



Влияние технологических факторов на каталазную активность ила, формирующегося на промстоках химических предприятий

Ф.Ю. Ахмадуллина, Р.К. Закиров, Е.С. Балымова✉

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казань, Российская Федерация

Аннотация. Специфика процессов продленной аэрации промышленных стоков диктует целесообразность изыскания и внедрения в практику более чувствительных и экспрессных показателей, достоверно описывающих состояние активного ила в процессе биологической очистки, что необходимо для обеспечения эффективного контроля и управления процессом водоочистки. Возможное перспективное решение проблемы – использование ферментативной активности ила, что требует экспериментального подтверждения. В работе приведены результаты исследования влияния ряда технологических факторов, включая возраст активного ила, условия его регенерирования на каталазную активность. Выбор каталаза в качестве объекта исследования был обусловлен низкой активностью дегидрогеназ в процессах продленной аэрации и их инактивацией при наличии токсичных загрязнителей в сточных водах, что затрудняет достоверную оценку изменения их активности в динамике, особенно для зрелых илов. Что касается каталаза, относящихся к основным компонентам защитной клеточной системы, участвующих в нейтрализации избыточной перекиси водорода, образующейся при стрессировании активного ила при воздействии негативных экофакторов и изменении условий функционирования биостанции, следовало ожидать их более высокой чувствительности, что получило экспериментальное подтверждение. В результате проведенных исследований установлено снижение активности каталаза при увеличении возраста ила. Анализ каталазной активности показал, что активность проб нерегенерированных илов была ниже по сравнению с соответствующими пробами активного ила, прошедшего регенерацию, независимо от аппаратного оформления узла регенерации, но при этом для илов, формирующихся в системах с отдельно стоящими регенераторами, характерно более глубокое изменение активности каталаза.

Ключевые слова: каталаза, дегидрогеназа, активный ил, биологическая очистка, технологические факторы

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Казанского национального исследовательского технологического университета. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Для цитирования: Ахмадуллина Ф.Ю., Закиров Р.К., Балымова Е.С. Влияние технологических факторов на каталазную активность ила, формирующегося на промстоках химических предприятий // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2026. Т. 16. N 2. С. 251–258. DOI: 10.21285/achb.1042. EDN: FBVXKV.

Influence of technological factors on the catalase activity of activated sludge formed during treatment of industrial effluents from chemical plants

Farida Yu. Akhmadullina, Rustem K. Zakirov, Elena S. Balymova✉

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

Abstract. Reliable assessment of activated sludge condition during extended aeration treatment of industrial wastewater requires indicators that respond rapidly and sensitively to changes in biological performance. Enzymatic activity is a promising option; however, its applicability must be validated experimentally. This study examines the effects of several technological factors, including sludge age and regeneration conditions, on catalase activity. Catalases were selected as the target enzymes, as dehydrogenases exhibit low activity under extended aeration and are readily inactivated by toxic contaminants. These properties prevent consistent dynamic measurements in mature sludge. By contrast, catalases are key components of the cellular defense system that detoxify excess hydrogen peroxide generated when activated sludge is stressed by adverse environmental factors or variations in bioreactor operation. Their higher expected sensitivity was confirmed experimentally. The results show that catalase activity decreases as sludge age increases. Comparative analysis demonstrated that non-regenerated sludge samples consistently exhibited lower catalase activity than corresponding regenerated samples, regardless of the configuration of the regeneration unit. Sludge formed in systems with separate regeneration tanks showed a more pronounced reduction in catalase activity.

Keywords: catalase, dehydrogenase, activated sludge, biological treatment, technological factors

Funding. The work was supported by the budget of the Kazan National Research Technological University. No additional grants were received for the conduct or supervision of this study.

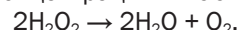
For citation: Akhmadullina F.Yu., Zakirov R.K., Balymova E.S. Influence of technological factors on the catalase activity of activated sludge formed during treatment of industrial effluents from chemical plants. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2026;16(2):251-258. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1042. EDN: FBVXKV.

