
ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК: 628.355

СООТНОШЕНИЕ НИТЧАТОЙ И ФЛОКУЛИРУЮЩЕЙ МИКРОБИОТЫ АКТИВНОГО ИЛА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

А. А. МАСЕХНОВИЧ¹⁾, И. А. ГРЕБЕНЧИКОВА¹⁾, Р. М. МАРКЕВИЧ¹⁾, М. В. РЫМОВСКАЯ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

Исследована способность нитчатых форм микроорганизмов, выделенных из биоценозов городских и производственных очистных станций, формировать нитчатые структуры и взаимодействовать с хлопками активного ила при совместном с ним культивировании в аэробных, микроаэробных и анаэробных условиях при различном соотношении объемов суспензий активный ил : нитчатые бактерии. Установлено соотношение нитчатой и флокулирующей микробиоты для эффективной биологической очистки сточных вод. Показано, что совместное культивирование активного ила и изолятов

Образец цитирования:

Масехнович АА, Гребенчикова ИА, Маркевич РМ, Рымовская МВ. Соотношение нитчатой и флокулирующей микробиоты активного ила для эффективной биологической очистки сточных вод. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:80–86.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-80-86>

For citation:

Masekhnovich AA, Grebenchikova IA, Markevich RM, Rymovskaya MV. The ratio of filamentous and flocculating microbiota of activated sludge for effective biological wastewater treatment. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:80–86. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-80-86>

Авторы:

Александра Андреевна Масехнович – аспирант кафедры биотехнологии.

Ирина Александровна Гребенчикова – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры биотехнологии.

Раиса Михайловна Маркевич – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры биотехнологии.

Мария Васильевна Рымовская – кандидат технических наук; доцент кафедры биотехнологии.

Authors:

Aleksandra A. Masekhnovich, postgraduate student at the department of biotechnology.

al.masekhnovich@mail.ru

Irina A. Grebenchikova, PhD (engineering), docent; associate professor at the department of biotechnology.

greb_irina_al@mail.ru

Raisa M. Markevich, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of biotechnology.

marami-bstu@yandex.ru

Mariya V. Rymovskaya, PhD (engineering); associate professor at the department of biotechnology.

rymovskaya_mv@mail.ru

M7, M9 и M26 в микроаэробных условиях способствует формированию плотного и компактного хлопка активного ила, если интенсивность перемешивания достаточна для обеспечения растворенным кислородом гетеротрофной микробиоты ила, но не приводит к разрушению хлопков. При культивировании в аэробных условиях смеси активного ила с бактериями M42 отмечено формирование наиболее компактного хлопка, что может быть связано с деятельностью бактерий этого изолята, которые массово встраивались в хлопок, однако не нарушали его структуру. Бактерии изолята A33 не оказывали влияния на структуру хлопка при любых соотношениях и условиях аэрации, но обнаруживались в смешанной культуре в большом количестве. В анаэробных условиях в присутствии бактерий M26 и A12 при соотношениях активный ил : нитчатые бактерии, равных 1:1, 3:1, нарушается структура хлопка, что может приводить к снижению его седиментационной способности. Кроме того, при наличии в иловой смеси изолята A12 в культуральной жидкости наблюдается большое количество не связанных с хлопком бактериальных нитей небольшой длины, что влечет за собой значительное увеличение концентрации взвешенных веществ в отстоянной жидкости.

Установленные факты следует учитывать в процессе эксплуатации очистных сооружений при риске массового развития нитчатых бактерий изолятов M26 и A12 и не допускать формирования в биореакторах застойных зон.

Ключевые слова: сточные воды; активный ил; биоценоз; нитчатые формы микроорганизмов; вспухание.

Благодарность. Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы «Повышение эффективности процессов биологической очистки сточных вод путем стабилизации бактериального состава биоценоза активного ила» ГБ 23-042, регистрационный № 20230575.

