

А. К. СТРЕЛКОВ
О. С. ПОНОМАРЕНКО
П. П. АВДЕЕНКОВ
Е. Р. ЗОНТОВА
Е. Ю. ТУКТАШЕВА

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПИВОВАРЕННОГО ЗАВОДА

RESULTS OF STUDIES ON BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT OF A BREWERY

Для биологической очистки сточных вод пивоваренной промышленности применялся реактор периодического действия, который эксплуатировался в аэробных и анатоксидно-аэробных условиях. В результате длительных исследований были достигнуты следующие качественные характеристики очищенных сточных вод, мг/л: ХПК – 147, БПК_{полн} – 36, взвешенные вещества – 10. Соединения азота удалось снизить до, мг/л: N-NH₄ – 0,68, N-NO₃ – 15,3, N-NO₂ – 0,01. Удельная скорость окисления органических загрязнений при 20 °С в среднем составила, мг/(г·ч): по ХПК – 12,4, по БПК_{полн} – 9.

Ключевые слова: сточные воды, канализационные очистные сооружения, пивоваренная промышленность, биологическая очистка, реактор периодического действия

Введение. Сточные воды пищевой промышленности характеризуются высокими концентрациями органических загрязнений, которые включают компоненты перерабатываемого сырья и, как правило, не являются токсичными [1]. Для очистки данной категории сточных вод применяются сложные многоступенчатые схемы с использованием механических, химических, физико-химических, биологических и комбинированных методов. Результаты по физико-химической очистке сточных вод пивоваренной промышленности, представленные в [2], показали низкую эффективность по ХПК на уровне 34,08 %. Поэтому возникла необходимость рассмотрения биологических методов очистки.

Для биологической очистки высококонцентрированных сточных вод рекомендуется использовать анаэробные методы. Это связано с тем, что в анаэробных условиях микроорганизмы расходуют гораздо большее количество органических веществ, чем в аэробных, отсутствуют затраты на аэрацию, образуется меньше избыточного активного ила. При этом очистка в аэробных условиях

For the biological treatment of wastewater from the brewing industry, a batch reactor was used, which was operated under aerobic and anoxic-aerobic conditions. As a result of long-term studies, the following qualitative characteristics of treated wastewater were achieved, mg/l: COD – 147, BOD_{tot} – 36, suspended solids – 10. Nitrogen compounds were reduced to, mg/l: N-NH₄ – 0.68, N-NO₃ – 15.3, N-NO₂ – 0.01. The specific rate of oxidation of organic pollutants at 20 °C averaged, mg/(g·h): for COD – 12.4, for BOD_{tot} – 9.

Keywords: waste water, sewage treatment facilities, brewing industry, biological treatment, sequencing batch reactor

протекает более глубоко. Оптимальное сочетание анаэробных и аэробных процессов позволяет наиболее полно использовать преимущества каждого метода и исключить их недостатки, а тем самым увеличить эффективность и производительность процесса в целом [1, 3–5].

Аэробная биологическая очистка высококонцентрированных сточных вод может осуществляться в классических аэротенках, реакторах периодического действия, мембранных биореакторах [5]. В работе [6] было установлено, что процессы в аэротенке и реакторе периодического действия идентичны. Основным отличием является то, что аэротенк представляет собой полностью смешанный непрерывный процесс, а в реакторе периодического действия процесс также полностью смешанный, но имеет прерывистую подачу. Поэтому в своём исследовании мы использовали лабораторный реактор периодического действия для моделирования процессов биологической очистки в полномасштабных условиях. Конструктивная и эксплуатационная простота данной установ-

ки позволяет получить все необходимые данные для расчёта.

Реактор периодического действия перед аэротенком имеет ряд преимуществ и недостатков. К преимуществам относятся низкие капитальные и эксплуатационные затраты [7]. К недостатком – низкая производительность, нестабильная работа, плохая переносимость залповых сбросов, сложный подбор оптимального циклического режима для проведения нитрификации и денитрификации [8]. SBR технология для очистки сточных вод пивоваренной промышленности зарекомендовала себя как высокоэффективная [9]. Эффективность очистки по ХПК составляла 78–90 % в зависимости от схемы аэрации.

Цель данного исследования заключалась в подборе оптимальных режимов работы реактора периодического действия при очистке исходных сточных вод пивоваренного завода.

