

## Особенности регулирования реакции среды в анаэробном биореакторе с гранулированным илом

Мария В. Рымовская	<sup>1</sup>	<a href="mailto:rymovskaya_mv@mail.ru">rymovskaya_mv@mail.ru</a>	 0000-0003-4350-7859
Раиса М. Маркевич	<sup>1</sup>	<a href="mailto:marami-bstu@ya.ru">marami-bstu@ya.ru</a>	 0000-0002-9238-3568
Александра А. Масехнович	<sup>1</sup>	<a href="mailto:al.masekhovich@mail.ru">al.masekhovich@mail.ru</a>	 0000-0001-8564-5139

<sup>1</sup> Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13-а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрено влияние нагрузки по органическим веществам и реагентов для коррекции pH на биохимическую активность, состав и свойства анаэробного гранулированного ила при очистке сточных вод молокоперерабатывающего предприятия. Технологический процесс моделировали в лабораторных биореакторах при 30°C в полунепрерывном режиме с подпиткой модельной сточной водой. В качестве реагентов для регулирования pH использовали гидрокарбонат натрия, гидроксид аммония и гидроксид натрия. Определены основные технологические характеристики работы лабораторных биореакторов: скорость утилизации органических веществ, эффективность очистки сточных вод, pH жидкости в биореакторах, стабильность гранул. Показано, что тип реагента для коррекции pH не оказывает влияния на скорость утилизации органических веществ. При коррекции pH гидрокарбонатом натрия достигается наибольшая эффективность очистки модельной сточной воды (83-88%) и оптимальный для метаногенных бактерий интервал pH (6,9-7,2). Самая высокая степень разрушения гранул наблюдалась при использовании для коррекции pH гидроксида натрия. Тип реагента для коррекции pH оказывает влияние на состав минеральной части ила и обуславливает увеличение в ней доли вносимого катиона. Предпочтительным для коррекции pH в анаэробных биореакторах признан гидрокарбонат натрия. Использование растворов аммиака и гидроксида натрия можно порекомендовать для средне- и высоконагружаемых систем. Экспериментально установлено, что гидрокарбонат натрия обеспечивает наиболее стабильные условия для метаногенеза, поддерживая pH в оптимальном диапазоне независимо от органической нагрузки. В отличие от гидроксидных реагентов, он не вызывает значительного разрушения гранулированной структуры ила, что подтверждается микроскопическими исследованиями и анализом минерального состава. При этом использование гидроксида натрия приводит к увеличению доли мелкодисперсных частиц в реакторе до 84% при высоких нагрузках, что может негативно влиять на эффективность очистки. Полученные данные важны для оптимизации работы промышленных анаэробных реакторов, особенно при обработке сточных вод с переменным составом и нагрузкой. Результаты исследования демонстрируют преимущества буферных систем на основе гидрокарбонатов перед сильными щелочами для поддержания стабильной работы биологических систем очистки.

**Ключевые слова:** очистка сточных вод, анаэробный гранулированный активный ил, лабораторный биореактор, полунепрерывный режим культивирования, реакция среды, нагрузка по органическим загрязнителям, скорость утилизации, состав ила.

## Features of the medium reaction regulation in anaerobic bioreactor with granular sludge

Mariya V. Rymovskaya	<sup>1</sup>	<a href="mailto:rymovskaya_mv@mail.ru">rymovskaya_mv@mail.ru</a>	 0000-0003-4350-7859
Raisa M. Markevich	<sup>1</sup>	<a href="mailto:marami-bstu@ya.ru">marami-bstu@ya.ru</a>	 0000-0002-9238-3568
Aleksandra A. Masehovich	<sup>1</sup>	<a href="mailto:al.masekhovich@mail.ru">al.masekhovich@mail.ru</a>	 0000-0001-8564-5139

<sup>1</sup> Belarusian State Technological University, Sverdlova Str., 13-a Minsk, 220006, Republic of Belarus

**Abstract.** The influence of organic matter load and pH correction reagents on the biochemical activity, composition and properties of anaerobic granular sludge during milk processing wastewater treatment has been considered. The process was modeled in laboratory bioreactors at 30 °C in a semi-continuous mode with model wastewater feed. Sodium bicarbonate, ammonium hydroxide and sodium hydroxide have been used as pH adjustment reagents. The main technological characteristics of the laboratory bioreactors were determined: rate of organic pollutant utilization, efficiency of wastewater treatment, pH of bioreactors liquid, and the proportion of debris in total mass of granules. It was shown that the type of pH correction reagent does not affect the organic matter utilization rate. The highest efficiency of model wastewater treatment (83-88%) and the closest pH to the optimum for methanogenic bacteria (6.9-7.2) was achieved while pH adjusted with sodium bicarbonate. The highest degree of granule destruction has been observed when sodium hydroxide was used to correct pH. The type of pH correction reagent affects the composition of the mineral part of the sludge and causes an increasing of the introduced cation proportion. Sodium bicarbonate has been recognized as preferable for pH correction in anaerobic bioreactors. The use of ammonia and sodium hydroxide solutions can be recommended for medium- and high-load systems. It has been experimentally established that sodium bicarbonate provides the most stable conditions for methanogenesis, maintaining pH depending on the organic load. Unlike hydroxide reagents, it does not cause significant disturbances in the granular structure, which is confirmed by microscopic studies and analysis of the mineral composition. At the same time, the use of sodium hydroxide leads to an increase in the proportion of fine particles in the reactor to 84% at high loads, which can negatively affect the efficiency of purification. The data obtained are important for optimizing the operation of industrial anaerobic reactors, especially when treating wastewater with variable composition and inclusions. Results of a study of the efficiency of buffer systems based on bicarbonates against strong alkalis to maintain stable operation of biological purification systems.

**Keywords:** wastewater treatment, anaerobic granular activated sludge, laboratory bioreactor, semi-continuous cultivation mode, medium reaction, organic pollutant load, disposal rate, sludge composition.

Для цитирования

Рымовская М.В., Маркевич Р.М., Масехнович А.А. Особенности регулирования реакции среды в анаэробном биореакторе с гранулированным илом // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 1. С. 217–226. doi:10.20914/2310-1202-2025-1-217-226

For citation

Rymovskaya M.V., Markevich R.M., Masehovich A.A. Features of the medium reaction regulation in anaerobic bioreactor with granular sludge. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 217–226. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-1-217-226

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Введение

Анаэробные технологии очистки сточных вод совершенствуются параллельно с традиционно используемыми аэробными технологиями. В основе их лежит культивирование спонтанно развивающихся сообществ микроорганизмов при непрерывном или полунепрерывном поступлении субстрата в составе сточных вод, причем объемный расход и состав сточных вод, рН и температура редко регулируются, чаще только контролируются.