THE RATIO OF FILAMENTOUS AND FLOCCULATING MICROBIOTA OF ACTIVATED SLUDGE FOR EFFECTIVE BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT

A. A. MASEKHNOVICH^a, I. A. GREBENCHIKOVA^a, R. M. MARKEVICH^a, M. V. RYMOVSKAYA^a

^aBelarusian State Technological University,

13a Sverdlova Street, Minsk 220006, Belarus

Corresponding author: A. A. Masekhnovich al.masekhnovich@mail.ru

The ability of filamentous forms of microorganisms isolated from biocenoses of urban and industrial wastewater treatment plants to form filamentous structures and interact with activated sludge flocs when co-cultivated with it at aerobic, microaerobic and anaerobic conditions and at different volume ratios of activated sludge: filamentous bacteria suspensions was studied. The ratio of filamentous and flocculating microbiota for effective biological wastewater treatment has been established. It was found that the joint cultivation of activated sludge and isolates M7, M9 and M26 in microaerobic conditions contributes to the formation of dense and compact floc of activated sludge, the mixing intensity is sufficient to provide dissolved oxygen to the heterotrophic microbiota of sludge, but does not lead to the destruction of floc. When cultivating a mixture of activated sludge and M42 bacteria under aerobic conditions, the formation of the most compact floc was noted, which may be due to the activity of bacteria of this isolate, which were massively embedded in floc, but did not violate its structure. Bacteria of isolate A33 did not affect the structure of floc at any ratios and aeration conditions, but were found in large quantities in mixed culture. Under anaerobic conditions, in the presence of M26 and A12 bacteria, at a ratios of activated sludge : filamentous bacteria equal to 1:1, 3:1, the structure of floc is disrupted, which can lead to a decrease in its sedimentation ability. In addition, in the presence of isolate A12 in the sludge mixture, a large number of non-floc bacterial filaments of small length are observed in the culture liquid, which leads to a significant increase in the concentration of suspended solids in the settled liquid.

The established facts should be taken into account when operating treatment facilities at the risk of mass development of filamentous bacteria isolates M26 and A12 and prevent the formation of dead zones in bioreactors.

Keywords: wastewater; activated sludge; biocenosis; filamentous forms of microorganisms; bulking.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the research work «Improving the efficiency of biological wastewater treatment processes by stabilizing the bacterial composition of the biocenosis of activated sludge» GB 23042, No. SR 20230575.

Введение

В настоящее время нитчатое вспухание активного ила (АИ) является наиболее распространенной в мировой практике проблемой биологической очистки сточных вод [1]. Вспухание происходит вследствие деградации видового состава активного ила. Это может произойти по многим причинам: увеличение объема сточных вод, поступающих на очистку, изменение их химического состава, концентрации отдельных загрязняющих веществ, в том числе токсичных для активного ила, колебание удельной нагрузки на ил, понижение температуры сточных вод и т. д. [2]. В результате количественное преобладание получают нитчатые бактерии как наиболее устойчивые к различным неблагоприятным факторам [3].

При вспухании размеры флокул активного ила увеличиваются, но при этом значительно уменьшаются их плотность и, соответственно, способность к осаждению, что приводит к выносу АИ из отстойников вместе с биологически очищенными сточными водами [4]. Это также приводит к снижению эффективности биохимического окисления загрязняющих веществ и дополнительному ухудшению качества биологической очистки сточных вод. В конечном итоге вспухание ила в аэротенках вызывает проблему экологического характера – загрязнение природных водоемов [5].

В то же время наличие нитчатых бактерий в активном иле нельзя рассматривать только как отрицательное явление. При малой концентрации они вносят значимый вклад в процесс очистки сточных вод благодаря своей высокой окислительной способности, а вследствие их армирующего действия увеличиваются размеры и повышается прочность флокул. При наличии нитчатых микроорганизмов повышается степень осветления воды при отстаивании смеси сточной воды и активного ила. Это связано с тем, что они способны улавливать и удерживать взвешенные вещества, находящиеся в воде в коллоидном и мелкодисперсном состоянии [6].

