

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ВОДЫ В ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ФЛОТАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ

Антонова Е. С., Сазонов Д. В.

## INCREASING WASTEWATER TREATMENT EFFICIENCY IN PNEUMOHYDRAULIC FLOTATORS

Antonova E. S., Sazonov D. V.

### Аннотация

Приведены основные параметры, влияющие на эффективность флотационной очистки воды: размеры генерируемых пузырьков газов и их количество. Кратко рассмотрены основные способы аэрации, используемые для флотационной очистки воды. Особое внимание уделено пневмогидравлической флотации. Рассмотрены два способа повышения эффективности очистки воды в пневмогидравлических флотаторах. Первый заключается в подаче воздуха перед насосом, а второй — в применении диспергирующих устройств. Описана лабораторная установка, на которой изучались эти способы. В результате проведённых экспериментов получены функции плотности распределения размеров пузырьков воздуха в различных ситуациях при разном газонасыщении воды: 2, 5 и 7,5 %. В исходном варианте пневмогидравлической системы аэрации основная часть воздуха выделяется в виде больших пузырьков размером более 500 мкм. При подаче воздуха перед насосом получено нормальное распределение размеров пузырьков воздуха со средним значением 75 мкм. Применение диспергатора позволяет значительно снизить долю пузырьков размером более 500 мкм и получить полимодальное распределение пузырьков воздуха по размерам с двумя пиками (60–70 и 90–120 мкм). В зависимости от вида загрязнений необходимы разные пузырьки, что лучше определять экспериментально, поэтому и выбирать тот или иной метод аэрации надо в каждом случае отдельно.

**Ключевые слова:** флотация, очистка сточных вод, пневмогидравлическая система аэрации, размер пузырька, диспергатор, аэратор, пневмогидравлический флотатор, газосодержание.

### Введение

Флотация — это процесс разделения веществ, основанный на гидрофобных свойствах газов. В частности флотация используется для очистки воды, при этом в большинстве случаев в качестве газа используется атмосферный воздух. Пер-

### Abstract

Basic parameters affecting efficiency of flotation wastewater treatment, such as bubble size and their quantity, are considered. Main types of aeration methods used for flotation water treatment are briefly described. Special attention is paid to pneumohydraulic flotation. Two ways of efficiency increase in pneumohydraulic flotators are considered. The first one is air supply upstream of the pump, the second one is the use of a disperser. A laboratory setup for investigation of those methods is described. Probability density functions of bubble size for different experimental conditions and gas volume fraction of 2 %, 5 %, 7.5 % are presented. In conventional pneumohydraulic aeration systems, the major portion of air is released in the form of large bubbles (in size more than 500  $\mu\text{m}$ ). When air was supplied upstream of the pump, normal distribution with bubble average size of 75  $\mu\text{m}$  was obtained. The use of a disperser allows significantly decreasing the fraction of bubbles in size more than 500  $\mu\text{m}$  and obtaining polymodal distribution with two peaks (60–70 and 90–120  $\mu\text{m}$ ). The aeration method should be chosen with the consideration of bubble size, needed for different types of contamination, that is better to be defined experimentally.

**Keywords:** flotation, wastewater treatment, pneumohydraulic aeration system, bubble size, disperser, aerator, pneumohydraulic flotator, gas volume fraction.

воочередным моментом при флотации является образование флотокомплексов «частицы загрязнений — пузырьки воздуха».

Эффективность очистки воды флотационным способом напрямую связана с вероятностью образования флотокомплексов. Учёные предлага-

