

DOI 10.35776/VST.2021.10.03  
УДК 628.35:615.076

## Совершенствование гидробиологического анализа активного ила на Минской очистной станции

О. С. Дубовик<sup>1</sup>, Р. М. Маркевич<sup>2</sup>, Е. В. Гаврилович<sup>3</sup>, И. А. Гребенчикова<sup>4</sup>, В. В. Иванович<sup>5</sup>



О. С. Дубовик



Р. М. Маркевич



Е. В. Гаврилович



И. А. Гребенчикова



В. В. Иванович

<sup>1</sup> Дубовик Ольга Сергеевна, заместитель начальника производства «Минскоочиствод», УП «Минскводоканал» 220088, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Пулихова, 15, тел.: +375 (29) 559-63-86, e-mail: dubovik.volha@gmail.com

<sup>2</sup> Маркевич Раиса Михайловна, кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, Белорусский государственный технологический университет

220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, тел.: +375 (29) 693-33-79, e-mail: Markevich@belstu.by

<sup>3</sup> Гаврилович Екатерина Валентиновна, инженер-микробиолог второй категории химико-бактериологической лаборатории, Минская очистная станция производства «Минскоочиствод», УП «Минскводоканал»

220088, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Пулихова, 15, тел.: +375 (29) 777-32-20, e-mail: gavrilovich\_ev@minskvodokanal.by

<sup>4</sup> Гребенчикова Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии, Белорусский государственный технологический университет

220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, тел.: +375 (29) 754-88-47, e-mail: grebenchikova@belstu.by

<sup>5</sup> Иванович Вадим Викентьевич, ведущий инженер-технолог, Минская очистная станция производства «Минскоочиствод», УП «Минскводоканал»

220088, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Пулихова, 15, тел.: +375 (29) 798-43-06, e-mail: ivanovich\_vv@minskvodokanal.by

На основании накопленного опыта эксплуатации сооружений Минской очистной станции и обзора источников информации определена схема гидробиологического анализа активного ила, приведена форма регистрации результатов проведенного анализа. Для количественного учета нитчатых микроорганизмов разработана собственная пятибалльная система. Для нитчатых микроорганизмов, выявленных в активном иле, на основании анализа литературных данных определены условия, благоприятствующие их массовому развитию. В течение длительного периода времени, включающего разные сезоны года, проведена апробация усовершенствованной методики для мониторинга состояния иловой суспензии очистных сооружений двух площадок станции: классических четырехкоридорных аэротенков-вытеснителей первой

площадки и биореакторов с каскадной денитрификацией второй площадки. Определены представители нитчатых микроорганизмов, постоянно обитающие в очистных сооружениях, выявлены доминирующие виды. Проведено сопоставление результатов анализа нитчатых форм и седиментационных характеристик активного ила. Сделаны заключения об особенностях биоценоза аэротенков первой площадки и биореакторов второй площадки, идентичности по видовому составу сообществ нитчатых бактерий, влиянии состава сточных вод и условий их очистки (нагрузка на ил, наличие зон с разным уровнем аэрации) на свойства иловой суспензии.

**Ключевые слова:** очистка сточных вод, активный ил, гидробиологический анализ, нитчатая форма микроорганизмов, балльная система оценки, доза ила, иловый индекс.

### Improving the hydrobiological analysis of activated sludge at the Minsk wastewater treatment facilities

O. S. Dubovik<sup>1</sup>, R. M. Markevich<sup>2</sup>, E. V. Gavrilovich<sup>3</sup>, I. A. Grebenchikova<sup>4</sup>, V. V. Ivanovich<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Dubovik Olga, Deputy Director of Operations, Minskochistvod, UE Minskvodokanal

15 Pulikhova St., 220088, Minsk, Republic of Belarus, tel.: +375 (29) 559-63-86, e-mail: dubovik.volha@gmail.com

<sup>2</sup> Markevich Raisa, Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Department of Biotechnology, Belarusian State Technological University

13a Sverdlova St., 220006, Minsk, Republic of Belarus, tel.: +375 (29) 693-33-79, e-mail: Markevich@belstu.by

<sup>3</sup> Gavrilovich Ekaterina, Microbiological Engineer of the Second Category of the Chemical and Bacteriological Laboratory, Minsk Wastewater Treatment Facilities, Minskochistvod, UE Minskvodokanal

15 Pulikhova St., 220088, Minsk, Republic of Belarus, tel.: +375 (29) 777-32-20, e-mail: gavrilovich\_ev@minskvodokanal.by

<sup>4</sup> Grebenchikova Irina, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Department of Biotechnology, Belarusian State Technological University

13a Sverdlova St., 220006, Minsk, Republic of Belarus, tel.: +375 (29) 754-88-47, e-mail: grebenchikova@belstu.by

<sup>5</sup> Ivanovich Vadim, Leading Process Engineer, Minsk Wastewater Treatment Facilities, Minskochistvod, UE Minskvodokanal

15 Pulikhova St., 220088, Minsk, Republic of Belarus, tel.: +375 (29) 798-43-06, e-mail: ivanovich\_vv@minskvodokanal.by

Based on the accumulated experience in operating the Minsk Wastewater Treatment Facilities and a review of information sources, a scheme for the hydrobiological analysis of activated sludge was determined, and a form for recording the results of the analysis was provided. For the quantitative account of filamentous microorganisms, an original five-point system was developed. Based on the literature data analysis, favorable conditions for the mass growth of filamentous microorganisms found in activated sludge were determined. Over a long period of time, including different seasons of the year, the improved methodology was tested for monitoring the state of the sludge suspension at two sites of the treatment facilities: traditional four-line continuous-flow aeration tanks at the first site and bioreactors with cascade denitrification at the second site. The species of filamentous microorganisms, permanently living in wastewater treatment structures, have been identified, and the dominant species have been determined. The results of the analysis of filamentous forms and sedimentation characteristics of activated sludge are compared. Conclusions were made about the features of the biocenosis in the aeration tanks at the first site and in the bioreactors at the second site; about the identity of the species composition of the filamentous bacteria communities, the effect of the wastewater composition and treatment conditions (sludge load, occurrence of zones with different levels of aeration) on the properties of the sludge suspension.