Таким образом, современные технологии биологической очистки сточных вод не предусматривают полного исключения из биоценоза активного ила нитчатых бактерий. Задача состоит в том, чтобы обеспечить оптимальное соотношение нитчатых и флокулирующих микроорганизмов [7].

Цель исследования – установление соотношения нитчатой и флокулирующей микробиоты активного ила для эффективной биологической очистки сточных вод.

Материалы и методы исследования

В эксперименте использовали активный ил с минимальным исходным содержанием нитчатых форм микроорганизмов и суточные культуры бактериальных изолятов, выделенных из биоценозов Минской очистной станции УП «Минскводоканал» (МОС) и Слонимского картонно-бумажного завода «Альбертин», выращенных на среде ССВ, разработанной на основе среднегодового состава реальных сточных вод, поступающих на МОС.

Аэробные условия создавали путем культивирования иловой суспензии с нитчатыми микроорганизмами в емкостях с небольшим количеством питательной среды (50 см³) в шейкере-инкубаторе Environmental Shaker – Incubator ES-20 при частоте встряхиваний 160 мин⁻¹. Для моделирования микроаэробных условий суспензию активного ила с добавлением выделенных бактерий культивировали при той же частоте встряхиваний в емкостях с высоким слоем среды, допуская лишь незначительное перемешивание культуральной жидкости. Анаэробные условия обеспечивали в плотно закрытых пробирках без перемешивания, заполняя их практически полностью (высота слоя среды около 10 см).

Для оценки влияния количества нитчатых бактерий (НБ) на структуру хлопка активного ила (АИ) были выбраны следующие соотношения количества суспензий АИ:НБ – 1:1; 3:1; 10:1.

Эксперимент проводили в течение 4 суток без внесения подпитки. Периодически отбирали пробы суспензий и микроскопировали полученные образцы при помощи микроскопа «Биологический» (увеличение ×400). Визуально оценивали численность нитчатых форм бактерий и их влияние на структуру хлопка активного ила. Для сравнения изучали изменение морфологии нитей микроорганизмов при культивировании чистых культур в идентичных условиях.

Результаты исследования и их обсуждение

Для эксперимента были отобраны изоляты с наиболее развитой нитчатой структурой, способные сохранять ее при существенном варьировании значений внешних факторов (рис. 1).

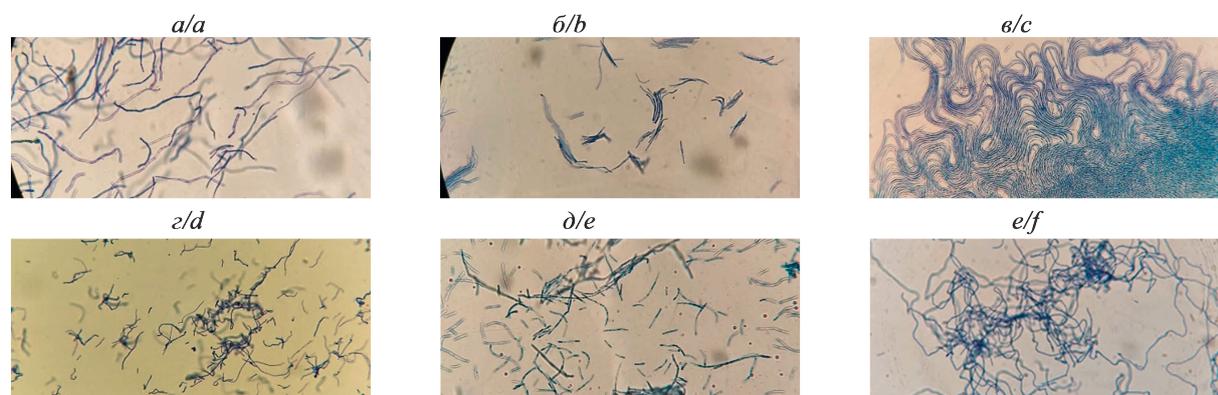


Рис. 1. Микрофотографии нитчатых форм микроорганизмов, выделенных из биоценозов активного ила Минской очистной станции УП «Минскводоканал»: а) М7, б) М9, в) М26, г) М42 и Слонимского картонно-бумажного завода «Альбертин»: д) А12, е) А33