Бурное развитие анаэробных технологий очистки сточных вод объясняется их серьезными преимуществами перед традиционными аэробными методами: низкая потребность в электроэнергии ввиду отсутствия аэрации сточных вод и циркуляции активного ила; малый прирост биомассы активного ила, который является обременительным отходом; стабильность избыточного анаэробного ила; генерация биогаза, используемого в качестве энергоносителя; возможность эксплуатации их как высоконагружаемых систем при относительно небольшой потребности в производственных площадях. Эти особенности и преимущества анаэробных методов открывают возможности эксплуатации их для очистки сточных вод периодически действующих и сезонных производств.

Медленное накопление биомассы анаэробных микроорганизмов стало причиной активного поиска способов ее удержания в объеме биореактора. Самым удачным решением является использование гранулированного ила, формирующегося в результате автоселекции размножающихся суспендированных бактерий и их агрегирования в частицы в восходящем потоке жидкости [1]. Медленнорастущие метаногенные и ацетогенные микроорганизмы формируют компактные плотные гранулы с хорошей осаждаемостью, поэтому в реакторе можно достичь высокой концентрации биомассы, наибольших значений скорости утилизации загрязнений и метаногенерации.

Гранулы такого ила стабильны, в них создаются оптимальные условия для развития всех его биообъектов в единой метаболической цепи, когда продукты жизнедеятельности микроорганизмов внешних слоев служат субстратом для микроорганизмов центральных зон. Диффузионные расстояния в гранулах активного ила минимальны и благоприятны для транспорта промежуточных продуктов разложения органических веществ [2]. Метаногенная активность гранулированного ила выше, чем у флокулированного, и значительно превышает активность дисперсной биомассы.

Ферментативная активность бактерий зависит от уровня рН среды. Оптимум рН для метаногенных бактерий 6,8–7,2, при значении рН 6,2 и менее их метаболизм нарушается. В то же время это значение рН считается оптимальным для ацетатобразующих бактерий. Интенсивный синтез ими уксусной кислоты приводит к дальнейшему снижению уровня рН и подавлению потребляющих ее метаногенов, результатом чего является закисление среды в биореакторе [3].

Присутствующие в среде положительно и отрицательно заряженные ионы формируют буферную систему, которая обеспечивает поддержание стабильного значения рН. В условиях подкисления среды органическими кислотами важно знать количество ионов, обеспечивающих ее подщелачивание, – щелочность. Снижение щелочности приводит к резким колебаниям уровня рН даже при незначительном изменении концентраций положительно и отрицательно заряженных ионов [4] и может стать причиной сбоя в работе сообщества микроорганизмов.

Щелочность в анаэробных биореакторах обусловлена присутствием ионов аммония, образующихся при утилизации аминокислот и находящихся в равновесии с аммиаком, бикарбонатов, находящихся в равновесии с диоксидом углерода, и органических кислот, образующихся в результате жизнедеятельности кислотогенной и ацетогенной групп бактерий. Равновесие между этими компонентами определяет уровень рН. Аммиак растворяется в воде и с диоксидом углерода формирует бикарбонат аммония. Аммонийные соли органических кислот утилизируются метаногенными бактериями с высвобождением аммиака, который снова участвует в обеспечении щелочности системы [5].

Для достижения устойчивого уровня рН в анаэробный биореактор вносят вещества, увеличивающие щелочность: гидроксиды и карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов, гидроксид аммония. Для длительного применения предпочтительно внесение смеси катионов, что позволяет нивелировать недостатки отдельных реагентов [6–7].

Слабым местом технологий очистки сточных вод является постепенное отклонение от оптимальных параметров, приводящее к хроническим проблемам эксплуатации биореакторов. Общие стратегии и рекомендации по управлению подобными системами разработаны, неплохо систематизированы в книгах и руководствах, публикуются частные случаи эксплуатации очистных сооружений [8–10].

Публикаций, посвященных изучению влияния реагента для коррекции рН на состав ила и технологический процесс очистки практически нет.

В Республике Беларусь действует несколько анаэробных очистных сооружений с гранулированным активным илом. В частности, на локальной очистной станции ОАО «Туровский молочный комбинат» (г. Туров, Гомельская обл.) используют анаэробный биореактор типа E2E с псевдооживленным слоем гранулированного ила, а на локальной очистной станции ОСП ГГЦ «Березинский спиртовой завод» РУП «Минск-Кристалл» (г. Березино, Минская обл.) действует анаэробный реактор типа UASB. Биореактор типа E2E (Voith Paper GmbH & Co. KG, Германия) состоит из резервуара реактора и напорной колонны. В зависимости от количества сточных вод и уровня загрязненности биологически очищенная вода частично возвращается в реактор для создания постоянной скорости потока, что способствует поддержанию достаточно большой скорости массообмена. В этой динамичной системе с большой скоростью протока очищаемой жидкости для поддержания рН используют гидроксид натрия. Для коррекции рН в UASB-реакторе на ОСП ГГЦ «Березинский спиртовой завод» РУП «Минск-Кристалл» приемлемым стало использование карбоната кальция, поскольку на очистку подается жидкость с относительно большой загрязненностью по органическим веществам, горизонтальное перемешивание практически отсутствует, а высвобождение катионов кальция, связывающихся с анионами неорганических кислот, растянуто во времени.

Целью работы стало изучение особенностей коррекции рН в анаэробном биореакторе с гранулированным илом.

Объектом исследования являлся технологический процесс анаэробной очистки сточных вод молокоперерабатывающего производства в лабораторных биореакторах с гранулированным активным илом. Предмет исследования – биохимические процессы в анаэробных биореакторах и состав гранулированного активного ила в условиях коррекции рН.

Научная задача исследования заключалась в изучении биохимической активности, состава и свойств анаэробного гранулированного ила, используемого в условиях разной нагрузки по органическим веществам и различных реагентов для коррекции рН, сопоставлении технологических характеристик для определения наилучшего варианта реагента для коррекции рН.