Методика эксперимента. Эксперимент был проведен на реальной сточной воде одного из предприятий производства пива. Сточную воду для исследований отбирали из канализационной насосной станции действующего завода. Отбор осуществлялся с интервалом приблизительно два-три дня в течение двух месяцев при значительных колебаниях концентрации загрязнений. ХПК исходных сточных вод изменялось от 3325 до 19100 мг/л, БПК_{полн} – от 2230 до 12800 мг/л. Содержание соединений азота, изменялось в пределах, мгN/л: аммоний – 0,3–78,95, нитраты – 0–45,48, нитриты – 0–0,4, фосфор – 3,02–125,81. Значение pH колебалось от 4,5 до 9. Соотношение БПК_{полн} и ХПК в исходных сточных водах составляло 0,67, что говорит о возможности протекания процессов биологической очистки.

Для исследования процессов биологической очистки сточных вод методом непрерывного культивирования использовался лабораторный реактор периодического действия (SBR) полезным объемом 5 л, изготовленный из стеклянной трубы внутренним диаметром 110 мм, толщиной стенки 6 мм. На дне реактора установлены два распылителя для исключения оседания активного ила и создания однородных условий при работе в аэробной фазе. Воздух расходом 300 л/ч подавался двумя аэраторами. Для аноксидной фазы использовалась мешалка длиной вала 500 мм и пропеллер диаметром 60 мм, изготовленные из нержавеющей стали. Частота вращения мешалки 300 об/мин исключала оседание ила. Отбор проб осуществлялся с помощью трёх пробоотборников, расположенных по длине корпуса установки. Полное опорожнение установки осуществлялось через отверстие, расположенное на дне реактора. Последовательное включение аэробного и аноксидного режимов осуществлялось вручную. Концентра-

ция растворенного кислорода и температура производились оксиметром Oxi 3310 фирмы WTW. Регулирование pH осуществлялось только на заливаемой сточной воде. В аэробных условиях для избегания анаэробных условий концентрация растворённого кислорода (КРК) поддерживалась на уровне 7–8 мгO₂/л. Перевод установки в аноксидную фазу считался при КРК менее 0,5 мгO₂/л.

Реактор периодического действия эксплуатировался по циклу: заполнение, аэробная/аноксидная фаза, седиментация, декантация. Аэробная фаза исследовалась для окисления органических веществ и осуществления процесса нитрификации. Аноксидная фаза изучалась для окисления органических веществ и осуществления процесса денитрификации. Продолжительность заполнения и декантации – не более 1 мин, отстаивания – 60 мин. Длительность анаэробной/аноксидной фаз определялась экспериментально, методом ежечасного отбора проб объёмом 100 мл.

Химические анализы были выполнены по стандартным методикам. Определение ХПК проводили на приборе Флюорат-02-05М, БПК определяли с помощью манометрической системы OxiTop IS12, pH и температуру – на портативном приборе ОНАУС ST 20, взвешенные вещества, дозу и зольность ила – с использованием мембранных фильтров (размер пор 0,22 мкм) на установке вакуумного фильтрования ПВФ-35(47). Минеральные формы азота, фосфаты определялись на спектрофотометре UNICO 2800, общий азот – на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ, органический азот получен по разности концентраций общего азота и его минеральных форм.

Экспериментальная часть. Работа реактора периодического действия начиналась с двухнедельного периода пуска наладочных работ. За это время активный ил с городских очистных сооружений Самары адаптировался к сточной воде пивоваренного завода. Для исключения дефицита биогенных элементов в сточную воду дозировался аммоний хлористый (2,62–131 мгN/л) и натрий фосфорнокислый однозамещенный двуводный (0,52–77,5 мгP/л). В ходе лабораторных исследований было установлено, что органического азота вполне достаточно для жизнедеятельности активного ила и даже требуется проведение процесса нитри-денитрификации.

На рис. 1 представлено детальное изменение органических веществ и соединений азота в аэробном (а), аноксидно-аэробном (б), двойном чередовании аноксидных и аэробных режимов (в).