Fig. 1. Photomicrographs of filamentous forms of microorganisms isolated from activated sludge biocenoses of the Minsk wastewater treatment plant UE «Minskvodokanal»: а) М7, б) М9, в) М26, г) М42 and Slonim cardboard and paper mill «Albertin»: е) А12, ф) А33

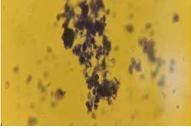
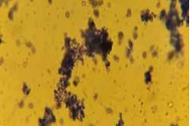
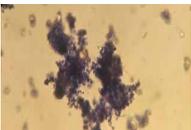
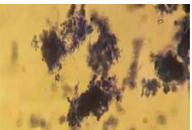
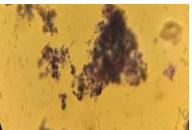
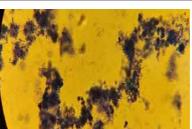
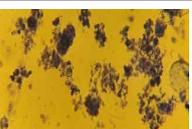
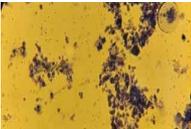
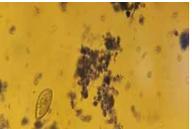
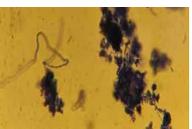
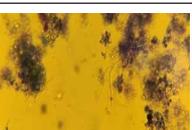
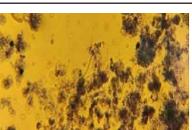
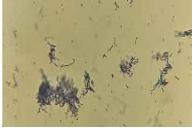
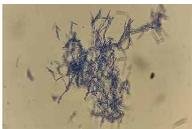
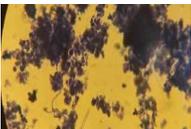
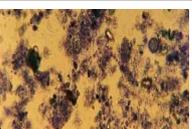
Результаты эксперимента по влиянию условий аэрации на формирование хлопка активного ила в присутствии нитчатой микробиоты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Способность нитчатых форм микроорганизмов встраиваться в структуру хлопка в различных условиях аэрации

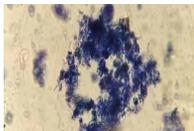
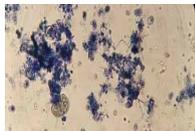
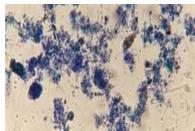
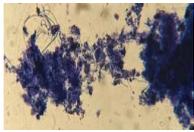
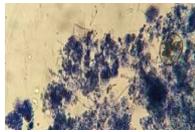
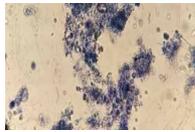
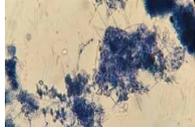
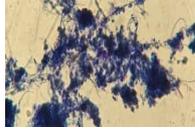
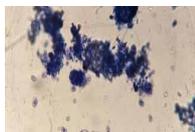
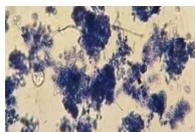
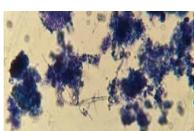
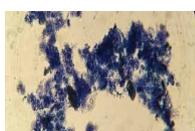
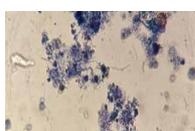
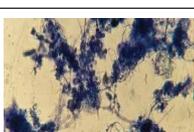
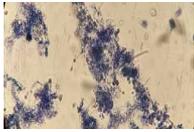
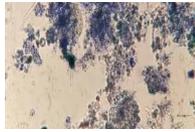
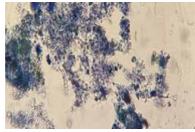
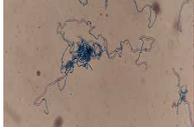
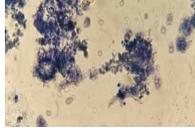
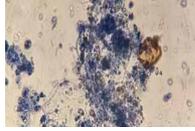
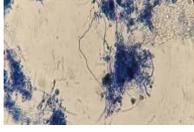
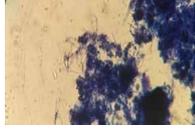
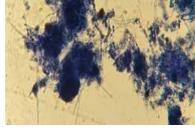
Table 1

