

Биосорбционная очистка сточных вод и детоксикация избыточного активного ила

Р.Я. Исхакова

Казанский государственный энергетический университет, Казань

Аннотация: В статье представлено исследование биосорбционной очистки сточных вод. Для проведения очистки используется отход теплоэнергетики – шлам водоподготовки. Введение шлама позволяет более эффективно проводить биологическую очистку сточных вод, о чем свидетельствует снижение значений показателей химического и биологического потребления кислорода, концентрации аммонийного азота и фосфатов. Показано повышение седиментационных свойств активного ила и благоприятное воздействие шлама на процесс детоксикации.

Ключевые слова: биосорбция, отход энергетики, активный ил, очистка сточных вод, показатели качества, седиментационные свойства, детоксикация.

Вопросы биологической очистки сточных вод и дальнейшей утилизации осадков являются актуальными [1-3]. Современные подходы интенсификации биологической очистки сточных вод заключаются в сочетании нескольких типов процессов в одном аппарате [4-6].

Проведено исследование, направленное на использование отхода теплоэнергетики – шлама водоподготовки (ВПУ), состоящего преимущественно из карбоната кальция, в качестве сорбционного материала в процессе биологической очистки сточных вод в аэротенках, работающих в режиме нитрификации [7].

Проведен модельный эксперимент на установке, воспроизводящей биологическую систему очистки сточных вод. В эксперименте использовали шлам ВПУ, дозируемый в систему, который выступал в качестве адсорбционного материала. Концентрация активного ила (АИ) составляла 2 г/дм³. Воздушную аэрацию системы осуществляли насосом, концентрация растворенного кислорода составила 2 мг/дм³. Дозу шлама водоподготовки подбирали экспериментально. Эффективность работы системы биосорбционной очистки оценивали по показателям биологическое потребление кислорода пятисуточное (БПК₅), химическое потребление

кислорода (ХПК), концентрация аммонийного азота, фосфатов. Контроль осуществляли по холостому эксперименту, в котором протекала биологическая очистка. Принципиальная схема работы установки представлена на рис. 1.

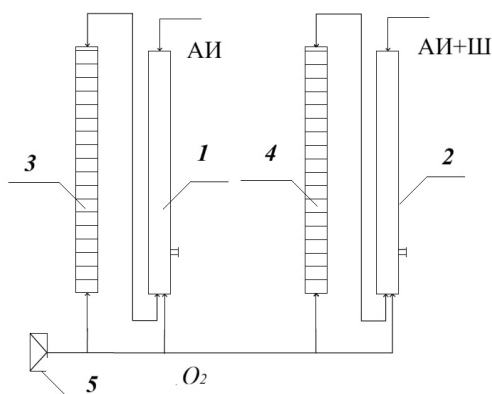


Рисунок 1. Принципиальная схема работы модельной установки
1, 2 – аэротенк; 3, 4 – вторичный отстойник; 5 – воздушный насос.

Экспериментально установлено, что оптимальным является дозирование шлама в количестве $0,6 \text{ г/дм}^3$. Результаты опытных испытаний во времени представлены в таблице 1. Как видно из таблицы 1 введение шлама в систему биологической очистки в качестве адсорбционного материала способствует более интенсивному снижению показателей ХПК, БПК₅ и концентрации аммонийного азота по сравнению с традиционной биологической очисткой. Таким образом, требуемые значения достигаются за меньшее время контакта.

Наблюдаемое резкое снижение значения ХПК обусловлено процессом сорбции устойчивых к биологическому разложению соединений шлагом ВПУ, так как в ходе биологической стадии очистки указанные соединения практически не удаляются из состава очищаемых сточных вод. Значительная интенсивность снижения показателя БПК₅ обусловлена формированием биопленки вследствие фиксации активного ила на поверхности шлама ВПУ,

что существенно повышает эффективность удаления органических веществ в начале процесса биосорбционной очистки.

Таблица 1.

Показатели качества сточных вод при биологической очистке и биосорбции

Значение показателя		Время проведения эксперимента, часов							НДС в водоем
		0	1	2	3	4	6	12	
ХПК, мг	Биологическая	330	281	254	223	202	178	103	30
$O_2/дм^3$	Биосорбция	330	99	29	28	28	28	28	
БПК ₅ , мг	Биологическая	98	76	62	50	43	38	23	2
$O_2/дм^3$	Биосорбция	98	62	47	44	24	20	1,5	
NH_4^+ , мг/дм ³	Биологическая	1,66	1,58	1,46	1,32	1,13	0,96	0,65	0,5
	Биосорбция	1,66	0,87	0,5	0,26	0,2	0,17	0,09	
PO_4^{3-} , мг/дм ³	Биологическая	0,53	0,53	0,48	0,42	0,4	0,39	0,38	0,2
	Биосорбция	0,53	0,36	0,25	0,18	0,16	0,15	0,14	

В результате проведения биосорбции наблюдается снижение БПК₅ почти на 98%. При биосорбции происходит параллельное протекание двух механизмов: адсорбционного связывания загрязнений шламом и последующего биохимического окисления АИ. Резкий спад концентрации загрязнений в первые часы контакта подтверждает преобладание физической сорбции, определяемой межмолекулярными взаимодействиями. Последующее замедленное снижение показателей является результатом их биodeградации, аналогично процессу классической биологической очистки. Кинетика указанных процессов демонстрирует превосходящую скорость адсорбционных реакций над биохимическими превращениями [8].

