

ОДНОИЛОВАЯ СИСТЕМА НИЗКОКИСЛОРОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА

Гульшин И. А., Гогина Е. С.

SINGLE-SLUDGE SYSTEM OF ADVANCED LOW-OXYGEN WASTEWATER TREATMENT WITH NITROGEN COMPOUNDS REMOVAL

Gulshin I. A., Gogina E. S.

Аннотация

Введение. Низкокислородные методы очистки сточных вод обладают существенным потенциалом для дальнейшего развития и снижения общих энергетических затрат на канализационных очистных сооружениях. Основная проблема, возникающая при снижении интенсивности аэрации в аэрационных сооружениях, — это поддержание системы в стабильном состоянии при необходимости окисления органических загрязнений и аммонийного азота. Для ее решения необходимо одновременно с изменением кислородного режима реализовывать ряд дополнительных мероприятий для воздействия на технологические параметры системы. **Методы.** В данной работе выполнено исследование систем, работающих при низких концентрациях растворенного кислорода с одновременной нитрификацией и денитрификацией. Проведено сравнение активного ила, работающего при недостатке кислорода с хорошо аэрируемым нитрифицирующим активным илом. Исследование выполнялось в лабораторных условиях и на полупроизводственной установке на действующих очистных сооружениях. **Результаты.** В ходе эксперимента подтверждено влияние повышенных скоростей потока иловой смеси в циркуляционных сооружениях на состав и характеристики активного ила при пониженных концентрациях растворенного кислорода. Поддержание высоких скоростей и относительно низких удельных нагрузок по органическим загрязнениям оказало стабилизирующий эффект, снизив тем самым риск нитчатого вспухания активного ила. **Заключение.** Технология одновременной нитрификации и денитрификации подразумевает наличие достаточного количества нитрифицирующей и денитрифицирующей биомассы, каждая из которых работает в нехарактерных для нее условиях. В результате работы определены технологические параметры системы, позволяющие стабилизировать активный ил и поддерживать его в нитрифицирующем состоянии.

Ключевые слова: активный ил, нитрификация, денитрификация, анаммокс, низкокислородная очистка.

Abstract

Introduction. Low-oxygen methods of wastewater treatment have significant potential for further development and reduction of the overall energy costs at sewage treatment plants. When the aeration intensity at aeration stations decreases, the main task is to maintain the system in a stable state where it is necessary to oxidize organic pollutants and ammonia nitrogen. To solve it, it is required to implement a number of additional measures to control the operational parameters of the system simultaneously with a change in the oxygen regime. **Methods.** The paper addresses systems operating at low concentrations of dissolved oxygen with simultaneous nitrification and denitrification. The authors compared activated sludge performing well with a lack of oxygen with well-aerated nitrifying activated sludge. The study was carried out in a laboratory and at an experimental plant at existing treatment facilities. **Results.** During the experiment, the influence of increased sludge flow rates in circulation systems on the composition and characteristics of activated sludge at low concentrations of dissolved oxygen was confirmed. Maintenance of high speeds and relatively low specific loads for organic pollutants had a stabilizing effect, and thus reduced the risk of the filamentous swelling of activated sludge. **Conclusion.** The technology of simultaneous nitrification and denitrification implies the presence of nitrifying and denitrifying biomass in a sufficient amount, working under non-standard conditions. As a result of the study, operational parameters of the system were determined that made it possible to stabilize activated sludge and maintain it in a nitrifying state.

Keywords: activated sludge, nitrification, denitrification, anammox, low-oxygen wastewater treatment.

Введение

Несмотря на интенсивное развитие природоохранных технологий в последние десятилетия, антропогенная эвтрофикация и снижение уров-

ня растворенного кислорода в водоемах из-за поступления в них недоочищенных сточных вод остается серьезной проблемой. В Российской Федерации большинство действующих очист-

ных сооружений хозяйственно-бытовых сточных вод было построено в середине прошлого века в соответствии с действующими на тот момент нормативными документами, не предусматривающими необходимость удаления биогенных элементов. При этом до настоящего времени многие из этих сооружений не реконструировались. В то же время довольно остро стоит вопрос об энергоэффективности процессов очистки городских сточных вод. Согласно результатам последних исследований на очистку сточных вод приходится около 22 % общих энергозатрат предприятий водопроводно-канализационного хозяйства, и 80 % из них — это электроэнергия, потребляемая при аэрации активного ила на стадии биологической очистки [1]. Таким образом, одной из актуальных задач исследований в области очистки сточных вод является разработка энергоэффективных, а значит низкоокислородных технологий глубокого удаления биогенных элементов.

Данные технологии основываются на двух принципах: создании специфических условий для осуществления процессов нитрификации и денитрификации при низких концентрациях растворенного кислорода и использовании анаэробных микроорганизмов, способных реализовывать альтернативные процессы при отсутствии растворенного кислорода.

В первом случае наибольшее распространение получили технологии, основанные на процессе одновременной нитрификации и денитрификации (ОНД). В той или иной мере ОНД может возникать в биопленках, аэробных гранулах и во флоккулах активного ила. Механизм процесса основывается на возникновении градиентов концентрации кислорода во внеклеточном матриксе активного ила из-за определенных диффузионных ограничений. При этом внешние слои структурной единицы биомассы насыщены кислородом и обеспечивают нитрификацию автотрофными нитрифицирующими микроорганизмами. Ближе к центру структурной единицы (или к слою загрузки, если это биопленка или прикрепленная биомасса) уровень кислорода снижается, возникают анаэробные и аноксидные микрозоны, наличие которых обеспечивает возникновение процесса гетеротрофной денитрификации. Исследование процессов одновременной нитрификации ведутся учеными разных

стран применительно к сооружениям различных конструкций: в аэротенках [6, 11, 18], в контактных биореакторах различных конструкций [9], в сооружениях циркуляционного типа [13], SBR-реакторах переменного действия [16, 17], в мембранных биореакторах [12].

