

УДК 628.356

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.3.171

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

С.Н. Долгобородова¹, ст. преп.

Н.И. Богданович², д-р техн. наук, проф.

Т.С. Мауричева¹, канд. геол.-минерал. наук

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
ул. Капитана Воронина, д. 6, г. Северодвинск, Россия, 164520;

e-mail: s.dolgorodova@narfu.ru; t.mauricheva@narfu.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: n.bogdanovich@narfu.ru

Показана опасность сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий для водных экосистем и возможность их биологической очистки в аэротенках. Изучены и обобщены существующие в России и за рубежом системы аэрации биологической очистки стоков целлюлозно-бумажной промышленности. Показаны современные тенденции развития аэрационных систем, критерии их выбора. Кроме того, обоснована актуальность вопроса интенсификации биологической очистки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий путем применения готовых газожидкостных смесей повышенной устойчивости, имеющих пузырьковую структуру. Разработана методика их получения на универсальной лабораторной установке. В исследуемой газожидкостной смеси сплошной фазой является вода, дисперсной – воздух. Рассматриваемые газожидкостные смеси получены путем непосредственной подачи атмосферного воздуха в воду через входной патрубок центробежного насоса. Проведено экспериментальное исследование гидродинамики двухфазного газожидкостного потока в зависимости от размера воздушных пузырьков. Приведенные результаты исследования показывают, что, устанавливая различные расходы жидкости и воздуха, можно получить газожидкостные смеси с пузырьками воздуха повышенной устойчивости размером от 1 до 8 мм и турбулентным режимом течения обеих фаз. Установлены экспоненциальные зависимости размеров воздушных пузырьков от расходов жидкости и воздуха, а также данные по гидродинамическому режиму газожидкостной смеси «воздух–вода». Многочисленные исследования и применение стандартизированных методов измерений, их анализ и обработка подтверждают достоверность полученных результатов. Данная установка по исследованию газожидкостного потока призвана устранить недостатки аналогов. Так, предлагаемая методика получения газожидкостных смесей повышенной устойчивости позволяет отказаться от дорогостоящего воздуходувного оборудования. Универсальность установки заключается в том, что она может быть применена для различных целей во многих отраслях промышленности, включая целлюлозно-бумажную. Планируется дальнейшее исследование газожидкостных смесей в лабораторных, а затем и в реальных условиях. Практическое применение газожидкостных смесей, имеющих пузырьковую структуру повышенной устойчивости, позволит повысить эффективность очистки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий за счет интенсификации биохимических процессов.

Ключевые слова: газожидкостные смеси, сточные воды, биологическая очистка, интенсификация, целлюлозно-бумажные предприятия.

Введение

В технологических процессах целлюлозно-бумажного производства образуются сточные воды, характеризующиеся сложным физико-химическим составом, высокой цветностью и неприятным специфическим запахом. Следовательно, спуск неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий неизбежно приводит к сильному загрязнению водных экосистем.

На всех отечественных и большинстве зарубежных целлюлозно-бумажных предприятиях для очистки сточных вод перед сбросом в водоем применяются биологические методы на сооружениях с аэротенками. Известно, что токсичность сточных вод сульфатцеллюлозных предприятий значительно снижается в присутствии хозяйственно-бытовых вод [6]. Сущность биологической очистки заключается в снижении, в первую очередь, биохимического потребления кислорода (БПК). Эффективность биологической очистки определяется в основном конструкцией аэротенка и его аэрационной системы. В работе [1] перечислены критерии оценки устойчивости функционирования сооружений биологической очистки. Система аэрации обеспечивает снабжение кислородом и перемешивание иловой смеси, тем самым поддерживая активный ил во взвешенном состоянии. От эффективности подачи в аэротенк и распределения в нем воздуха, перемешивания иловой смеси и других факторов зависят показатели качества очистки стоков (степень очистки по БПК, ХПК (химическое потребление кислорода) и т. д.) и энергетические показатели (расход энергии или воздуха на очистку 1 м³ сточной воды и др.) [2].

