

Е. С. ГОГИНА
И. А. ГУЛЬШИН
Е. В. СПАСИБО

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СООРУЖЕНИИ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА

EFFICIENCY OF NUTRIENT REMOVAL IN AN OXIDATION DITCHES

Изменения в законодательстве, относящиеся к сбросу очищенной сточной воды, приводят к необходимости совершенствования методов ее очистки. В работе представлены результаты эксперимента, проведенного на лабораторной модели циркуляционного окислительного канала, с целью определения возможности проведения глубокой биологической очистки сточных вод в данном сооружении. Сделан упор на энергоэффективность технологии ввиду тенденции снижения эксплуатационных затрат на станциях биологической очистки. По результатам эксперимента сделаны выводы, на основании которых планируется выполнение дальнейших исследований.

Ключевые слова: очистка сточных вод, активный ил, циркуляционный окислительный канал

Сегодня, наряду с интенсификацией работы технологических схем канализационных очистных сооружений (КОС), стоит задача повышения энергоэффективности и сокращения затрат при эксплуатации КОС. Одним из важных элементов при реализации поставленных задач является биологическая ступень очистки сточных вод, в частности удаление биогенных элементов, повышенное содержание которых на выпуске в водоем приводит к его эвтрофикации. Эффективное удаление азота и фосфора осуществляется в основном в сооружениях аэрационного типа, в большинстве случаев в аэротенках, на которые приходится основное энергопотребление КОС, связанное с работой систем аэрации, а также перемешивающих устройств [1].

В конце XX в. произошло ужесточение нормативов концентраций загрязнений при сбросе сточных вод в водоем, в частности по биогенным элементам (соединениям азота и фосфора), в результате многие действующие сооружения нуждаются в реконструкции – изменении технологии очистки. Как известно, классический аэротенк не позволяет получить положительный результат по удалению биогенных элементов из-за отсутствия предусмотренных для этого технологических процессов [2].

Changes in legislation related to the discharge of treated wastewater lead to the need to improve the methods of its treatment. This paper presents the results of an experiment conducted on a laboratory model of an oxidation ditches in order to determine the possibility of deep biological wastewater treatment in this facility. Emphasis has been placed on the energy efficiency of the technology, in view of the trend towards lower operating costs at biological treatment plants. Based on the results of the experiment, conclusions were drawn, on the basis of which further research is planned.

Keywords: wastewater treatment, activated sludge, oxidation ditches

В настоящее время качество очищенной воды в РФ регламентируется следующими документами: Приказом Минсельхоза № 552 от 13.12.2016 и Постановлением Правительства РФ № 1430 от 15.09.2020.

Согласно ИТС-10-2019, разработаны схемы (наилучшие доступные технологии (НДТ)), позволяющие добиться нормативных показателей по сбросу очищенной воды по биогенным и другим загрязнениям.

Глубокое удаление азота и фосфора достигается путем создания в аэрационных сооружениях зон с различными концентрациями кислорода.

В настоящее время в мире широко применяются циркуляционные окислительные каналы (ЦОК), как перспективное решение для снижения энергозатрат, капитальных затрат на очистку сточных вод [3].

Циркуляционный окислительный канал является одним из самых ранних аэрационных сооружений биологической очистки сточных вод, упоминающийся еще в начале XX столетия. Сооружение обеспечивает биохимическое окисление загрязняющих веществ и минерализацию активного ила, без необходимости первичного отстаивания сточных вод, что значительно упрощает технологическую схему КОС. В то же время конструктивные особенности

ЦОК позволяют значительно снижать негативное воздействие от залповых сбросов сточных вод и высокой суточной неравномерности, предотвращая нарушение стабильности системы и обеспечивая равномерное качество очистки сточных вод. При этом эксплуатация ЦОК во многих случаях не требует высокой квалификации операторов, что позволяет применять данные сооружения в отдаленных малых поселениях, рабочих поселках, закрытых предприятиях и в прочих местах, где возможны определенные трудности с подбором требуемого персонала.

