

## Характеристика активного ила, осуществляющего процесс очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота в аэрационных сооружениях циркуляционного типа при низких концентрациях растворенного кислорода

*И. А. Гульшин*

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»*

**Аннотация:** В статье представлены результаты исследования активного ила, осуществляющего очистку хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота в условиях низких концентраций растворенного кислорода в биореакторе (концентрации на уровне 0,2-0,7 мг/дм<sup>3</sup>). Исследования осуществлялись в лабораторных и полупроизводственных условиях на моделях аэрационных сооружений циркуляционного типа. Методы исследований включали в себя оптическую, электронную и флуоресцентную микроскопию, метод лазерной дифракции и метод полимеразной цепной реакции в реальном времени. В результате исследований установлены состав и состояние основных индикаторных микроорганизмов активного ила, структура флокул активного ила, в том числе распределение размеров флокул в зависимости от различных технологических условий процесса, причины нитчатого вспухания активного ила в случаях нарушения стабильности системы, а также количество функциональных генов бактерий и архей, связанных с процессами нитрификации и денитрификации. Отдельно выполнялось исследование седиментационных свойств активного ила, включающее в себя определение скоростей осаждения активного ила в условиях взаимовлияния флокул и биофлокуляционного потенциала. Исследования выполнялись как для экспериментального активного ила, работающего при одновременной нитрификации и денитрификации с низкими концентрациями растворенного кислорода, так и для контрольного нитрифицирующего активного ила, взятого с действующих очистных сооружений, работающих по традиционной технологической схеме денитрификации.

**Ключевые слова:** нитрификация, денитрификация, активный ил, аэротенк, циркуляционный окислительный канал, биологическая очистка, хозяйственно-бытовая сточная вода, низкокислородный метод очистки, энергосбережение, ресурсосбережение, экология.

### Введение

Качественная очистка городских сточных вод в наши дни остается одной из важнейших задач комплексной экологической политики большинства развитых и развивающихся государств, особенно с учетом постепенного перехода на методы цифрового моделирования городской инфраструктуры и автоматизированного экологического мониторинга [1, 2].

---

Существенное значение при этом придается очистке сточных вод от соединений азота, как одного из биогенных элементов, способного при попадании в водоем вызывать процесс эвтрофикации и нарушать тем самым стабильность биосистемы [3, 4].

Наиболее технологически доступным и экономически выгодным способом удаления соединений азота из хозяйственно-бытовых сточных вод является биологическая очистка с применением многовидового сообщества микроорганизмов (активного ила). Несмотря на экономическую целесообразность применения данного способа относительно других способов очистки сточных вод от различных форм азота, традиционные технологические схемы очистки городских сточных вод с отдельно выделенными зонами нитрификации и денитрификации подразумевают повышенные расходы электроэнергии на аэрацию биомассы для поддержания процессов жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, в число которых входят нитрифицирующие микроорганизмы, осуществляющие в условиях достаточного количества растворенного кислорода двухстадийный процесс нитрификации, то есть последовательное окисление аммонийного азота до нитритов, а затем нитратов. Также присутствующие в активном иле денитрифицирующие микроорганизмы в анаэробных условиях, то есть при практически полном отсутствии растворенного кислорода в среде, восстанавливают нитраты до газообразного азота, который затем покидает сточные воды, возвращаясь в атмосферу.

В целях повышения энергоэффективности процесса очистки сточных вод и снижения тем самым эксплуатационных затрат в мире ведутся исследования низкокислородных технологий биологической очистки сточных вод, в том числе позволяющих эффективно реализовывать процессы нитрификации и денитрификации в нехарактерных для них условиях [5, 6]. На базе Национального исследовательского Московского государственного

---

строительного университета (НИУ МГСУ) были выполнены комплексные исследования технологии создания и поддержания процесса одновременной нитрификации и денитрификации (ОНД) в аэрационных сооружениях циркуляционного типа, направленные на разработку проектно-методических рекомендаций по расчету данных сооружений. Процесс ОНД возможен в сооружениях с пониженными концентрациями растворенного кислорода (на уровне  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ ) и высокими горизонтальными скоростями потока иловой смеси (на уровне  $0,3 \text{ м/с}$ ). При этом активный ил работает в стрессовых условиях при нехватке кислорода. В связи с этим часть исследования была посвящена изучению свойств активного ила, его адаптации к кислородному дефициту. Результаты исследования были использованы для уточнения расчетов вторичных отстойников, работающих в системе с одновременной нитрификацией и денитрификацией.