Эффективность очистки стоков в аэротенках можно повысить за счет интенсификации биохимических процессов, а именно: устранения существующих недостатков их работы, обеспечения минимальных энергозатрат на очистку и максимально возможной утилизации образующихся при очистке твердых отходов. Целью проводимого исследования является рассмотрение вопроса об актуальности применения готовых газожидкостных смесей повышенной устойчивости для интенсификации биологической очистки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий.

Методы исследования

Изучение и обобщение результатов научных исследований и анализ опыта эксплуатации сооружений биологической очистки привели к созданию усовершенствованных схем очистки стоков в аэротенках [2, 5]. Ведущими отечественными (например, ГНЦ РФ ОАО «НИИ ВОДГЕО», ОАО «НИИ КВОВ») и зарубежными научными организациями осуществляются инженерные разработки в области интенсификации работы сооружений биологической очистки сточных вод, в том числе по созданию эффективных систем аэрации [2]. Так, в проект РАН «Перспективный план фундаментальных исследований по приоритетным направлениям развития науки до 2025 г.» включены исследования характеристик и свойств газожидкостных смесей, построение моделей двухфазных течений.

По способу ввода кислорода и энергии для перемешивания жидкости выделяют следующие системы аэрации применительно к аэротенкам: пневматическую, механическую, пневмомеханическую (смешанную), гидравлическую, или струйную [2, 4, 8]. В последние годы повышенный научный и практический интерес вызывает гидравлическая система аэрации, принцип действия которой заключается в использовании энергии движущейся жидкости для создания развитой поверхности газожидкостного контакта [8]. Анализ многочисленных исследований показывает, что гидравлическая аэрация имеет ряд преимуществ при минимуме недостатков: высокая степень насыщения кислородом (2,1... 3,8 кВт·ч/кг O₂); равномерное перемешивание иловой смеси; возможность образования пузырьков различных размеров; высокая степень очистки (более 95 %); низкие энергозатраты и др.

Вопрос актуальности и возможности применения газожидкостных смесей для интенсификации очистки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий требует экспериментального подтверждения. Для изучения газожидкостных потоков в лаборатории Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (САФУ) была собрана универсальная установка (рис. 1) и оценена ее работа [3]. Цель лабораторного исследования – разработка методики получения газожидкостных смесей повышенной устойчивости, имеющих пузырьковую структуру.