Классический циркуляционный окислительный канал представляет собой замкнутый канал, с направленным потоком, круглой, овальной или подковообразной формы, что позволяет создать повышенную внутреннюю рециркуляцию иловой смеси [4].

Изначально внутренний циркуляционный поток создавался системами поверхностной аэрации. Подобные системы имеют ряд эксплуатационных недостатков, в первую очередь связанных с высокой неравномерностью распределения растворенного кислорода в сооружении, хотя и отличаются крайней простотой в обслуживании и эксплуатации по сравнению с системами пневматической аэрации. При этом первые сооружения ЦОК работали исключительно в режиме продленной аэрации с продолжительностью пребывания в них сточных вод до 10–15 сут. Работая практически без участия операторов и обслуживающего персонала подобные ЦОК позволяли достигать действующих на тот момент нормативов по качеству сточной воды и, кроме того, обеспечивая некоторую стабилизацию осадка и активного ила. Большая площадь ЦОК в какой-то мере компенсировалась отсутствием первичных отстойников и усреднителей на КОС. Ужесточение нормативных требований к степени очистки сточных вод выявило ряд недостатков конструкций ЦОК подобного типа.

Для успешного удаления соединений азота по классической двухзонной схеме необходимо поддержание определенных кислородных условий для реализации процессов нитрификации и денитрификации, что обычно успешно реализуется либо в сооружениях проточного типа (коридорные аэротенки), либо в сооружениях циклического действия (SBR).

В циркуляционном окислительном канале, в условиях замкнутого потока с высокой горизонтальной скоростью, создание отдельных вырванных кислородных зон по длине сооружения довольно затруднительно.

В случае с ЦОК неоднократно было выявлено, что довольно сложно установить баланс между минимальной необходимой скоростью

потока и требуемыми аноксидными условиями [6, 7]. В то же время расчеты, выполненные С. Алайя, показывают, что при неравномерных и высоких нагрузках по органическим загрязнениям значительно снижаются объемы аэробных зон и в большей части сооружения возникает дефицит кислорода [8].

Современные системы автоматизации позволяют в некоторой степени преодолеть недостатки устройств пневматической аэрации путем использования пневматических систем совместно с независимыми от них погружными мешалками, предназначенными для перемешивания потоков жидкости и создающих устойчивый поток иловой смеси. Но комбинация аэраторов и погружной мешалки не может разделить кислородные зоны в сооружениях циркуляционного типа должным образом. Для создания аноксидных и аэробных макрозон была предложена глубокая оптимизация градиентного распределения концентрации растворенного кислорода по длине сооружений за счет активности биомассы и расчета скорости потока [9–11].

Риттманом и Лангеландом в конце XX в. были изложены основные механизмы одновременной нитрификации и денитрификации (ОНД), возникающей в ЦОК. Особенностью является то, что протекание реакций нитри-денитрификации происходит в одном и том же реакторе в одинаковых условиях за счет градиента концентрации растворенного кислорода внутри флокул активного ила [12]. В рамках поиска энергоэффективных решений для биологической очистки сточных вод в НИУ МГСУ было проведено исследование процесса ОНД в ЦОК. В результате была подтверждена эффективность ОНД в качестве альтернативы созданию отдельных кислородных макрозон при концентрациях кислорода в диапазоне 0,4–0,6 мг/л, также выявлены максимальные скорости нитри-денитрификации. Немаловажным стало определение необходимости адаптации биомассы к условиям с низким содержанием кислорода [13]. Исследования показали, что, несмотря на достижение нормативных показателей качества очистки сточных вод при сниженных эксплуатационных затратах, системы ОНД в ЦОК с низким содержанием кислорода обладают повышенным риском нарушения стабильности, особенно в части нитчатого вспухания активного ила. Для решения данной проблемы было решено провести дополнительное исследование, направленное на совмещение ОНД с гранулированием активного ила непосредственно в ЦОК. Для селекции флокул активного ила по размерам в конструкции ЦОК был предусмотрен встроенный вторичный отстойник. Ранее встраиваемые в ЦОК вторич-

ные отстойники рассматривались в основном как способ снижения занимаемых сооружениями площадей [14,15]. Продолжение исследование было проведено на базе научно-исследовательской лаборатории «Технология очистки природных и сточных вод» НИИСФ РААСН.