### Материалы и методы

Исследования выполнялись на испытательных установках различных конструкций, описанных ранее [7, 8]. В качестве субстрата использовалась модельная сточная вода на основе пептона и реальная сточная вода с действующих очистных сооружений, расположенных в Московской области. Субстрат отличался низкими концентрациями легкодоступных органических веществ ( $\text{БПК}_5 \approx 115 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ ) при средних концентрациях аммонийного азота ( $\text{NH}_4 \approx 35 \text{ мг/дм}^3$ ), что в целом характерно для хозяйственно-бытовых сточных вод значительной части регионов Российской Федерации.

Одновременно с исследованием эффективности процессов очистки сточных вод при различных технологических режимах работы системы исследовались седиментационные и микробиологические свойства активного ила.

Седиментационные свойства оценивались путем определения илового индекса активного ила в его естественном виде, илового индекса при дозе

---

активного ила, равной  $3,5 \text{ г/дм}^3$ , а также построения седиментационных кривых для иловой смеси при пяти различных дозах активного ила, получаемыми концентрированием и разбавлением каждой отобранной пробы. Определение дозы ила и илового индекса осуществлялось по стандартным методикам. По полученным седиментационным кривым рассчитывались скорости осаждения активного ила при взаимовлиянии флокул. Для расчета использовались участки с постоянной скоростью осаждения для каждой дозы активного ила. В результате строилась зависимость вида (1):

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

где  $V_{hs}$  – скорость осаждения активного ила, м/ч;  $a$  – доза активного ила,  $\text{г/дм}^3$ ;  $V_0$  – максимальная скорость осаждения, м/ч;  $r_v$  – модельный параметр.

Биофлокуляционный потенциал активного ила определялся через концентрации диспергированных взвешенных веществ и флокулированных взвешенных веществ надиловой жидкости – тест DSS/FSS [9]. Анализ выполнялся с использованием флокулятора Stuart SW6. Определялись диспергированные взвешенные вещества в надиловой жидкости после 30 минут отстаивания, флокулированные взвешенные вещества в надиловой жидкости после предварительной обработки в флокуляторе и концентрация взвешенных веществ после вторичного отстаивания. Соотношение измеренных концентраций позволяло судить о работоспособности системы и выявлять причины выноса активного ила (недостатки конструкции вторичного отстойника или низкая биофлокуляционная способность активного ила).

Видовой состав и состояние индикаторных микроорганизмов активного ила оценивались методами оптической и флуоресцентной микроскопии с выполнением гидробиологического анализа. Анализ выполнялся на

---

просвечивающем оптическом микроскопе по живой капле с определением количества и активности по девятибалльной шкале семи определенных индикаторных микроорганизмов активного ила. Флуоресцентная микроскопия была направлена в первую очередь на определение причин нитчатого вспухания активного ила по известной методике [10]. Для оценки состава и структуры поверхности флокул активного ила дополнительно использовался сканирующий растровый электронный микроскоп (РЭМ) FEI Quanta 250, анализ на котором выполнялся в режиме естественной среды без предварительного напыления.

Исследование распределения размеров флокул активного ила при различных технологических режимах работы системы с одновременной нитрификацией и денитрификацией выполнялось методом лазерной дифракции на приборе Analysette 22 (FRITSCH) с предварительным ультразвуковым диспергированием иловой смеси для разделения отдельных флокул активного ила.

Кроме того, методом полимеразной цепной реакции в реальном времени выполнялся анализ количества функциональных генов бактерий и архей, связанных с процессами нитрификации и денитрификации. Данная величина сравнивалась с общим выделенным ДНК бактерий и архей, что позволяло произвести относительную оценку нитрификационного и денитрификационного потенциала активного ила. Данное исследование выполнялось на базе Почвенного института имени В. В. Докучаева. Образцы активного ила, отобранные из различных систем, центрифугировались при скорости 10 000 оборотов в минуту и замораживались для хранения до выполнения анализа.