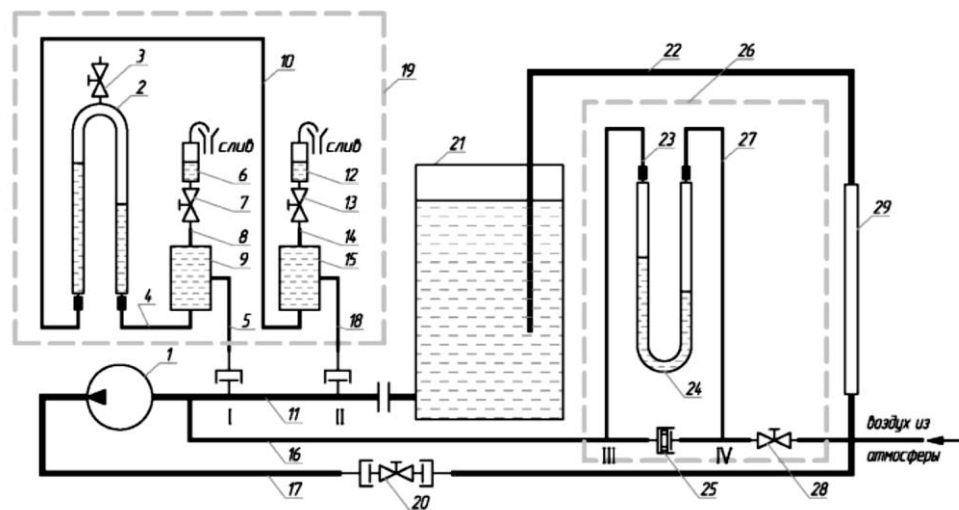


Рис. 1. Схема лабораторной установки для получения газожидкостной смеси: 1 – центробежный насос; 2, 24 – пьезометры; 3, 7, 13 – продувочные вентили; 4, 5, 8, 10, 14, 18 – шланги Ду6; 6, 12 – смотровые колонки; 9, 15 – газосборники; 11, 17, 22 – трубопроводы Ду30; 16 – трубопроводы Ду15; 19 – расходомер жидкости; 20 – клапан Ду30; 21 – бак (емкость 100 л); 23, 27 – трубопроводы Ду6; 25 – шайба дроссельная (Ду3, Ду6, Ду10); 26 – расходомер воздуха; 28 – клапан Ду10; 29 – прозрачный рабочий участок

Основными элементами лабораторной установки являются: центробежный насос 1, бак 21, участок визуализации 29 из стекла, расходомеры воздуха 26 и жидкости 19. В качестве газожидкостной смеси исследовали водовоздушную смесь. Лабораторный стенд работает по замкнутому циклу. Для разделения получаемой газожидкостной смеси в баке 21 был экспериментально подобран и установлен разделитель с двойным слоем сетки (на рис. 1 не показан), размер отверстия которого равен $1,5 \times 1,5$ мм. Полученные результаты измерений обработаны методом наименьших квадратов, построены градуировочные характеристики расходомеров воды и воздуха:

$$\Delta P_{\text{ж}} = f(G_{\text{ж}}); \Delta P_{\text{в}} = f(G_{\text{в}}).$$

Здесь $P_{\text{ж}}$ и $P_{\text{в}}$ – соответственно давление жидкости (вода) и воздуха;
 $G_{\text{ж}}$ и $G_{\text{в}}$ – соответственно расход воды и воздуха.

Особенностью стенда является то, что подача газа в жидкость осуществляется на всасывающую линию насоса непосредственно из атмосферы, что позволяет устранить недостатки существующих установок, у которых подача воздуха в жидкость осуществляется в напорный патрубок с помощью дополнительных устройств, что в свою очередь усложняет схему и обслуживание установок, увеличивает энергозатраты.

Результаты и их обсуждение

Способы создания газожидкостного потока описаны, как в отечественной, так и зарубежной литературе [7–11]. Известно, что гидродинамические характеристики пузырькового газожидкостного потока определяются в основном дисперсностью газовой фазы [7, 8]. Результаты многократных наблюдений показали, что при установке различных расходов жидкости $G_{\text{ж}}$ и воздуха $G_{\text{в}}$ можно получить газожидкостные смеси с различными размерами (1...8 мм), концентрацией и свойствами пузырьков воздуха. Построены графики экспоненциальной зависимости средних диаметров воздушных пузырьков от расхода жидкости и воздуха (рис. 2):

$$d_{\text{п}} = f(G_{\text{ж}}); d_{\text{п}} = f(G_{\text{в}}).$$

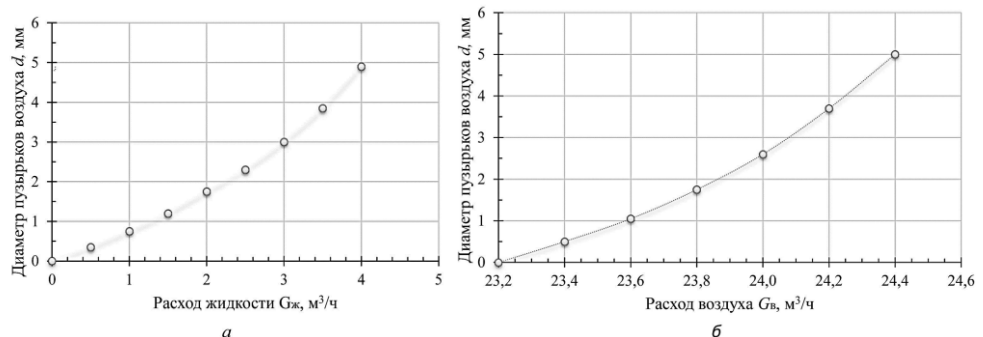


Рис. 2. Зависимость диаметра пузырьков от расхода жидкости (а) и воздуха (б)

Были подобраны различные гидродинамические режимы для обеих фаз. Выявлено, что преобладает турбулентный режим течения газожидкостного потока для обеих фаз [3].