В рамках данного исследования представлена конструкция ЦОК с условным выделением аноксидных и аэробных макрозон. Благодаря созданию условий для грануляции активного ила оказалась возможной денитрификация внутри флокул активного ила при повышенном содержании растворенного кислорода в зонах ЦОК.

Материалы и методы

В качестве сточной воды использовалась модельная жидкость на основе пептона основного и растворов азото- и фосфорсодержащих солей (хлорид аммония, ацетат кальция, фосфат калия), сопоставимая по своему химическому составу со сточной водой малых населенных пунктов Российской Федерации. Химический состав рассматриваемой модельной жидкости представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав модельной жидкости

Показатель	Значение, мг/л
NH_4^+	39,6–49,7
БПК_5	118–144
Взвеш.вещества	121–135
PO_4^{3-}	13,1–14,5

Для проведения химического анализа основных показателей использовалось следующее лабораторное оборудование: спектрофотометр Nach Lange DR 3900 (исследуемый параметр – аммоний, фосфат, нитрит и нитрат), WTW OxiTop (исследуемый параметр – БПК₅), Metter Toledo SevenGoPro (исследуемый параметр – рН, кислород), взвешенные вещества контролировались стандартными методами.

Достаточно протяжённые коридоры исследуемой модели ЦОК позволили создать градиент растворенного кислорода по длине. Общий объем установки составлял 144 л. Аэрация ЦОК обеспечивалась мелкопузырчатými аэраторами, расположенными в точке после отвода воды на вторичный отстойник. Кольцевое движение потока жидкости обеспечивалось погружными мешалками с регулируемой частотой вращения. Подача исходной модельной жидкости осуществлялась насосами-дозаторами из емкостей.

Согласно исследованиям [16,17], эффективность ОНД резко возрастает, когда размер флокул активного ила превышает 110 мкм, что связано с более устойчивыми бескислородными микрозонами во флокулах. Поэтому для интенсификации процесса ОНД в исследуемой модели ЦОК был размещен вторичный отстойник, обеспечивающий отделение активного ила и отвод очищенной сточной воды. Конструкция отстойника обеспечивала задержание в ЦОК крупных флокул активного ила и отвод мелких, что необходимо для поддержания процесса аэробной грануляции. На размер флокул и грануляцию также влияло отсутствие механического воздействия на них со стороны перекачивающего насосного оборудования рециркуляции. Для проверки эффективности работы встроенного вторичного отстойника был проведен сравнительный анализ распределения флокул по размерам методом лазерной дифракции. Средние размеры флокул по эквивалентному диаметру составили 410 мкм. Лабораторная модель ЦОК представлена на рис. 1.

По длине коридоров ЦОК создавался градиент растворенного кислорода по направлению движения иловой смеси, что создавало аноксидные и аэробные зоны по длине установки. При этом в целом в системе поддерживался режим с низким содержанием кислорода для возможности осуществления ОНД. Первая кислородная зона располагалась в месте подачи воздуха, вторая – в месте отвода очищенных сточных вод. Было изучено два кислородных режима для данной установки:

- кислородный режим 1. Первая зона – 2,5 мг/дм³, вторая зона – 1,3 мг/дм³, средняя концентрация – 1,9 мг/дм³;
- кислородный режим 2. Первая зона – 1,9 мг/дм³, вторая зона – 0,15 мг/дм³, средняя концентрация – 1,03 мг/дм³.

Распределение растворенного кислорода по зонам осуществлялось путем регулирования интенсивности аэрации и скорости потока. Скорость потока, кроме того, влияла на значение степени внутренней рециркуляции. Скорость потока и степень внутренней рециркуляции в зависимости от кислородных режимов показаны в табл. 2.

Результаты

В ходе эксперимента были проведены количественные химические анализы, которые описывают степень очистки сточной воды в исследуемой установке. Отбор проб производился с определенной частотой в двух точках: 1 – вход и 2 – выход.

Усредненная эффективность работы системы представлена в табл. 3.