Все исследования выполнялись как для экспериментального активного ила из лабораторных и полупроизводственных установок, отобранного на разных этапах исследования, так и для контрольного активного ила,

---

отобранного с действующих очистных сооружений. Контрольный активный ил находился в системе с аэробными зонами с повышенной интенсивностью аэрации в традиционных схемах денитри-нитрификации, что позволило сравнить денитри-нитрифицирующий активный ил в благоприятных и неблагоприятных для него условиях.

### Результаты

Низкокислородная система с одновременной нитрификацией и денитрификацией исследовалась при различных технологических режимах. Основным параметром этих режимов, оказывающим влияние на состояние активного ила, являлась концентрация растворенного кислорода. В ходе исследования было установлено, что при повышении горизонтальных скоростей потока иловой смеси в аэрационных сооружениях циркуляционного типа увеличивается массоперенос растворенного кислорода из среды во флоккулы активного ила, что в некоторой степени компенсирует дефицит растворенного кислорода в системе. Однако для поддержания стабильности бионта необходимо контролировать нагрузку на него по органическим загрязнениям. Таким образом, все этапы исследования подразделялись на условно стабильные при достаточном количестве растворенного кислорода (не менее  $0,35 \text{ мг/дм}^3$ ) и соответствующих удельных нагрузках по органическим загрязнениям (на уровне  $0,15 \text{ ГБПК/г}\cdot\text{сут}$ ) и нестабильные, когда система подвергалась неконтролируемому нитчатому вспуханию.

Первый этап исследования выполнялся на лабораторной установке с вертикальным потоком иловой смеси, обеспечивающей условия идеального смешения. Концентрации растворенного кислорода на данном этапе находились в диапазоне от  $0,1 \text{ мг/дм}^3$  до  $1,5 \text{ мг/дм}^3$ . В качестве инокулянта использовался нитрифицирующий активный ил с действующих очистных сооружений, поэтому на первом подэтапе система эксплуатировалась при



повышенных концентрациях растворенного кислорода. Количество и активность индикаторных микроорганизмов характеризовала активный ил как хорошо аэрируемую нитрифицирующую биомассу.

При снижении концентрации растворенного кислорода был запущен процесс адаптации активного ила. Увеличилось количество нитчатых микроорганизмов во флокулах активного ила, что привело к появлению водонасыщенных микроканалов, которые можно увидеть на снимках РЭМ (рис.1). Данные микроканалы снижали диффузионные ограничения для внешних слоев флокул ила, повышая тем самым эффективность процессов нитрификации при низких концентрациях растворенного кислорода.

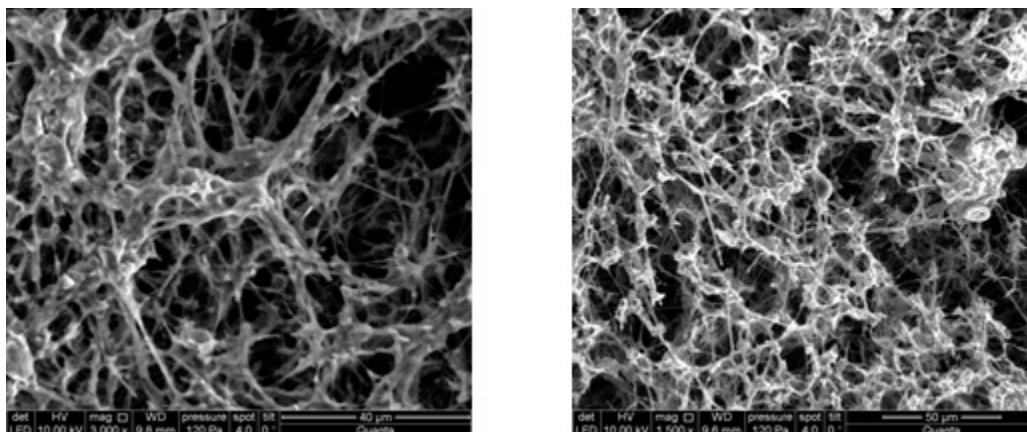


Рис. 1. – Микрофотографии, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, демонстрирующие наличие микроканалов в структуре флокул активного ила после умеренного нитчатого вспухания