Полученные результаты, исходя из анализа и опыта работы аэротенков, позволят в промышленных условиях повысить степень перемешивания и насыщения кислородом воздуха сточной жидкости. Достичь оптимальных условий для аэрирования сточной жидкости можно также путем регулирования подачи воздуха в воду, комбинируя мелко- и крупнопузырчатую аэрацию, что подтверждено исследованиями [3].

Выводы

1. Применение готовых газожидкостных смесей пузырьковой структуры повышенной устойчивости интенсифицирует биологическую очистку сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий.

2. Разработана методика получения газожидкостной смеси путем подачи воздуха в жидкость непосредственно из атмосферы через входной патрубок центробежного насоса.

3. Экспериментально получены характеристики газожидкостной смеси повышенной устойчивости, которые позволят регулировать размеры воздушных пузырей и гидродинамику двухфазного течения в зависимости от характера и степени загрязнения сточных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов В.И., Денисов А.А. Проектирование современных комплексов биологической очистки сточных вод// Экология и пром-сть России. 2009. № 2. С. 26–31.
2. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод: учеб. для вузов /Под ред. Ю.В. Воронова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во ассоциации строительных вузов, 2006. 704 с.
3. Долгобородова С.Н. Лабораторное исследование метода получения газожидкостных смесей повышенной устойчивости для интенсификации биологической очистки сточных вод// Фундамент. исслед. 2014. № 12. Ч. 7. 1389–1393 с.
4. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.
5. Колесников В.П., Вильсон Е.В. Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях/ Под ред. В.К. Гордеева-Гаврикова. Ростов-н/Д.: Юг, 2005. 212 с.
6. Косарева Е.Н. Снижение токсичности и остаточной загрязненности сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий при различных вариантах биологической очистки: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2007. 145 с.
7. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 296 с.
8. Попкович Г.С., Репин Б.Н. Системы аэрации сточных вод. М.: Стройиздат, 1986. 136 с.

9. Fujilawa S., Zhang R., Hayama S., Peng G. The control of micro-air-bubble generation by a rotational porous plate // International Journal of Multiphase Flow. 2003. Vol. 29. P. 1221–1236.

10. Tan R.B.H., Chen W.B., Tan K.H. A nonspherical model for bubble formation with liquid cross-flow// Chemical Engineering Science. 2000. Vol. 55. P. 6259–6267.

11. Sullivan S.L., Hardy B.W., Holland C.D. Formation of air bubbles at orifices submerged beneath liquids// American Institute of Chemical Engineers Journal. 1964. Vol. 10, N 6. P. 848–854.

Поступила 19.02.15

UDC 628.356

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.3.171

The Relevance of Application of Gas Liquid Mixtures for the Wastewater Treatment Intensification of the Pulp and Paper Mills

S.N. Dolgoborodova¹, Senior Lecturer

N.I. Bogdanovich², Doctor of Engineering Sciences, Professor

T.S. Mauricheva¹, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Captain Voronin str., 6, Severodvinsk, 164520, Arkhangelsk Region, Russian Federation;

e-mail: s.dolgoborodova@narfu.ru; t.mauricheva@narfu.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: n.bogdanovich@narfu.ru