ВВЕДЕНИЕ

К характерной особенности функционирования химических и нефтехимических предприятий относится образование сточных вод сложного состава, содержащих биорезистентные и токсичные поллютанты, что предопределяет реализацию в практике низконагружаемых биопроцессов водоочистки [1–3]. Для последних свойственно использование зрелых илов, или илов большого возраста, не обеспечивающих высокую окислительную мощность биоокислителей из-за их низкой дегидрогеназной активности [4–6].

Для дегидрогеназ, обладающих высокой чувствительностью, характерна резкая инактивация даже при незначительном повышении токсичности очищаемых сточных вод [7]. Что касается каталаз, то информация в этой области для илов процесса продленной аэрации практически отсутствует. Следует отметить, что все микроорганизмы содержат каталазу или пероксидазу или тот и другой фермент одновременно. Их присутствие в клетке микроорганизмов объясняется универсальностью протекания в них процессов образования, присутствия и накопления в них перекиси водорода как промежуточного продукта трансформации органических загрязнителей. В то же время каталаза и пероксидаза относятся к одним из основных компонентов защитной клеточной системы,

являясь мощными антиоксидантами. Их роль – нейтрализация образующейся в клетке микроорганизмов перекиси водорода, обладающей высокой токсичностью (минимальная концентрация – 100 мкМ) [8–10]:



В связи с этим следует ожидать, что воздействие негативных экофакторов на ценоз смешанной популяции микроорганизмов, осуществляющих очистку, а также изменение условий функционирования биостанции обусловит их стрессирование и, как следствие, окажет влияние на активность каталаз.

Целью настоящего исследования являлась оценка степени влияния основных технологических факторов, включая возраст ила, условия регенерации ила на активность каталаз.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования стали иловые суспензии действующих очистных сооружений производств органического синтеза, отбор которых осуществляли из разных очередей биостанции, отличающихся условиями функционирования. Согласно поставленной цели, пробы ила отбирали на входе и в конце зоны регенерации (III очередь действующих очистных сооружений) или отдельно стоящего регенератора (I очередь).

Возраст ила определяли по экспериментально установленному приросту ила в модельных опытах [11], проведенных в условиях, максимально приближенных к производственным [12].

Каталазную активность изучаемых проб ила оценивали титриметрическим методом по количеству перекиси водорода, разложенной каталазой за определенное время. О количестве расщепленной перекиси водорода судят по разности объемов KMnO_4 , израсходованных на титрование иловой суспензии до и после действия фермента [13].

Активность дегидрогеназ определяли спектрофотометрическим методом по восстановлению бесцветной окисленной формы трифенилтетразолия хлористого под действием дегидрогеназ в биологических системах в трифенилформазан – соединение красного цвета, не растворимое в воде, но растворимое в этаноле [14].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Необходимость и целесообразность изучения влияния ряда экофакторов на биохимическую активность илов процессов продленной аэрации сточных вод обусловлены изысканием альтернативного достоверного критерия оценки состояния биоагента, участвующего в процессе биологической очистки сточных вод, что позволит управлять процессом водоочистки. Низкие величины дегидрогеназной активности, характерные для зрелых илов, формирующихся на стоках химических предприятий, согласно литературным данным [4], очевидно, обусловленных токсичностью и биорезистентностью последних, не позволяют достоверно оценить состояние активной биомассы и ее изменение под воздействием различных технологических стрессоров (табл. 1).

Таблица 1. Влияние возраста ила на его дегидрогеназную активность

Table 1. Effect of sludge age on its dehydrogenase activity

Возраст ила, сут.	Дегидрогеназная активность ила, мг/г	
	надильная жидкость (в клетке)	сточная вода
50	0,37±0,02 0,55±0,03	0,60±0,03 0,74±0,04
46-49	1,86±0,09	2,01±0,10
44-46	0,39±0,02 0,86±0,04	0,52±0,03 1,09±0,05
40-41	1,06±0,05 1,32±0,07 1,42±0,07 1,76±0,09	1,35±0,07 1,43±0,07 1,60±0,08 2,14±0,11
38	1,56±0,08	1,61±0,08
25-30	1,92±1,00 2,48±0,12 2,30±0,12 1,17±0,06 2,38±0,12	2,25±0,11 2,63±0,13 3,02±0,15 2,38±0,12 3,37±0,17
20-30	1,75±0,09 2,10±0,11	1,89±0,09 2,62±0,13
9	2,12±0,11	2,07±0,10
4	2,88±0,14	3,94±0,20