ют различные модели флотационного процесса [7, 21, 23]. И хотя не все модели учитывают то, что флотокомплексам необходимо всплыть (не говоря уже о возможности их разрушения), все они показывают прямо или косвенно, что чем вероятнее образование флотокомплексов, тем эффективнее или быстрее будет идти очистка воды. Следовательно, необходимо повысить вероятность образования этих комплексов, а она зависит от большого числа факторов. Наиболее явными параметрами являются размеры пузырьков газа и их количество. Очевидно, что чем их больше, а размер меньше до определённых пределов, тем проще образоваться флотокомплексу. Однако полностью скомпенсировать большие размеры пузырьков их большим количеством невозможно. Одна из причин — они поднимаются к поверхности воды очень быстро, что приводит к неравномерности аэрации. Практика показывает [2], что для большинства случаев очистки воды желательны пузырьки размером до 100–150 мкм, хотя иногда и пузырьки размером 0,5–2 мм могут достаточно эффективно извлекать некоторые вещества, например, поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Естественно, желательно получать большое количество пузырьков малого размера простым способом с минимальными энергозатратами. Флотационные установки как раз и классифицируются, как правило, по способам создания пузырьков воздуха. Наиболее эффективными и дорогими являются напорная флотация и электрофлотация, при которых образуются пузырьки размером 20–80 мкм [21]. В первом случае в воде растворяют газ под избыточным давлением 3–5 атм, а во втором — происходит электролиз воды с выделением пузырьков водорода и кислорода. Наиболее простым и незатратным способом является пневматическая флотация, при которой воздух, подаваемый от компрессора, проходит через аэратор, однако пузырьки в этом случае образуются достаточно крупными: более 400 мкм [15].

Промежуточное положение занимает пневмогидравлическая флотация. В этом случае вода подаётся от насоса в аэратор, где смешивается с воздухом. При выходе водовоздушной смеси из аэратора происходит диспергирование воздуха. В некоторых случаях идёт самоподсос воздуха

(в этом случае можно говорить об эжекционной флотации), но обычно его подача осуществляется от компрессора. Это стандартный вариант пневмогидравлической флотации, при котором воздух подаётся в систему либо перед аэратором, либо непосредственно в него. Степень диспергирования пузырьков газа в этом случае определяется в основном конструкцией аэратора, расходом воды ( $Q_B$ ) и соотношением расходов газа ( $Q_G$ ) и воды, которое обозначим через газосодержание  $\varphi = (Q_G : Q_B) \cdot 100 \%$ . В работе [19] получены пузырьки со средними размерами 2–3 мм. В основном развитие данного способа идёт в разработке и совершенствовании конструкций пневмогидравлических аэраторов (ПА), например, создают вращающиеся ПА [5], или изменяют параметры сопла, чему посвящена работа [12].

Существуют также микроустройства для генерирования микропузырьков. В [20] рассмотрено применение Т-образных микроустройств, в которых имеются каналы размерами порядка 100–200 мкм. При этом размеры генерируемых пузырьков составляют 60–180 мкм, но производительность таких устройств недостаточна для очистки сточной воды.

В данной работе предложено два других способа повышения качества диспергирования: подача воздуха перед насосом и применение диспергирующего устройства при подаче воздуха после насоса. Про первый способ имеются неоднозначные данные по размерам образующихся пузырьков [18]. В [10] говорится, что в этом случае пузырьки образуются больших размеров, нежели при напорной флотации. В работе [17] показана целесообразность подачи воздуха перед насосом, так как средний размер генерируемых пузырьков воздуха составлял 50–70 мкм при  $\varphi$  до 5 %. Однако в этом случае использовался специальный центробежный насос японской фирмы Nikuni и аэратор с вращением потока воды.

Другим способом уменьшения размеров генерируемых пузырьков газа является применение специальных диспергаторов. Их основное преимущество — универсальность, так как такие устройства могут быть установлены в любые системы. Принцип их действия основан на различных физических явлениях: изменении направления потока движения [14, 16, 22], механическом диспергировании [4, 11], комбини-

ровании электрического и центробежного полей [1, 3, 5], обработке ультразвуком [9]. Наиболее технически простым решением, не требующим дополнительных энергозатрат, является диспергирование пузырьков при их контакте с твёрдой поверхностью [4, 11]. Данные устройства в ряде случаев позволяют получать пузырьки размерами менее 100 мкм. Однако следует отметить некоторые недостатки: сложность некоторых технологий, недостаточная степень диспергирования, достижение требуемых параметров только при определённых настройках системы.

### Методы и материалы

Для исследования возможности повышения эффективности очистки воды в пневмогидравлических флотаторах была использована лабораторная установка, представленная на рис. 1.

Особенностью выполненной работы является то, что сравнение методов можно было проводить при использовании одного и того же оборудования: аэратора и насоса.