В Национальном исследовательском Московском государственном строительном университете (НИУ МГСУ) выполнена работа по разработке и исследованию технологии глубокой биологической очистки сточных вод от соединений азота в аэрационных сооружениях циркуляционного типа в низкоокислородных условиях. Аэрационные сооружения циркуляционного типа включают в себя аэрируемые сооружения различных конструкций, самые распространенные из которых — это аэротенки карусельного типа и циркуляционные окислительные каналы. Подобные сооружения активно применяются во всем мире, но в большинстве случаев для удаления азота обеспечиваются зонированными аэрационными схемами, позволяющими реализовывать аэробные и аноксидные макрозоны в объеме сооружения, что влечет за собой повышенные расходы на аэрацию в аэробных зонах. При реализации процесса ОНД в аэрационных сооружениях циркуляционного типа во всем объеме сооружения поддерживается одинаковая низкая концентрация растворенного кислорода. Направленный горизонтальный поток иловой смеси в данных сооружениях обеспечивает смешение и разбавление поступающих сточных вод, что необходимо для равномерного распределения органического субстрата по флоккулам активного ила, обеспечения требуемой нагрузки по органическим загрязнениям, а также повышает α -фактор и коэффициент массопереноса кислорода воздуха из воды в биомассу. Цель исследования заключалась в разработке соответствующей технологии, а значит в подтверждении возможности эффективной нитрификации при низких концентрациях растворенного кислорода в условиях высоких горизонтальных скоростей потока иловой смеси и в выработке проектно-методических рекомендаций для применения технологии на практике. Для решения этих задач, помимо всего прочего, было выполнено комплексное исследование биомассы, работающей в экспериментальных условиях [4].

Методы и материалы

Исследование выполнялось на лабораторных моделях аэрационных сооружений циркуляционного типа, а также на полупроизводственной установке, размещенной на действующих очистных сооружениях. Конструкции и эксплуатационные характеристики установок были описаны ранее [2, 3]. Основными моделируемыми параметрами системы являлись: концентрация растворенного кислорода в различных контрольных точках установок, продолжительность очистки, скорость циркулирующего потока иловой смеси и удельная нагрузка на активный ил по органическим загрязнителям. Эксперимент осуществлялся на модельной жидкости и реальной сточной воде. Модельная жидкость готовилась на основе пептона основного сухого с добавлением фосфатов, ацетатов и хлористого аммония. Концентрации основных загрязняющих веществ модельной жидкости представлены в таблице 1.

Таблица 1
Состав модельной жидкости, используемой в эксперименте

Показатель	Величина показателя		
	минимальная	средняя	максимальная
Взвешенные вещества	44 мг/дм ³	95 мг/дм ³	122 мг/дм ³
БПК ₅	35 мгО ₂ /дм ³	115 мгО ₂ /дм ³	155 мгО ₂ /дм ³
ХПК	52 мгО/дм ³	130 мгО/дм ³	188 мгО/дм ³
Общий азот	25 мг/дм ³	45 мг/дм ³	90 мг/дм ³
Аммоний-ион	18 мг/дм ³	35 мг/дм ³	81 мг/дм ³
Фосфат-ион	2,5 мг/дм ³	4,5 мг/дм ³	12,9 мг/дм ³

Состав модельной жидкости подбирался таким образом, чтобы соответствовать низкоконцентрированным сточным водам, характерным для большинства регионов Российской Федерации. При этом особое внимание уделялось соотношению БПК₅ к аммонийному азоту как одному из основных лимитирующих факторов для технологий денитри-нитрификации.

Полупроизводственный этап эксперимента выполнялся на реальной сточной воде. Отбор воды производился из приемной камеры действующих очистных сооружений, расположенных в Московской области. Перед началом полупроизводственного этапа эксперимента было выполнено фракционирование органических загрязнений и азота, содержащихся в сточной воде. Для анализа состава поступающих сточных вод был выполнен недельный цикл суточных отборов проб воды. Усредненные показатели по дням отбора представлены в табл. 2.

В целом по своему химическому составу сточная вода соответствовала используемой ранее модельной жидкости. Для внесения корректировок при сравнении результатов экспериментов был выполнен респирометрический анализ сточной воды по методу, предложенному Экама [7] с использованием методики Кэппелера. В результате анализа было установлено, что доля легкоокисляемых органических веществ в сточной воде составила 78–80 %, инертных органических веществ (взвешенных и растворенных) — 9–10 %, трудноокисляемых органических веществ — 14–15 %. Отдельно респирометрически был определен денитрификационный потенциал

Таблица 2
Результаты анализов, поступающих в установку сточных вод по суточным отборам в течение недели

Наименование показателя	Единицы измерения	Усредненные результаты СХА по дням					
		1	2	3	4	5	6
Аммоний-ион	мг/дм ³	48,16	44,1	38,9	40,2	43,65	42,1
Нитрит-ион	мг/дм ³	–	–	–	–	–	–
Нитрат-ион	мг/дм ³	–	–	–	–	–	–
Фосфат-ион	мг/дм ³	7,12	8,23	7,88	7,54	8,11	8,64
БПК ₅	мгО ₂ /дм ³	119	106	99	115	108	107
ХПК	мгО/дм ³	146	134	138	152	144	139
Взвешенные вещества	мг/дм ³	144	138	143	140	135	142

сточной воды, характеризующий количество восстанавливаемого азота нитратов на литр сточной воды. Для поступающих сточных вод он оказался равен 35 мг/дм³, что было достаточно для реализации глубокой биологической очистки данной сточной воды от соединений азота.

В ходе исследования выполнялись работы по определению кинетических параметров системы [10] — определению скоростей реакций окисления органических загрязнений и аммонийного азота по зависимости Михаэлиса–Ментен с использованием графиков Лайнувера–Берка, определение скоростей реакций нитрификации и денитрификации *ex situ* в наиболее благоприятных для активного ила условиях. Помимо этого, особое внимание было уделено исследованию свойств активного ила, работающего в экспериментальных условиях.

Результаты и обсуждение

В первую очередь были определены седиментационные свойства активного ила при различных технологических параметрах работы системы. Седиментационные свойства определялись при построении множества седиментационных кривых при пяти различных дозах ила. В качестве стандартной дозы ила рассматривалась концентрация 3,5 г/дм³, для которой также определялся иловый индекс. В результате расчетов определялись зависимости скорости осаждения экспериментального активного ила от дозы ила в системе следующего вида:

$$V_{hs}(a) = V_0 \cdot e^{-r_V \cdot a}, \quad (1)$$

где V_{hs} — скорость осаждения активного ила, м/ч; a — доза активного ила, г/дм³; V_0 — максимальная скорость осаждения, м/ч; r_V — модельный параметр.