Исследования начинались с 23-часового аэробного режима (рис. 1, а). После загрузки

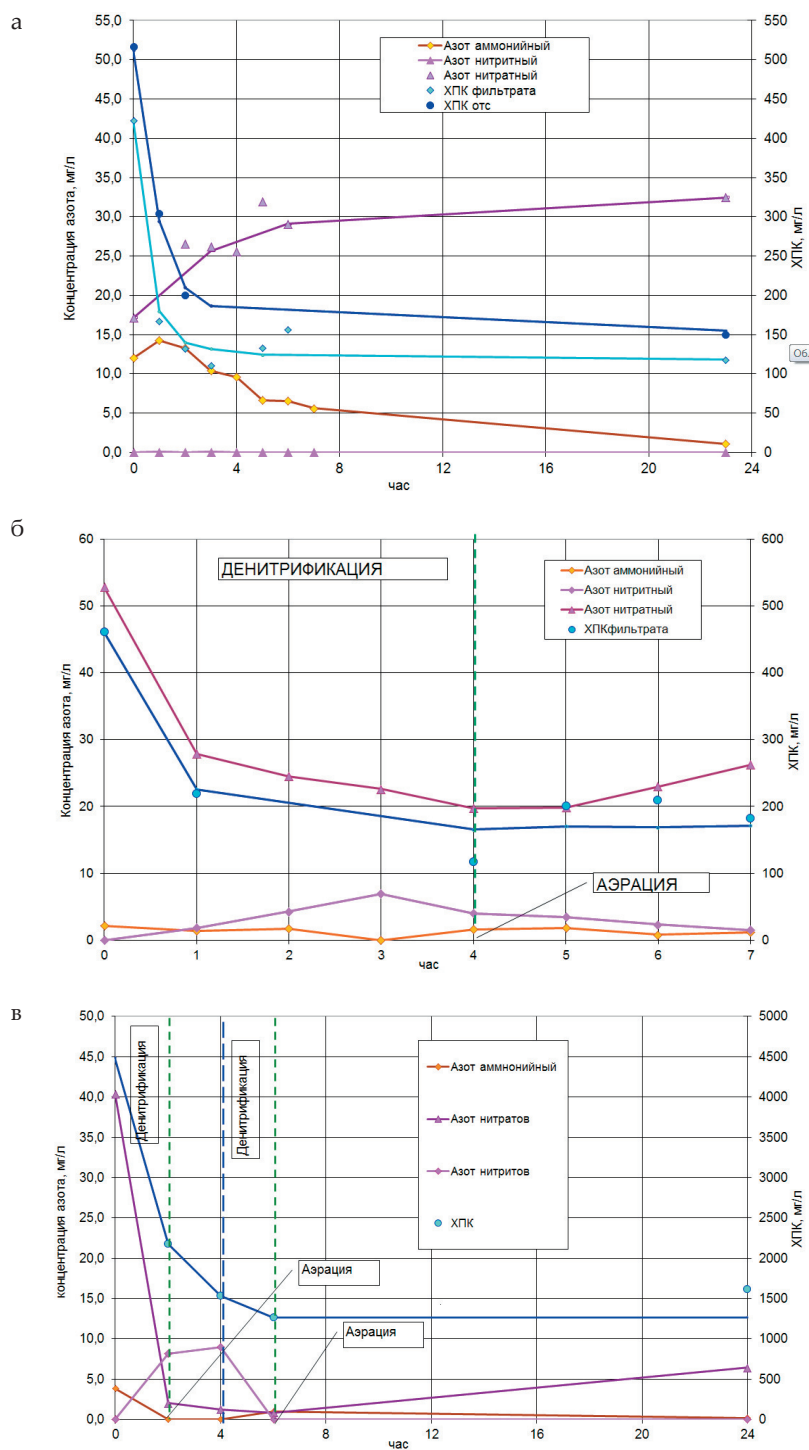


Рис. 1. Результаты работы реактора периодического действия в аэробной (а), аноксидно-аэробной (б), двойное чередование аноксидной и аэробной (в) фаз на сточной воде

0,4 л сточной воды внутри реактора установились следующие концентрации загрязнений, мг/л: ХПК – 516,80, N-NH_4 – 12, N-NO_2 – 0, N-NO_3 – 17,15, P-PO_4 – 38,30. Значение pH сточной воды внутри реактора составляло 6,71, тем-

пература – 22,4 °С. Реактор работал при дозе ила 4,71 г/л, нагрузке по ХПК 0,07 г/г/сут. По результатам первых двух часов работы установлено, что ХПК снижалось на 63,30 %, большая часть из которого снималась в первые 30 мин

в результате сорбции активным илом. Зольность активного ила перед загрузкой составляла 27,18 %. Цикл работы реактора завершился со следующими показателями, мг/л: ХПК (после отстаивания) – 150, N-NH₄ – 1,11, N-NO₂ – 0,04, N-NO₃ – 32,41, P-PO₄ – 37,36.