**Key words:** wastewater treatment, activated sludge, hydrobiological analysis, filamentous form of microorganisms, point-based system, sludge dosage, sludge index.

Биологическая стадия очистки сточных вод на первой площадке Минской очистной станции представлена классическими четырехкоридорными аэротенками-вытеснителями и типовыми вторичными отстойниками, на второй площадке – биореакторами с каскадной денитрификацией и вторичными отстойниками.

Стабильность функционирования стадии биологической очистки в целом и работы вторичных отстойников в частности в значительной степени определяют седиментационные свойства активного ила. Нарушение осаждения активного ила может быть вызвано массовым развитием нитчатых микроорганизмов (нитчатое вспухание) или увеличением продукции экзополисахаридов (гелевое вспухание) вследствие поступления сточных вод с высокой долей промышленных загрязнений, зачастую содержащих токсичные соединения. Кроме того, препятствовать осаждению могут пузырьки газа на хлопках ила в том случае, если по каким-либо причинам денитрификация протекает во вторичных отстойниках. В этой связи большое

значение имеет гидробиологический анализ активного ила, прежде всего оценка количества и форм нитчатых микроорганизмов, и выявление факторов, вызывающих массовое развитие того или иного вида.

Ранее гидробиологический анализ активного ила на Минской очистной станции проводили ежедневно, он включал определение запаха, цвета, способности к осаждению, свойств надильной воды, состояния хлопка, состава биоценоза с измерением ориентировочной численности разных групп гидробионтов. Дополнительно, два раза в неделю, анализировали состав нитчатых форм микроорганизмов путем микроскопирования образцов, окрашенных по методу Грама. Определяли размер и форму клеток, гранул, наличие септ, размер нитей, подвижность микроорганизмов и их расположение относительно хлопка ила (внутри хлопка, свободноплавающие нити), присутствие прикрепленных бактерий на нитях, отношение нитчатых организмов к окраске по Граму (грамотрицательные, грамположительные или грамвариабельные) [1–3].

Сложность и невысокая информативность такого анализа обусловлена рядом причин. Во-первых, само по себе определение форм нитчатых организмов является трудоемкой задачей. Во-вторых, биоценоз каждого очистного сооружения уникален, преимущественное развитие получают те микроорганизмы, в том числе и нитчатые, которые находят для себя наиболее благоприятные условия. По этой причине для адекватного анализа работы очистных сооружений, предотвращения или устранения возможных проблем необходимо иметь четкую картину состава и численности организмов при удовлетворительном функционировании конкретных сооружений. И, наконец, необходима информация о взаимосвязи состава микроорганизмов, доминировании тех или иных представителей биоценоза с определенными условиями очистки применительно к данным очистным сооружениям. Практика показывает, что весьма полезной является собственная балльная система для определения количества нитчатых форм микроорганизмов.

Вместе с тем обработка результатов гидробиологического анализа для конкретных очистных сооружений невозможна без использования литературных данных и накопленного опыта. Анализ источников информации [4; 5] позволяет выделить следующие варианты ухудшения качественных характеристик активного ила и их возможные причины:

явление «пин-флок» — сформированные флокулы маленькие, компактные, слабые, сферические или неправильной формы. Более крупные флокулы осаждаются быстро, более мелкие — медленно. Иловый индекс в этом случае может иметь небольшие значения, однако в очищенных сточных водах часто наблюдается высокое содержание взвешенных веществ;

слизистое, гелевое вспухание ила, которое вызывают гелеобразующие бактерии, в основном рода *Zoogloea*. При этом уменьшается скорость осаждения хлопков, фактически отсутствует разделение активного ила и очищенных сточных вод, вследствие чего наблюдается перегрузка вторичных отстойников;

нитчатое вспухание ила вызывается развитием микроорганизмов с нитчатой структурой (хламидобактерии, нитчатые сине-зеленые водоросли, сапротрофные грибы). В этом случае при высоком иловом индексе надильная вода очень чистая, однако из-за низкой плотности ила занимаемый им объем превышает вместимость иловой зоны отстойника, и граница осадка поднимается выше допустимого уровня;

всплывающий активный ил формируется, если во вторичных отстойниках протекает денитрификация, и выделяющийся газообразный азот поднимает хлопья ила на поверхность. Как следствие, возможно образование пены на поверхности жидкости во вторичных отстойниках, а также в аноксидной зоне биореактора;

преобладание диспергированных клеток, образующих лишь небольшие скопления. Для такого состояния характерны мутная надильная вода и отсутствие четкой границы между осветленной жидкостью и осевшим илом;

пенообразование, которое может быть вызвано присутствием биологически стойких поверхностно-активных веществ либо нитчатых форм микроорганизмов. В случае развития бактерий рода *Nocardia*, *Microthrix parvicella* либо типа 1863 пена характеризуется высокой механической стойкостью, аккумулируется в сооружениях и даже выходит за их пределы, что приводит к выносу взвешенных веществ из вторичных отстойников.

Цель настоящей работы заключалась в совершенствовании методики гидробиологического анализа активного ила и ее практической оценке.