## Материалы и методы

Для моделирования технологического процесса анаэробной очистки сточных вод использовались 18 лабораторных биореакторов, представляющих собой вертикальные цилиндрические емкости рабочим объемом 200 см<sup>3</sup>. Биореакторы снабжены гидрозатворами для поддержания анаэробного режима. В каждый из биореакторов вносили 50 г. (примерно 50 см<sup>3</sup>) влажного гранулированного ила и 150 см<sup>3</sup> модельной сточной воды. В работе использован гранулированный активный ил, отобранный из анаэробного биореактора типа E2E с псевдооживленным слоем ила (ОАО «Туровский молочный комбинат»). Биореакторы термостатировали в суховоздушном термостате при температуре 30°С. Подпитку биореакторов модельной сточной водой, отбор проб жидкости и удаление биологически очищенной воды вели без нарушения анаэробнозона с периодичностью 1 раз в сутки, перемешивали содержимое биореакторов во время подпитки или отбора проб.

Для подпитки микроорганизмов ила органическими веществами использовали модельную сточную воду молокоперерабатывающего производства, ее готовили на основе сухой сладкой сыворотки с внесением нитрата натрия, поскольку мойка оборудования на предприятиях отрасли происходит с использованием растворов гидроксида натрия и азотной кислоты. Состав модельной сточной воды, мг/дм<sup>3</sup>: сухая молочная сыворотка – 2000; натрия нитрат – 10; остальная водопроводная вода – остальное; рН – 7,0. Для моделирования низко-, средне- и высоконагружаемых систем готовили концентраты такой воды 5×, 10× и 20× соответственно.

Для оценки работы анаэробных биореакторов определяли химическое потребление кислорода (ХПК), щелочность, концентрацию ионов аммония, рН сточной (СВ) и биологически очищенной воды (БОВ). Для измерения ХПК использовали автоматический измеритель ХПК, состоящий из блока подготовки проб Ш 839800 COD REACTOR и анализатора Multiparameter Bench Photometer. Щелочность определяли по ГОСТ 31957–2012. Концентрацию неорганического азота в аммонийной форме определяли путем отгонки филтраты с последующим титрованием. Показатель рН устанавливали потенциометрически с использованием прибора рН/ORP meter HANNA instruments по инструкции производителя.

Анаэробный гранулированный активный ил из биореакторов подвергали анализу после отделения свободно стекающей влаги. Для характеристики ила определяли массу влажного ила из каждого биореактора, устанавливали

влажность, рассчитывали концентрацию ила в биореакторе по сухой массе, определяли массовую долю минеральных веществ в сухом остатке и компонентный состав минерального остатка, оценивали целостность и плотность гранул. Установление влажности и содержания сухих веществ проводили по ГОСТ 171–2015, доли минеральных веществ в сухом остатке – по ГОСТ 28178–89. Плотность гранулированного активного ила определяли путем отнесения массы навески влажного гранулированного ила к объему, занимаемому им. Компонентный состав минерального остатка устанавливали с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония).

В условиях экспериментов варьировались нагрузки по органическим веществам и реагент для регулирования рН с изучением каждого из сочетаний.

Нагрузка по органическим веществам на ил была принята на основании опытно-эксплуатационных данных промышленных анаэробных биореакторов с локальных очистных сооружений ОАО «Туровский молочный комбинат» и ОСП ГЦ «Березинский спиртовой завод» РУП «Минск-Кристалл». Средняя нагрузка по органическим загрязнениям, оцененная по ХПК, составляла 7,8 и 3,3 кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут) соответственно для биореакторов с рециркуляцией и без рециркуляции очищаемой воды, при этом достигается средняя эффективность очистки воды 88 и 93% соответственно. Поскольку в моделируемом в нашем исследовании процессе не была предусмотрена рециркуляция очищаемой воды, то решили принять за рабочую (среднюю), характерную для нормальных условий работы таких установок, нагрузку на уровне 3,0–4,0 кг

ХПК/(м<sup>3</sup>·сут)). Условия низкой и высокой нагрузки моделировали на уровне 1,0–2,0 и 7,0–8,0 кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут) соответственно.

В качестве реагентов для регулирования рН использовали гидрокарбонат натрия, гидроксид аммония и гидроксид натрия. Регулирование реакции среды вели при снижении значения рН ниже 6,5 до достижения значения рН 7,0.

Для вывода биореакторов на установившийся режим в течение 3 месяцев выдерживали их в выбранном варианте условий нагрузки по органическим веществам при регулярной подпитке (1 раз в сутки) и своевременной коррекции реакции среды (рН). Для постановки эксперимента сменяли часть жидкости в биореакторе в выбранном режиме и далее модельную сточную воду не вносили, отбор проб жидкости из биореакторов делали на 1, 3, 5 и 7 сут. На основании данных по загрязненности СВ и БОВ рассчитывали эффективность очистки по ХПК,%, скорость утилизации органических загрязнителей сточных вод микроорганизмами активного ила на единицу рабочего объема биореактора и на единицу сухих веществ ила, кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут) и г ХПК/(кг×сут) соответственно, а также скорость накопления аммонийного азота в расчете на единицу сухих веществ ила, г N/(кг×сут).

### Результаты и обсуждение

Качественный и количественный состав загрязнителей сточных вод, гидродинамический режим работы анаэробных биореакторов с гранулированным илом оказывают непосредственное влияние на величину показателя рН и качество создаваемой буферной среды. Для промышленных анаэробных биореакторов в таблице 1 приведены результаты анализа разовых проб сточной и биологически очищенной воды, гранулированного активного ила.

Таблица 1.

Показатели качества сточных и биологически очищенных вод, гранулированного активного ила из промышленных анаэробных биореакторов

Table 1.

