D., Ksenofontov B.S., Antonova E., Yushinov V. Wastewater Treatment by Flotation with Modern System of Aeration, Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference and Expo 2014 (SGEM 2014), 17 - 26 June, 2014, Albena, Bulgaria, NY, 2015, vol. 1, pp. 815-820.
16. Saththasivam J., Loganathan K., Sarp S. An Overview of Oil–Water Separation using Gas Flotation Systems, *Chemosphere*, 2016, vol. 144, pp. 671-680.
17. Minnaert M. On Musical Air-Bubbles and the Sounds of Running Water, *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1933, vol. 16, pp. 235-248.
18. Ivanov M.V., Gavrilov S.A., Tyurina J.M., Yusipova A., Boldyrev M.D. Lecture Notes in Engineering and Computer Science, Proceedings of the World Congress on Engineering 2019, 3 - 5 July, 2019, London, U.K., 2019, pp. 299-303.

Acoustic Monitoring of the Dispersed Composition of Air Bubbles in Aeriated Waste Water Purification Processes

S. A. Gavriliev, M. V. Ivanov

*Bauman Moscow State Technical University
(National Research University), Moscow, Russia*

Keywords: aeration; dispersed composition of gas phase; monitoring; passive acoustic method; flotation.

Abstract: A passive acoustic method is proposed for monitoring the dispersed composition of air bubbles, which determines the efficiency of wastewater treatment in facilities with aeration systems, in treatment facilities with aeration systems. The principal possibility of applying the method has been demonstrated on an experimental plant assembled on the basis of a flotation column. The size of the bubbles created by the flotation column aeration system was determined photometrically. It is shown that the error in determining the bubble radii by the proposed method relative to the photometric method was no more than 17.5%.

© С. А. Гаврильев, М. В. Иванов, 2021