Гидробиологический анализ дал сведения о достаточной активности индикаторных микроорганизмов, чувствительных к содержанию растворенного кислорода в иловой смеси во всех случаях, когда концентрация растворенного кислорода опускалась не ниже  $0,3 \text{ мг/дм}^3$ . На этапах исследования с более низкими концентрациями (например, при концентрации  $0,1 \text{ мг/дм}^3$ ) активность прекращалась. Умеренное нитчатое вспухание активного ила соответствовало развитию нитчатых бактерий

тип 0092, что в целом положительно влияло на седиментационные свойства биомассы.

Максимальные скорости осаждения активного ила на данном этапе наблюдались при работе системы в однокоридорном режиме с концентрацией растворенного кислорода на уровне 0,5 мг/дм<sup>3</sup>. Усредненная скорость, выведенная через зависимость от дозы ила, представлена в формуле (2):

$$V_{hs}(a) = 11,944 \cdot e^{-0,376 \cdot a} \quad (2)$$

Общая продолжительность стабильной части первого этапа исследования составила более 3 месяцев, что говорит об успешной адаптации биомассы к низкокислородным условиям. Нарушение работоспособности системы из-за неконтролируемого роста нитчатых бактерий *Sphaerotilus natans* было отмечено либо при общей концентрации растворенного кислорода в системе ниже 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, либо при создании в системе анаэробной зоны с концентрацией растворенного кислорода ниже 0,1 мг/дм<sup>3</sup> и продолжительностью пребывания в ней иловой смеси более двух часов.

Второй этап исследования выполнялся на лабораторной модели с горизонтальным потоком иловой смеси и состоял из двух параллельных экспериментов, продолжительность каждого из которых составила пять месяцев. Эксперименты состояли из четырех и пяти подэтапов, построенных по принципу Латинского квадрата (с тремя факторами и тремя уровнями). Как и на предыдущем этапе исследования, основное влияние на состояние биомассы оказывали концентрация растворенного кислорода и удельная нагрузка по органическим загрязнениям. Первый эксперимент предполагал эксплуатацию системы при низких концентрациях растворенного кислорода и высоких удельных нагрузках по органическим загрязнениям. В результате, большую часть эксперимента система находилась в состоянии нитчатого вспухания. Вторым экспериментом был построен по принципу,

---



обеспечивающему меньшие нагрузки по органическим загрязнениям меньшим концентрациям растворенного кислорода в системе. Иловый индекс по дням этапов для обоих экспериментов представлен на рис.2.

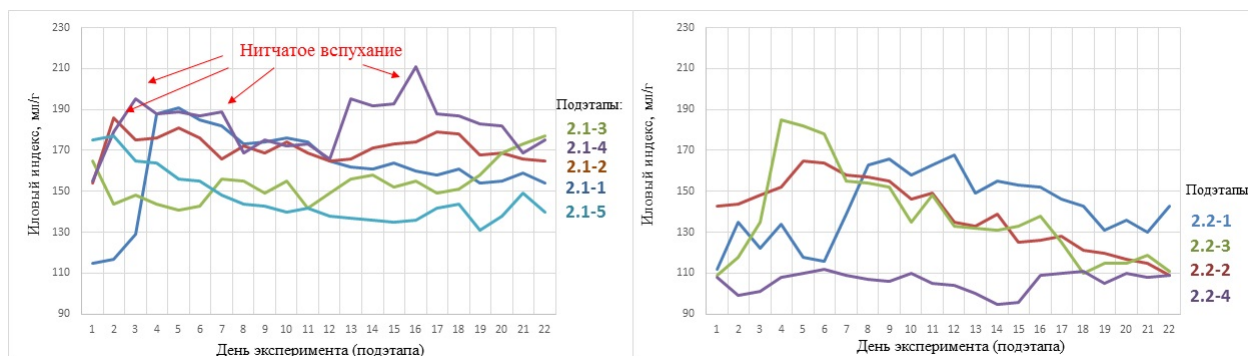


Рис. 2. – Изменение илового индекса по дням исследования на втором этапе для первого эксперимента (слева) и второго эксперимента (справа)