На основании накопленного опыта и обзора источников информации предложена схема анализа и разработана форма регистрации результатов (рис. 1). Гидробиологический анализ включает следующие этапы:

определение запаха, цвета, седиментационной способности активного ила (иловый индекс, характеристика надильной воды);

характеристика хлопья (размер, плотность);

установление качественного и количественного состава биоценоза активного ила с наглядным представлением в виде диаграммы;

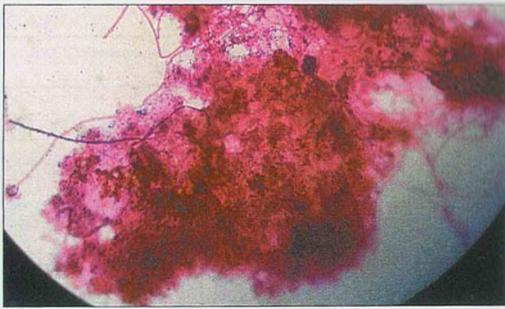
определение форм нитчатых микроорганизмов (окрашивание по методам Грама и Нейссера [1; 3]);

оценка численности присутствующих форм нитчатых микроорганизмов по балльной системе, определение доминирующих форм;

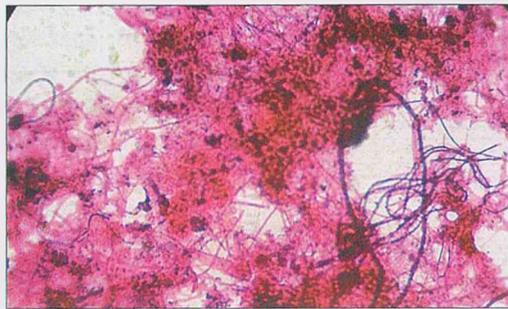
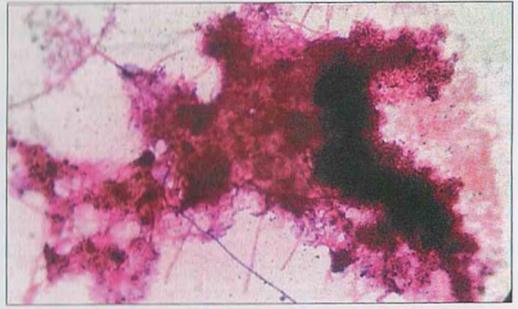
подготовка заключения (с анализом дозы ила, илового индекса и состава сточных вод, поступающих на биологическую стадию очистки).

Отчет о результатах гидробиологического анализа, представленный с использованием разработанной формы, дает технологу возможность в полной мере оценить ситуацию, существующую на станции в данный момент времени: состав биоценоза, присутствие и доминирование в нем определенных организмов, в том числе нитчатых форм, соотношение различных индикаторных групп и др. Частота проведения гидробиологи-

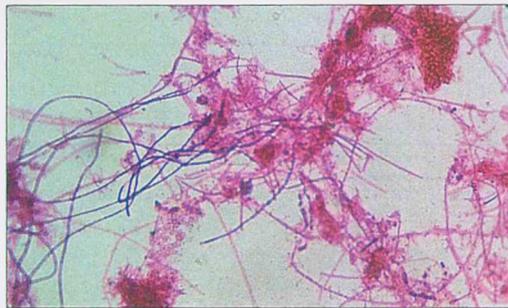
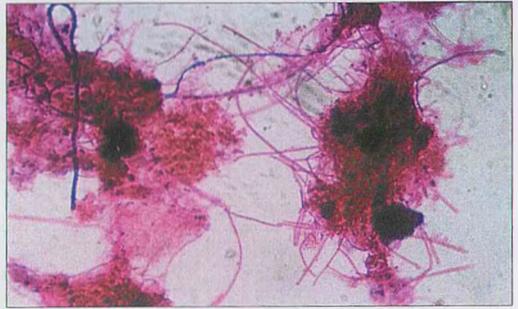




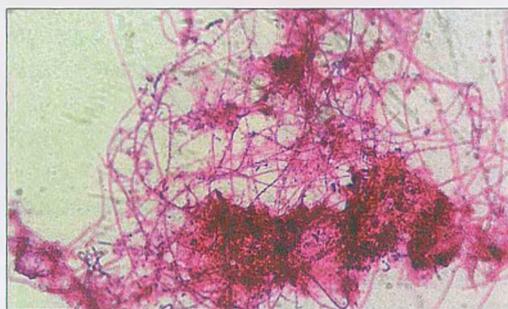
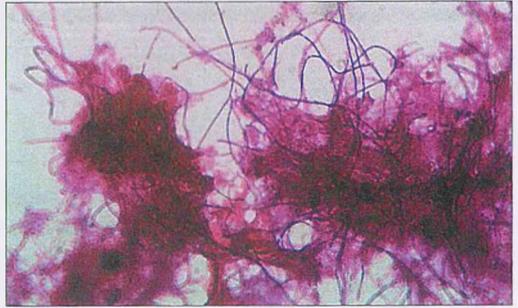
**1 балл** (1–5 нитей на хлопок и не во всех хлопках)



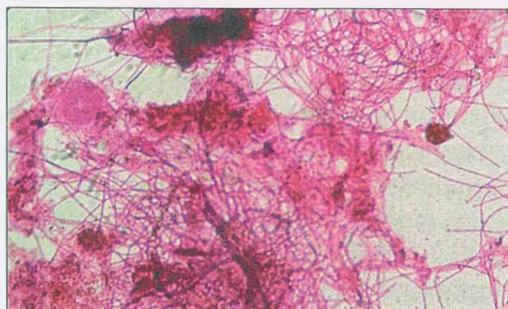
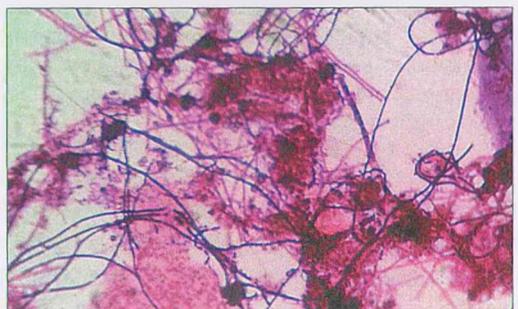
**2 балла** (5–20 нитей на хлопок, могут быть не во всех хлопках)



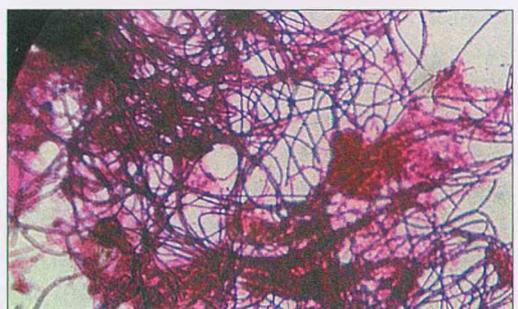
**3 балла** (20–40 нитей на хлопок либо вне хлопка)