Дополнительно оценивалась возможность активного ила к образованию устойчивых флокул в стрессовых условиях при пониженных концентрациях растворенного кислорода, то есть биофлокуляционный потенциал. Он мог быть нарушен при адаптации активного ила к новым условиям эксплуатации, при которой увеличилось число нитчатых бактерий. Данный потенциал измерялся через соотношение концентрации диспергированных и флокулированных взвешенных веществ с использованием лабораторного флокулятора Stuart SW6. Диспергированные взвешен-

ные вещества измерялись в надильной воде после осаждения активного ила в мерном цилиндре в течение 30 минут. Флокулированные взвешенные вещества измерялись после предварительной подготовки активного ила во флокуляторе, а выносимая биомасса измерялась на выходе после вторичного отстойника. Данные испытания позволяли определять причину проблем с выносом активного ила (проблема с биологической системой или конструкцией установки — сооружения).

Оценка видового состава по индикаторным микроорганизмам выполнялась по разработанной методике на просвечивающем оптическом микроскопе. По живой капле оценивалось количество (по девятибалльной шкале) и состояние следующих индикаторных микроорганизмов: *Aspidisca costata*, *Aspidisca sulcate*, отряд *Peritricha*, *Litonotus lamella*, *Philodina*, *Monostyla*, *Notommata*, *Aelosoma*. Отдельно выполнялся контроль развития нитчатых микроорганизмов по известной методике на флуоресцентном микроскопе [5].

Отдельный блок исследований был посвящен изучению структурных свойств флокул активного ила при различных технологических параметрах. Для этого, во-первых, пробы активного ила были проанализированы на растровом электронном микроскопе (РЭМ) FEI Quanta 250 в среде водяного пара, что позволило изучить принцип строения водонасыщенных каналов, отвечающих за передачу растворенного кислорода внутрь флокулы. Во-вторых, были выполнены работы по определению размеров отдельных флокул активного ила при различных технологических условиях. Размеры флокул определялись методом лазерной дифракции на анализаторе FRITCH Analysette 22 с предварительной ультразвуковой пробоподготовкой, рассчитанной таким образом, чтобы не разбивать отдельные флокулы.

Важным оставался вопрос о видовом составе активного ила и его изменении при длительном нахождении в низкокислородных условиях. Методом полимеразной цепной реакции в реальном времени на базе Почвенного института имени В. В. Докучаева был выполнен анализ количественного содержания рибосомальных генов бактерий и архей и их функциональных генов, связанных с нитрификацией и денитрификацией. Данные исследования выполнялись на стандар-

тном наборе оборудования по протоколу, разработанному для исследования образцов почв. Для оценки генов, связанных с процессом денитрификации, были использованы праймеры nirK876, nirK1040 для nirK [8] и cd3af и R3cd для nirS [15]. Для оценки нитрификации использовались праймеры amoA-1F, amoA-2R (для генов бактерий) и Arch-amoAF, Arch-amoAR для архей [14].

Для обеспечения сравнительного анализа исследования выполнялись для проб активного ила при различных экспериментальных условиях, а также для проб контрольного активного ила с действующих очистных сооружений.

Результаты исследования продемонстрировали способность активного ила к адаптации к низкокислородным условиям при высоких скоростях потока иловой смеси. Этому способствовали укрупненные флоккулы активного ила и повышенный коэффициент массопереноса кислорода воздуха. Стабильность системы поддерживалась контролем величины нагрузки по органическим загрязнениям на активный ил (на уровне 0,15 гБПК/г·сут при концентрации растворенного кислорода не менее 0,35 мг/дм³). При повышении нагрузки или снижении концентрации растворенного кислорода система теряла стабильность, и в большинстве случаев происходило нитчатое вспухание. При этом умеренное развитие нитчатых микроорганизмов, в частности типа 0092, способствовало адаптации нитрифицирующего активного ила к низкокислородным условиям. Нитчатые микроорганизмы создавали каркас во внешних слоях флоккул, обеспечивающий наличие водо-воздушных микроканалов. Данные структурные образования видны на микрофотографии на рис. 1.

Микроканалы обеспечили необходимую эффективность нитрификации во внешних слоях флоккул, способствуя повышенному массопереносу кислорода.

Условия работы системы в аэрационных сооружениях циркуляционного типа обеспечили в целом удовлетворительное качество активного ила несмотря на низкие концентрации растворенного кислорода. Индикаторные микроорганизмы, присутствующие в активном иле, характеризовали его как достаточно активный. Отмечено большое количество и высокая активность *Aspidisca costata* на всех стабильных этапах эксперимента,

а также коловраток и инфузорий *Peritricha*. Микрофотографии индикаторных микроорганизмов активного ила представлены на рис. 2.

На полупроизводственном этапе эксперимента на реальной сточной воде снижение концентрации растворенного кислорода не привело к развитию нитчатого вспухания, что является крайне распространенной реакцией системы на нехватку кислорода, однако это в некоторой мере снизило активность индикаторных микроорганизмов.

В то же время исследованный стабильный активный ил обладал высоким биофлокуляционным потенциалом. При повышении нагрузки по органическим загрязнениям при низких концентрациях растворенного кислорода количество взвешенных веществ в надилловой жидкости резко возрастало (эксперимент 1). При обеспечении контролируемой нагрузки качество надилловой воды оставалось удовлетворительным (эксперимент 2). Результаты анализов на лабораторном и полупроизводственном этапе эксперимента представлены в табл. 3.