Скорость осаждения на первой экспериментальной линии (3) оказалась значительно ниже, чем на второй (4). Были составлены зависимости скоростей от дозы ила. Для первой экспериментальной линии:

$$V_{hs}(a) = 8,708 \cdot e^{-0,412 \cdot a} \quad (3)$$

Для второй экспериментальной линии:

$$V_{hs}(a) = 12,559 \cdot e^{-0,409 \cdot a} \quad (4)$$

Результаты оценки биофлокуляционного потенциала ожидаемо показали, что на первой экспериментальной линии резко возросло количество взвешенных веществ в надиловой жидкости (табл. 1), что говорило о низком потенциале вспухшего активного ила. На второй экспериментальной линии концентрации взвешенных веществ были значительно ниже, биофлокуляционный потенциал был высок, что и характеризовалось высокой скоростью осаждения активного ила.

Таблица № 1

Анализ биофлокуляционного потенциала на 2 этапе исследования

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

Третий этап исследования выполнялся в полупроизводственных условиях на реальной сточной воде. В полупроизводственной установке была предусмотрена система для предотвращения попадания в нее крупных механических примесей и жиров, что важно для функционирования биологической системы. Активный ил на реальной сточной воде оказался стабильнее, чем системы на модельной жидкости в лабораторных условиях. Состав активного ила по индикаторным микроорганизмам соответствовал составу, характерному для действующих очистных сооружений (рис.3). Снижение концентрации растворенного кислорода не привело к нитчатому вспуханию, однако снизило активность индикаторных микроорганизмов.

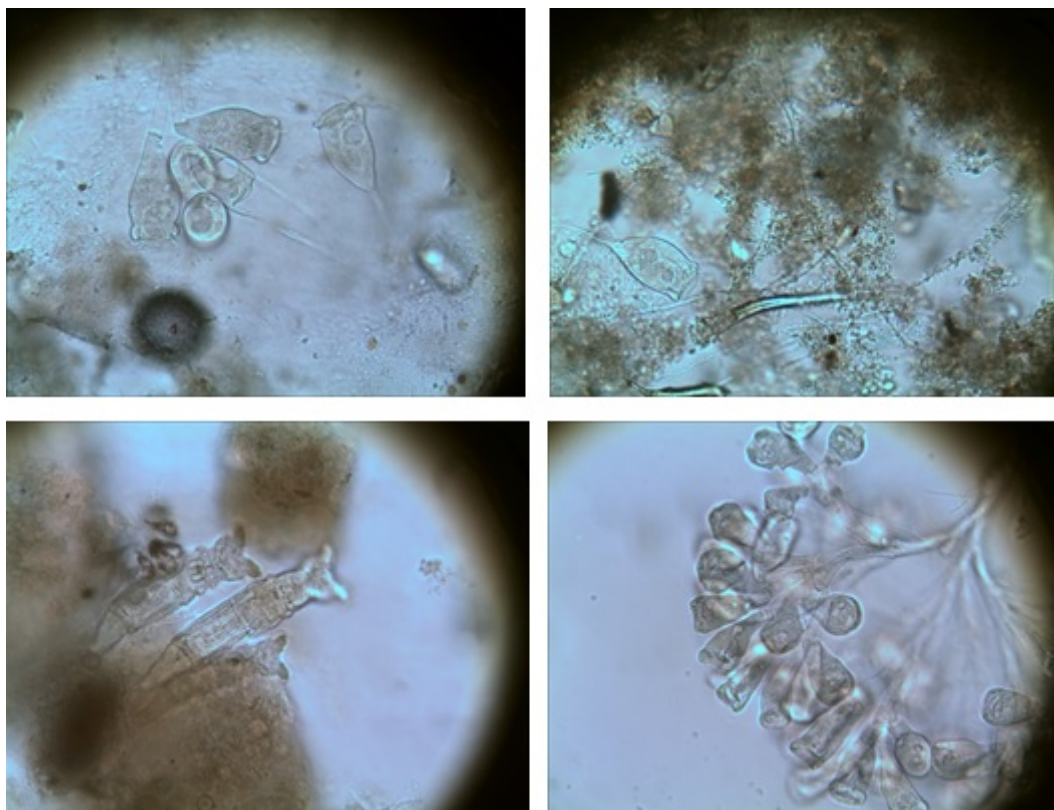


Рис. 3. – Наличие и состояние индикаторных микроорганизмов активного ила на 3 этапе исследования