Введение шлама водоподготовки оказывает положительный эффект на удаление аммонийного азота. Процесс окисления NH_4^+ до NO_2^- , а затем до NO_3^- в присутствии нитрифицирующих бактерий сопровождается потреблением щелочности и выделением ионов водорода. При этом происходит подкисление среды, что замедляет процесс нитрификации в связи с чувствительностью нитрифицирующих бактерий к снижению pH.

Шлам, состоящий преимущественно из карбоната кальция, имеет слабощелочную реакцию среды (pH=7,9). Таким образом, шлам водоподготовки стабилизирует pH в оптимальном для бактерий диапазоне. Это предотвращает «закисление» системы и обеспечивает стабильную и эффективное снижение аммонийного азота.

При введении шлама снижается содержание фосфатов за счет образования нерастворимых фосфатов кальция, которые создают дополнительную матрицу для иммобилизации фосфатаккумулирующих микроорганизмов (ФАО). Внеклеточные полимеры ФАО также повышают адгезию к поверхности CaCO_3 . Таким образом шлам ВПУ является биоактивным материалом.

Седиментационные показатели АИ являются ключевыми параметрами для оперативного управления работой очистных сооружений [9,10]. Неудовлетворительное осаждение АИ во вторичных отстойниках приводит к выносу биомассы и ухудшению качества очистки. Седиментационный анализ состояния АИ проводился по показателям: концентрация взвешенных веществ, иловый индекс. Результаты представлены на рис. 2 и 3.

Как видно из рис.2 и 3 значение илового индекса и концентрация взвешенных веществ снижается. Шлам ВПУ диссоциирует в воде с образованием ионов Ca^{2+} , которые нейтрализуют отрицательные заряды на

поверхности частиц АИ за счет образования двойного электрического слоя вокруг коллоидных частиц ила.

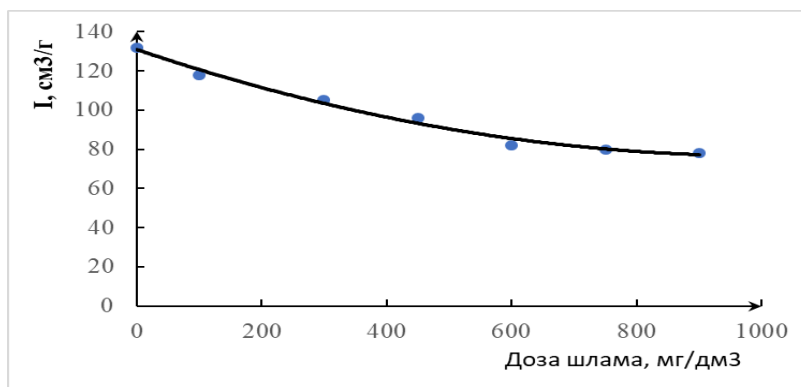


Рис. 2.– Седиментационная кривая изменения илового индекса от дозы

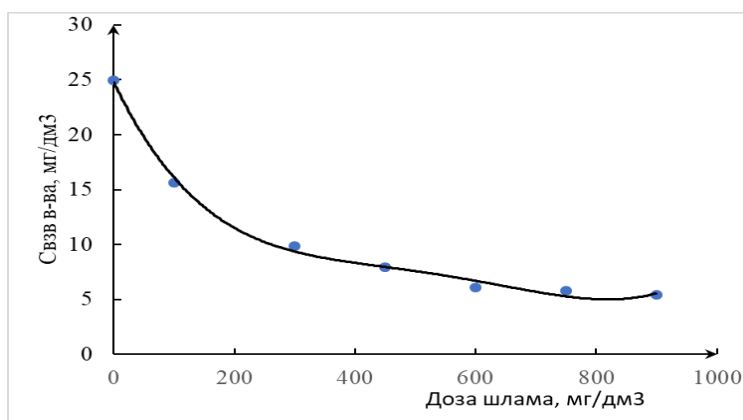


Рис. 3. – Зависимость изменения концентрации взвешенных веществ от дозы

Снижение сил отталкивания позволяет частицам АИ и карбоната кальция сталкиваться и образовывать более крупные, плотные и прочные хлопья. Снижается электростатическое отталкивание между коллоидными частицами, способствуя их агрегации и формированию более крупных, плотных хлопьев.