Quality indicators of wastewater and biologically treated water, granulated active sludge from industrial anaerobic bioreactors

Показатель качества Water quality index	рН   pH		Щелочность, мг/дм <sup>3</sup> по CaCO <sub>3</sub>   Alkalinity, mg/dm <sup>3</sup> by CaCO <sub>3</sub>		Аммонийный азот, мг/дм <sup>3</sup>   Ammonium nitrogen, mg/dm <sup>3</sup>		Концентрация в био- реакторе, кг с.в./м <sup>3</sup>   Concentration in the bioreactor, kg dry matter/m <sup>3</sup>	Содержание мине- ральных веществ, % от с.в.   Mineral content, % of dry matter
	СВ   Waste water	БОВ   Biologi- cally treated water	СВ   Waste water	БОВ   Biologi- cally treated water	СВ   Waste water	БОВ   Biologically treated water	гранулированный активный ил   granulated active sludge	
Биореактор типа UASB   Bioreactor type UASB	3,5–6,1	6,9–7,6	1700	3900	547,2	1116,3	220–240	49,7–55,8
Биореактор типа E2E   Bioreactor type E2E	6,8–7,0	6,7–7,5	50	61	5,2	6,1	100–140	32,4–38,8

Сточные воды производства пищевого этанола содержат много органических кислот и аммонийного азота. В результате утилизации олиго- и полисахаридов, пептидов микробиотой активного ила щелочность и текущая концентрация аммонийного азота в биореакторе типа UASB увеличиваются в 2 раза, обеспечивая метаногенным бактериям надежную защиту от снижения pH. Даже при низком значении показателя pH поступающих сточных вод он корректируется катионами в биореакторе до приемлемого значения 6,9–7,6, большой вклад при этом вносят, по-видимому, ионы аммония. Карбонат кальция в эту систему вносится либо при значительном увеличении объемного расхода потока или его загрязненности, либо в случае пуска после длительного отсутствия подпитки.

В составе СВ молокоперерабатывающего производства, напротив, аммонийного азота относительно мало и щелочность невелика, значительного увеличения этих показателей в БОВ не происходит из-за использования рециркуляции потока очищенной воды для корректной работы биореактора с псевдооживленным слоем, при

котором достигается омывание гранул ила очищаемой водой и потому – интенсивный массообмен. Использование для коррекции pH гидроксида натрия позволяет поддерживать оптимальный для метаногенных бактерий уровень pH.

Концентрация активного ила в биореакторе типа UASB в 2 раза выше, чем в биореакторе с псевдооживленным слоем ила, что объясняется различающимся гидродинамическим режимом работы. Содержание минеральных веществ в иле относительно велико. Есть свидетельства, что малорастворимые соли в составе таких гранул могут формировать трехмерный каркас и потому участвовать в обеспечении прочности и целостности таких гранул [11].

В результате моделирования процесса анаэробной очистки сточных вод молокоперерабатывающего производства в лабораторных биореакторах нами установлено, что на скорость утилизации органических веществ значимое влияние оказало увеличение нагрузки на ил по органическим веществам, тогда как достоверной разницы при смене типа реагента для коррекции pH не выявлено (таблица 2).

Таблица 2.

Скорость утилизации органических загрязнителей по ХПК в зависимости от нагрузки и типа реагента

Table 2.

Rate of organic pollutant disposal by COD depending on the load and type of reagent

Нагрузка по органическим загрязнениям, кг ХПК/(м <sup>3</sup> ·сут) Organic pollutant load, kg COD/(m <sup>3</sup> ·day)	Скорость утилизации органических загрязнителей по ХПК, г ХПК/(кг×сут) Rate of organic pollutant disposal by COD, g COD/(kg day)		
	тип реагента для коррекции pH   pH correction reagent type		
	NaHCO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> OH	NaOH
	1 сут   1 day		
1,0–2,0	13	18	19
3,0–4,0	130	135	137
7,0–8,0	352	352	367
	5 сут   5 days		
1,0–2,0	3	4	4
3,0–4,0	26	27	26
7,0–8,0	70	69	73

Полученные значения скоростей утилизации имеют линейную зависимость от нагрузки по загрязнениям, поэтому можно сделать вывод о том, что предельная скорость деструкции органических веществ для изучаемых систем в нашем эксперименте не достигнута.

Численные значения эффективности очистки сточной воды по удаляемым органическим загрязнениям представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Эффективность очистки сточных вод по ХПК в зависимости от нагрузки и типа реагента

Table 3.

Efficiency of wastewater treatment by COD depending on the load and type of reagent

Время, сут   Time, days	Эффективность очистки сточной воды по ХПК, %   Efficiency of wastewater treatment by COD, %					
	Тип реагента для коррекции pH   pH correction reagent type					
	NaHCO <sub>3</sub>		NH <sub>4</sub> OH		NaOH	
	нагрузка по органическим загрязнениям, кг ХПК/(м <sup>3</sup> ·сут)   organic pollutant load, kg COD/(m <sup>3</sup> ·day)					
	3,0–4,0	7,0–8,0	3,0–4,0	7,0–8,0	3,0–4,0	7,0–8,0
3	45	55	50	48	32	54
5	73	60	51	53	35	55
7	88	83	54	68	42	62

Достижимая эффективность очистки по ХПК при средней и высокой нагрузке составила 42–68% в случае коррекции рН гидроксидом аммония и гидроксидом натрия, тогда как коррекция рН гидрокарбонатом натрия приводила к повышению эффективности очистки до 83–88%. В условиях малонагружаемых систем устойчивого эффекта снижения ХПК не наблюдали – вероятно, из-за недостатка субстрата для метаногенов [12].

В таблице 4 представлены численные значения рН жидкости из анаэробных биореакторов по истечении 1 и 7 сут эксперимента.

Таблица 4.  
Показатель рН биологически очищенной воды в зависимости от нагрузки и типа реагента  
Table 4.  
pH value of biologically treated water depending on the load and type of reagent

Нагрузка по органическим загрязнениям, кг ХПК/(м <sup>3</sup> ·сут)   Organic pollutant load, kg COD/(m <sup>3</sup> ·day)	Значения рН жидкости из анаэробных биореакторов   pH values of liquid from anaerobic bioreactors		
	Тип реагента для коррекции рН   pH correction reagent type		
	NaHCO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> OH	NaOH
	1 сут   1 day		
1,0–2,0	5,8	6,6	6,7
3,0–4,0	5,1	5,1	5,2
7,0–8,0	4,9	5,0	5,1
	7 сут   7 days		
1,0–2,0	7,1	9,2	8,4
3,0–4,0	7,2	7,5	6,7
7,0–8,0	6,9	6,3	6,4

В первые сутки для средне- и высоконагружаемых систем рН снижался до уровня 4,9–5,2, и коррекция его до уровня 7,0 приводила к стабилизации рН через 7 сут на уровне 6,3–7,5 вследствие согласованного образования и потребления органических кислот метаногенными бактериями. В низконагружаемых системах показатель рН снизился за 1 сут до 5,8–6,7 из-за меньшего кислотообразования и буферности системы. Несмотря на то, что внесения реагента для коррекции рН не требовалось (и поэтому он не вносился), через 7 сут рН стал щелочным в системах, где для его коррекции использовались растворы гидроксидов аммония и натрия.