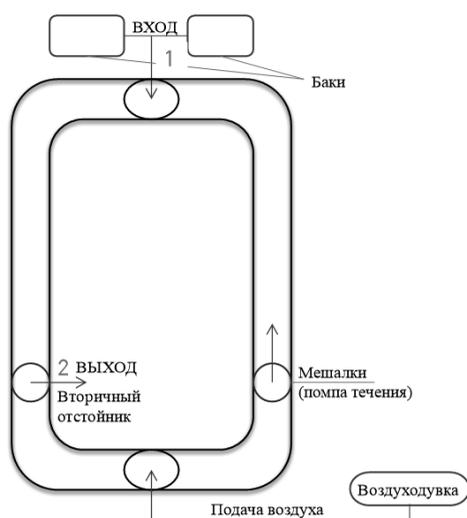


Рис. 1. Схема и изображение лабораторной установки (точки отбора проб отмечены красным цветом)

Таблица 2

Распределение технологических параметров работы установки по режимам на третьем этапе экспериментального исследования

Режим	Средняя концентрация растворенного кислорода, мг/дм ³	Скорость течения иловой смеси, м/с	Степень внутренней рециркуляции, %
1	1,90	0,2	250
2	1,03	0,25	350

Таблица 3

Усредненные показатели работы установки

Режим	Растворенный кислород (средн.), O ₂ мг/дм ³	Точка отбора	Доза активного ила, г/дм ³	БПК ₅ , мгO ₂ /дм ³	NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³
1	1,90	ВХОД	1,113	144	39,56	–	–	14,5
		ВЫХОД		5,2	0,46	0,07	21,2	10,1
2	1,03	ВХОД	1,471	115	49,66	–	–	13,5
		ВЫХОД		3,1	0,66	0,09	11,2	8,3

Результаты санитарно-химических анализов по отдельным пробам представлены в табл. 4, 5.

Точка (1) характеризует вход – поступающую модельную жидкость, соответствующую очищаемой сточной воде.

Точка (2) характеризует очищенную сточную воду на выходе. Отдельно измерялась доза активного ила в биореакторе. В целом при обеспечении необходимых кислородных условий, поддержания требуемой нагрузки на активный ил и гидродинамического режима работы сооруже-

жения можно достичь качества очистки сточных вод, удовлетворяющего современным требованиям законодательства Российской Федерации.

Данное исследование нацелено на изучение работы циркуляционного окислительного канала с зонированными кислородными макрозонами, расположенными по длине установки. Было изучено два технологических режима работы установки, отличающихся кислородными условиями работы и степенью внутренней рециркуляции. Наличие аэробной зоны повысило стабильность

Таблица 4

Результаты анализов точки (1)

Анализ	Режим	БПК ₅ , мгО ₂ / дм ³	NH ₄ , мг/ дм ³	NO ₂ , мг/ дм ³	NO ₃ , мг/ дм ³	PO ₄ , мг/ дм ³	Взвешенные вещества, мг/ дм ³
1	1	156	44,51	–	–	15,1	139,88
2		138	39,82	–	–	14,9	141,25
3		146	38,73	–	–	15,1	145,26
4		149	46,12	–	–	14,8	124,33
5		151	37,56	–	–	13,2	128,56
6	2	126	56,23	–	–	14,8	128,12
7		114	47,85	–	–	14,1	131,54
8		105	48,55	–	–	13,8	115,48
9		111	49,62	–	–	12,8	119,23
10		106	52,31	–	–	12,3	129,22

Таблица 5

Результаты анализов точки (2)

Анализ	Режим	БПК ₅ , мгО ₂ / дм ³	NH ₄ , мг/ дм ³	NO ₂ , мг/ дм ³	NO ₃ , мг/ дм ³	PO ₄ , мг/ дм ³	Взвешенные вещества, мг/ дм ³
1	1	6,4	0,65	0,09	23,5	10,3	7,81
2		4,1	0,32	0,12	19,5	10,5	5,23
3		4,5	0,59	0,08	24,6	12,4	2,16
4		5,8	0,62	0,04	20,8	10,3	2,59
5		5,9	0,37	0,12	17,7	8,3	4,77
6	2	2,6	0,79	0,07	8,4	8,8	2,69
7		2,4	0,66	0,08	10,4	8,2	3,25
8		2,6	0,62	0,09	10,8	7,8	2,36
9		2,3	0,51	0,04	11,1	7,9	1,96
10		2,4	0,39	0,08	14,9	8,6	3,58