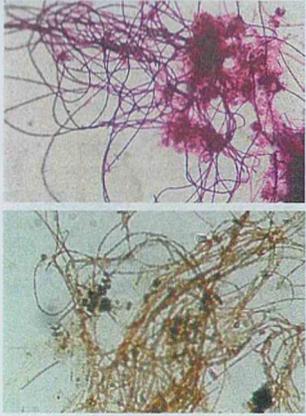
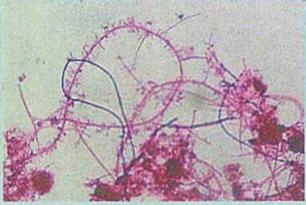
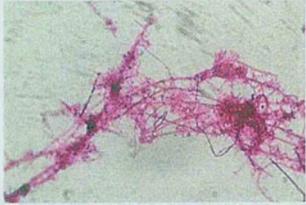
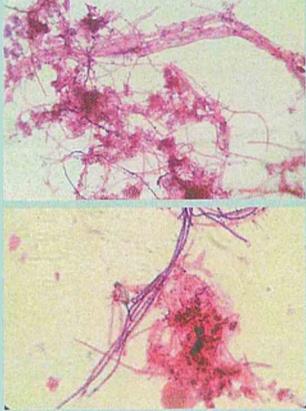
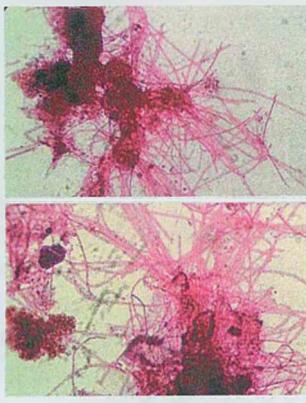
**4 балла** (большое количество нитей, подсчет затруднен, но хлопки ила хорошо просматриваются)

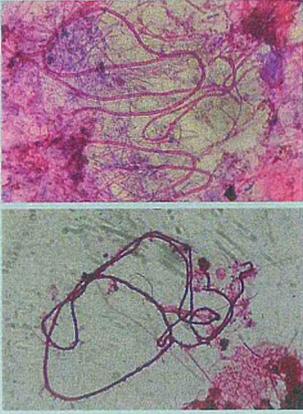
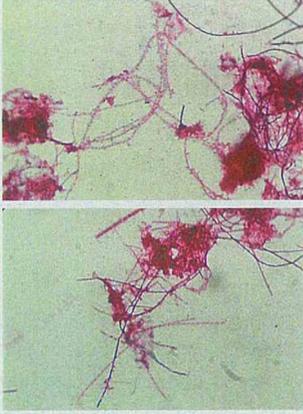
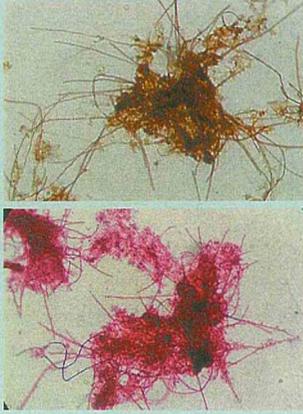


**5 баллов** (нити образуют сплошной рост внутри либо вне хлопка, визуально присутствует большее количество волокон, чем хлопков)



**Рис. 2.** Микрофотографии иловой суспензии, рекомендуемые для оценки численности нитчатых форм организмов по балльной шкале (окраска по методу Грама, увеличение 1000×)

Систематическое название нитчатых организмов (либо их тип)	Микрофотографии нитчатых организмов в составе иловой суспензии	Условия, способствующие развитию данных организмов
<i>Microthrix parvicella</i>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая нагрузка на активный ил [6–10].</li> <li>2. Низкая температура (10–15 °С) [5–7].</li> <li>3. Значительное содержание высших жирных кислот [7; 11].</li> <li>4. Большой объем аноксидной зоны (&gt; 40% от объема аэротенка) [7].</li> <li>5. Поступление восстановленных соединений серы и азота [7].</li> <li>6. Низкая концентрация кислорода [5; 7–9].</li> <li>7. Высокий возраст активного ила [5; 8].</li> <li>8. Недостаток питательных веществ (необходимых для роста и жизнедеятельности микроорганизмов) [9].</li> </ol>
0041		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая нагрузка на активный ил [6; 7; 9–11].</li> <li>2. Недостаток питательных веществ (необходимых для роста и жизнедеятельности микроорганизмов) [6; 9; 10].</li> <li>3. Низкая концентрация кислорода [9].</li> <li>4. Высокий возраст активного ила [5].</li> </ol>
0675		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая нагрузка на активный ил [6; 10].</li> <li>2. Недостаток питательных веществ (необходимых для роста и жизнедеятельности микроорганизмов) [6; 9].</li> <li>3. Высокий возраст активного ила [5].</li> </ol>
1851		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая нагрузка на активный ил [7; 9].</li> <li>2. Недостаток питательных веществ (необходимых для роста и жизнедеятельности микроорганизмов) [6].</li> <li>3. Содержание низкомолекулярных соединений (сельскохозяйственные предприятия) [7].</li> <li>4. Аэробные условия [9].</li> <li>5. Высокий возраст активного ила [5; 9].</li> <li>6. Содержание простых сахаров и растворимого крахмала в составе сточных вод [5].</li> </ol>
021N		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая нагрузка на активный ил [7; 9; 10].</li> <li>2. Низкая концентрация кислорода [7].</li> <li>3. Высокая концентрация легко разлагаемых жирных кислот [5; 7].</li> <li>4. Недостаток питательных веществ (необходимых для роста и жизнедеятельности микроорганизмов) [7; 9–11].</li> <li>5. Дефицит азота и фосфора в сточных водах, содержание в сточных водах восстановленных соединений серы и органических кислот [5; 10].</li> </ol>