При использовании гидрокарбоната натрия показатель рН стабилизировался на уровне 6,9–7,2 для всех вариантов нагрузок по органическим веществам. Влияние гидроксидов аммония и натрия было более значительным: рН возрастал (до 8,4–9,2) при низких нагрузках, был близок к нейтральному (6,7–7,5) при средних нагрузках и стабилизировался в кислой области (6,3–6,4) при высоких нагрузках.

Скорость накопления аммонийного азота в анаэробных биореакторах, где для коррекции рН использовались гидрокарбонат натрия и гидроксид аммония, была наибольшей (700–1100 г NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/(кг·сут)) за первые сутки эксперимента, в случае использования для коррекции рН гидроксида натрия скорость накопления аммонийного азота была на уровне 100–200 г NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/(кг·сут). Рост концентрации аммонийного азота свидетельствует об активном процессе разложения белков, а при подщелачивании содержимого биореакторов гидроксид аммония разлагается до аммиака и воды, аммиак переходит в газовую фазу. Отметим, что численные значения рН для этого периода (таблица 4) для всех вариантов сопоставимы. Поэтому можем предположить, что рост концентрации ионов аммония был скомпенсирован ростом концентрации органических кислот.

При оценке влияния условий очистки на свойства гранулированного ила анализировали степень разрушения гранул анаэробного активного ила (таблица 5), плотность, влажность и содержание минеральных веществ (таблица 6).

Таблица 5.  
Степень разрушения гранул анаэробного активного ила  
Table 5.  
Degree of destruction of anaerobic active sludge granules

Нагрузка по органическим загрязнениям, кг ХПК/(м <sup>3</sup> ·сут)   Organic pollutant load, kg COD/(m <sup>3</sup> ·day)	Доля мелких взвешенных частиц, % масс.   Proportion of debris, % by weight		
	тип реагента для коррекции рН   pH correction reagent type		
	NaHCO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> OH	NaOH
1,0–2,0	18	17	28
3,0–4,0	30	38	54
7,0–8,0	35	41	84

Таблица 6.  
Показатели качества гранулированного ила  
Table 6.  
Quality indicators of granulated sludge

Показатель качества ила   Sludge quality index	Тип реагента для коррекции рН   pH correction reagent type		
	NaHCO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> OH	NaOH
Плотность гранул ила, кг/дм <sup>3</sup>   Density of sludge granules, kg/dm <sup>3</sup>	0,98 ± 0,03	0,99 ± 0,04	0,98 ± 0,04
Влажность, %   Humidity, %	94,0 ± 1,0	95,0 ± 1,0	95,0 ± 1,5
Содержание минеральных веществ, % от сухих веществ   Mineral content, % of dry matter	17,6 ± 0,6	15,3 ± 0,6	18,6 ± 1,3

Процессы формирования новых и разрушения уже сформировавшихся флокул и гранул являются естественной неотъемлемой частью всех технологий биологической очистки сточных вод. Неравномерность подаваемой подпитки и обусловленная этим неравномерность образующихся потоков отходящих газообразных метаболитов приводят к образованию новых флокул и разрыву сформированных гранул, и потому – увеличению количества взвешенных веществ и фрагментов гранул. Количество мелких взвешенных частиц в биореакторах, где рН корректировался с использованием гидроксида натрия, было в 1,5–2,0 раза больше, чем при использовании гидрокарбоната натрия и гидроксида аммония. Считаем, что этот факт можно считать свидетельством меньшей устойчивости к колебаниям нагрузки

гранулированного ила из анаэробных биореакторов, где коррекция рН ведется с использованием гидроксида натрия.

Плотность гранул ила и влажность не имели значимых различий и составили в среднем 0,94–1,03 кг/дм<sup>3</sup> и 93,0–96,5%. Содержание минеральных веществ в гранулах ила из системы, где коррекция рН велась с использованием гидроксида аммония, значимо меньше, чем из систем, где для коррекции рН использовались реагенты, содержащие катион щелочного металла, и составляет 14,7–15,9 и 17,0–19,9% от сухих веществ соответственно. Этот факт вызвал интерес, поскольку щелочные металлы с подавляющим числом анионов не образуют малорастворимые осадки, и поэтому был выполнен элементный анализ золы (таблица 7).

Таблица 7.

Массовая доля химических элементов в золе, образующейся при сжигании гранулированного активного ила из действующих и использованных в эксперименте анаэробных биореакторов

Table 7.

Mass fraction of chemical elements in ash formed during combustion of granulated activated sludge from operating and experimental anaerobic bioreactors

Химический элемент в составе золы Chemical element in the ash	Массовая доля химических элементов, % от массы золы   Mass fraction of chemical elements, % of ash mass			
	Вещество, постоянно используемое для коррекции рН   Constantly used substance to correct pH			
	NaOH	CaCO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> OH
	Наименование анаэробного биореактора с гранулированным илом Name of the anaerobic bioreactor with granular sludge			
	промышленный биореактор типа E2E (ОАО «Туровский молочный комбинат» industrial bioreactor type E2E ("Turov Dairy Plant"))	промышленный биореактор типа UASB (ОСП ГПЦ «Березинский спиртовой завод» РУП «Минск- Кристалл»)   industrial bioreactor type UASB ("Berezinsky Distillery")	лабораторный биореактор laboratory bioreactor	лабораторный биореактор laboratory bioreactor
O	30,12 ± 0,15	49,85 ± 0,35	37,87 ± 0,20	45,61 ± 0,24
Na	45,02 ± 0,23	0,94 ± 0,91	26,82 ± 0,27	8,63 ± 0,39
K	1,70 ± 0,10	0,54 ± 0,15	1,54 ± 0,10	1,39 ± 0,11
Ca	2,73 ± 0,12	21,63 ± 0,19	5,57 ± 0,19	8,40 ± 0,13
Mg	3,66 ± 0,38	4,21 ± 0,44	3,33 ± 0,44	2,99 ± 0,24
Fe	4,48 ± 0,20	11,03 ± 0,34	3,63 ± 0,34	2,78 ± 0,21
Zn	отс.   absent	0,94 ± 0,80	0,64 ± 0,80	1,28 ± 0,51
Al	5,61 ± 0,31	0,51 ± 0,38	9,68 ± 0,23	13,75 ± 0,20
Si	0,39 ± 0,26	0,70 ± 0,32	4,61 ± 0,24	8,84 ± 0,23
P	1,40 ± 0,25	7,76 ± 0,32	3,88 ± 0,25	6,36 ± 0,26
S	1,39 ± 0,17	1,63 ± 0,26	0,70 ± 0,17	отс.   absent
Cl	3,50 ± 0,10	0,29 ± 0,15	1,75 ± 0,10	отс.   absent