Как видно из данных таблицы, активный ил процесса продленной аэрации сточных вод производств органического синтеза характеризуется низкой дегидрогеназной активностью, изменяющейся в пределах 1,06–3,18 мг/г. При этом наблюдается тенденция: чем больше возраст ила, тем меньше его дегидрогеназная активность из-за роста мертвых клеток и аккумуляции биоинертных частиц в «стареющих» хлопьях ила. Следствием снижения численности активных живых клеток является снижение ферментативной активности, так как мертвые клетки способны чистить воду своими энзимами, но хуже и непродолжительно. Кроме того, необходимо учитывать возможность ухудшения режима массообмена клеток с окружающей средой при увеличении размера хлопьев ила, что характерно для зрелых илов, в результате ухудшения условий доступа кислорода к бактериальным клеткам и затруднения отведения метаболитов, что приводит к снижению окислительной способности активной биомассы [15].

При смешении ила со сточной водой его дегидрогеназная активность возрастает неоднозначно. В одних случаях наблюдается почти двукратное увеличение активности дегидрогеназ, в других – рост дегидрогеназной активности незначителен, что, очевидно, обусловлено непостоянством состава сточных вод контрольных очистных сооружений, характеризующихся лимитированием по субстрату и реальным содержанием токсикантов, способствующих инактивации дегидрогеназ. Как видно из вышеизложенного, последние неперспективны для их использования в качестве эффективного показателя, оценивающего состояние биоагента, осуществляющего процесс водоочистки.

Что касается каталазной активности илов процессов продленной аэрации промстоков, формирующихся в условиях стрессирования, следует ожидать более высокую активность каталаз, что получило экспериментальное подтверждение ранее [16]. Однако при определении возможности использования данного показателя для оценки состояния биоагента в процессе биологической очистки сточных вод необходимо знание его чувствительности к воздействию различных экофакторов, включая технологические, что и являлась целью настоящих исследований.

Как известно, илы большого возраста способны нивелировать залповые сбросы токсикантов за счет лучшей защищенности клеток активной биомассы экзополимерным гелем [17] и, как следствие, в меньшей степени должны быть подвержены стрессированию. Для подтверждения этого предположения были определены и сопоставлены значения каталазной активности различающихся по возрасту илов действующих очистных сооружений с учетом различных условий их формирования. Данные, приведенные в табл. 2, относятся к пробам регенерированных илов.

Анализ данных таблицы однозначно подтвердил весомое влияние возраста ила на его каталазную активность и аналогичную закономерность его изменения, установленную ранее для дегидрогеназной активности, что более наглядно демонстрирует графический материал, представленный на рис. 1.

Таблица 2. Влияние возраста ила на его каталазную активность

Table 2. Effect of sludge age on its catalase activity

Возраст ила, сут.	Каталазная активность, мг H_2O_2 / г $\times$ мин
8–10	45,2 $\pm$ 2,2
	42,6 $\pm$ 2,1
	47,4 $\pm$ 2,4
21–28	39,2 $\pm$ 1,9
	32,8 $\pm$ 1,6
	39,7 $\pm$ 1,4
30–32	32,7 $\pm$ 1,6
	43,3 $\pm$ 2,2
	40,8 $\pm$ 2,0
	45,8 $\pm$ 2,3
32–34	36,5 $\pm$ 1,8
	35,9 $\pm$ 1,8
	34,0 $\pm$ 1,7
	35,7 $\pm$ 1,8
	40,6 $\pm$ 2,0
36–38	29,0 $\pm$ 1,5
	30,2 $\pm$ 1,5
	29,4 $\pm$ 1,5
	30,2 $\pm$ 1,5
40–42	20,9 $\pm$ 1,0
	20,1 $\pm$ 1,0
	22,4 $\pm$ 1,1
	25,7 $\pm$ 1,3
43–46	19,6 $\pm$ 1,0
	16,3 $\pm$ 0,8
	17,4 $\pm$ 0,9