Эффективность снижения в этом эксперименте по ХПК и азоту аммонийному составляла, %: 70,98 и 90,97 соответственно.

Увеличение концентрации азота нитратов с 17,15 до 32,41 мг/л потребовало проведения процесса денитрификации.

Для удаления азота нитратов в реакторе создавались **аноксидные** (бескислородные) условия (рис. 1, б). После фазы заполнения сразу включалась фаза перемешивания. Концентрация загрязнений в реакторе составляла, мг/л: ХПК – 460,40, N-NH₄ – 2,18, N-NO₂ – 0,03, N-NO₃ – 52,77, P-PO₄ – 12,84. Значение pH сточной воды внутри реактора находилось от 7,28 до 7,70. Температура внутри реактора составляла 23,5 °С. Реактор работал при дозе ила 5,02 г/л, нагрузке по ХПК – 0,05 г/г/сут.

За первый час аноксидного режима ХПК сточной воды внутри реактора снижалось на 52,43 %. Большая доля снижения концентрации органического вещества за сравнительно короткое время объясняется как деятельностью микроорганизмов, так и сорбцией активного ила. Азот нитратный – уменьшился до 27,9 мг/л. Отметим, что зольность активного ила в первоначальный момент была 20 %. Аноксидный режим закончился за 4 часа с результатами, мг/л: ХПК – 117, N-NH₄ – 1,62, N-NO₂ – 3,99, N-NO₃ – 19,69. За 4 часа аноксидного режима ХПК снизилось на 343,28 мг/л, азот нитратный – на 33,01 мг/л. Дальнейшая денитрификация была невозможна из-за недостаточного количества органических веществ. Далее установ-

ка была переведена в аэробный режим. Цикл работы реактора завершился со следующими показателями, мг/л: ХПК (после отстаивания) – 161,90, N-NH₄ – 1,19, N-NO₂ – 1,47, N-NO₃ – 26,20.

Достаточно высокий уровень азота нитратов потребовал рассмотреть возможность проведения более глубокой денитрификации в две аноксидные фазы.

Во время **двойного аноксидного** режима (рис. 1, в) концентрация загрязнений в реакторе составляла, мг/л: ХПК – 4477, N-NH₄ – 3,81, N-NO₂ – 0,04, N-NO₃ – 40,41, P-PO₄ – 4,68. Температура сточной воды внутри реактора изменялась от 24,0 до 24,5 °С, pH – 8,1. Реактор работал при дозе ила 5,58 г/л, нагрузке по ХПК – 0,15 г/г/сут.

За первую двухчасовую денитрификацию ХПК снизилось до 2175,5 мг/л, N-NH₄ – до 0 мг/л, N-NO₂ – до 8,16 мг/л, N-NO₃ – до 2 мг/л. За первую денитрификацию ХПК было снижено на 2302 мг/л, азот нитратный – на 38,41 мг/л. Имело место увеличение нитритов с 0,04 до 8,16 мг/л.

Реактор был переведен в двухчасовой аэробный режим, который закончился с концентрациями, мг/л: ХПК – 1535, N-NH₄ – 0, N-NO₂ – 9, N-NO₃ – 1,2.

Второй аноксидный режим длился два часа и был завершён с концентрациями, мг/л: ХПК – 1265, N-NH₄ – 0,94, N-NO₂ – 0,035, N-NO₃ – 0,85. Имело место значительное снижение нитритов с 9 до 0,035 мг/л. Нитраты остались практически без изменений. Значение ХПК снизилось на 270 мг/л.

Последующая аэрация в течение 18 часов привела к снижению ХПК до 1265 мг/л, азота аммонийного и нитритного – до 0,13 и 0,005 мг/л соответственно. Азот нитратный увеличился до 6,41 мг/л.