Систематическое название нитчатых организмов (либо их тип)	Микрофотографии нитчатых организмов в составе иловой суспензии	Условия, способствующие развитию данных организмов
<i>Nostocoida limicola</i> II, III		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая нагрузка на активный ил [6; 9].</li> <li>2. Содержание простых сахаров и растворимого крахмала в составе сточных вод [5; 6].</li> <li>3. Недостаток питательных веществ (необходимых для роста и жизнедеятельности микроорганизмов) [7; 9; 11].</li> <li>4. Повышенное содержание в сточных водах легко разлагаемых соединений [5; 7; 9].</li> <li>5. Наличие гнилостных процессов в системе [11].</li> <li>6. Дефицит фосфора [5].</li> </ol>
<i>Beggiatoa</i>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Наличие в сточных водах восстановленных соединений серы [7; 9; 10].</li> <li>2. Низкая концентрация кислорода [7].</li> <li>3. Наличие гнилостных процессов [6; 10].</li> <li>4. Высокая нагрузка по органическим веществам в составе сточных вод [6].</li> </ol>
<i>Haliscomenobacter hydrossis</i>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая нагрузка на активный ил [7; 10].</li> <li>2. Высокое содержание низкомолекулярных соединений в сточных водах (агроиндустрия) [7].</li> <li>3. Возраст ила от 2 до 10 суток [5].</li> <li>4. Низкая концентрация кислорода в аэротенке [5–7; 9; 10].</li> <li>5. Недостаток фосфора [5; 7].</li> <li>6. Высокая концентрация азотсодержащих компонентов [7].</li> <li>7. Недостаток питательных веществ (необходимых для роста и жизнедеятельности микроорганизмов) [10].</li> </ol>

этого показателя, стабильные значения – в летний период (187–192 см<sup>3</sup>/г), существенное снижение – с августа по октябрь (до 158 см<sup>3</sup>/г) с последующим возрастанием до летних значений. Доза ила с марта по октябрь постепенно увеличивалась с 4 до 5 г/дм<sup>3</sup> с незначительным снижением в июне, далее с ноября по январь фиксировалось некоторое снижение.

На второй площадке очистных сооружений иловый индекс с марта по сентябрь имел тенденцию к снижению, за исключением зафиксированного существенного увеличения в июле. В осенне-зимний период аналогично ситуации на

первой площадке значения илового индекса возрастали. В большинстве случаев величина илового индекса для биореактора второй площадки не превышала 180 см<sup>3</sup>/г. Доза активного ила колебалась в более широких пределах, чем на первой площадке: от минимального значения 3,6 г/дм<sup>3</sup> в июне до максимального 6 г/дм<sup>3</sup> с октября по январь. В весенне-летний период зафиксированы наименее стабильные значения дозы ила. Более низкие значения илового индекса (около 135–175 см<sup>3</sup>/г) обусловлены поддержанием более высокой дозы ила в очистном сооружении (5,5–6 г/дм<sup>3</sup>).

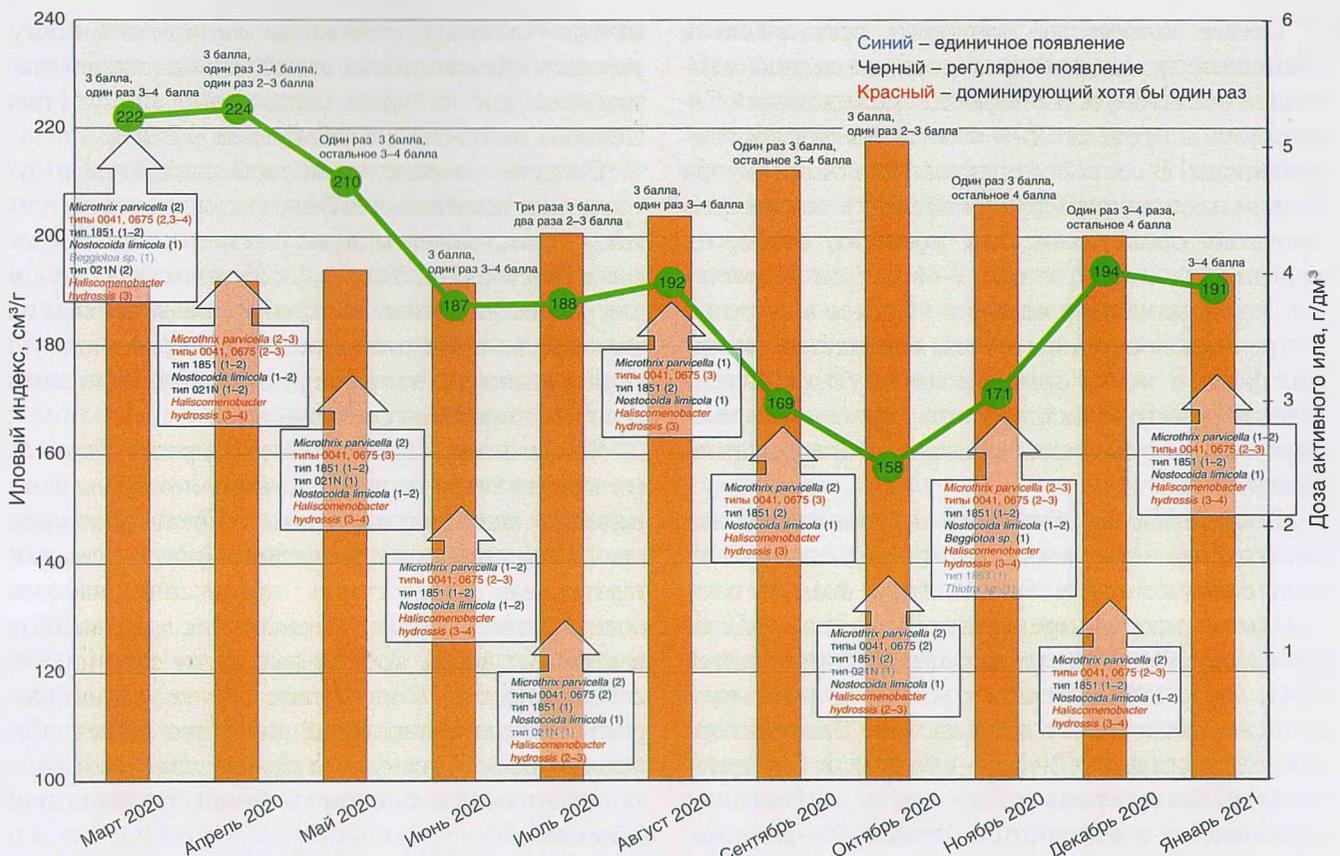


Рис. 3. Динамика показателей активного ила и состава обнаруженных нитчатых форм микроорганизмов в аэротенке первой площадкой Минской очистной станции  
 — доза активного ила; ● иловый индекс