The ability of filamentous forms of microorganisms to integrate into the structure of floc under various aeration conditions

Условия культивирования	Микрофотографии чистых культур нитчатых бактерий	Микрофотографии суспензий при соотношении активный ил : нитчатые бактерии		
		1 : 1	3 : 1	10 : 1
Изолят М7				
Аэробные				
Микроаэробные				
Анаэробные				
Изолят М9				
Аэробные				
Микроаэробные				
Анаэробные				
Изолят М26				
Аэробные				
Микроаэробные				
Анаэробные				

Окончание табл. 1

Ending table 1

Условия культивирования	Микрофотографии чистых культур нитчатых бактерий	Микрофотографии суспензий при соотношении активный ил : нитчатые бактерии		
		1 : 1	3 : 1	10 : 1
Изолят М42				
Аэробные				
Микроаэробные				
Анаэробные				
Изолят А12				
Аэробные				
Микроаэробные				
Анаэробные				
Изолят А33				
Аэробные				
Микроаэробные				
Анаэробные				

Установлено, что для всех исследуемых изолятов при соотношении количества АИ:НБ = 10:1 бактериальные нити либо визуально не обнаруживались ни в свободном состоянии, ни в структуре хлопка, либо обнаруживались в малом количестве, поэтому при обсуждении результатов эксперимента рассматривали соотношения АИ:НБ = 1:1 и 3:1.

Показано, что в чистой культуре бактерии изолята М7 образовали более выраженные нитчатые структуры в микроаэробных условиях в сравнении с аэробными и анаэробными. При культивировании совместно с активным илом нити М7 визуально фиксировались в хлопке уже после 6 ч культивирования при любых соотношениях АИ:НБ. Образование нитей было намного менее выражено в аэробных и анаэробных условиях, в этих случаях нити были короче, хуже встраивались в хлопок, часто наблюдались в свободном состоянии.

При совместном культивировании АИ и НБ М7 наиболее компактный хлопок формировался микроаэробных условиях, несмотря на большое количество длинных нитей, обнаруженных как в свободном состоянии, так и в структуре хлопка.

При культивировании бактерий М9 в чистой культуре наиболее длинные нити образовывались в анаэробных условиях. При совместном культивировании АИ и НБ М9 в соотношении 1:1 встраивание в хлопок происходило уже после 6 ч культивирования при любой интенсивности аэрации. При соотношении АИ:НБ = 3:1 после первых 6 ч культивирования в смеси наблюдались свободные нити бактерий. По прошествии 24 ч, независимо от исходного соотношения АИ:НБ и условий аэрации, наблюдалось обрастание нитей гетеротрофной микробиотой. При этом в аэробных и анаэробных условиях хлопок был более рыхлый, области с большей плотностью биомассы перемежались с менее плотными; в условиях микроаэрации формировался хлопок визуальнее компактнее, в нем было больше крупных образований.

Бактериальные нити изолята М26 наблюдались в структуре хлопка независимо от условий аэрации и соотношения АИ:НБ уже после 6 ч совместного культивирования:

- в аэробных условиях бактерии М26 образовывали нити небольшой длины в малом количестве, вследствие чего они не могли выступать как связующий элемент при формировании хлопка;
- при микроаэробных условиях бактерии М26 образовывали более длинные нити, которые успешно связывали элементы хлопка, в результате формировался крупный и более компактный хлопок активного ила;
- при совместном культивировании бактерий изолята М26 с активным илом в отсутствие аэрации отмечены разрыхление хлопка, разобщение отдельных более плотных участков и в то же время объединение их в крупные пространственные структуры за счет длинных бактериальных нитей исследуемого изолята, выступающих в роли «мостиков». Следует отметить, что при культивировании М26 в чистой культуре наибольшая длина и количество нитей наблюдались именно в анаэробных условиях.