Результаты работы установки в течение двух месяцев представлены в таблице.

Результаты работы установки

Показатель, мин.-макс.(средн.)	Исходная сточная вода
pH	4,5-8,6 (6,8)
Доза ила, г/л	3,67-5,9 (4,5)
Иловый индекс, мл/г	60-145 (68)
Зольность ила, %	21,9-27,2(24,0)
ХПК исходной, мг/л	3325-19100 (6241)
ХПК очищенной воды, мг/л	147-2900 (1250)
БПК _{полн} исходной воды, мг/л	2227-12797 (4200)
БПК _{полн} очищенной воды, мг/л	36,0-919 (389)
Взвешенные вещества в исходной воде, мг/л	560-920(780)
Взвешенные вещества в очищенной воде, мг/л	10-45 (30)
Нагрузка по ХПК, г/(г·сут)	0,15-1,62 (0,47)
Окислительная мощность по ХПК, г/(м ³ ·сут)	539-8885 (1635)

Окончание таблицы

Показатель, мин.-макс.(средн.)	Исходная сточная вода
Уд. скорость окисления по ХПК при 20 °С, мг/(г·ч)	4,6-27,1 (11,7)
Окислит. мощность по БПК, г/(м³·сут)	435-6262 (1239)
Уд. скорость окисления по БПК при 20 °С, мг/(г·ч)	3,1-21,1 (8,5)
Азот аммонийный в исходной воде, мгN/л	0,35-79 (17,7)
Азот аммонийный в очищенной воде, мгN/л	1,5-43,2 (10,2)
Азот нитратный в исходной воде, мгN/л	0,07-6,1 (2,4)
Азот нитратный в очищенной воде, мгN/л	2,38-99,45 (21,1)
Азот нитритный в исходной воде, мгN/л	0-0,395 (0,16)
Азот нитритный в очищенной воде, мгN/л	0,15-36,0 (12)

Выводы. 1. Соотношение БПК_{полн} и ХПК в исходных сточных водах составляло 0,67, что говорит о возможности протекания процессов биологической очистки.

2. Биологическая очистка сточных вод пивоваренных заводов позволила достичь следующих показателей, мг/л: ХПК – 147, БПК_{полн} – 36, взвешенные вещества – 10; N-NH₄ – 0,68, N-NO₂ – 0,01, N-NO₃ – 15,3.

3. Эффективность работы установки по ХПК достигает 79,97 %, БПК_{полн} – 90,74 %.

4. В режиме нитри-денитрификации концентрации N-NH₄, N-NO₂ достигали 0,68 и 0,01 мг/л. При этом добиться снижения N-NO₃ ниже 15,3 мг/л не удалось.

5. В связи с накоплением продуктов метаболизма и сложностью проведения денитрификации в реакторе периодического действия дальнейшие исследования планируются на проточной установке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения / С. В. Яковлев, И. В. Скирдов, В. Н. Швецов и др.; под ред. С. В. Яковлева. М.: Стройиздат, 1985. 208 с.

2. Тукташева Е.Ю. Исследование эффективности предварительной реагентной обработки сточных вод пивоваренных заводов // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 3. С. 56–61. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.09.

3. Chan Y.J. et al. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater // Chemical Engineering Journal. 2009. Vol. 155, № 1–2. P. 1–18.

4. Heijnen J.J. et al. Large Scale Anaerobic-Aerobic Treatment of Complex Industrial Waste Water Using Biofilm Reactors // Water Science and Technology. 1991. Vol. 23, № 7–9. P. 1427–1436.

5. Wang S.-G. et al. Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor // Bioresource Technology. 2007. Vol. 98, № 11. P. 2142–2147.

6. Sánchez J.B., Vuono M., Dionisi D. Model-based comparison of sequencing batch reactors and continuous-flow activated sludge processes for

biological wastewater treatment // Computers & Chemical Engineering. 2021. Vol. 144. P. 107127.

7. Kundu P., Debsarkar A., Mukherjee S. Treatment of Slaughter House Wastewater in a Sequencing Batch Reactor: Performance Evaluation and Biodegradation Kinetics // BioMed Research International. 2013. Vol. 2013. P. 1–11.