Установка состоит из камеры аэрации 1, промежуточного резервуара 2, компрессора 3, центробежного насоса 4, аэратора 6. Для фотографирования пузырьков на камере аэрации 1 закреплена прозрачная ёмкость 9, в которую набирается исследуемая рабочая жидкость. С одной стороны ёмкости установлен USB-микроскоп 10,

соединённый с компьютером 11, с противоположной стороны напротив объектива микроскопа — источник света 8.

Вода из резервуара 2 подаётся насосом 4 в камеру аэрации 1. Подача воздуха осуществляется от компрессора 3 двумя способами: П1 — подвод воздуха после насоса в эжектор 7 (существующий); П2 — подвод воздуха перед насосом (предлагаемый). В первом случае диспергирование пузырьков происходит в аэраторе; во втором — в насосе и аэраторе. Также рассматриваемая система аэрации может быть дополнена диспергатором 5, устанавливаемым после аэратора. Из камеры аэрации 1 вода самотёком поступает в резервуар 2, что способствует удалению оставшихся мелких пузырьков воздуха.

Эксперименты по определению дисперсного состава пузырьков, генерируемых пневмогидравлической системой аэрации, проводились для трёх способов диспергирования воздуха: 1) подвод воздуха после насоса (исходный вариант); 2) подвод воздуха перед насосом (предлагаемый); 3) подвод воздуха после насоса с установкой диспергатора (предлагаемый).

В исследовании использовался ребристый вращающийся диспергатор оригинальной конструкции [8], принцип работы которого заключался в следующем. Водовоздушная смесь, выходящая из аэратора с большой скоростью, ударяется о ребристую поверхность диспергатора, вследствие чего пузырьки воздуха дробятся на более мелкие, а диспергатор вращается, что обеспечивает более интенсивное перемешивание водовоздушной смеси с загрязнённой водой. Последний аспект повышает вероятность образования флотокомплексов.

Эксперименты проводились при следующих значениях газосодержания  $\varphi$ : 2; 5; 7,5 %.

### Результаты исследования и их обсуждение

Были определены размеры 200–300 пузырьков для каждого случая. В результате статистической обработки были получены функции плотности распределения размеров пузырьков (рис. 2–4). На основе полученных данных определена доля воздуха, приходящаяся на каждую группу пузырьков по размерам.

При подаче воздуха после насоса получено неоднородное распределение пузырьков. В результате статистической обработки выделено несколько нормальных распределений (рис. 2).

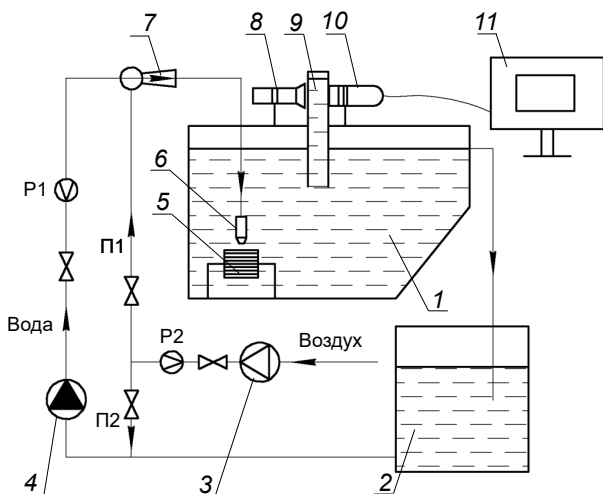


Рис. 1. Схема лабораторной установки:  
1 — камера аэрации; 2 — промежуточный резервуар;  
3 — компрессор; 4 — насос; 5 — диспергатор; 6 — аэратор;  
7 — эжектор; 8 — источник света; 9 — ёмкость; 10 — USB-микроскоп; 11 — компьютер; P1 — расходомер для воды; P2 — расходомер для воздуха; П1 — подвод воздуха в эжектор (после насоса); П2 — подвод воздуха перед насосом