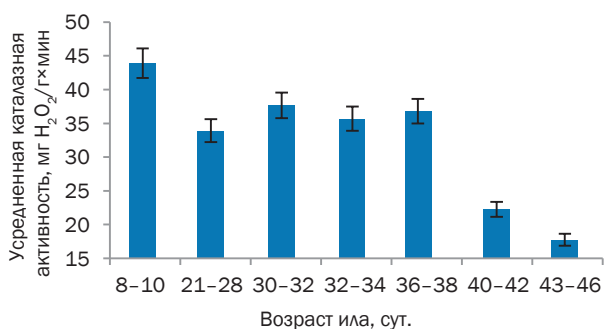


Рис. 1. Влияние возраста ила на каталазную активность илов очистных сооружений производств органического синтеза (усредненные данные)

Fig. 1. Effect of sludge age on the catalase activity of sludge from treatment facilities of organic synthesis industries (average data)

Полученные результаты можно объяснить совокупным действием взаимоисключающих факторов: эффектом старваии илов процесса продленной аэрации [18], ухудшением процесса массообмена в укрупненных хлопках зрелого ила [19], с одной стороны, и снижением численности активных живых клеток в биомассе, а также

наличием большей концентрации экзополимерной субстанции в илах большого возраста [20] – с другой.

В процессах продленной аэрации сточных вод формируются низконагружаемые илы, с увеличением возраста которых интенсивность неблагоприятного воздействия фактора старваии будет повышаться, что должно сопровождаться ростом каталазной активности смешанной популяции микроорганизмов в качестве ответа на более глубокое оксидативное стрессирование последней [21]. Ухудшение условий массообмена в укрупненных скоплениях ила при его «старении» также должно приводить к аналогичному эффекту. Наблюдаемая обратная картина (см. рис. 1), очевидно, обусловлена проявлением преобладающего влияния двух первых факторов: ростом мертвых клеток активной биомассы зрелого возраста, не способных к синтезу ферментов, и субстратной функцией экзополимерной субстанции, обеспечивающей снижение негативного влияния фактора «голодания» зрелых илов.

На контрольных очистных сооружениях условия регенерации активного ила различаются на I и III очередях биостанции (рис. 2).

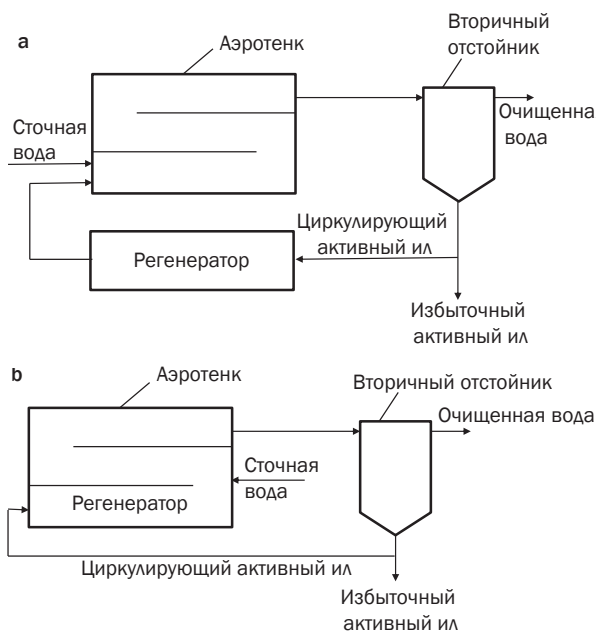


Рис. 2. Схемы узла биологической очистки: а – I очередь; б – III очередь

Fig. 2. Schemes of the biological treatment unit: а – I line; б – III line

Обобщение результатов экспериментальных исследований позволило оценить влияние процесса регенерации на каталазную активность илов процесса продленной аэрации (табл. 3). При этом отбор пробы иловой суспензии осуществляли на входе в регенератор или зону регенерации и в начале зоны аэрации до смешения ила со сточной водой.