Большая часть ионов металлов из представленных в таблице 7 (кальций, магний, железо, цинк, алюминий) образуют малорастворимые соли с карбонат-, фосфат- и гидроксид-анионами, железо и цинк образуют малорастворимые сульфиды.

Содержание калия для всех систем находилось на уровне 0,5–1,7% масс. и соответствует физиологически нормальной концентрации его в живых клетках. На этом же уровне находится концентрация натрия в зольном остатке ила

из биореактора типа UASB. В системах, где для коррекции pH использовались гидроксид и гидрокарбонат натрия, массовая доля натрия составила 45,0 и 26,8% соответственно, использование карбоната кальция в качестве реагента для коррекции pH приводит к увеличению массовой доли кальция до 21,6%. Повышенное содержание натрия (8,6% масс.) в золе ила из системы, где для коррекции pH использовался гидроксид аммония, может быть объяснено тем, что для лабораторного эксперимента был использован гранулированный ил из промышленного биореактора типа E2E.

В результате анализа преобладающих и сопутствующих элементов в составе золь и образующих с их участием малорастворимых соединений можем сделать предположение, что основу минерального каркаса гранул составляют алюмосиликаты и фосфаты.

В составе минеральных остатков ила изученных систем концентрация алюмосиликатов, оцененная по массе комплексных анионов, содержащих алюминий, кремний и кислород, составляет до 20% масс. и до 38% масс. для лабораторных биореакторов, где для регулирования pH использовались гидрокарбонат натрия и гидроксид аммония соответственно.

Фосфаты кальция, магния, алюминия, цинка и железа малорастворимы, есть указания на образование устойчивых нерастворимых комплексов между железом, кальцием и фосфат-анионом [13]. Если исключить из рассмотрения анаэробный биореактор, где для коррекции pH использовался карбонат кальция, то содержание кальция, магния и железа в зольном остатке гранулированных илов находятся в тесной взаимосвязи с коэффициентами корреляции более 0,999. В [14] авторы показали, что в присутствии этих ионов в среде увеличивается продукция экзопротеинов в процессе гранулообразования.

Произведения растворимости солей (фосфатов, карбонатов) и гидроксидов кальция и магния меньше, чем произведения растворимости солей и гидроксидов железа, алюминия и цинка, поэтому замена одних катионов на вторые термодинамически выгодна, и происходит накопление ионов металлов с большей молекулярной массой. Концентрация фосфатов, оцененная по фосфат-анионам, составляет до 4,2,

23,4, 11,7 и 19,2% масс. для систем, где для регулирования pH использовались гидроксид натрия, карбонат кальция, гидрокарбонат натрия и гидроксид аммония соответственно.

Тем не менее доля натрия в составе продуктов озольнения не соответствует стехиометрическому соотношению элементов в составе малорастворимых соединений, и он, по-видимому, присутствует в относительно свободном виде в равновесии с карбонат- и гидрокарбонат-ионами. Кроме того, удержание в составе гранул алюминия позволяет предположить образование в гранулах алюмонатриевых, алюмокалиевых и алюмоаммонийных квасцов – сульфатов трех- и одновалентных металлов.

### Заключение

Вид реагента для коррекции pH не оказывает влияния на скорость утилизации органических веществ. Наибольшая эффективность очистки, оцененная по снижению ХПК, достигалась при коррекции pH гидрокарбонатом натрия.

Наилучшим вариантом, обеспечивающим мягкое и стабильное поддержание корректного уровня pH, стало использование гидрокарбоната натрия: показатель pH был на уровне 6,9–7,2 для всех вариантов нагрузок по органическим веществам. При использовании гидроксидов аммония и натрия разброс численных значений pH был более значительным: от 8,4–9,2 при низких нагрузках до 6,3–6,4 при высоких нагрузках.

Гранулированный ил из анаэробных биореакторов, где коррекция pH ведется с использованием гидроксида натрия, содержал больше фрагментов гранул, что может стать причиной выноса активной биомассы из биореактора и потому – снижения эффективности его работы.

Тип реагента для коррекции pH оказывает влияние на состав минеральной части ила и обуславливает увеличение доли вносимого катиона в составе золь.

Предпочтительным для коррекции pH в анаэробных биореакторах является гидрокарбонат натрия, поскольку обеспечивает наиболее мягкий вариант поддержания оптимальных значений pH для жизнедеятельности метаногенных бактерий. Использование растворов аммиака и гидроксида натрия можно порекомендовать для применения в средне- и высоконагружаемых системах.

### Литература

- 1 Haandel A., Lettinga G. *Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate*. Chichester, England: Wiley, 1995. 226 p.
- 2 Mills S., Trego A.C., Prevedello M., Vrieze J.D., O'Flaherty V., Lens P.N.L., Collins G. Unifying concepts in methanogenic, aerobic, and anammox sludge granulation // *Environmental Science and Ecotechnology*. 2024. Vol. 17. P. 100310. doi:10.1016/j.ese.2023.100310. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666498423000753> (дата обращения: 20.12.2024).
- 3 Seghezze L., Zeeman G., van Liel J.B., Hamelers H.V.M., Lettinga G. A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors // *Bioresource Technology*. 1998. Vol. 65, Issue 3. P. 175-190. doi:10.1016/S0960-8524(98)00046-7.
- 4 Deublein D., Steinhäuser A. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. 450 p.