При этом зависимость скорости осаднения активного ила от дозы активного ила на полупроизводственном этапе эксперимента получилась следующего вида:

$$V_{hs}(a) = 14,529 \cdot e^{-0,385 \cdot a} \quad (2)$$

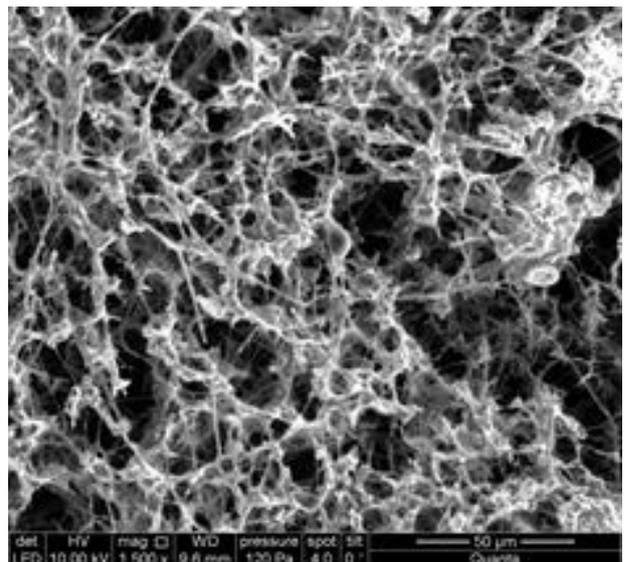


Рис. 1. Микрофотография внешних слоев флоккулы активного ила, полученная на растровом электронном микроскопе в естественной среде

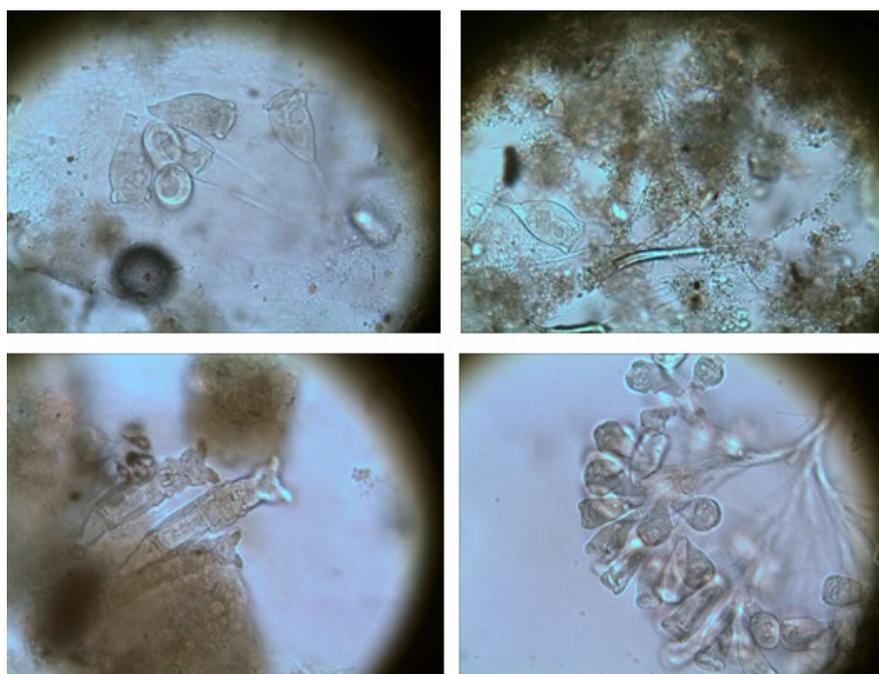


Рис. 2. Микрофотографии индикаторных микроорганизмов активного ила

Таблица 3
Результаты анализа биофлокуляционного потенциала на 2-м (лабораторном) и 3-м (полупроизводственном) этапах исследования

Этап	Эксперимент	DSS, мг/дм ³	FSS, мг/дм ³	ESS, мг/дм ³
2	1	22,1	21,5	23,6
	2	4,9	4,8	5,6
3	1	5,2	4,5	6,1

Стабильность активного ила на полупроизводственном этапе эксперимента с реальной сточной водой оказалась выше стабильности лабораторной системы в виду того, что она не являлась закрытым бионтом.

Гранулометрический анализ активного ила показал наличие крупных флокул активного ила на стабильных этапах исследования, на которых не происходило нитчатого вспухания. Крупные флокулы биомассы критически важны для обеспечения процесса одновременной нитрификации и денитрификации. Их размеры удавалось поддерживать благодаря использованию низкоинтенсивных аэрационных систем, крупнолопастных низкоскоростных мешалок и созданию необходимой турбулентности при повышении горизонтальных скоростей потока иловой смеси.

Результаты гранулометрического анализа приведены в табл. 4.

Как видно, при благоприятных условиях удалось достичь достаточно больших размеров флокул (больше 200 мкм), при которых денитрификация была максимальной. При разработке проектно-методических рекомендаций на основании исследования эмпирически были установлены скорости реакций (нитрификации и денитрификации) от размеров флокул по эквивалентному диаметру.

Для подтверждения того, что процесс ОНД выполняется при неизменном составе биомассы в основном только благодаря эксплуатационным

Таблица 4
Результаты гранулометрического анализа по этапам эксперимента

Этап	Концентрация растворенного кислорода, мг/л	Усредненные размеры флокул по эквивалентному диаметру, мкм
1.2-3	0,3	55
1.2-4	0,5	199
2.1-3	0,5	91
2.1-4	0,35	78
2.2-2	0,5	112
2.2-4	0,5	266
3	0,5	310

условиям, был выполнен комплекс анализов методом полимеразной цепной реакции в реальном времени. Объектами исследования выступили образцы биомассы, отобранные на всех этапах исследования, а также контрольные образцы, взятые с действующих очистных сооружений, работающих по классической схеме одноиловой денитри-нитрификации. Шифры образцов по этапам исследования представлены в табл. 5.

После подготовки и выделения ДНК была проведена работа по определению количест-

ва копий генов бактерий и архей. Копии генов бактериальной 16S рРНК присутствовали в количестве 10^{11} – 10^{12} копий на грамм биомассы активного ила для всех исследованных образцов (рисунок 3). Максимальное количество бактериальных генов было отмечено в образцах 1, 13 и 16–18. Активный ил на данных этапах отличался пониженной зольностью. Измерение количества генов бактериальной 16S рРНК выполнялось для последующей относительной оценки генов, связанных с азотным циклом.

Количество копий генов архей оказалось максимальным в образце 13 ($6,73 \cdot 10^{10}$ копий на грамм субстрата). Наименьшее количество копий генов было обнаружено в образцах 15, 17 и 19 (порядка 10^9 копий на грамм субстрата). В остальных образцах это количество находилось в диапазоне от $1,55$ до $2 \cdot 10^{10}$ копий на грамм субстрата (рисунок 4).