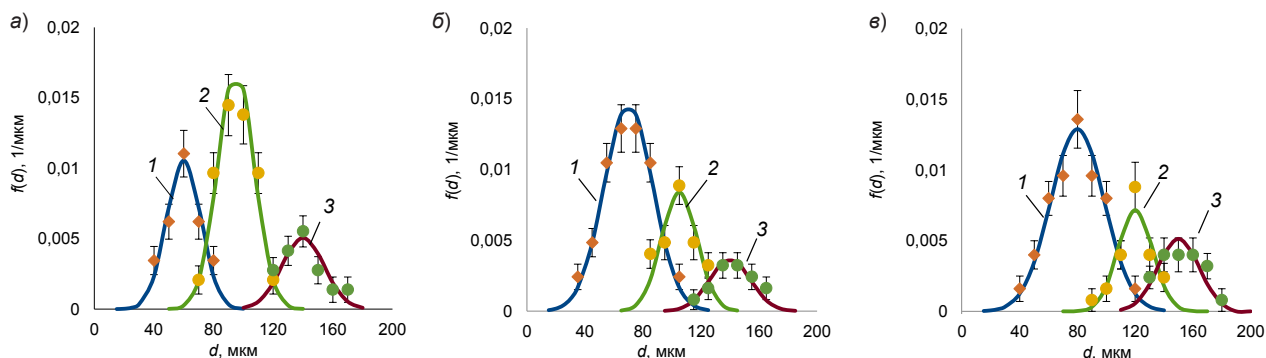


Рис. 2. Функции плотности распределения размеров пузырьков при подаче воздуха после насоса: а)  $\phi = 2\%$ ; б)  $\phi = 5\%$ ; в)  $\phi = 7,5\%$ ; 1 — первая группа пузырьков (мелкодисперсные); 2 — вторая группа пузырьков (среднедисперсные); 3 — третья группа пузырьков (крупнодисперсные)

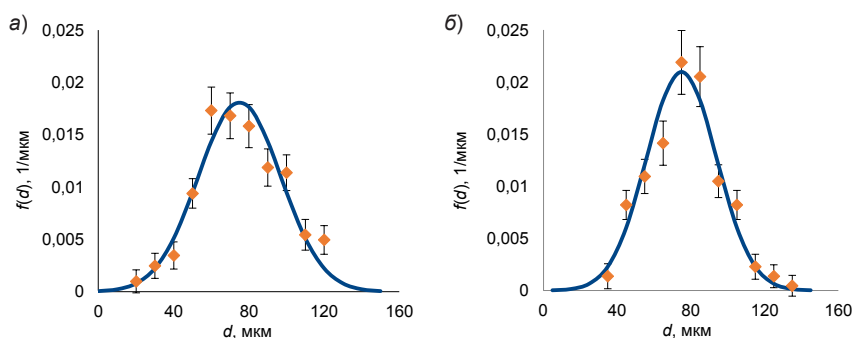


Рис. 3. Функции плотности распределения размеров пузырьков при подаче воздуха перед насосом: а)  $\phi = 2\%$ ; б)  $\phi = 5\%$

Пузырьки крупнее 200 мкм в распределении не представлены, так как они малоэффективны во флотационном процессе очистки воды. Доля пузырьков крупнее 500 мкм при подаче воздуха после насоса возрастает с 12 до 25 % при увеличении газосодержания  $\phi$  с 2 до 7,5 %, а доля воздуха, приходящаяся на эти пузырьки, составляет

более 90 %. Дальнейшее увеличение расхода воздуха нецелесообразно, так как при этом возрастает средний размер пузырьков всех групп.

При подаче воздуха перед насосом получено уномодальное нормальное распределение (рис. 3). Пузырьков более 500 мкм зафиксировано не было. При газосодержаниях 2 и 5 % вид