The paper demonstrates the risk of sewage of the pulp and paper mills for the aquatic ecosystems and the possibility of their biological treatment in the aeration tanks. The existing aeration systems of the biological wastewater treatment of the pulp and paper industry of Russia and foreign countries are studied and summarized. We present the current trends of the aeration systems and the criteria for their selection. In addition, the urgency of intensification of biological wastewater treatment of the pulp and paper mills by using the high stability gas-liquid mixtures with a bubble structure is proved. A mixture technique is developed in a universal laboratory setting. The water is a continuous phase and the air is a dispersed one in the observable gas-liquid mixture. The gas-liquid mixtures under consideration are derived by the air direct feeding into the water through the inlet of a centrifugal pump. The experimental study of the hydrodynamics of two-phase gas-liquid flow depending on the size of the air bubbles is carried out. The research efforts show that the liquid-gas mixtures with the high stability air bubbles of the size from 1...8 mm and a turbulent flow regime of the two phases can be obtained by setting different fluid and air flow rates. The exponential dependences of the size of air bubbles on the fluid and air flow rates and the data of the hydrodynamic regime of the gas-liquid mixture “air – water” are established. Numerous researches and the use of the standardized methods of measurement, their analysis and processing confirm the accuracy of the results. This setting for the study of a gas-liquid flow is designed to remove defects of the analogues. Thus, the proposed technique of obtaining the high stability gas-liquid mixtures eliminates the costly air-blowing equipment. The set is multi-function as it can be applied for various purposes in many industries, including the pulp and paper one. We intend to study the gas-liquid mixtures in the laboratory

environment and in actual practice. The practical application of the gas-liquid mixtures with a high stability bubble structure will increase the efficiency of the wastewater treatment of the pulp and paper mills due to the intensification of the biochemical processes.

Keywords: gas liquid mixtures, wastewater, biological treatment, intensification, pulp and paper mill.

REFERENCES

1. Bazhenov V.I., Denisov A.A. Proektirovanie sovremennykh kompleksov biologicheskoy ochistki stochnykh vod [Designing of the Modern Systems of Biological Sewage Treatment]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2009, no. 2, pp. 26–31.
2. Voronov Yu.V., Yakovlev S.V. *Vodootvedenie i ochistka stochnykh vod* [Sewage and Waste Water Treatment]. Moscow, 2006. 704 p.
3. Dolgoborodova S.N. Laboratornoe issledovanie metoda polucheniya gazozhidkostnykh smesey povyshennoy ustoychivosti dlya intensivatsii biologicheskoy ochistki stochnykh vod [Laboratory Study of Producing Technique of High Stability Gas-Liquid Mixtures to Intensify the Biological Wastewater Treatment]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2014, no. 12, pp. 1389–1393.
4. Zhmur N.S. *Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniyakh s aerotenkami* [Technological and Biochemical Processes of Sewage Treatment in the Plants with the Aeration Tanks]. Moscow, 2003. 512 p.
5. Kolesnikov V.P., Vil'son E.V. *Sovremennoe razvitie tekhnologicheskikh protsessov ochistki stochnykh vod v kombinirovannykh sooruzheniyakh* [Modern Development of Technological Processes of Wastewater Treatment in the Combined Plants]. Ed. by V.K. Gordeev-Gavrikov. Rostov-on-Don, 2005. 212 p.
6. Kosareva E.N. *Snizhenie toksichnosti i ostatochnoy zagryaznennosti stochnykh vod tsellyulozno-bumazhnykh predpriyatii pri razlichnykh variantakh biologicheskoy ochistki*: dis. ... kand. tekhn. nauk [Reductions in the Toxicity and Residual Load of the Pulp and Paper Mills in Various Options of Biological Treatment: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Arkhangel'sk, 2007. 145 p.
7. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [The Hydrodynamics of the Gas-Liquid Systems]. Moscow, 1976. 296 p.
8. Popkovich G.S., Repin B.N. *Sistemy aeratsii stochnykh vod* [Wastewater Aeration Systems]. Moscow, 1986. 136 p.
9. Fujilawa S., Zhang R., Hayama S., Peng G. The control of Micro-Air-Bubble Generation by a Rotational Porous Plate. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, vol. 29, pp. 1221–1236.
10. Tan R.B.H., Chen W.B., Tan K.H. A Nonspherical Model for Bubble Formation with Liquid Cross-Flow. *Chemical Engineering Science*, 2000, vol. 55, pp. 6259–6267.
11. Sullivan S.L., Hardy B.W., Holland C.D. Formation of Air Bubbles at Orifices Submerged Beneath Liquids. *AIChE Journal*, 1964, vol. 10, no. 6, pp. 848–854.

Received on February 19, 2015