Зависимость скорости осаждения активного ила от дозы ила на реальной сточной воде (5) приняла следующий вид:

$$V_{hs}(a) = 14,529 \cdot e^{-0,385 \cdot a} \quad (5)$$

Одна из задач исследования заключалась в оценке бактериального состава активного ила при различных технологических режимах эксплуатации системы с одновременной нитрификацией и денитрификацией. Для решения данной задачи был проведен анализ методом полимеразной цепной реакции в реальном времени, позволивший оценить отношение количества функциональных генов, связанных с процессами нитрификации и денитрификации к общему количеству ДНК бактерий и архей в пробах активного ила.

Количество копий генов бактериальной 16S рРНК для всех проб находилось в пределах  $10^{11}$ - $10^{12}$  копий/г. Количество копий генов архейной 16S рРНК варьировалось в широком диапазоне от  $10^9$  до  $6,73 \cdot 10^{10}$  копий/г.

Количество копий гена *amoA* бактерий сильно различалось в различных образцах и находилось в диапазоне от  $10^6$  до  $3,38 \cdot 10^8$  копий/г. Наибольшее значение отношения количества копий *amoA*-ассоциированных генов к общему количеству копий рибосомальных генов бактерий выявлено в активном иле, работающем в полупроизводственных условиях на этапе 3 исследования. При этом гены *amoA* архей были выявлены только на первом этапе исследования на адаптированном нитрифицирующем активном иле.

Количество копий гена *nirK* находилось в диапазоне от  $1,8 \cdot 10^{10}$  до  $10^{11}$  копий/г, при этом максимальное количество также приходилось на этап 3, соответствующий полупроизводственному этапу исследования. Этому же этапу соответствовало максимальное количество копий генов *nirS*. В целом количество данных генов находилось в диапазоне от  $2 \cdot 10^8$  до  $9,1 \cdot 10^9$  копий/г. Наибольшее соотношение копий *nirS*, *nirK* и 16S рРНК соответствовало полупроизводственному этапу исследования и этапу 1.2-4.

По полученным данным было оценено соотношение обилия групп микроорганизмов в образцах активного ила по количеству копий рибосомальных генов. При этом вариации числа рибосомальных оперонов в

---

геномах бактерий и архей сказываются на оценке численности микроорганизмов.

Важной характеристикой активного ила, влияющей на эффективность процессов нитрификации и денитрификации, является размер флокул активного ила. Увеличение размеров флокул позволяет достичь возникновения и поддержания стабильных аноксидных микрозон в их центре для обеспечения процесса денитрификации в нехарактерных для этого условиях эксплуатации активного ила. В ходе исследования крупные флокулы активного ила были отмечены на тех этапах, где не происходило неконтролируемого нитчатого вспухания биомассы. В остальных случаях в связи с эксплуатационными особенностями, к которым относятся, например, низкая интенсивность аэрации (а значит, снижение механического воздействия на флокулы), гидравлические особенности работы аэрационных сооружений циркуляционного типа, применение крупнолопастных низкооборотных перемешивающих устройств, позволяли поддерживать необходимые размеры флокул. Результаты экспериментов были представлены в виде интегральных и дифференциальных кривых распределения частиц по размерам. Усредненные результаты данного исследования представлены в табл. 2.