системы, нитчатого вспухания обнаружено не было. В целом лабораторный реактор показал достаточную эффективность при очистке сточных вод от органических соединений и азота. Эффективность очистки представлена на рис. 2.

Одной из задач исследования являлось определение параметров кинетики ферментативной активной ила. Определялись скорости окисления органических загрязнений (по БПК₅) и нитрификации. Определение было основано на построении графиков обратных величин (Лайнувера – Берка) с дальнейшим определением констант уравнения Михаэлиса – Ментен (максимальной скорости реакции и константы Михаэлиса). Полученные значения для скоростей окисления органических загрязнений и нитрификации показаны в табл. 6.

Полученные таким образом зависимости Михаэлиса-Ментен визуализированы в виде графических зависимостей на рис. 3 и 4.

Таблица 6

Константы Михаэлиса-Ментена для скорости окисления органики

Режим	Окисление органики		Нитрификация	
	V _{max}	K _m	V _{max}	K _m
1	33,90	8,98	4,22	0,02
2	27,17	6,29	4,44	0,04

Сведения об эффективности очистки и минимальных концентрациях загрязнений в очищенной воде представлены в табл. 7.

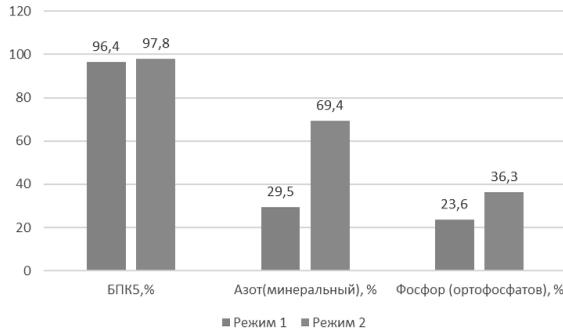


Рис. 2. Эффективность очистки при различных кислородных режимах

Уравнения скоростей реакций окисления органических загрязнений и нитрификации, построенные на основании констант Михаэлиса-Ментена, представлены в табл. 8.

В ходе эксперимента изучена лабораторная модель циркуляционного окислительного канала с выраженными кислородными макронеонами, выявлена эффективность очистки по нескольким показателям, а также установлены значения скоростей реакций нитрификации и окисления органических загрязнений для двух исследуемых режимов лабораторной установки, моделирующей циркуляционный окислительный канал.

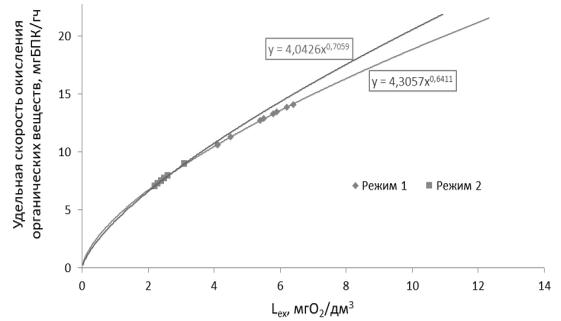


Рис. 3. Зависимости удельных скоростей окисления органических веществ от величины БПК₅ в очищенной сточной воде

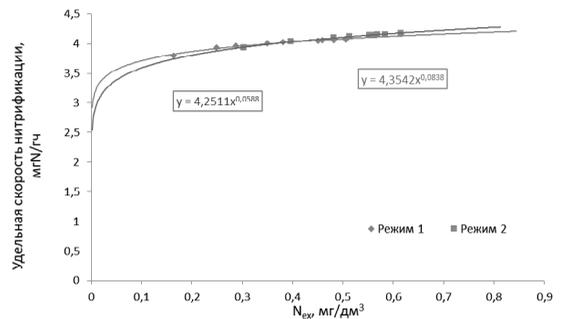


Рис. 4. Зависимости удельных скоростей нитрификации от остаточных концентраций азота аммонийного в очищенной сточной воде