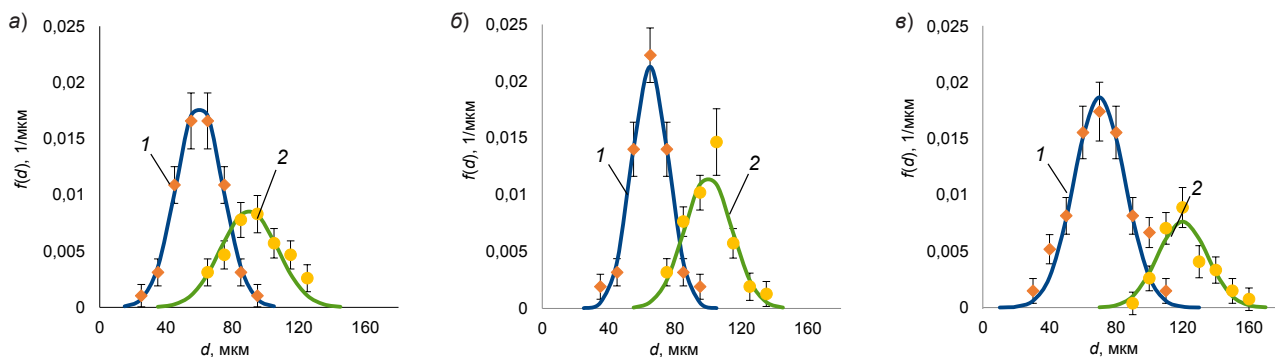


Рис. 4. Функции плотности распределения размеров пузырьков при подаче воздуха после насоса и использовании диспергатора: а)  $\phi = 2\%$ ; б)  $\phi = 5\%$ ; в)  $\phi = 7,5\%$ ; 1 — первая группа пузырьков (мелкодисперсные); 2 — вторая группа пузырьков (среднедисперсные)

распределения практически не меняется, средний размер пузырька 75 мкм со среднеквадратическими отклонениями 22 и 19 мкм соответственно. При увеличении газосодержания свыше 5–7 % отмечается нестабильность работы насоса и возможно его «завоздушивание», при котором насос перестаёт качать воду — это является технологическим ограничением данного способа.

Использование диспергатора при подаче воздуха после насоса позволяет значительно сократить количество крупных пузырьков размерами более 500 мкм. Их доля составляет менее 5 %. Появление таких пузырьков носит случайный характер и не оказывает значительного влияния на процесс. Дисперсный состав в данном случае характеризуется двумя группами пузырьков со средними размерами 60–70 и 90–120 мкм, на которые приходится 55–65 % воздуха. При увеличении газосодержания размер диспергированных пузырьков увеличивается, так как увеличивается их исходный размер.

Проведённый эксперимент позволил выявить основные особенности работы пневмогидравлической системы аэрации.

При использовании существующего варианта с подачей воздуха после насоса образуется большое количество пузырьков размерами более 500 мкм, на которые приходится около 95 % воздуха. Распределение пузырьков размерами менее 500 мкм неравномерно и характеризуется несколькими значениями. Вторая и третья группа пузырьков имеют размеры более 100 мкм. Применение диспергатора и подача воздуха перед насосом могут решить эту проблему.

Применение диспергатора позволяет получить полимодальное распределение, характеризующееся двумя группами пузырьков, и при этом снизить до 35–45 % долю воздуха, приходящуюся на пузырьки размерами более 500 мкм. Данный метод позволяет работать в широком диапазоне значений газосодержания, однако при его повышении размер пузырьков также увеличивается и количество пузырьков с размерами более 500 мкм возрастает. Этот способ можно применять при наличии в воде легкофлотируемых загрязнений разного типа, для извлечения которых требуются пузырьки широкого диапазона размеров [13].

При подаче воздуха перед насосом получается уномодальное нормальное распределение пу-

зырьков со средним размером 75 мкм. В отличие от существующего варианта, практически отсутствовали крупнодисперсные пузырьки размером более 500 мкм. Доля воздуха, приходящаяся на пузырьки размерами менее 100 мкм, с которыми наиболее эффективно образуются флотокомплексы, существенно возрастает. При использовании данного варианта необходимо учитывать ограничение по соотношению расходов ( $\varphi$  не более 5 %). Однако это не является серьёзным недостатком, так как этот способ подачи воздуха позволяет получить мелкодисперсные пузырьки с большей интенсивностью аэрации, чем при подводе воздуха после насоса, где до 90–95 % приходится на пузырьки, с которыми флотация не идёт эффективно. Данный метод применяется при очистке воды от труднофлотируемых, мелкодисперсных, гидрофобно-гидрофильных загрязнений, для извлечения которых требуются однородные пузырьки с размерами менее 100 мкм [2, 13].