Введение шлама ВПУ оказывает положительное влияние на структуру АИ, так как катионы Ca^{2+} связываются с экзополисахаридами бактерий, уплотняя матрицу хлопьев, что снижает их гидрофильность и способность удерживать воду, что также снижает объем осадка.

Помимо этого шлам ВПУ, взаимодействуя с фосфатами сточных вод, образует нерастворимый фосфат кальция ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), который включается в хлопья АИ, увеличивая их плотность.

Экспериментально установленные значения илового индекса и концентрации взвешенных веществ определяются после гравитационного осаждения во вторичных отстойниках в течении 2 ч. Применение дозирования шлама ВПУ способствует формированию биологической пленки на его поверхности, что увеличивает плотность активного ила и улучшает его седиментационную способность, обеспечивая тем самым повышение эффективности удаления взвешенных частиц из сточной воды.

Таким образом, биосорбционная очистка сточных вод обеспечивает снижение показателей ХПК, БПК₅, концентрации аммонийного азота, фосфатов, а также повышает седиментационные свойства АИ, способствуя его детоксикации.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) в целях защиты докторских диссертаций, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Литература

1. Liu X., Zoryna T. Regional pollution and the geographical distribution of pollution intensive industries in China // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 3 (63). С. 106-119. URL: elibrary.ru/download/elibrary_71966533_37972237.pdf
2. Москвичева Е.В., Войтюк А.А., Доскина Э.П., Игнаткина Д.О., Юрьев Ю.Ю., Щитов Д.В. Совершенствование технологии очистки

городских сточных вод с использованием сорбента на основе избыточного активного ила // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2968

3. Ahmer Ali Siyal, Muhammad Rashid Shamsuddin, Aaron Low, Nurul Ekmi Rabat. A review on recent developments in the adsorption of surfactants from wastewater //Journal of Environmental Management, Vol. 254, 15 January 2020, P. 109797.

4. Гульшин И.А. Низкокислородный метод очистки сточных вод с гранулированным активным илом // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/7013

5. Сафронов М.А., Салмин С.М., Малютина Т.В., Титов Е.А. Экспериментальные исследования технологии биологической очистки сточных вод с применением электрообработки и аэрации активного ила // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8823

6. Шлёкова И.Ю., Кныш А.И. Повышение эффективности аэробной биологической очистки нефтесодержащих сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 203-209.

7. Исхакова Р.Я., Черникова Д.И. Очистка сточных вод отходом энергетики // Тинчуринские чтения - 2025 «Энергетика и цифровая трансформация». Сборник статей Международной молодежной научной конференции. Казань, 2025. С. 812-816.

9. Cardete M.A., Mata-Álvarez J., Dosta J., Niet o-Sánchez R. Effect of the mixed liquor parameters on sludge settling for a petrochemical activated sludge system including an aerobic selector // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2018. Vol.6. Iss.1. pp. 1062-1071.

10. Умирова Н.Р., Даваахуу А., Морыганова Ю.А., Никитина И.С., Бураков И.А., Ахметова И.Г. Вопросы очистки сточных вод тепловых

электрических станций Узбекистана и Монголии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27. № 2. С. 164-176.

References

1. Liu X., Zoryna T. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta. 2024. Т. 16. № 3 (63). pp. 106-119. URL: elibrary.ru/download/elibrary_71966533_37972237.pdf
2. Moskvicheva E.V., Vojtjuk A.A., Doskina Je.P., Ignatkina D.O., Jur'ev Ju.Ju., Shhitov D.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. № 2-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2968
3. Ahmer Ali Siyal, Muhammad Rashid Shamsuddin, Aaron Low, Nurul Ekmi Rabat. Journal of Environmental Management, Vol. 254, 15 January 2020, P. 109797.
4. Gul'shin I.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/7013
5. Safronov M.A., Salmin S.M., Maljutina T.V., Titov E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8823
6. Shljokova I.Ju., Knysh A.I. Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija. 2021. № 1. pp. 203-209.
7. Ishakova R. Ja., Chernikova D.I. V sbornike: Tinchurinskie chtenija - 2025 «Jenergetika i cifrovaja transformacija». sbornik statej Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj kon-ferencii. Kazan', 2025. pp. 812-816.
9. Cardete M.A., Mata-Álvarez J., Dosta J., Niet o-Sánchez R. Journal of Environmental Chemical Engi-neering. 2018. Vol.6 Iss.1. pp. 1062-1071.
10. Umirova N.R., Davaahuu A., Moryganova Ju.A., Nikitina I.S., Burakov I.A., Ahmetova I.G. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2025. Т. 27. № 2. pp. 164-176.

Дата поступления: 14.09.2025

Дата публикации: 25.10.2025