Далее анализировались функциональные гены бактерий и архей, связанные с процессом нитрификации (по гену amoA). В различных образцах количество этого гена серьезно различалось. 24 образец показал максимальное ко-

Таблица 5

Шифры образцов для анализа методом полимеразной цепной реакции в реальном времени

Шифр	Этап исследования
1	2.1-3
13	2.2-4
15	2.2-2
16-18	K1 (контроль)
17	2.1-4
19	K2 (контроль)
24	3

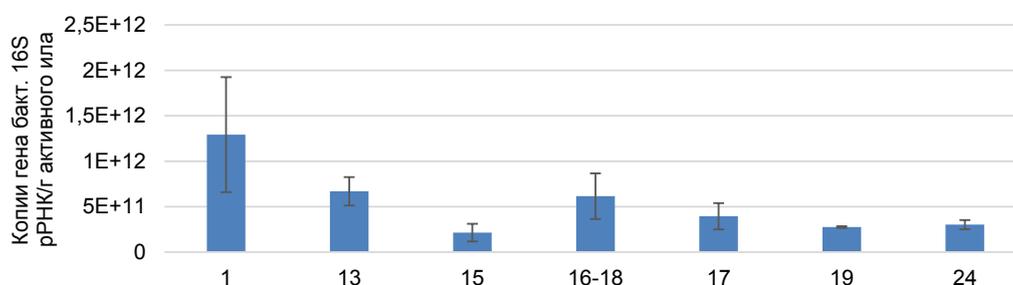


Рис. 3. Количество копий генов бактериальной 16S рРНК в образцах. Усредненное значение для двух повторностей выделения ДНК и двух повторностей ПЦР

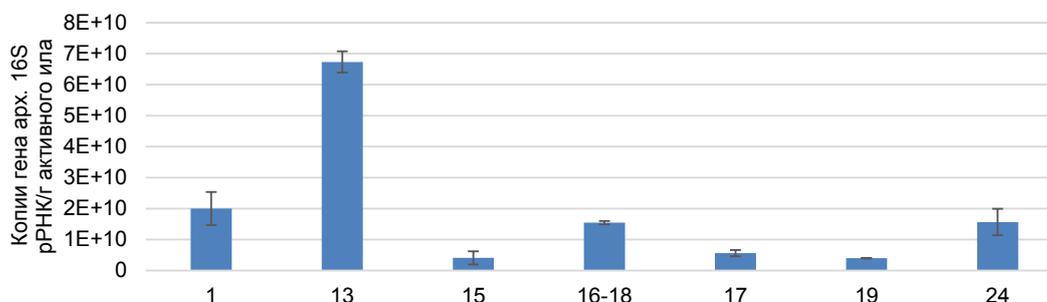


Рис. 4. Количество копий генов архейной 16S рРНК в образцах. Усредненное значение для двух повторностей выделения ДНК и двух повторностей ПЦР

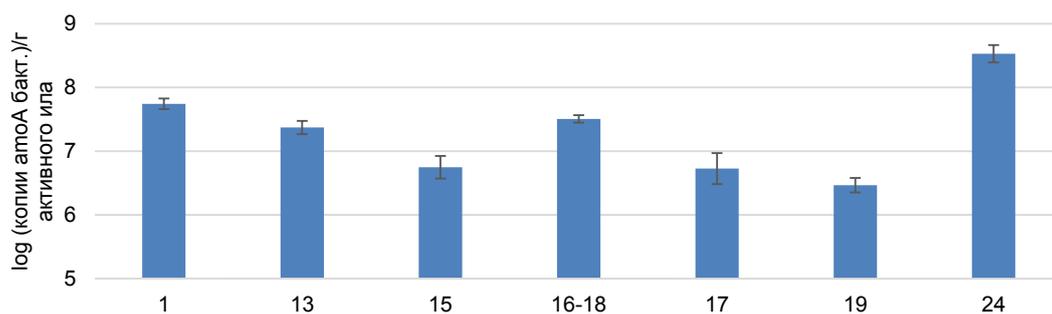


Рис. 5. Количество копий гена бактериального amoA. Усредненное значение для двух повторностей выделения ДНК и двух повторностей ПЦР

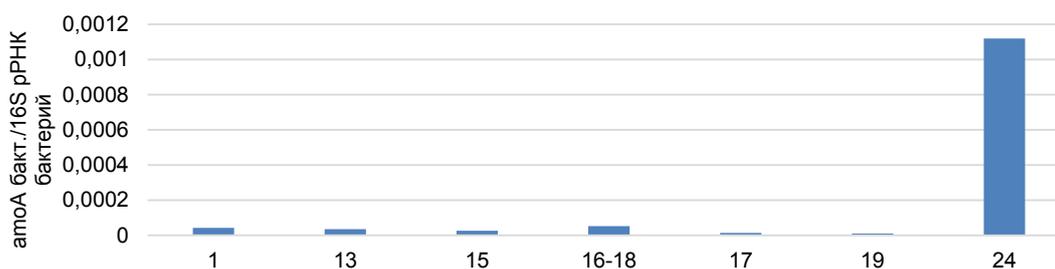


Рис. 6. Соотношение количества копий гена amoA бактерий в образцах к количеству копий гена бактериальной 16S рРНК

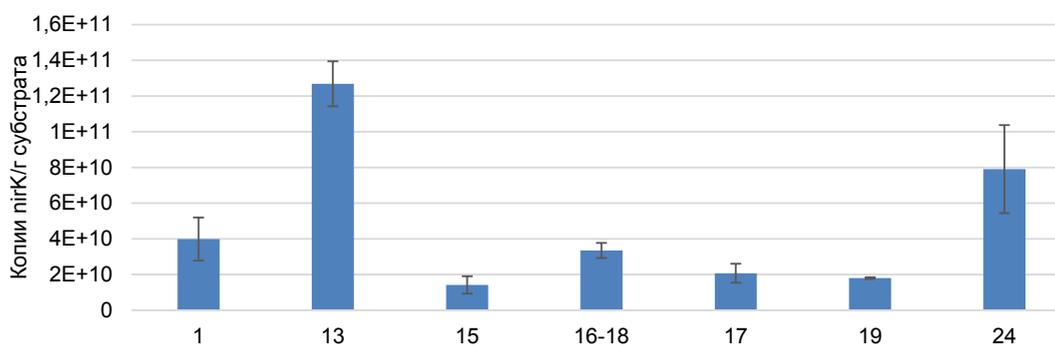


Рис. 7. Количество копий гена бактериального nirK. Усредненное значение для двух повторностей выделения ДНК и двух повторностей ПЦР.