Таблица № 2

Усредненные результаты гранулометрического анализа

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

В условиях отсутствия нитчатого вспухания удалось достичь средних размеров флокул более 200 мкм. Активный ил с флокулами более 200 мкм соответствовал максимальному денитрификационному потенциалу биомассы, как по микробному составу, так и по скоростям реакций нитрификации и денитрификации и эффективности процессов очистки сточных вод от соединений азота. Эмпирически были установлены зависимости скоростей окисления аммонийного азота и денитрификации от размеров флокул активного ила, работающего по схеме одновременной нитрификации и денитрификации в низкокислородных условиях. Зависимости представлены на рис. 4.

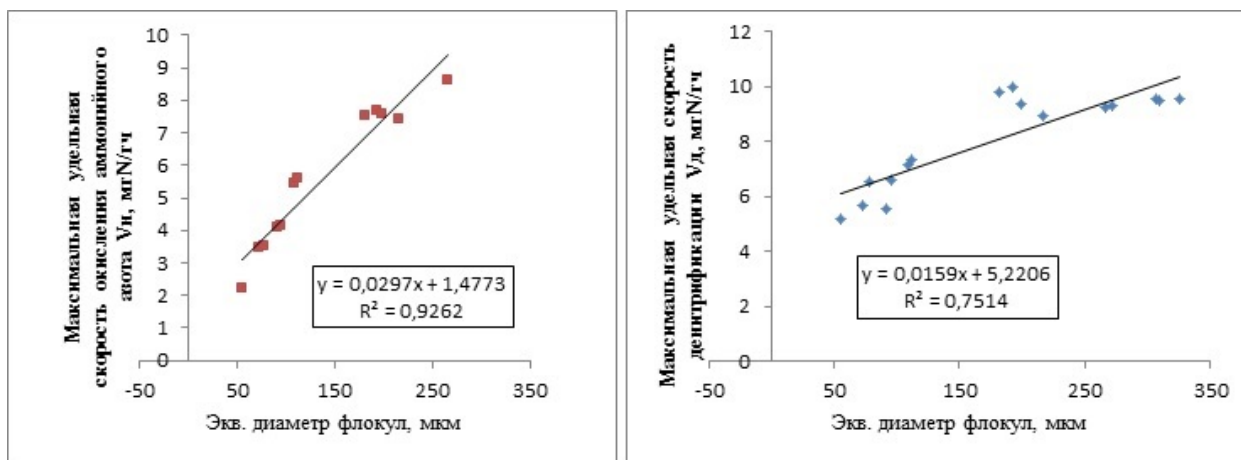


Рис. 4. – Зависимость максимальной удельной скорости окисления аммонийного азота от эквивалентного диаметра флокул активного ила (слева); Зависимость максимальной удельной скорости денитрификации от эквивалентного диаметра флокул активного ила (справа)

### Заключение

Исследование низкокислородных технологий биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод является перспективным направлением

для развития энергоэффективности эксплуатации городской инфраструктуры. Однако в большинстве случаев данные технологии подразумевают, что активный ил, осуществляющий нитрификацию и денитрификацию, работает в стрессовых для него условиях. При разработке и внедрении данных технологий необходимо детально изучать технологические характеристики активного ила при различных эксплуатационных параметрах, а также механизмы его адаптации к изменяющейся среде. По этому вопросу в рамках выполненного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Механизм адаптации активного ила к условиям с низким содержанием растворенного кислорода включает в себя, в том числе, умеренное увеличение количества нитчатых микроорганизмов *тип 0092*, формирующих структуру флокул активного ила, способствующую повышению эффективности нитрификации при пониженных концентрациях растворенного кислорода.

2. Гидробиологический анализ проб активного ила выявил, что в условиях повышенных средних горизонтальных скоростей потока иловой смеси в аэрационных сооружениях циркуляционного типа количество и состояние индикаторных микроорганизмов соответствуют нитрифицирующему активному илу (хорошо аэрируемому), что может быть связано с повышенным массопереносом кислорода из воды во флокулы активного ила.

3. Установлены зависимости скорости осаждения активного, работающего при одновременной нитрификации и денитрификации, от дозы активного ила, которые можно использовать для уточнения расчетов вторичных отстойников, работающих по данным технологическим схемам.