#### **Заключение**

В работе проведено исследование пневмогидравлической системы аэрации, применяемой для флотационной очистки воды, и предложены способы повышения качества генерируемой водовоздушной смеси: подача воздуха перед насосом и применение диспергатора. Оба метода могут применяться как при модернизации существующих пневмогидравлических флотационных установок, так и при проектировании новых. При этом вместо большого объёма крупных пузырьков газа размером от 500 мкм можно получить либо нормальное распределение размеров пузырьков со средним значением 75 мкм (подача воздуха перед насосом), либо полимодальное распределение (использование диспергатора), при котором большая часть пузырьков имеет размеры менее 140 мкм.

#### **Литература**

1. Алексеева, Т. В. (2003). Разработка технологии очистки замасленных сточных вод ТЭЦ с использованием метода безнапорной флотации. Канд. техн. наук. Пензенская государственная архитектурно-строительная академия.
2. Андреев, С. Ю., Гарькина, И. А. и Петрунин, А. А. (2014). Совершенствование флотационной очистки производственных сточных вод. Региональная архитектура и строительство, № 2, сс. 157–162.
3. Андреев, С. Ю., Гришин, Б. М., Ширшин, И. Б., Шистеров, А. С., Давыдов, Г. П., Кулапин, В. И. и Колдов, А. С.

(2011). Использование новой технологии генерирования тонкодисперсной водовоздушной смеси для интенсификации флотационной очистки сточных вод. В: Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», Пенза: ПГУ, т. 1, сс. 347–350.

4. Бочкарёв, Г. Р. и Кондратьев, С. А. (2005). Установка для флотационной очистки воды. Патент РФ № 2251530.

5. Гришин, Л. Б. (2009). Совершенствование очистки нефтесодержащих производственных сточных вод. Канд. техн. наук. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства.

6. Казаков, В. Д., Полканов, А. Г., Ратинер, М. М. и Толстой, М. Ю. (2009). Экспериментальные и теоретические исследования вращающегося пневмогидравлического аэратора. Вестник ИргТУ, № 2 (38), сс. 163–167.

7. Ксенофонов, Б. С. (2010). Флотационная обработка воды, отходов и почвы. М.: Новые технологии, 272 с.

8. Ксенофонов, Б. С. и Антонова, Е. С. (2014). Флотационная машина для очистки сточных вод. Патент на полезную модель РФ № 149273.

9. Максимова, С. В. (2006). Совершенствование систем аэрации сооружений биологической очистки сточных вод с использованием вихревых эрлифтных устройств. Канд. техн. наук. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства.

10. Мацнев, А. И. (1976). Очистка сточных вод флотацией. Киев: Будивельник, 132 с.

11. Мельникова, С. А., Шехирев, Д. В. и Думов, А. М. (2013). Исследование закономерности работы пневмогидравлического струйно-эжекторного аэратора. Научный вестник Московского государственного горного университета, № 4, сс. 64–69.

12. Орлов, А. В. (2010). Интенсификация работы очистных сооружений с использованием пневмогидравлических аэраторов. Канд. техн. наук. Иркутский государственный технический университет.

13. Сазонов, Д. В., Антонова, Е. С. (2018). Подбор систем аэрации для флотационной очистки воды различного состава. Вода: химия и экология, № 1–3 (114), сс. 62–67.

14. Chen, F.-T., Peng, F.-X., Wu, X.-Q. and Luan, Z.-K. (2004). Bubble performance of a novel dissolved air flotation (DAF) unit. *Journal of Environmental Sciences*, vol. 16, issue 1, pp. 104–107.

15. Cheng, G., Shi, C., Yan, X., Zhang, Z., Xu, H., and Lu, Y. (2017). A study of bubble-particle interactions in a column flotation process. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 53 (1), pp. 17–33. doi: 10.5277/ppmp170102.

16. Kazuo, A., Matsuo, K. and Saito, S. (2005). *Apparatus and method for removing unburned carbon from fly ash*. U.S. Patent No. 889389B2.

17. Li, P. (2006). *Development of advanced water treatment technology using microbubbles*. PhD Thesis. Tokyo: Keio University.