- 5 Markevich R.M., Grebenchikova I.A., Rymovskaya M.V. Biotechnological processing of industrial waste. Laboratory practical training. Minsk: BGТУ, 2019. 153 p.
- 6 Polprasert C. Organic Waste Recycling Technology and Management. London: International Water Association (IWA) Publisher, 2007. 538 p.
- 7 Gerardi M.H. The Microbiology of Anaerobic Digesters. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. 188 p.
- 8 Macarie H., Esquive M., Laguna A., Baron O., El Mamouni R., Guiot S.R., Monroy O. Strategy to identify the causes and to solve a sludge granulation problem in methanogenic reactors: application to a full-scale plant treating cheese wastewater // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 25, Issue 22. P. 21318-21331. doi:10.1007/s11356-017-9818-3.
- 9 Liu C., Li H., Zhang Y., Chen Q. Characterization of methanogenic activity during high-solids anaerobic digestion of sewage sludge // Biochemical Engineering Journal. 2016. Vol. 109. P. 96-100. doi:10.1016/j.bej.2016.01.010.
- 10 Yoochatchaval W., Ohashi A., Harada H., Yamaguchi T., Syutsubo K. Characteristics of Granular Sludge in an EGSB Reactor for Treating low Strength Wastewater // International Journal of Environment Resources. 2008. Vol. 2, No. 4. P. 319-328.
- 11 Yu H.-Q., Tay J.-H., Fang H.H.P. The role of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up // Water Research. 2001. Vol. 35, No. 4. P. 1052-1060. doi:10.1016/S0043-1354(00)00345-6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/12095771\\_The\\_role\\_of\\_calcium\\_in\\_sludge\\_granulation\\_during\\_UASB\\_reactor\\_start-up](https://www.researchgate.net/publication/12095771_The_role_of_calcium_in_sludge_granulation_during_UASB_reactor_start-up) (дата обращения: 24.11.2023).
- 12 Rymovskaya M.V., Il'yukevich I.S., Sverdlova A.R. Evaluation of biochemical activity of granulated sludge in the technology of anaerobic treatment of wastewater from milk processing plants // Proceedings of the 87th scientific and technical conference of faculty, research staff and postgraduate students "Technology of organic substances". Minsk: BGТУ, 2023. P. 401-405.
- 13 Klyuchnikov S.O. Vitamin and mineral complexes for children: theory and practice // Pediatrics. Journal named after G.N. Speransky. 2008. No. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vitaminno-mineralnye-kompleksy-dlya-detey-teoriya-i-praktika> (дата обращения: 24.11.2024).
- 14 Kończak B., Miksch K. Influence of calcium, magnesium and iron ions on the molecular mass of exoproteins during biogranulation // Chemical and Process Engineering. 2020. Vol. 41, No. 4. P. 257-266. doi:10.24425/cpe.2020.136011.
- 15 Wang Z., Jiang K., Zhu Y., Liu L., Zou X., Yang X., Xu Y., Zhang J., Chen Y., Gao W., Wang S. Review of the mechanism and control methods of anaerobic granular sludge calcification // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 53. P. 103695. doi: 10.1016/j.jwpe.2023.103695.
- 16 Hamiruddin N.A., Awang N.A., Shahpudin S.N.M., Zaidi N.S. et al. Effects of wastewater type on stability and operating conditions control strategy in relation to the formation of aerobic granular sludge - a review // Water Science and Technology. 2021. Vol. 84. No. 9. P. 2113-2130. doi: 10.2166/wst.2021.415.
- 17 Haaksman V.A., Schouteren M., van Loosdrecht M.C.M., Pronk M. Impact of the anaerobic feeding mode on substrate distribution in aerobic granular sludge // Water Research. 2023. Vol. 233. P. 119803. doi: 10.1016/j.watres.2023.119803.
- 18 Haaksman V.A., van Dijk E.J.H., Al-Zuhairy S., Mulders M. et al. Utilizing anaerobic substrate distribution for growth of aerobic granular sludge in continuous-flow reactors // Water Research. 2024. Vol. 257. P. 121531. doi: 10.1016/j.watres.2024.121531.
- 19 Fazzino F., Frontera P., Malara A., Pedullà A., Calabrò P.S. Effects of carbon-based conductive materials on semi-continuous anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and waste activated sludge // Chemosphere. 2024. Vol. 357. P. 142077. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142077.
- 20 Xu D., Li J., Liu J., Qu X., Ma H. Advances in continuous flow aerobic granular sludge: A review // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 163. P. 27-35. doi: 10.1016/j.psep.2022.05.018.
- 21 Galang M.G.K., Chen J., Cobb K., Zarra T., Ruan R. Reduction of biogenic CO<sub>2</sub> emissions, COD and nutrients in municipal wastewater via mixotrophic co-cultivation of *Chlorella vulgaris* - aerobic-activated sludge consortium // Environmental Technology. 2025. P. 1-15. doi: 10.1080/09593330.2025.2463696.
- 22 Hou Y., Gan C., Chen R., Chen Y., Yuan S., Chen Y. Structural Characteristics of Aerobic Granular Sludge and Factors That Influence Its Stability: A Mini Review // Water. 2021. Vol. 13, No. 19. P. 2726. doi: 10.3390/w13192726.

## References

- 1 Haandel A., Lettinga G. Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate. Chichester, England: Wiley, 1995. 226 p.
- 2 Mills S., Trego A.C., Prevedello M., Vrieze J.D., O'Flaherty V., Lens P.N.L., Collins G. Unifying concepts in methanogenic, aerobic, and anammox sludge granulation // Environmental Science and Ecotechnology. 2024. Vol. 17. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100310>. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666498423000753>. (accessed 20.12.2024).
- 3 Seghezzi L., Zeeman G., van Liel J.B. et al. A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. Bioresource Technology. 1998. vol. 65. no. 3. pp. 175-190. doi:10.1016/S0960-8524(98)00046-7.
- 4 Deublein D., Steinhauser A. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. Germany, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. 450 p.
- 5 Markevich R.M., Grebenchikova I.A., Rymovskaya M.V. Biotechnological processing of industrial waste. Laboratory practical training. Minsk: BSTU, 2019. 153 p. (in Russian).
- 6 Polprasert C. Organic Waste Recycling Technology and Management. London: IWA Publishing, 2007. 538 p.
- 7 Gerardi M.H. The Microbiology of Anaerobic Digesters. Hoboken: Wiley, 2003. 188 p.
- 8 Macarie H., Esquive M., Laguna A. et al. Strategy to identify the causes and to solve a sludge granulation problem in methanogenic reactors. Environmental Science and Pollution Research. 2017. vol. 25, no. 22. pp. 21318-21331. doi:10.1007/s11356-017-9818-3.
- 9 Liu C., Li H., Zhang Y., Chen Q. Characterization of methanogenic activity during high-solids anaerobic digestion of sewage sludge. Biochemical Engineering Journal. 2016. vol. 109. pp. 96-100. doi:10.1016/j.bej.2016.01.010.
- 10 Yoochatchaval W., Ohashi A., Harada H. et al. Characteristics of Granular Sludge in an EGSB Reactor for Treating low Strength Wastewater. International Journal of Environment Resources. 2008. vol. 2. no. 4. pp. 319-328.