Согласно полученным данным, во всех экспериментах каталазная активность проб нерегенерированных илов была ниже по сравнению с соответствующими пробами активного ила, прошедшего регенерацию, независимо от аппаратного оформления узла регенерации, но

Таблица 3. Каталазная активность регенерированных и нерегенерированных илов

Table 3. Catalase activity of regenerated and non-regenerated sludges

Очередь	Возраст ила, сут.	Каталазная активность, мг H ₂ O ₂ / г×мин	
		регенерированный ил	нерегенерированный ил
I	30–32	43,25±2,16	25,73±1,29
		36,49±1,82	22,80±1,14
		35,98±1,79	22,36±1,12
		34,04±1,70	27,20±1,36
		35,72±1,79	25,73±1,29
		40,61±2,03	–
III	36–38	38,60±1,93	31,21±1,56
		36,96±1,85	33,01±1,65
		34,94±1,75	32,50±1,63

при этом для илов, формирующихся в биоокислителях I очереди биостанции, характерно более глубокое изменение активности каталаз (рис. 3).

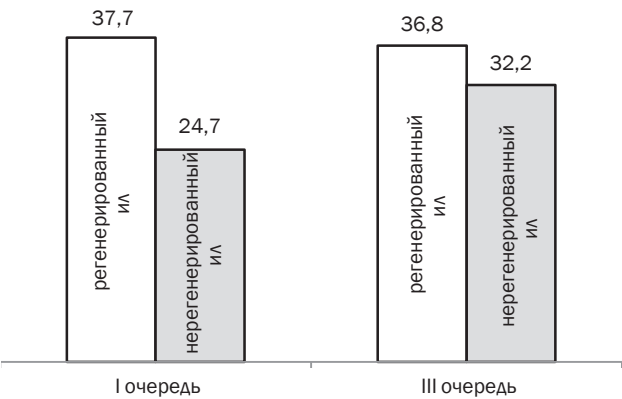


Рис. 3. Влияние аппаратного оформления узла биологической очистки на каталазную активность, мг H₂O₂ / г×мин: I очередь (отдельно стоящий регенератор); III очередь (совмещенный аэротенк с регенератором)

Fig. 3. Effect of the hardware design of the biological treatment unit on the catalase activity, mg H₂O₂ / g×min: I line (a separate regenerator); III line (combined aeration tank with a regenerator)

Очевидно, данный факт связан с процессами, протекающими в узле регенерации, более выраженными в отдельно стоящем регенераторе, и в первую очередь с увеличением числа активно функционирующих бактерий. Однако ввиду более высокой концентрации активного ила в регенераторе (зона регенерации) по сравнению с аэротенком, а также отсутствия подачи сточных вод при интенсивной аэрации иловой суспензии к концу процесса регенерации из-за воздействия фактора «голодания» возрастает стрессирование биоагента процесса продленной аэрации сточных вод и, как следствие, наблюдается рост каталазной активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали возможность использования для оценки состояния активного ила в процессе биологической очистки сточных вод каталазной активности смешанной популяции микроорганизмов, отличающейся высокой чувствительностью к воздействию различных экофакторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнов Ю.Д., Матвеева В.А., Яковлев Н.М., Сахабуддинова Э.Р. Анализ и оценка современных технологий очистки сточных вод на гальваническом производстве // Горный журнал. 2023. N 9. С. 55–60. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.08. EDN: CWB NRA.
2. Вертинский А.П. Физико-химические методы очистки сточных вод: проблемы, современное состояние и возможные пути совершенствования // Инновации и инвестиции. 2019. N 11. С. 257–261. EDN: UYXBRJ.
3. Wang H., Dai B., Gao F., Cao X., Ji X., Zuo L., et al. Petrochemical wastewater treatment in a full-scale biological aerated filter system: Insight into the mechanism of performance deterioration // Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 488. P. 151089. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151089.
4. Поруцкий Г.В. Биохимическая очистка сточных вод органических производств. М.: Химия, 1975. 253 с.
5. Pourakbar M., Behnami A., Mahdavianpour M., Dariyan F.S., Aghayani E. Developing a method for measurement of dehydrogenase activity in biological wastewater treatment processes applied for toxic compounds degradation // MethodsX. 2020. Vol. 7. P. 100970. DOI: 10.1016/j.mex.2020.100970.
6. Pan Y., Yu S.-S., Xiao Z.-C., Min Y., Tian T., Zheng Y.-M., et al. Re-evaluation and modification of dehydrogenase activity tests in assessing microbial activity for wastewater treatment plant operation // Water Research. 2023. Vol. 246. P. 120737. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120737.
7. Гюнтер Л.И., Беляева М.А., Ребарбар М.М. Оценка токсичности компонентов промышленных сточных вод по дегидрогеназной активности ила // Водоснабжение и санитарная техника. 1976. N 9. С. 9–12.
8. Головки Т.К., Силина Е.В., Лашманова Е.А., Козловская А.В. Активные формы кислорода и антиоксиданты в живых системах: интегрирующий обзор // Теоретическая и прикладная экология. 2022. N 1. С. 17–26. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026. EDN: WMMPOL.