Таблица 7

Эффективность очистки воды по этапам

Режим	БПК		Аммоний-ион	Нитриты	Нитраты	Минеральный азот	Фосфаты	
	Эффект, %	Минимальная концентрация, мг/дм ³		Эффект, %	Эффект, %	Эффект, %	Минимальная концентрация, мг/дм ³	
1	96,4	4,1	0,21	0,02	17,7	29,5	23,6	8,3
2	97,8	2,2	0,39	0,04	8,4	69,4	36,3	7,8

Таблица 8

Скорости реакций окисления органических загрязнений и нитрификации

Режим	Удельная скорость окисления органических загрязнений		Удельная скорость нитрификации	
	моно	степенная	моно	степенная
1	$v_{3-1} = \frac{33,90 \cdot L_{ex}}{8,98 + L_{ex}}$	$v_{3-1} = 4,3057L_{ex}^{0,6411}$	$v_{3-1} = \frac{4,22 \cdot N_{ex}}{0,02 + N_{ex}}$	$v_{3-1} = 4,2511N_{ex}^{0,0588}$
2	$v_{3-2} = \frac{27,17 \cdot L_{ex}}{6,29 + L_{ex}}$	$v_{3-2} = 4,0426L_{ex}^{0,706}$	$v_{3-2} = \frac{4,44 \cdot N_{ex}}{0,04 + N_{ex}}$	$v_{3-2} = 4,3542N_{ex}^{0,0838}$

Выводы. По результатам эксперимента в циркуляционном окислительном канале при режиме 2 на модельной сточной воде получены показатели очищенной воды, удовлетворяющие действующим нормативным требованиям. Показано успешное применение низкокислородного режима в ЦОК с образованием флокул активного ила, как в случае эксплуатации сооружения на реальных очистных сооружениях в режиме энергоэффективности.

Глубокое удаление фосфора в циркуляционных окислительных каналах без включения в схему предварительной анаэробной обработки трудноосуществимо. К тому же успешный процесс биологического удаления фосфора зависит от некоторых факторов, например таких, как доступность органического вещества. Для реализации процесса дефосфотации на сооружениях очистки малых и средних расходов сточных вод рекомендуется применять физико-химические методы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Березин С.Е., Баженов В.И. Воздуходувные станции с регулируемыми центробежными компрессорами. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2019. 188 с.
2. Гульшин И.А., Гогина Е.С. Одноиловая система низкокислородной технологии глубокой очистки сточных вод от соединений азота // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 4(80). С. 9–19.
3. Гогина Е.С., Гульшин И.А. Перспективы развития технологий очистки сточных вод с глубоким удалением азота в аэрационных сооружениях циркуляционного типа // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году: сб. науч. тр. РААСН: в 2 т. / РААСН. М.: Изд. АСВ, 2021. С. 47–51.
4. Xu X., Wei W., Liu F., Wei W., Liu Z. Experimental study on aeration efficiency in a pilot-scale decelerated oxidation ditch equipped with fine bubble diffusers and impellers. *Can. J. Chem. Eng.* 2021. N. 99. P. 1410–1420.
5. Subtil E.L., Silva M.V., Lotto B.A., Moretto M.R.D., Mierzwa J.C. Pilot-scale investigation on the feasibility of simultaneous nitrification and denitrification (SND) in a continuous flow single-stage membrane bioreactor. *J. Water Process. Eng.* 2019. N. 32. 100995.
6. Deronzier G. Optimization of oxygen transfer in clean water by fine bubble diffused air system and separate mixing in aeration ditches / Duchene P., Heduit A. // *Water science and technology.* 1998. I. 38. N. 3. P. 35–42.
7. Ekama G.A. Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems / Dold P.L., Marais G.R. // *Water Science and Technology.* 1986. I. 18. N. 6. P. 91–114.
8. Fayolle Y. Aeration and mixing in loop reactors equipped with fine bubble diffusers and slow speed mixers: a full scale study // *Proceedings of the Water Environment Federation.* 2011. I. 2011. N. 18. P. 357–367.
9. Баженов В.И. Комплексная рециркуляционная модель биохимических процессов аэробной биологической очистки: дис. ... доктора техн. наук: 03.00.23: защищена 2009 г. Щелково, 2009. 445 с.
10. Баженов В.И., Канунникова М.А. Механизм адаптации активного ила к низким концентрациям кислорода // *Достижения науки и техники АПК.* 2012. № 9. С. 82–84.
11. Баженов В.И. Принцип продольной рециркуляции в аэротенках карусельного типа // *Водоснабжение и канализация.* 2014. № 11–12. С. 101–111.
12. Rittmann B.E., Langeland W.E. Simultaneous denitrification with nitrification in single-channel oxidation ditches. *J. Water Pollut. Control Fed.* 1985, N. 57, P. 300–308.
13. Гульшин И.А. Разработка технологии биологической очистки сточных вод от соединений азота в аэрационных сооружениях циркуляционного типа в низкокислородных условиях: дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 166 с.
14. Hallin S. et al. Relationship between N-cycling communities and ecosystem functioning in a 50-year-old fertilization experiment // *The ISME journal.* 2009. V. 3. N. 5. P. 597.
15. Hao O.J., Huang J. Alternating aerobic-anoxic process for nitrogen removal: process evaluation // *Water Environment Research.* 1996. V. 68. N. 1. P. 83–93.
16. Pochana K., Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND). *Water Sci. Technol.* 1999, V. 39, P. 61–68.
17. Xu D., Li J., Ma T. Rapid aerobic sludge granulation in an integrated oxidation ditch with two-zone clarifiers. *Water Res.* 2020, V. 175, 115704.