11 Han-Qing Yu, Joo-Hwa Tay, Herbert H P Fang The role of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up // *Water Research*. 2001. Vol. 35. № 4. PP. 1052–1060. DOI:10.1016/S0043-1354(00)00345-6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/12095771\\_The\\_role\\_of\\_calcium\\_in\\_sludge\\_granulation\\_during\\_UASB\\_reactor\\_start-up](https://www.researchgate.net/publication/12095771_The_role_of_calcium_in_sludge_granulation_during_UASB_reactor_start-up). (accessed: 24.11.2023).

12 Rymovskaya M.V., Il'yukevich I.S., Sverdlova A.R. Evaluation of biochemical activity of granulated sludge in the technology of anaerobic treatment of wastewater from milk processing plants // *Proceedings of the 87th scientific and technical conf. of faculty, research staff and postgraduate students (with international participation) "Technology of organic substances"*, Minsk, January 31 – February 17, 2023, Belarusian State Technological University, responsible for the publication I.V. Voitov. Minsk : BGTU, 2023. pp. 401–405. (in Russian).

13 Klyuchnikov S.O. Vitamin and mineral complexes for children: theory and practice // *Pediatrics*. Journal named after G.N. Speransky. 2008. № 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vitaminno-mineralnye-kompleksy-dlya-detey-teoriya-i-praktika> (accessed: 24.11.2024). (in Russian).

14 Kończak B., Miksch K. Influence of calcium, magnesium and iron ions on the molecular mass of exoproteins during biogranulation // *Chemical and Process Engineering*. 2020. Vol. 41. № 4. PP. 257–266. DOI: 10.24425/cpe.2020.136011.

15 Wang Z., Jiang K., Zhu Y., Liu L., Zou X., Yang X. et al. Review of the mechanism and control methods of anaerobic granular sludge calcification. *Journal of Water Process Engineering*. 2023. vol. 53. 103695. doi: 10.1016/j.jwpe.2023.103695.

16 Hamiruddin N.A., Awang N.A., Shahpudin S.N.M., Zaidi N.S. et al. Effects of wastewater type on stability and operating conditions control strategy in relation to the formation of aerobic granular sludge – a review. *Water Science and Technology*. 2021. vol. 84. no. 9. pp. 2113–2130. doi: 10.2166/wst.2021.415.

17 Haaksman V.A., Schouteren M., van Loosdrecht M.C.M., Pronk M. Impact of the anaerobic feeding mode on substrate distribution in aerobic granular sludge. *Water Research*. 2023. vol. 233. 119803. doi: 10.1016/j.watres.2023.119803.

18 Haaksman V.A., van Dijk E.J.H., Al-Zuhairy S., Mulders M. et al. Utilizing anaerobic substrate distribution for growth of aerobic granular sludge in continuous-flow reactors. *Water Research*. 2024. vol. 257. 121531. doi: 10.1016/j.watres.2024.121531.

19 Fazzino F., Frontera P., Malara A., Pedullà A., Calabrò P.S. Effects of carbon-based conductive materials on semi-continuous anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and waste activated sludge. *Chemosphere*. 2024. vol. 357. 142077. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142077.

20 Xu D., Li J., Liu J., Qu X., Ma H. Advances in continuous flow aerobic granular sludge: A review. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. vol. 163. pp. 27–35. doi: 10.1016/j.psep.2022.05.018.

21 Galang M.G.K., Chen J., Cobb K., Zarra T., Ruan R. Reduction of biogenic CO<sub>2</sub> emissions, COD and nutrients in municipal wastewater via mixotrophic co-cultivation of *Chlorella vulgaris* – aerobic-activated sludge consortium. *Environmental Technology*. 2025. pp. 1–15. doi: 10.1080/09593330.2025.2463696.

22 Hou Y., Gan C., Chen R., Chen Y., Yuan S., Chen Y. Structural Characteristics of Aerobic Granular Sludge and Factors That Influence Its Stability: A Mini Review. *Water*. 2021. vol. 13. no. 19. 2726. doi: 10.3390/w13192726.

23

#### Сведения об авторах

**Мария В. Рымовская** к.т.н., доцент, кафедра биотехнологии, Белорусский государственный технологический университет, ул. Сverdlova, 13-а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь, rymovskaya\_mv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-4350-7859>

**Раиса М. Маркевич** к.х.н., доцент, кафедра биотехнологии, Белорусский государственный технологический университет, ул. Сverdlova, 13-а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь, marami-bstu@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9238-3568>

**Александра А. Масехнович** ассистент, кафедра биотехнологии, Белорусский государственный технологический университет, ул. Сverdlova, 13-а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь, al.masekhnovich@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8564-5139>

#### Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Information about authors

**Mariya V. Rymovskaya** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, biotechnology department, Belarusian State Technological University, Sverdlova Str., 13-a Minsk, 220006, Republic of Belarus, rymovskaya\_mv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-4350-7859>

**Raisa M. Markevich** Cand. Sci. (Chem.), associate professor, biotechnology department, Belarusian State Technological University, Sverdlova Str., 13-a Minsk, 220006, Republic of Belarus, marami-bstu@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9238-3568>

**Aleksandra A. Masehnovich** assistant, biotechnology department, Belarusian State Technological University, Sverdlova Str., 13-a Minsk, 220006, Republic of Belarus, al.masekhnovich@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8564-5139>

#### Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

<b>Поступила</b> 09/01/2025	<b>После редакции</b> 03/03/2025	<b>Принята в печать</b> 18/03/2025
<b>Received</b> 09/01/2025	<b>Accepted in revised</b> 03/03/2025	<b>Accepted</b> 18/03/2025