9. Gonzalez A., van Lier J.B., de Kreuk M.K. Effects of mild thermal pre-treatment combined with H₂O₂ addition on waste activated sludge digestibility // *Waste Management*. 2022. Vol. 141. P. 163–172. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.01.017.
10. Liu Z., Smith S.R. Enzyme activity of waste activated sludge extracts // *Water Science & Technology*. 2020. Vol. 80, no. 7. P. 1861–1869. DOI: 10.2166/wst.2020.002.
11. Çakici A., Bayramoğlu M. An approach to controlling sludge age in the activated sludge process // *Water Research*. 1995. Vol. 29, no. 4. P. 1093–1097. DOI: 10.1016/0043-1354(94)00249-7.
12. Shulnikova A., Balymova E., Novikova A., Zakirov R., Akhmadullina F. The influence of ultrasonic exposure on the biocenosis of activated sludge from treatment facilities of domestic and industrial wastewater // *Ecology, energy, earth science and agriculture (AEES2023): International conference on ensuring sustainable development*. Les Ulis, 2024. P. 1023. DOI: 10.1051/e3sconf/202449401023.
13. Anjum N.A., Sharma P., Gill S.S., Hasanuzzaman M., Khan E.A., Kachhap K., et al. Catalase and ascorbate peroxidase-representative H₂O₂-detoxifying heme enzymes in plants // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23, no. 19. P. 19002–19029. DOI: 10.1007/s11356-016-7309-6.
14. Залетова Н.А., Залетов С.В. Изучение отклика дегидрогеназной активности ила на изменение технологических параметров работы аэротенка // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2020. N 1. С. 22–26. DOI: 10.35776/MNP.2020.01.03. EDN: MZUAOU.
15. Ковалева Н.Г., Ковалев В.Г. Биохимическая очистка сточных вод предприятий химической промышленности. М.: Химия, 1987. 156 с.
16. Закиров Р.К., Ахмадуллина Ф.Ю., Балымова Е.С., Геталов А.А. Сонохимический метод повышения ферментативной активности илов большого возраста // *Вестник Технологического университета*. 2015. Т. 18. N 4. С. 287–289. EDN: TMYZAT.
17. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 507 с. EDN: QNKHHB.
18. Horan N.J., Shanmugan P. Effects of starvation and nutrient depletion on the settling properties of activated sludge // *Water Research*. 1986. Vol. 20, no. 5. P. 661–666. DOI: 10.1016/0043-1354(86)90031-X.
19. Watari T., Asano K., Omine T., Hatamoto M., Araki N., Mimura K., et al. Effects of denitrifying granular sludge addition on activated sludge and anaerobic-aerobic systems for municipal sewage treatment // *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2022. Vol. 57, no. 9. P. 830–839. DOI: 10.1080/10934529.2022.2118485.
20. Cydzik-Kwiatkowska A., Ciesielski S., Florczyk M., Pasieczna-Patkowska S., Komorowska-Kaufman M., Pomian W., et al. Biopolymer production in a full-scale activated sludge wastewater treatment plant: seasonal changes and promising bacterial producers // *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 24. P. 6231. DOI: 10.3390/en17246231.
21. Imlay J.A. The molecular mechanisms and physiological consequences of oxidative stress lessons from a model bacterium // *Nature Reviews Microbiology*. 2013. Vol. 11, no. 7. P. 443–454. DOI: 10.1038/nrmicro3032.
- REFERENCES**