REFERENCES

1. Berezin S.E. Bazhenov V.I. *Vozduhoduvnye stancii s reguliruemymi centrobezhnymi kompressorami* [Air blowing stations with adjustable centrifugal compressors]. Simferopol, IT «ARIAL», 2019. 188 p.
2. Gulshin I.A., Gogina E.S. Single-phase system of low-oxygen technology for deep purification of wastewater from nitrogen compounds. *Voda i jekologija: problema i reshenija* [Water and Ecology: Challenges and Solutions], 2019, no. 4 (80), pp. 9–19. (in Russian)
3. Gogina E.S., Gulshin I.A. Prospects for Development of Waste Water Treatment Technologies with Deep Nitrogen Removal in Circulation-Type Aeration Facilities. *Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniju razvitiya arhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federacii v 2020 godu: sbornik nauchnyh trudov RAASN: v 2 t. / Rossijskaja akademija arhitektury i stroitel'nyh nauk (RAASN)* [Fundamental, search and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020: a collection of scientific works of RAASN: in 2 volumes / Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN)]. Moscow, ASV, 2021, pp. 47–51. (In Russian).

4. Xu X., Wei W., Liu F., Wei W., Liu Z. Experimental study on aeration efficiency in a pilot-scale decelerated oxidation ditch equipped with fine bubble diffusers and impellers. *Can. J. Chem. Eng.* 2021. N. 99. P. 1410–1420.
5. Subtil E.L., Silva M.V., Lotto B.A., Moretto M.R.D., Mierzwa J.C. Pilot-scale investigation on the feasibility of simultaneous nitrification and denitrification (SND) in a continuous flow single-stage membrane bioreactor. *J. Water Process. Eng.* 2019. N. 32. 100995.
6. Deronzier G. Optimization of oxygen transfer in clean water by fine bubble diffused air system and separate mixing in aeration ditches. *Water science and technology.* 1998. I. 38. N. 3. P. 35–42.
7. Ekama G.A. Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems. *Water Science and Technology.* 1986. I. 18. N. 6. P. 91–114.
8. Fayolle Y. Aeration and mixing in loop reactors equipped with fine bubble diffusers and slow speed mixers: a full scale study. *Proceedings of the Water Environment Federation.* 2011. I. 2011. N. 18. P. 357–367.
9. Bazhenov V.I. *Kompleksnaja recirkuljacionnaja model' biohimicheskikh processov ajerobnoj biologicheskoy ochistki. Doct. Diss.* [Integrated recirculation model of biochemical processes of aerobic biological purification. *Doct. Diss.*] Shchjol'kovo, 2009. 445 p.
10. Bazhenov V.I., Kanunnikova M.A. *Mechanism of adaptation of active sludge to low oxygen concentrations. Dostizhenija nauki i tehniki APK* [Achievements of science and technology of the agro-industrial complex], 2012, no. 9, pp. 82–84. (in Russian)
11. Bazhenov V.I. Principle of longitudinal recirculation in carousel type aeration tanks. *Vodosnabzhenie i kanalizacija* [Water Supply and Sewerage], 2014, no. 11–12, pp. 101–111. (in Russian)