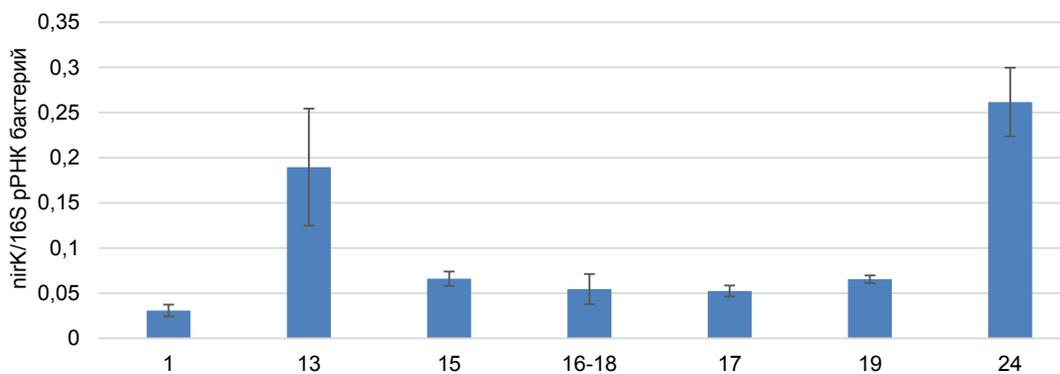


Рис. 8. Соотношение количества копий гена nirK бактерий в образцах к количеству копий гена бактериальной 16S рРНК

личество копий, на уровне $3,38 \cdot 10^8$ копий amoA бактерий на грамм активного ила. Наименьшее количество копий генов содержалось в образцах 15, 17 и 19 (около 106 копий на грамм активного ила), в остальных образцах количество копий находилось в диапазоне от 2,4 до $5,5 \cdot 10^7$ копий на грамм активного ила. Усредненное распределение представлено на рис. 5.

При относительной оценке количества генов, ассоциированных с процессом нитрификации, выявлено наибольшее соотношение между количеством копий рибосомальных генов бактерий и копий гена amoA в образце 24 (рис. 6).

При этом в образце 13 обнаружены гены amoA архей.

После этого был выполнен анализ количества функциональных генов бактерий, связанных с денитрификацией. Количество nirK оказалось наибольшим в образцах 13 и 24, на уровне 10^{11} копий на грамм активного ила (рис. 7). В остальных образцах он находился на уровне $1,8-4 \cdot 10^{10}$ копий на грамм активного ила. Относительное содержание nirK к количеству копий бактерий оказалось наибольшим в образцах 13 и 24 (рис. 8).

В образцах 13 и 24 также было отмечено наибольшее количество копий генов nirS — на уровне $9,1 \cdot 10^9$ и $3,6 \cdot 10^9$ копий на грамм активного ила соответственно. Наименьшее количество генов nirS было определено в образцах 15, 17 и 19 — на уровне от 2 до $5 \cdot 10^8$ копий гена nirS на грамм активного ила. При этом наибольшее относительное количество гена обнаружилось в образцах 13, 24 и 16–18.

По результатам анализа был определен потенциал системы к осуществлению процессов нитрификации и денитрификации. При одновременной нитрификации и денитрификации количество копий функциональных генов было сопоставимо с таким же количеством для контрольного активного ила, работающего по классической схеме денитри-нитрификации. При этом и нитрифицирующие, и денитрифицирующие микроорганизмы работали в нехарактерных для них условиях. Механизм адаптации активного ила к низкокислородным условиям облегчает доступ нитрифицирующей части флокул к растворенному кислороду. При этом денитрификация эффек-

тивно осуществляется внутри структуры флокул без чрезмерного кислородного ингибирования.

Отдельно отмечена роль архей в осуществлении процесса нитрификации. Этапы эксперимента, на которых отмечено наибольшее количество копий генов архей, ассоциированных с нитрификацией, соответствует наибольшим удельным скоростям нитрификации, определенным по результатам лабораторных тестов. Система с высоким содержанием нитрифицирующих архей оказалась более адаптированной к стрессовым условиям при пониженных концентрациях растворенного кислорода.

Заключение

По итогам исследования активного ила, работающего в условиях с одновременной нитрификацией и денитрификацией, были сделаны следующие выводы:

1. Количественно-видовой состав и функциональные характеристики активного ила при низкокислородном режиме эксплуатации в условиях повышенных скоростей потока иловой смеси и низких нагрузок по органике после соответствующего процесса адаптации соответствует активному илу, работающему по классическим схемам денитри-нитрификации.

2. Адаптация активного ила к низкокислородным условиям происходит при контролируемом росте нитчатых бактерий внутри флокул активного ила. Преобладающий вид при этом — тип 0092. Образующаяся структура флокул с плотным центром и водонасыщенными краями повышает эффективность процесса одновременной нитрификации и денитрификации.

3. При повышенных скоростях потока иловой смеси индикаторные микроорганизмы в низкокислородном активном иле (в том числе простейшие) соответствуют нитрифицирующему активному илу и проявляют умеренную активность, что говорит об увеличении массопереноса кислорода воздуха.

4. Максимальная эффективность одновременной нитрификации и денитрификации была достигнута при размерах флокул активного ила в диапазоне от 200 до 250 мкм. Меньшие размеры флокул связаны с большей удельной поверхностью активного ила, а значит, с большей скоростью и эффективностью нитрификации. Увеличение размеров флокул сказывается на возникновении

более стабильных анаэробных и аноксидных микрозон внутри их структуры, что необходимо для обеспечения процесса денитрификации в условиях наличия растворенного кислорода в объеме биореатора.

5. Для флокул активного ила, обладающими оптимальными размерами и структурой для обеспечения процесса одновременной нитрификации и денитрификации, определены зависимости скорости осаждения от дозы ила с учетом взаимовлияния структурных единиц активного ила друг на друга при наличии нитчатых микроорганизмов в низкокислородной среде.

Благодарности

Работа выполнена на оборудовании Головного регионального центра коллективного пользования научным оборудованием и установками (ГР ЦКП НИУ МГСУ).