1. Smirnov Yu.D., Matveeva V.A., Yakovlev N.M., Sakhabutdinova E.R. Modern wastewater treatment technologies in galvanic production: analysis and evaluation // *Gornyi Zhurnal*. 2023;9:55–60. (In Russian). DOI: 10.17580/gzh.2023.09.08. EDN: CWBNRA.
2. Vertinsky A.P. Physical and chemical methods of wastewater treatment: problems, current state and possible ways of improvement. *Innovation & Investment*. 2019;11:257–261. (In Russian). EDN: UYXBRJ.
3. Wang H., Dai B., Gao F., Cao X., Ji X., Zuo L., et al. Petrochemical wastewater treatment in a full-scale biological aerated filter system: Insight into the mechanism of performance deterioration. *Chemical Engineering Journal*. 2024;488:151089. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151089.
4. Poruckij G.V. *Biochemical treatment of wastewater from organic production*. Moscow: Himiya; 1975, 253 p. (In Russian).
5. Pourakbar M., Behnami A., Mahdavianpour M., Dariyan F.S., Aghayani E. Developing a method for measurement of dehydrogenase activity in biological wastewater treatment processes applied for toxic compounds degradation. *MethodsX*. 2020;7:100970. DOI: 10.1016/j.mex.2020.100970.
6. Pan Y., Yu S.-S., Xiao Z.-C., Min Y., Tian T., Zheng Y.-M., et al. Re-evaluation and modification of dehydrogenase activity tests in assessing microbial activity for wastewater treatment plant operation. *Water Research*. 2023;246:120737. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120737.
7. Gyunter L.I., Belyaeva M.A., Rebabar M.M. Assessment of the toxicity of industrial wastewater components by sludge dehydrogenase activity. *Water Supply and Sanitary Technique*. 1976;9:9–12. (In Russian).
8. Golovko T.K., Silina E.V., Lashmanova E.A., Kozlovskaya A.V. Reactive oxygen species and antioxidants in living systems: an integrated overview. *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;1:17–26. (In Russian). DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026. EDN: WMMPOL.
9. Gonzalez A., van Lier J.B., de Kreuk M.K. Effects of mild thermal pre-treatment combined with H₂O₂ addition on waste activated sludge digestibility. *Waste Management*. 2022;141:163–172. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.01.017.
10. Liu Z., Smith S.R. Enzyme activity of waste activated sludge extracts. *Water Science & Technology*. 2020;80(7):1861–1869. DOI: 10.2166/wst.2020.002.
11. Çakici A., Bayramoğlu M. An approach to controlling sludge age in the activated sludge process. *Water Research*. 1995;29(4):1093–1097. DOI: 10.1016/0043-1354(94)00249-7.
12. Shulnikova A., Balymova E., Novikova A., Zakirov R., Akhmadullina F. The influence of ultrasonic exposure on the biocenosis of activated sludge from treatment facilities of domestic and industrial wastewater. In: *Ecology, energy, earth science and agriculture (AEES2023): International conference on ensuring sustainable development*. Les Ulis; 2024, p. 1023. DOI: 10.1051/e3sconf/202449401023.
13. Anjum N.A., Sharma P., Gill S.S., Hasanuzzaman M., Khan E.A., Kachhap K., et al. Catalase and ascorbate peroxidase-representative H₂O₂-detoxifying heme enzymes in plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23(19):19002–19029. DOI: 10.1007/s11356-016-7309-6.