18. Li, P. and Tsuge, H. (2006). Water treatment by induced air flotation using microbubbles. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 39, issue 8, pp. 896–903. doi: 10.1252/jcej.39.896.

19. Lima Neto, I. E., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N. (2008). Horizontal injection of gas-liquid mixtures in a water tank.

*Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, issue 12, pp. 1722–1731. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1722).

20. Parhizkar, M., Edirisinghe, M. and Stride, E. (2013). Effect of operating conditions and liquid physical properties on the size of monodisperse microbubbles produced in a capillary embedded T-junction device. *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 14, issue 5, pp. 797–808. doi: 10.1007/s10404-012-1098-0.

21. Prakash, R., Majumder, S. K. and Singh A. (2018). *Flotation technique: its mechanisms and design parameters*. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*, vol. 127, pp. 249–270. doi: 10.1016/j.cep.2018.03.029.

22. Serizawa, A., Inui, T., Yahiro, T. and Kawara, Z. (2003). *Laminarization of micro-bubble containing milky bubbly flow in a pipe*. [online] Доступно по ссылке: <http://aura-tec.com/pdf/03-milky.pdf> [дата обращения: 20.12.2018].

23. Yianatos, J. B. (2007). Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes. Columns and mechanically agitated cells — a review. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 85, issue 12, pp. 1591–1603. doi: 10.1016/S0263-8762(07)73204-5.

## References

1. Alekseeva, T. V. (2003). *Razrabotka tekhnologii ochistki zamazuchennykh stochnykh vod TETs s ispolzovaniyem metoda beznapornoy flotatsii [Development of a technology for CHP plant oily wastewater treatment using free-flow flotation]*. PhD Thesis in Engineering. Penza: Penza State Academy of Architecture and Construction (in Russian).

2. Andreev, S. Yu., Garkina, I. A. and Petrunin, A. A. (2014). *Sovershenstvovaniye flotatsionnoy ochistki proizvodstvennykh stochnykh vod [Improvement of waste water flotation purification]*. *Regional Architecture and Engineering*, No. 2, pp. 157–162. (in Russian).

3. Andreev, S. Yu., Grishin, B. M., Shirshin, I. B., Shisterov, A. S., Davydov, G. P., Kulapin, V. I. and Koldov, A. S. (2011). *Ispolzovaniye novoy tekhnologii generirovaniya tonkodispersnoy vodovozdushnoy smesi dlya intensivatsii flotatsionnoy ochistki stochnykh vod [Application of a new technology for generation of finely dispersed water-air mixture to intensify flotation wastewater treatment]*. In: *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost i kachestvo” [Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”]*, May 23–31, 2011. Penza: Penza State University, vol. 1, pp. 347–350 (in Russian).

4. Bochkaryov, G. R. and Kondratyev, S. A. (2005). *Ustanovka dlya flotatsionnoy ochistki vody [Device for flotation purification of water]*. Patent RU No. 2251530 (in Russian).

5. Grishin, L. B. (2009). *Sovershenstvovaniye ochistki neftesoderzhashchikh proizvodstvennykh stochnykh vod [Enhancement of oil-containing industrial wastewater treatment]*. PhD in Engineering. Penza: Penza State University of Architecture and Construction (in Russian).

6. Kazakov, V. D., Polkanov, A. G., Ratinер, M. M. and Tolstoy, M. Y. (2009). *Eksperimentalnye i teoreticheskiye issledovaniya vrashchayushchegosya pnevmogidravlicheskogo aeratora [Experimental and theoretical studies of the rotating pneumohydraulic aerator]*. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, No. 2 (38), pp. 163–167 (in Russian).

7. Ksenofontov, B. S. (2010). *Flotatsionnaya obrabotka vody, otkhodov i pochvy [Flotation wastewater treatment of*

water, waste and soil]. Moscow: Novye tekhnologii, 272 p. (in Russian).

8. Ksenofontov, B. S. and Antonova, E. S. (2014). *Flotatsionnaya mashina dlya ochistki stochnykh vod [Flotation machine for sewage]*. Patent RU No. 149273 (in Russian).