12. Rittmann B.E., Langeland W.E. Simultaneous denitrification with nitrification in single-channel oxidation ditches. *J. Water Pollut. Control Fed.* 1985, N. 57, P. 300–308.
13. Gulshin I.A. *Razrabotka tehnologii biologicheskoy ochistki stochnyh vod ot soedenenij azota v ajeracionnyh sooruzhenijah cirkuljacionnogo tipa v nizkokislorodnyh uslovijah. Cand. Diss.* [Development of Technology for Biological Treatment of Waste Water from Nitrogen Compounds in Circulation-Type Aeration Facilities under Low-Oxygen Conditions. *Cand. Diss.*] Moscow, 2018. 166 p.
14. Hallin S. et al. Relationship between N-cycling communities and ecosystem functioning in a 50-year-old fertilization experiment. *The ISME journal.* 2009. V. 3. N. 5. P. 597.
15. Hao O.J., Huang J. Alternating aerobic-anoxic process for nitrogen removal: process evaluation. *Water Environment Research.* 1996. V. 68. N. 1. P. 83–93.
16. Pochana K., Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND). *Water Sci. Technol.* 1999, V. 39, P. 61–68.
17. Xu D., Li J., Ma T. Rapid aerobic sludge granulation in an integrated oxidation ditch with two-zone clarifiers. *Water Res.* 2020, V. 175, 115704.

Об авторах:

ГОГИНА Елена Сергеевна

кандидат технических наук, доцент,
главный научный сотрудник
Научно-исследовательский институт строительной
физики РААСН
127238, Россия, г. Москва, Локомотивный проезд, 21,
тел. (495) 482-40-76
E-mail: gogina-es@yandex.ru

ГУЛЬШИН Игорь Алексеевич

кандидат технических наук
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет
129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26,
тел. (495) 781-99-88
E-mail: info@mgsu.ru

СПАСИБО Елена Васильевна

инженер Научно-исследовательский институт
строительной физики РААСН
127238, Россия, г. Москва, Локомотивный проезд, 21,
тел. (495) 482-40-76
E-mail: niisf@niisf.ru

GOGINA Elena S.

PhD in of Engineering Sciences, Associate Professor
Chief researcher
Research Institute of Construction Physics RAASN
127238, Russia, Moscow, Lokomotivny proezd, 21,
tel. (495) 482-40-76
E-mail: gogina-es@yandex.ru

GULSHIN Igor A.I.

PhD in of Engineering Sciences
National Research Moscow State University
of Civil Engineering
129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26,
tel. (495) 781-99-88
E-mail: info@mgsu.ru

SPASIBO Elena V.

Engineer
Research Institute of Construction Physics RAASN
127238, Russia, Moscow, Lokomotivny proezd, 21,
tel. (495) 482-40-76
E-mail: niisf@niisf.ru

Для цитирования: Гогина Е.С., Гульшин И.А., Спасибо Е.В. Эффективность удаления биогенных элементов в сооружении циркуляционного типа // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 4. С. 20–27. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.03.

For citation: Gogina E.S., Gulshin I.A., Spasibo E.V. Efficiency of nutrient removal in an oxidation ditches. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 4, pp. 20–27. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.03.