Таким образом, внесение бактерий изолята М26 в иловую смесь в соотношении АИ:НБ = 1:1 либо 3:1 нарушало структуру хлопка активного ила в анаэробных условиях. Согласно полученным результатам, существует вероятность, что на действующих очистных сооружениях развитию данных бактерий будет способствовать наличие в биореакторах зон с отсутствием аэрации и перемешивания иловой смеси, а значительный рост их концентрации в иловой смеси может приводить к деградации хлопка ила и ухудшению его седиментационной способности.

При культивировании в чистой культуре бактерий М42 значительное количество длинных нитей наблюдалось в аэробных условиях. При совместном культивировании бактерий изолята М42 с активным илом существенное влияние оказывала интенсивность аэрации: в анаэробных и микроаэробных условиях формировалось небольшое количество нитей средней длины, обнаруженных как в свободном состоянии, так и в структуре хлопка, причем они не являлись причиной его разрыхления; в аэробных условиях отмечено формирование наиболее компактного хлопка, что может быть связано с деятельностью бактерий изолята М42, которые постепенно медленно удлинялись на протяжении всего эксперимента, при этом массово встраивались в хлопок, не нарушая его структуру.

Бактерии А12 в аэробных и микроаэробных условиях развивались медленно, оценить их участие в формировании хлопка сложно. Визуально в иловой суспензии нитей практически не наблюдалось, при этом плотная и достаточно компактная структура хлопка затрудняла выявление в нем представителей данного изолята. Данное явление отмечено для всех соотношений АИ:НБ А12.

В то же время в анаэробных условиях наблюдалось массовое развитие изолята А12, в результате чего в иловой суспензии присутствовало большое количество свободных нитей разной длины (такая же ситуация складывалась при развитии чистой культуры бактерий А12 в отсутствие аэрации). Примерно через 24 ч совместного культивирования при любых соотношениях АИ:НБ нити бактерий А12 в массовом количестве обнаружены в структуре хлопка, что привело к его деградации, снижению плотности и компактности. Этот факт следует учитывать при эксплуатации очистных сооружений и при риске массового развития нитчатых бактерий изолята А12, не допуская формирования зон с отсутствием аэрации и перемешивания иловой смеси.

В чистой культуре бактерии изолята А33 образовывали длинные нити во всех условиях аэрации, однако в анаэробных количество нитчатых структур значительно выше. При совместном культивировании АИ и НБ А33 в любых условиях аэрации не отмечено бактериальных нитей в свободном состоянии, в то же время они обнаружены в структуре хлопка уже через 6 ч от начала эксперимента.

При соотношениях АИ:НБ = 1:1, 3:1 в аэробных и микроаэробных условиях структура хлопка не была нарушена присутствием изолята А33. В анаэробных условиях количество нитей в хлопке гораздо выше,

причем их длина значительно больше, чем в аэробных и микроаэробных, однако это обстоятельство также не сказывалось на структуре хлопка, его размерах и плотности. Следовательно, при возникновении на очистных сооружениях условий, соответствующих созданным в эксперименте, бактерии изолята А33 не вызовут значительных нарушений технологического процесса.

Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов.

1. Совместное культивирование с активным илом изолятов М7, М9 и М26 в микроаэробных условиях способствует формированию более плотного и компактного хлопка, интенсивность перемешивания достаточна для обеспечения растворенным кислородом гетеротрофной микробиоты ила, но не приводит к разрушению хлопков. Эффективность встраивания в хлопок активного ила данных нитчатых форм бактерий не зависит от исходного соотношения АИ:НБ.

2. Наличие бактерий М42 при культивировании смеси в аэробных условиях стимулировало формирование наиболее компактного хлопка, что может быть связано с деятельностью бактерий этого изолята, которые массово встраивались в хлопок, однако не нарушали его структуру.