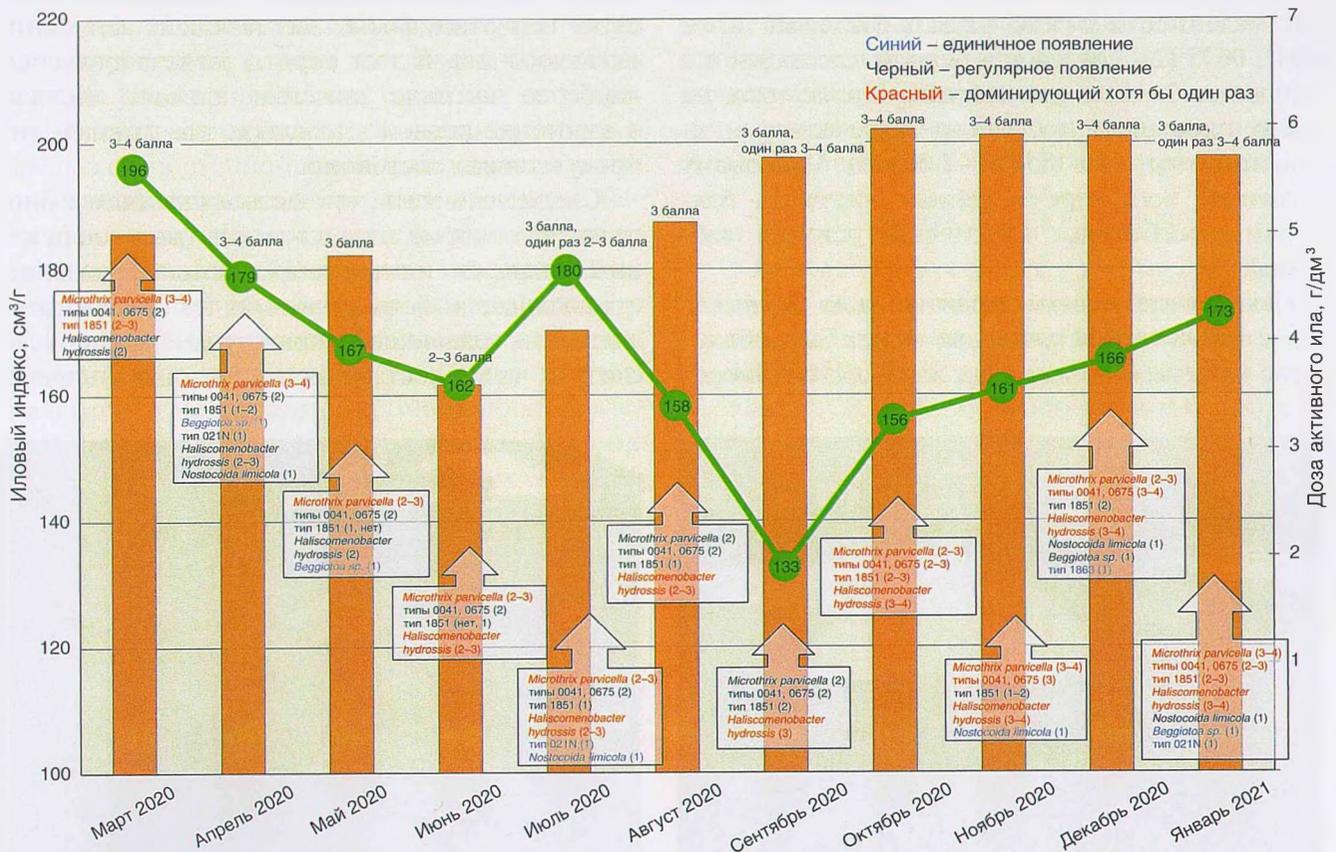


Рис. 4. Динамика показателей активного ила и состава обнаруженных нитчатых форм микроорганизмов в биореакторе второй площадки Минской очистной станции  
 — доза активного ила; ● иловый индекс

Общее количество нитчатых организмов в биоценозе активного ила аэротенка первой площадки в течение всего периода исследований находилось в пределах 2–4 баллов по разработанной шкале. В составе активного ила биореактора второй площадки сооружений общее количество нитчатых организмов, как правило, выше, их содержание соответствует 3–4 баллам. Отмечено, что возрастание илового индекса в июле не сопровождалось увеличением количества нитчатых форм и могло быть связано с более интенсивной денитрификацией при повышении температуры окружающей среды и соответственно сточных вод.

Постоянными обитателями биоценозов активного ила аэротенка первой площадки очистных сооружений и биореактора второй площадки являются представители видов *Microthrix parvicella*, *Haliscomenobacter hydrossis*, типов 0041, 0675, 1851. *Microthrix parvicella* в большей степени доминирует в биоценозе биореактора второй площадки (2–3, 3–4 балла), в биоценозе аэротенка первой площадки их количество оценивается в основном в 2 балла. Вторым, часто доминирующим микроорганизмом является *Haliscomenobacter hydrossis* (на первой площадке в подавляющем большинстве случаев – 3–4 балла, на второй – 2–3 или 3–4 балла). Третьими по численности можно назвать бактерии типов 0041, 0675 (2–3 балла для первой площадки и в основном 2 балла для второй). Кроме того, на обеих площадках постоянно встречались микроорганизмы типа 1851 (1–2 балла). Массовому развитию всех перечисленных нитчатых бактерий способствуют идентичные условия (таблица).