4. Установлено распределение размера флокул в иловой смеси при различных технологических режимах. Меньшим размерам флокул

---



соответствует меньшей эффективности денитрификации и большая эффективность нитрификации, что связано с изменением значений диффузионных ограничений внутри флокул. Максимальную эффективность удаления общего азота удалось достичь при размерах флокул более 200 мкм.

5. Методом количественного ПЦР-анализа в реальном времени удалось установить количество копий рибосомальных генов бактерий и архей на разных технологических этапах исследования, а также количество копий функциональных генов, связанных с азотным циклом. Относительное количество функциональных генов для экспериментального и контрольного активного ила, взятого с действующих очистных сооружений, обладает сходимостью, что говорит о том, что, в условиях пониженных концентраций растворенного кислорода при реализации процесса одновременной нитрификации и денитрификации, активный ил сохраняет свои количественно-функциональные характеристики, связанные с видовым составом.

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

### Литература

1. Волков С. А., Макиша Е. В. Формирование списков правил для верификации информационных моделей строительных объектов. Часть 1 // Инженерный вестник Дона. 2018. №4  
URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347).
2. Волков С. А., Макиша Е. В. Формирование списков правил для верификации информационных моделей строительных объектов. Часть 2 // Инженерный вестник Дона. 2018. №4  
URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5394](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5394).



3. Ahn Y. H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: a review // *Process Biochemistry*. 2006. Vol. 41. № 8. pp. 1709-1721.
  4. Helmer C., Kunst S. Simultaneous nitrification/denitrification in an aerobic biofilm system // *Water Science and Technology*. 1998. Vol. 37. № 4-5. pp. 183-187.
  5. Do Canto C. S. A. Feasibility of nitrification/denitrification in a sequencing batch biofilm reactor with liquid circulation applied to post-treatment // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. №. 3. pp. 644-654.
  6. Yang M., Sun P., Wang R., Han J., Wang J., Song Y., Tang X. Simulation and optimization of ammonia removal at low temperature for a double channel oxidation ditch based on fully coupled activated sludge model (FCASM): A full-scale study // *Bioresource technology*. 2013. №. 143. pp. 538-548.
  7. Гогина Е. С., Гульшин И. А. Моделирование энергоэффективного процесса биологической очистки сточных вод в циркуляционном окислительном канале // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2016. № 9. С. 42-48
  8. Гогина Е. С., Гульшин И. А. Удаление азота в модели циркуляционного окислительного канала при пониженном содержании органики в сточных водах // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2017. № 12. С. 26-33.
  9. ПНД Ф СБ 14.1.92-96. Методическое руководство по гидробиологическому контролю нитчатых микроорганизмов активного ила. — М.: Государственный комитет РФ по охране окружающей среды. 1996. 51 с.
  10. Gulshin I. The settling behavior of an activated sludge with simultaneous nitrification and denitrification // *Matec Web of Conferences*. 2017. № 106. P. 07002.
-

## References

1. Volkov S. A., Makisha E. V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347).
2. Volkov S. A., Makisha E. V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5394](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5394).
3. Ahn Y. H. Process Biochemistry. 2006. Vol. 41. № 8. pp. 1709-1721.
4. Helmer C., Kunst S. Water Science and Technology. 1998. Vol. 37. № 4-5. pp. 183-187.
5. Do Canto C. S. A. Bioresource Technology. 2008. Vol. 99. №. 3. pp. 644-654.
6. Yang M., Sun P., Wang R., Han J., Wang J., Song Y., Tang X. Bioresource technology. 2013. №. 143. pp. 538-548.
7. Gogina E. S., Gulshin I. A. Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika. 2016. № 9. pp. 42-48
8. Gogina E. S., Gulshin I. A. Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika. 2017. № 12. pp. 26-33.
9. PND F SB 14.1.92-96. Metodicheskoe rukovodstvo po gidrobiologicheskomu kontrolju nitchatyh mikroorganizmov aktivnogo ila. M.: Gosudarstvennyj komitet RF po ohrane okruzhajushhej sredy [Methodological guide to hydrobiological control of filamentous microorganisms of activated sludge.]. 1996. P. 51.
10. Gulshin I. Matec Web of Conferences. 2017. № 106. P. 07002.