Литература

1. Березин, С. Е. и Баженов, В. И. (2019). Воздуходувные станции с регулируемыми центробежными компрессорами. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 188 с.
2. Гогина, Е. С. и Гульшин, И. А. (2016). Моделирование энергоэффективного процесса биологической очистки сточных вод в циркуляционном окислительном канале. Водоснабжение и санитарная техника, № 9, сс. 42–48.
3. Гогина, Е. С. и Гульшин, И. А. (2017). Удаление азота в модели циркуляционного окислительного канала при пониженном содержании органики в сточных водах. Водоснабжение и санитарная техника, № 12, сс. 26–33.
4. Гульшин, И. А. (2019). Характеристика активного ила, осуществляющего процесс очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота в аэрационных сооружениях циркуляционного типа при низких концентрациях растворенного кислорода. Инженерный вестник Дона, № 1. [online] Доступно по ссылке: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5681> [Дата обращения 16.07.2019].
5. Жмур, Н. С. (2003). Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 512 с.
6. Chai, H., Xiang, Y., Chen, R., Shao, Z., Gu, L., Li, L. and He, Q. (2019). Enhanced simultaneous nitrification and denitrification in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater: Treatment performance and nitrogen removal pathway. *Bioresource Technology*, Vol. 280, pp. 51–58. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.02.022.
7. Ekama, G. A., Dold, P. L. and Maras, G. V. R. (1986). Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems. *Water Science & Technology*, Vol. 18, Issue 6, pp. 91–114. DOI: 10.2166/wst.1986.0062
8. Hallin, S., Jones, C. M., Schloter, M. and Philippot, L. (2009). Relationship between N-cycling communities and ecosystem functioning in a 50-year-old fertilization experiment. *The ISME Journal*, Vol. 3, Issue 5, pp. 597–605. DOI: 10.1038/ismej.2008.128.
9. Ito, T., Aoi, T., Miyazato, N., Hatamoto, M., Fuchigami, S., Yamaguchi, T. and Watanabe, Y. (2019). Diversity and abundance of denitrifying bacteria in a simultaneously nitrifying and denitrifying rotating biological contactor treating real wastewater at low temperatures. *H₂Open Journal*, Vol. 2, Issue 1, pp. 58–70. DOI: 10.2166/h2oj.2019.021.
10. Kappeler, J. and Gujer, W. (1992). Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modelling. *Water Science & Technology*, Vol. 25, Issue 6, pp. 125–139. DOI: 10.2166/wst.1992.0118.
11. Lei, X., Jia, Y., Chen, Y. and Hu, Y. (2019). Simultaneous nitrification and denitrification without nitrite accumulation by a novel isolated *Ochrobactrum anthropic* LJ81. *Bioresource Technology*, Vol. 272, pp. 442–450. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.10.060.
12. Li, L., Dong, Y., Qian, G., Hu, X. and Ye, L. (2018). Performance and microbial community analysis of bio-electrocoagulation on simultaneous nitrification and denitrification in submerged membrane bioreactor at limited dissolved oxygen. *Bioresource Technology*, Vol. 258, pp. 168–176. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.02.121.
13. Liu, Y., Shi, H., Xia, L., Shi, H., Shen, T., Wang, Z., Wang, G. and Wang, Y. (2010). Study of operational conditions of simultaneous nitrification and denitrification in a Carrousel oxidation ditch for domestic wastewater treatment. *Bioresource Technology*, Vol. 101, Issue 3, pp. 901–906. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.09.015.
14. Margulies, M., Egholm, M., Altman, W. E., Attiya, S., Bader, J. S., Bemben, L. A., Berka, J., Braverman, M. S., Chen, Y.-J., Chen, Z., Dewell, S. B., Du, L., Fierro, J. M., Gomes, X. V., Godwin, B. C., He, W., Helgesen, S., Ho, C. H., Irzyk, G. P., Jando, S. C., Alenquer, M. L. I., Jarvie, T. P., Jirage, K. B., Kim, J.-B., Knight, J. R., Lanza, J. R., Leamon, J. H., Lefkowitz, S. M., Lei, M., Li, J., Lohman, K. L., Lu, H., Makhijani, V. B., McDade, K. E., McKenna, M. P., Myers, E. W., Nickerson, E., Nobile, J. R., Plant, R., Puc, B. P., Ronan, M. T., Roth, G. T., Sarkis, G. J., Simons, J. F., Simpson, J. W., Srinivasan, M., Tartaro, K. R., Tomasz, A., Vogt, K. A., Volkmer, G. A., Wang, S. H., Wang, Y., Weiner, M. P., Yu, P., Begley, R. F. and Rothberg, J. M. (2005). Genome sequencing in microfabricated high-density picolitre reactors. *Nature*, Vol. 437 (7057), pp. 376–380. DOI: 10.1038/nature03959.
15. Michotey, V., Méjean, V. and Bonin, P. (2000). Comparison of methods for quantification of cytochrome *cd₁*-denitrifying bacteria in environmental marine samples. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 66, No. 4, pp. 1564–1571. DOI: 10.1128/aem.66.4.1564-1571.2000.
16. She, Z., Wu, L., Wang, Q., Gao, M., Jin, C., Zhao, Y., Zhao, L. and Guo, L. (2018). Salinity effect on simultaneous nitrification and denitrification, microbial characteristics in a hybrid sequencing batch biofilm reactor. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, Vol. 41, Issue 1, pp. 65–75. DOI: 10.1007/s00449-017-1844-5.
17. Yan, L., Liu, S., Liu, Q., Zhang, M., Liu, Y., Wen, Y., Chen, Z., Zhang, Y. and Yang, Q. (2019). Improved performance of simultaneous nitrification and denitrification via nitrite in an oxygen-limited SBR by alternating the DO. *Bioresource Technology*, Vol. 275, pp. 153–162. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.12.054.
18. Zhang, P. and Qi, Z. (2007). Simultaneous nitrification and denitrification in activated sludge system under low oxygen concentration. *Frontiers of Environmental Science &*

Engineering in China, Vol. 1, Issue 1, pp. 49–52. DOI: 10.1007/s11783-007-0009-1.