9. Maksimova, S. V. (2006). *Sovershenstvovaniye sistem aeratsii sooruzheniy biologicheskoy ochistki stochnykh vod s ispolzovaniyem vikhrevykh erliftnykh ustroystv [Improvement of aeration systems at biological wastewater treatment plants using vortex airlift devices]*. PhD in Engineering. Penza: Penza State University of Architecture and Construction (in Russian).

10. Matsnev, A. I. (1976). *Ochistka stochnykh vod flotatsiy [Flotation wastewater treatment]*. Kiev: Budivel'nik, 132 p. (in Russian).

11. Melnikova, S. A., Shekhirev, D. V. and Dumov, A. M. (2013). Issledovaniye zakonmernosti raboty pnevmogidravlicheskogo struyno-ezhektornogo aeratora [Investigation of functioning regularity of the pneumohydraulic stream-ejection aerator]. *Nauchny Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta*, No. 4, pp. 64–69 (in Russian).

12. Orlov, A. V. (2010). *Intensifikatsiya raboty ochistnykh sooruzheniy s ispolzovaniyem pnevmogidravlicheskikh aeratorov [Intensification of treatment plant operation using pneumohydraulic aerators]*. PhD in Engineering. Irkutsk: Irkutsk State Technical University (in Russian).

13. Sazonov, D. V. and Antonova, E. S. (2018). Podbor sistem aeratsii dlya flotatsionnoy ochistki vody razlichnogo sostava [The selection of aeration system for the flotation treatment of different kinds of water]. *Water: Chemistry and Ecology*, № 1-3 (114), pp. 62–67 (in Russian).

14. Chen, F.-T., Peng, F.-X., Wu, X.-Q. and Luan, Z.-K. (2004). Bubble performance of a novel dissolved air flotation (DAF) unit. *Journal of Environmental Sciences*, vol. 16, issue 1, pp. 104–107.

15. Cheng, G., Shi, C., Yan, X., Zhang, Z., Xu, H., and Lu, Y. (2017). A study of bubble-particle interactions in a column flotation process. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 53 (1), pp.17–33. doi: 10.5277/ppmp170102.

16. Kazuo, A., Matsuo, K. and Saito, S. (2005). *Apparatus and method for removing unburned carbon from fly ash*. U.S. Patent No. 889389B2.

17. Li, P. (2006). *Development of advanced water treatment technology using microbubbles*. PhD Thesis. Tokyo: Keio University.

18. Li, P. and Tsuge, H. (2006). Water treatment by induced air flotation using microbubbles. *Journal of Chemical*

*Engineering of Japan*, vol. 39, issue 8, pp. 896–903. doi: 10.1252/jcej.39.896.

19. Lima Neto, I. E., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N. (2008). Horizontal injection of gas-liquid mixtures in a water tank. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, issue 12, pp. 1722–1731. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1722).

20. Parhizkar, M., Edirisinghe, M. and Stride, E. (2013). Effect of operating conditions and liquid physical properties on the size of monodisperse microbubbles produced in a capillary embedded T-junction device. *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 14, issue 5, pp. 797–808. doi: 10.1007/s10404-012-1098-0.

21. Prakash, R., Majumder, S. K. and Singh, A. (2018). Flotation technique: its mechanisms and design parameters. *Chemical Engineering and Processing—Process Intensification*, vol. 127, pp. 249–270. doi: 10.1016/j.cep.2018.03.029.

22. Serizawa, A., Inui, T., Yahiro, T. and Kawara, Z. (2003). *Laminarization of micro-bubble containing milky bubbly flow in a pipe*. Available at: <http://aura-tec.com/pdf/03-milky.pdf>.

23. Yianatos, J. B. (2007). Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes. Columns and mechanically agitated cells — a review. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 85, issue 12, pp. 1591–1603. /doi: 10.1016/S0263-8762(07)73204-5.

#### Авторы

##### Антонова Екатерина Сергеевна

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Москва, Россия

E-mail: kotant@mail.ru

##### Сазонов Дмитрий Васильевич

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Москва, Россия

E-mail: sazonov-d@bmsu.ru

#### Authors

##### Antonova Ekaterina Sergeevna

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: kotant@mail.ru

##### Sazonov Dmitry Vasil'evich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: sazonov-d@bmsu.ru