8. Прикладная экобиотехнология: в 2 т. Т. 1 / А. Е. Кузнецов, Н. Б. Градова, С. В. Лушников [и др.]. 4-е изд., электрон. М.: Лаборатория знаний, 2020. 672 с.

9. Bakare B.F., Shabangu K., Chetty M. Brewery wastewater treatment using laboratory scale aerobic sequencing batch reactor // South African Journal of Chemical Engineering. 2017. Vol. 24. P. 128–134.

REFERENCES

1. Yakovlev S. V., Skirdov I. V., Shvetsov V.N. and others. *Biologicheskaya ochistka proizvodstvennyh stochnyh vod: Processy, apparaty i sooruzheniya* [Biological treatment of industrial wastewater: Processes, apparatuses and structures]. М., Stroyizdat, 1985. 208 p.

2. Tuktasheva E.Yu. study of efficiency of pre-reagent treatment of waste water from brewery. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol.11, no 3, pp. 56–61. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.09

3. Chan Y.J. et al. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 2009, vol. 155, no. 1–2, pp. 1–18.

4. Heijnen J.J. et al. Large Scale Anaerobic-Aerobic Treatment of Complex Industrial Waste Water Using Biofilm Reactors. *Water Science and Technology*, 1991, vol. 23, no. 7–9, pp. 1427–1436.

5. Wang S.-G. et al. Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor. *Bioresource Technology*, 2007, vol. 98, no 11, pp. 2142–2147.

6. Sánchez J.B., Vuono M., Dionisi D. Model-based comparison of sequencing batch reactors and continuous-flow activated sludge processes for biological wastewater treatment. *Computers & Chemical Engineering*, 2021, vol. 144, article number 107127.

7. Kundu P., Debsarkar A., Mukherjee S. Treatment of Slaughter House Wastewater in a Sequencing

Batch Reactor: Performance Evaluation and Biodegradation Kinetics. BioMed Research International, 2013, pp. 1–11.

8. Prikladnaya ekobiotehnologiya : uchebnoe posobie : v 2 t. T. 1 [Applied ecobiotechnology: textbook: in 2 volumes. V. 1] / A. E. Kuznetsov, N. B. Gradova,

S. V. Lushnikov [and others]. 4th ed. M., Laboratory of Knowledge, 2020. 672 p.

9. Bakare B.F., Shabangu K., Chetty M. Brewery wastewater treatment using laboratory scale aerobic sequencing batch reactor. South African Journal of Chemical Engineering, 2017, vol. 24, pp. 128–134.

Об авторах:

СТРЕЛКОВ Александр Кузьмич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: a19400209@yandex.ru

STRELKOV Alexander K.

Doctor of Engineering Science, Head of the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: a19400209@yandex.ru

ПОНОМАРЕНКО Ольга Сергеевна

кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: olga_solkina@mail.ru

PONOMARENKO Olga S.

PhD in Engineering Science, Associate Professor the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: olga_solkina@mail.ru

АВДЕЕНКОВ Павел Павлович

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: avdeenkovpp@mail.ru

AVDEENKOV Pavel P.

Postgraduate Student of the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: avdeenkovpp@mail.ru

ЗОНТОВА Екатерина Романовна

магистрант кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: zontova.cat@yandex.ru

ZONTOVA Ekaterina R.

Master's Degree Student of the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: zontova.cat@yandex.ru

ТУКТАШЕВА Екатерина Юрьевна

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 директор ООО «Объединенные Системы Водоочистки» 443030, Россия, г. Самара, ул. Урицкого, 10, тел. (846)205-99-55 E-mail: osv_samara@mail.ru

TUKTASHEVA Ekaterina Yu.

Postgraduate Student of the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 Director LLC «Ob"edinennye Sistemy Vodoochistki» 443030, Russia, Samara, Uritskogo, 10, tel. (846)205-99-55 E-mail: osv_samara@mail.ru

Для цитирования: Стрелков А.К., Пономаренко О.С., Авдеенков П.П., Зонтова Е.Р., Тукташева Е.Ю. Результаты исследований биологической очистки сточных вод пивоваренного завода // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 3. С. 34–39. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.5.

For citation: Strelkov A.K., Ponomarenko O.S., Avdeenkov P.P., Zontova E.R., Tuktasheva E.Yu. Results of Studies of Biological Wastewater Treatment of a Brewery. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 3, pp. 34–39. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.5.