3. Бактерий изолята А33 обнаруживались в смешанной культуре в большом количестве, но при этом не оказывали влияния на структуру хлопка при любых соотношениях и условиях аэрации.

4. Важное практическое значение имеют следующие результаты: наличие в смеси бактерий М26 и А12 при соотношении АИ:НБ = 1:1, 3:1 в анаэробных условиях приводит к нарушению структуры хлопка (в нем наблюдаются небольшие более плотные разрозненные участки, связанные длинными «мостиками» нитчатых бактерий), что может приводить к снижению его седиментационной способности. Кроме того, в случае присутствия в иловой смеси изолята А12 в отсутствие аэрации в культуральной жидкости наблюдается большое количество не связанных с хлопком бактериальных нитей небольшой длины, а это влечет за собой значительное увеличение концентрации взвешенных веществ в отстоянной жидкости. Установленные факты следует учитывать в процессе эксплуатации очистных сооружений при риске массового развития нитчатых бактерий изолятов М42 и А12 и не допускать формирования в биореакторах застойных зон с отсутствием аэрации и перемешивания иловой смеси.

Библиографические ссылки

1. Ручай НС, Маркевич РМ. *Экологическая биотехнология*. Минск: БГТУ; 2006. 312 с.
2. Гогина ЕС, Гульшин ИА. Использование озона для контроля нитчатого вспухания активного ила. *Строительство: наука и образование*. 2012;3:6–28.
3. Маркевич РМ, Гребенчикова ИА, Рымовская МВ. *Биотехнологическая переработка промышленных отходов*. Минск: БГТУ; 2018. 300 с.
4. Seviour RJ, Blackall LL. *The microbiology of activated sludge*. Dordrecht: Springer; 1999. 422 p.
5. Усачева КВ, Верес ЮК. Устранение нитчатого вспухания активного ила в условиях эксперимента. В: *Сборник научных работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2011»*. Минск: БГУ; 2012. с. 65–69.
6. Кичигина СВ. Устойчивость функционирования систем биологической очистки путем исключения нитчатого вспухания активного ила [автореферат диссертации]. Щелково: [б. и.]; 2007. 28 с.
7. Жмур НС. *Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками*. Москва: АКВАРОС; 2003. 512 с.

References

1. Ruchay NS, Markevich RM. *Ekologicheskaya biotekhnologiya* [Environmental biotechnology]. Minsk: BGTU; 2006. 312 p. Russian.
2. Gogina ES, Gulshin IA. *Ispol'zovanie ozona dlya kontrolya nitchatogo vspukhaniya aktivnogo ila* [The use of ozone to control filamentous swelling of activated sludge]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2012;3:6–28. Russian.
3. Markevich RM, Grebenchikova IA, Rymovskaya MV. *Biotekhnologicheskaya pererabotka promyshlennykh otkhodov* [Biotechnological processing of industrial waste]. Minsk: BGTU; 2018. 300 p. Russian.
4. Seviour RJ, Blackall LL. *The microbiology of activated sludge*. Dordrecht: Springer; 1999. 422 p.
5. Usacheva KV, Veres YuK. *Ustranenie nitchatogo vspukhaniya aktivnogo ila v usloviyakh eksperimenta*. V: *Sbornik nauchnykh работ studentov Respubliki Belarus «NIRS 2011»* [Elimination of filamentous swelling of activated sludge under experimental conditions]. Minsk: BGTU; 2012. p. 65–69. Russian.
6. Kichigina SV. *Ustoychivost funktsionirovaniya sistem biologicheskoy ochistki putem isklyucheniya nitchatogo vspukhaniya aktivnogo ila. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Stability of the functioning of biological purification systems by eliminating filamentous swelling of activated sludge [PhD thesis]. Shchelkovo: [publisher unknown]; 2007. 28 p. Russian.
7. Zhmur NS. *Tekhnologicheskije i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniyakh s aerotenkami* [Technological and biochemical processes of wastewater treatment at facilities with aerotanks]. Moscow: AKVAROS; 2003. 512 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 24.07.2024.
Received by editorial board 24.07.2024.