Более интенсивное развитие вида *Microthrix parvicella* на второй площадке может быть объяснено наличием аноксидных зон в составе биореак-

актора (таблица), а также высокой доли в поступающем общем потоке сточных вод кожевенных заводов, для которых характерно присутствие данного вида нитчатых бактерий [12; 13].

Биоценоз аэротенка первой площадки отличается от такового для биореактора второй площадки постоянным присутствием вида *Nostocoida limicola* (1–2 балла). Особенностью условий для развития данных микроорганизмов является высокая концентрация летучих жирных кислот, образующихся, например, при ацидофикации осадка в первичных отстойниках.

Численность представителей рода *Beggiatoa* на протяжении периода наблюдений была невелика и оценивалась в 1 балл. Среди факторов, способствующих их развитию, можно отметить протекание гнилостных процессов, высокое содержание летучих жирных кислот, наличие в сточных водах восстановленных соединений серы (таблица). Совокупность этих условий характерна для анаэробной зоны, что может объяснить вдвое более частое присутствие этих микроорганизмов в биоценозе биореактора второй площадки.

В период с марта по май 2020 г., наряду с перечисленными выше постоянными обитателями биоценозов, обнаруживались бактерии типа 021N, которые согласно [5; 9] находятся в десятке нитчатых форм, вызывающих вспухание активного ила. В этот период регистрировались наиболее высокие значения илового индекса в аэротенке первой площадки, где данный тип присутствовал постоянно.

Следует отметить, что частым явлением в биореакторах второй площадки очистных сооружений является интенсивное пенообразование, приводящее к формированию на поверхности жидкости плавающей корки (рис. 5). Из рис. 4 следует, что в составе активного ила биореак-



Рис. 5. Плавающая корка на поверхности жидкости в биореакторе второй площадки Минской очистной станции

торов постоянно присутствует вид *Microthrix parvicella* и практически всегда доминирует. Автор [12] указывает, что данный микроорганизм является формой нитчатых, которые вызывают пенообразование на очистных сооружениях. Кроме того, отличительной особенностью данного вида является постоянное присутствие и зачастую массовое развитие в сточных водах кожевенных заводов. Поскольку в общем объеме стоков, поступающих на вторую площадку очистных сооружений г. Минска, высока доля сточных вод промышленных предприятий [14], в числе которых и воды кожевенного завода, можно предположить, что образование пены связано со специфическим составом сточных вод, а не с проблемами эксплуатации очистных сооружений.

Обращает внимание тот факт, что развитию подавляющего большинства нитчатых форм микроорганизмов, обнаруженных в биоценозах активного ила обеих площадок Минской очистной станции, способствует низкая нагрузка на активный ил. Однако повышение нагрузки путем снижения дозы активного ила может иметь ряд отрицательных последствий. Так, возможен переход микроорганизмов в логарифмическую фазу роста, следствием чего является максимальный прирост биомассы, в результате увеличивается количество избыточного активного ила и возрастают затраты, связанные с его обработкой. При эксплуатации очистных сооружений предпочтительно, чтобы микроорганизмы пребывали в стационарной фазе роста, в условиях которой прирост биомассы ограничен небольшим количеством питательных веществ на единицу массы ила. По этой причине поддержание низкой нагрузки на активный ил за счет его высокой дозы является оправданным. Однако при определении величины дозы активного ила в аэротенке необходимо, кроме основных расчетных параметров, также учитывать значение илового индекса: чем он меньше, тем большую дозу ила можно поддерживать в аэротенке [15]. Кроме того, зафиксированное увеличение дозы активного ила с августа по октябрь от 4,5 до 5 г/дм<sup>3</sup> (рис. 3), что соответствовало уменьшению илового индекса со 192 до 158 см<sup>3</sup>/г, практически не повлияло на состав и количественное соотношение нитчатых форм — эти показатели в указанный период времени варьировали незначительно. Таким образом, принятие конкретного решения о рекомендуемой величине дозы ила в период интенсивного развития нитчатых бактерий требует учета всех факторов в совокупности.

## Выводы

Проведенная работа по совершенствованию методики гидробиологического анализа активного ила на Минской очистной станции позволила получить следующие результаты. Предложена форма учета организмов биоценоза активного ила и оценки характеристик иловой суспензии, позволяющая представлять результаты лабораторных исследований в графическом виде, что более наглядно и удобно для анализа по сравнению со стандартными формами. Разработана балльная система оценки уровня развития нитчатых организмов на очистных сооружениях. Проведена апробация предлагаемой методики для мониторинга состояния иловой суспензии на очистных сооружениях станции в течение длительного периода времени, включающего разные сезоны года. Установлено, что для первой и второй площадок очистных сооружений характерно формирование в основном идентичного по видовому составу сообщества нитчатых бактерий, отмечены особенности каждого биоценоза. Показано, что четыре-пять видов являются постоянными обитателями биосистемы, еще около четырех появляются периодически. Степень доминирования основных видов в биоценозах площадок различна.

Предлагаемые методики позволяют более полно и качественно проводить анализ состояния иловой суспензии, выявлять причины ухудшения качественных характеристик активного ила уже на начальных этапах их возникновения и своевременно принимать меры по их устранению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов М. Н., Дорофеев А. Г., Асеева В. Г. Микробиологический контроль активного ила биореакторов очистки сточных вод от биогенных элементов. — М.: Наука, 2012. 79 с.
2. ПНД Ф СБ 14.1.77-96 «Методическое руководство по гидробиологическому и бактериологическому контролю процесса биологической очистки на сооружениях с аэротенками». — М.: АКВАРОС, 1996. 97 с.
3. ПНД Ф СБ 14.1.92-96 «Методическое руководство по гидробиологическому и бактериологическому контролю процесса биологической очистки на сооружениях с аэротенками». — М.: АКВАРОС, 1996. 99 с.
4. Wilen B. M. Effect of different parameters on settling properties of activated sludge. Chalmers University of Technology. Department of Water Supply and Sewerage Technology. — Sweden, Rapport, 1995, 64 p.
5. David J., Richard M. G., Daigger G. T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems. 3<sup>rd</sup> edition. — London: CRC Press, 2017. 190 p.