14. Zaletova N.A., Zaletov S.V. The study of the response of dehydrogenase activity of sludge to a change in the process parameters of an aeration tank. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2020;1:22-26. (In Russian). DOI: 10.35776/MNP.2020.01.03. EDN: MZUAOU.

15. Kovaleva N.G., Kovalev V.G. *Biochemical treatment of wastewater from chemical enterprises*. Moscow: Himiya; 1987, 156 p. (In Russian).

16. Zakirov R.K., Akhmadullina F.Yu., Balymova E.S., Getalov A.A. Sonochemical method for increasing the enzymatic activity of old sludges. *Herald of Technological University*. 2015;18(4):287-289. (In Russian). EDN: TMYZAT.

17. Zhmur N.S. *Technological and biochemical processes of wastewater treatment at structures with aerotanks*. Moscow: AKVAROS; 2003, 507 p. (In Russian). EDN: QNKHHB.

18. Horan N.J., Shanmugan P. Effects of starvation and nutrient depletion on the settling properties of acti-

ivated sludge. *Water Research*. 1986;20(5):661-666. DOI: 10.1016/0043-1354(86)90031-X.

19. Watari T., Asano K., Omine T., Hatamoto M., Araki N., Mimura K., et al. Effects of denitrifying granular sludge addition on activated sludge and anaerobic-aerobic systems for municipal sewage treatment. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2022;57(9):830-839. DOI: 10.1080/10934529.2022.2118485.

20. Cydzik-Kwiatkowska A., Ciesielski S., Florczyk M., Pasieczna-Patkowska S., Komorowska-Kaufman M., Pomian W., et al. Biopolymer production in a full-scale activated sludge wastewater treatment plant: seasonal changes and promising bacterial producers. *Energies*. 2024;17(24):6231. DOI: 10.3390/en17246231.

21. Imlay J.A. The molecular mechanisms and physiological consequences of oxidative stress lessons from a model bacterium. *Nature Reviews Microbiology*. 2013;11(7):443-454. DOI: 10.1038/nrmicro3032.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахмадулина Фарида Юнусовна,
старший преподаватель,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68,
Российская Федерация,
AkhmadullinaFYu@corp.knrtu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6538-5616>

Закиров Рустем Каюмович,
к.т.н., доцент,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68,
Российская Федерация,
ZakirovRK@corp.knrtu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3771-4077>

Балымова Елена Сергеевна,
к.т.н., доцент,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68,
Российская Федерация,
✉ BalymovaES@corp.knrtu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4268-7600>

Вклад авторов

Ф.Ю. Ахмадулина – разработка концепции,
написание черновика рукописи,
редактирование рукописи.
Р.К. Закиров – курирование данных,
написание черновика рукописи, редактирование
рукописи.
Е.С. Балымова – проведение исследования,
разработка методологии, написание черновика
рукописи, редактирование рукописи.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Farida Yu. Akhmadullina,
Senior Lecturer,
Kazan National Research
Technological University,
68, Karl Marx St., Kazan, 420015,
Russian Federation,
AkhmadullinaFYu@corp.knrtu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6538-5616>

Rustem K. Zakirov,
Cand. Sci (Engineering), Associate Professor,
Kazan National Research
Technological University,
68, Karl Marx St., Kazan, 420015,
Russian Federation,
ZakirovRK@corp.knrtu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3771-4077>

Elena S. Balymova,
Cand. Sci (Engineering), Associate Professor,
Kazan National Research
Technological University,
68, Karl Marx St., Kazan, 420015,
Russian Federation,
✉ BalymovaES@corp.knrtu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4268-7600>

Contribution of the authors

Farida Yu. Akhmadullina – conceptualization,
writing – original draft, editing.
Rustem K. Zakirov – data curation,
writing – original draft, editing.
Elena S. Balymova – investigation,
methodology, writing – original draft, editing.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.03.2025.
Одобрена после рецензирования 19.05.2026.
Принята к публикации 08.06.2026.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read
and approved by all the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 27.03.2025.
Approved after reviewing 19.05.2026.
Accepted for publication 08.06.2026.