References

- Berezin, S. E. and Bazgenov, V. I. (2019). Blower stations with adjustable centrifugal compressors. Simferopol: IT ARIAL, 188 p.
- Gogina, E. S. and Gul'shin, I. A. (2016). Simulation of energy efficient biological wastewater treatment process in a circulation oxidation ditch. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 9, pp. 42–48.
- Gogina, E. S. and Gul'shin, I. A. (2017). Nitrogen removal in a circulation oxidation ditch model under the conditions of lowered concentration of organics in wastewater. *Water Supply and Sanitary Technique*, No 12, pp. 26–33.
- Gulshin, I. A. (2019). Methodological guide to hydrobiological control of filamentous microorganisms of activated sludge. *Engineering Journal of Don*, No 1. [online] Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5681> [Date accessed 16.07.2019].
- Jmour, N. S. (2003). Technological and biochemical processes of waste water treatment on treatment plants with aerotanks. Moscow: AKVAROS, 512 p.
- Chai, H., Xiang, Y., Chen, R., Shao, Z., Gu, L., Li, L. and He, Q. (2019). Enhanced simultaneous nitrification and denitrification in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater: Treatment performance and nitrogen removal pathway. *Bioresource Technology*, Vol. 280, pp. 51–58. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.02.022.
- Ekama, G. A., Dold, P. L. and Maras, G. V. R. (1986). Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems. *Water Science & Technology*, Vol. 18, Issue 6, pp. 91–114. DOI: 10.2166/wst.1986.0062.
- Hallin, S., Jones, C. M., Schloter, M. and Philippot, L. (2009). Relationship between N-cycling communities and ecosystem functioning in a 50-year-old fertilization experiment. *The ISME Journal*, Vol. 3, Issue 5, 597–605. DOI: 10.1038/ismej.2008.128.
- Ito, T., Aoi, T., Miyazato, N., Hatamoto, M., Fuchigami, S., Yamaguchi, T. and Watanabe, Y. (2019). Diversity and abundance of denitrifying bacteria in a simultaneously nitrifying and denitrifying rotating biological contactor treating real wastewater at low temperatures. *H₂Open Journal*, Vol. 2, Issue 1, pp. 58–70. DOI: 10.2166/h2oj.2019.021.
- Kappeler, J. and Gujer, W. (1992). Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modelling. *Water Science & Technology*, Vol. 25, Issue 6, pp. 125–139. DOI: 10.2166/wst.1992.0118.
- Lei, X., Jia, Y., Chen, Y. and Hu, Y. (2019). Simultaneous nitrification and denitrification without nitrite accumulation by a novel isolated *Ochrobactrum anthropic* LJ81. *Bioresource Technology*, Vol. 272, pp. 442–450. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.10.060.
- Li, L., Dong, Y., Qian, G., Hu, X. and Ye, L. (2018). Performance and microbial community analysis of bio-electrocoagulation on simultaneous nitrification and denitrification in submerged membrane bioreactor at limited dissolved oxygen. *Bioresource Technology*, Vol. 258, pp. 168–176. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.02.121.
- Liu, Y, Shi, H., Xia, L., Shi, H., Shen, T., Wang, Z., Wang, G. and Wang, Y. (2010). Study of operational conditions of simultaneous nitrification and denitrification in a Carrousel oxidation ditch for domestic wastewater treatment. *Bioresource Technology*, Vol. 101, Issue 3, pp. 901–906. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.09.015.
- Margulies, M., Egholm, M., Altman, W. E., Attiya, S., Bader, J. S., Bemben, L. A., Berka, J., Braverman, M. S., Chen, Y.-J., Chen, Z., Dewell, S. B., Du, L., Fierro, J. M., Gomes, X. V., Godwin, B. C., He, W., Helgesen, S., Ho, C. H., Irzyk, G. P., Jando, S. C., Alenquer, M. L. I., Jarvie, T. P., Jirage, K. B., Kim, J.-B., Knight, J. R., Lanza, J. R., Leamon, J. H., Lefkowitz, S. M., Lei, M., Li, J., Lohman, K. L., Lu, H., Makhijani, V. B., McDade, K. E., McKenna, M. P., Myers, E. W., Nickerson, E., Nobile, J. R., Plant, R., Puc, B. P., Ronan, M. T., Roth, G. T., Sarkis, G. J., Simons, J. F., Simpson, J. W., Srinivasan, M., Tartaro, K. R., Tomasz, A., Vogt, K. A., Volkmer, G. A., Wang, S. H., Wang, Y., Weiner, M. P., Yu, P., Begley, R. F. and Rothberg, J. M. (2005). Genome sequencing in microfabricated high-density picolitre reactors. *Nature*, Vol. 437 (7057), pp. 376–380. DOI: 10.1038/nature03959.
- Michotey, V., Méjean, V. and Bonin, P. (2000). Comparison of methods for quantification of cytochrome *cd1*-denitrifying bacteria in environmental marine samples. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 66, No. 4, pp. 1564–1571. DOI: 10.1128/aem.66.4.1564-1571.2000.
- She, Z., Wu, L., Wang, Q., Gao, M., Jin, C., Zhao, Y., Zhao, L. and Guo, L. (2018). Salinity effect on simultaneous nitrification and denitrification, microbial characteristics in a hybrid sequencing batch biofilm reactor. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, Vol. 41, Issue 1, pp. 65–75. DOI: 10.1007/s00449-017-1844-5.
- Yan, L., Liu, S., Liu, Q., Zhang, M., Liu, Y., Wen, Y., Chen, Z., Zhang, Y. and Yang, Q. (2019). Improved performance of simultaneous nitrification and denitrification via nitrite in an oxygen-limited SBR by alternating the DO. *Bioresource Technology*, Vol. 275, pp. 153–162. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.12.054.
- Zhang, P. and Qi, Z. (2007). Simultaneous nitrification and denitrification in activated sludge system under low oxygen concentration. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, Vol. 1, Issue 1, pp. 49–52. DOI: 10.1007/s11783-007-0009-1.

Авторы

Гульшин Игорь Алексеевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
E-mail: gulshinIA@mgsu.ru

Гогина Елена Сергеевна, канд. техн. наук, доцент

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
E-mail: goginaES@mgsu.ru

Authors

Gulshin Igor Alekseevich

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
E-mail: gulshinIA@mgsu.ru

Gogina Elena Sergeevna, PhD in Engineering, Associate Professor

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
E-mail: goginaES@mgsu.ru