6. WWOA [Electronic resource]: Identification & Control of Filamentous Bacteria: <https://www.wwoa.org/files/publishedpapers/2013/Microbiology/Identification%20and%20Control%20of%20Filamentous%20Bacteria.pdf/> (дата обращения 20.02.2017).
7. Eikelboom D. H. Process control of activated sludge plants by microscopic investigation. – London: IWA Publishing, 2000. 170 p.
8. Van Haandel A. C., van der Lubbe J. G. M. Handbook of biological wastewater treatment design and optimisation of activated sludge systems. – London: IWA Publishing, Alliance House, 2012. 769 p.
9. RESEARCHGATE [Electronic resource]: Activated sludge bulking one hundred years of theory and practice, Lever M. [https://www.researchgate.net/publication/271523654\\_ACTIVATED\\_SLUDGE\\_BULKING\\_One\\_hundred\\_years\\_of\\_theory\\_and\\_practice](https://www.researchgate.net/publication/271523654_ACTIVATED_SLUDGE_BULKING_One_hundred_years_of_theory_and_practice)— (дата обращения 10.02.2019).
10. The causes and control of activated sludge bulking and foaming. Summary report: Prepared by Dynamac Corporation. – Rockville, 1987. 92 p.
11. D'Antoni B. M., Iracá F., Romero M. Filamentous foaming and bulking in activated sludge treatments: causes and mitigation actions. – Fiesso d'Artico, 2017. 10 p.
12. Richards A. Effects of detergent use on water quality in Kathmandu, Nepal: Master of engineering in civil and environmental engineering at the Massachusetts Institute of technology, Cambridge, 2003. 84 p.
13. Övez S., Orhon D. Microbial ecology of bulking and foaming activated sludge treating tannery // *Journal of Environmental Science and Health*. A40:409–422, 2005. P. 409–422.
14. Дубовик О. С., Маркевич Р. М., Антонов К. В. Совершенствование биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора в условиях каскадной денитрификации // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2019. № 2. С. 19–23.
15. Гришин Б.М. и др. Совершенствование работы сооружений биологической очистки сточных вод с использованием электрогидродинамических установок. – Пенза, ПГУАС, 2013. 128 с.

#### REFERENCES

1. Kozlov M. N., Dorofeev A. G., Aseeva V. G. *Mikrobiologicheskii kontrol' aktivnogo ila bioreaktorov ochistki stochnykh vod ot biogennykh elementov* [Microbiological monitoring activated sludge in the bioreactor for removing nutrients from wastewater. Moscow, Nauka Publ., 2012, 79 p.].
2. *PND F SB 14.1.77-96 Metodicheskoe rukovodstvo po gidrobiologicheskomu i bakteriologicheskomu kontroliu protsessa biologicheskoi ochistki na sooruzheniiakh s aerotenkami* [Methodological guidelines for hydrobiological and bacteriological control of the biological treatment process at the facilities with aeration tanks. Moscow, AKVAROS Publ., 1996, 97 p.].
3. *PND F SB 14.1.92-96 Metodicheskoe rukovodstvo po gidrobiologicheskomu i bakteriologicheskomu kontroliu protsessa biologicheskoi ochistki na sooruzheniiakh s aerotenkami* [Methodological guidelines for hydrobiological and bacteriological control of the biological treatment process at the facilities with aeration tanks. Moscow, AKVAROS Publ., 1996, 99 p.].
4. Wilen B. M. Effect of different parameters on settling properties of activated sludge. Chalmers University of Technology. Department of Water Supply and Sewerage Technology. Sweden, Rapport, 1995, 64 p.
5. David J., Richard M. G., Daigger G. T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems. 3<sup>rd</sup> edition. London: CRC Press, 2017, 190 p.
6. WWOA [Electronic resource]: Identification & Control of Filamentous Bacteria: <https://www.wwoa.org/files/publishedpapers/2013/Microbiology/Identification%20and%20Control%20of%20Filamentous%20Bacteria.pdf/> (accessed February 20, 2017).
7. Eikelboom D. H. Process control of activated sludge plants by microscopic investigation. London: IWA Publishing, 2000, 170 p.
8. Van Haandel A. C., van der Lubbe J. G. M. Handbook of biological wastewater treatment design and optimisation of activated sludge systems. London: IWA Publishing, Alliance House, 2012, 769 p.
9. RESEARCHGATE [Electronic resource]: Activated sludge bulking one hundred years of theory and practice, Lever M. [https://www.researchgate.net/publication/271523654\\_ACTIVATED\\_SLUDGE\\_BULKING\\_One\\_hundred\\_years\\_of\\_theory\\_and\\_practice](https://www.researchgate.net/publication/271523654_ACTIVATED_SLUDGE_BULKING_One_hundred_years_of_theory_and_practice)— (accessed February 10, 2019).
10. The causes and control of activated sludge bulking and foaming. Summary report: Prepared by Dynamac Corporation. Rockville, 1987, 92 p.
11. D'Antoni B. M., Iracá F., Romero M. Filamentous foaming and bulking in activated sludge treatments: causes and mitigation actions. Fiesso d'Artico, 2017, 10 p.
12. Richards A. Effects of detergent use on water quality in Kathmandu, Nepal: Master of engineering in civil and environmental engineering at the Massachusetts Institute of technology, Cambridge, 2003, 84 p.
13. Övez S., Orhon D. Microbial ecology of bulking and foaming activated sludge treating tannery. *Journal of Environmental Science and Health*, A40:409–422, 2005, pp. 409–422.
14. Dubovik O. S., Markevich R. M., Antonov K. V. [Improvement of biological removal of nitrogen and phosphorus compounds from wastewater under the conditions of cascade denitrification]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2019, no. 2, pp. 19–23. (In Russian).
15. Grishin B. M., et al. *Sovershenstvovanie raboty sooruzhenii biologicheskoi ochistki stochnykh vod s ispol'zovaniem elektrogidrodinamicheskikh ustanovok* [Improving the operation of biological wastewater treatment facilities using electrohydrodynamic installations. Penza, PGUAS Publ., 2013, 128 p.].