

Оригинальная статья/ Original article
УДК 628.355
DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-77-83>

Восстановление видового состава биоценоза аэрируемых сооружений после длительного простоя

© В.Н. Кульков, Е.Ю. Солопанов

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Изучена динамика видового состава иммобилизованного ила на ершовой инертной загрузке после длительной остановки биореактора. Эксперимент проведен с применением микроскопического анализа. Запуск биореактора с илом, адаптированным к сточным водам, позволяет достичь заданной степени очистки за короткое время. Эксперимент проводили в физической модели биореактора, представляющей собой поперечный вертикальный разрез промышленного аэротенка-биореактора. Получена динамическая зависимость количественного увеличения видового состава биоценозов в период восстановления. Определена динамика биоценоза на примере жизненной активности инфузорий. Найдено математическое выражение для расчета скорости передвижения инфузорий в период восстановления биоценоза. Показано изменение массы иммобилизованного ила на ершовой загрузке в период культивирования биоценоза в аэробных условиях. Применение биореакторов с иммобилизованным на загрузке илом позволяет запустить биологическую очистку канализационных очистных сооружений путем создания аэробных условий и циклического перевода иммобилизованного ила в свободно плавающий ил с помощью воздушной среднепузырчатой аэрации. Видовой состав микроорганизмов увеличился до первоначальных 6 видов за десять суток, а физиологическое состояние биоценоза характеризовалось как удовлетворительное.

Ключевые слова: физическая модель биореактора, иммобилизованный ил, ершовая загрузка, жизнеспособность биоценоза

Информация о статье: Дата поступления 11 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 25 февраля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2020 г.

Для цитирования: Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Восстановление видового состава биоценоза аэрируемых сооружений после длительного простоя // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. N 1. С. 77–83. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-77-83>

Restoring biocoenotic species composition in aerated structures following prolonged downtime

Victor N. Kulkov, Evgeny Yu. Solopanov

Irkutsk National Research Technical University Irkutsk, Russian Federation

Abstract: A study was carried out into the dynamics of species composition for immobilised sludge with inert brush filtering following prolonged bioreactor downtime. The experimental part was carried out using microscopic analysis. The start of a bioreactor with sludge adapted to wastewater provides a specified degree of purification within a stated period of time. The experiment was carried out in a physical bioreactor model presenting a transverse vertical section of an industrial bioreactor aerotank. The dynamic dependency of the quantitative increase in biocoenotic species composition during the recovery period is obtained. The dynamics of biocoenosis is determined by the example of ciliate vital activity. A mathematical expression for calculating the ciliate movement speed during biocoenosis recovery is obtained. In culturing the biocoenosis under aero-

bic conditions, the rate of mass change for immobilised sludge with brush filtering is presented. The application of bioreactors with immobilised sludge under brush filtering provides for the biological treatment of sewage through the creation of aerobic conditions and cyclic transfer of immobilised sludge to freely floating sludge using air medium bubble aeration. In ten days, the microorganism species composition increased to the initial 6 species having a physiological biocoenosis state characterised as satisfactory.

Keywords: *bioreactor physical model, immobilised sludge, brush filtering, biocoenosis viability*

Information about the article: *Received April, 11 2019; accepted for publication February 25, 2019; available online March 31, 2020.*

For citation: Kulkov VN, Solopanov EYu. Restoring biocoenotic species composition in aerated structures following prolonged downtime. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020;10(1):77–83. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-77-83>

ВВЕДЕНИЕ

В окружающей среде значительное количество микроорганизмов живут и проявляют биохимическую активность, находясь в прикрепленном состоянии к твердой поверхности почвы или подводной растительности водоемов, осуществляя при этом разнообразные микробиологические превращения органических веществ [1, 2]. В аэротенках-биореакторах используется ершовая синтетическая загрузка с развитой поверхностью для седиментации свободно плавающего ила. Формирование иммобилизованного биоценоза организмов-деструкторов на инертных ершовых носителях – основополагающая идея для создания аэротенков-биореакторов, предназначенных для глубокой биологической очистки сточных вод [3–5].

При использовании иммобилизованного ила, адсорбированного на ершовой загрузке, глубокая очистка сточных вод осуществляется двумя видами ценозов: активным илом, находящимся в свободно плавающем состоянии, и биомассой, сорбированной на инертных носителях. Биомасса на носителях образována хлопьями ила и микроорганизмами, защищенными от их выноса из биореактора [6–11].

Иммобилизованный ил менее чувствителен к ядовитым веществам, поступающим в биореактор. Сорбированная структура биомассы на ершовой загрузке обеспечивает защищенность нитрифицирующих и денитрифицирующих микроорганизмов от залповых поступлений вредных веществ и увеличивает общую дозу ила в биореакторе.

Иммобилизованный на ершовой загрузке ил нуждается в периодической регенерации, то есть его переводе в свободно плавающее состояние и последующей адсорбции. Самопроизвольного смыывания отмирающей биомассы не происходит, так как гидродинамические потоки, реализуемые в объеме ершовой загрузки, имеют скорость от 0,05 до 0,07 м/с, что недостаточно для обновления биомассы.

Применение инертной загрузки с иммоби-

лизованным биоценозом позволяет запустить биологическую очистку канализационных очистных сооружений (КОС) в минимально короткое время благодаря использованию адаптированного биоценоза. Смыывание иммобилизованного биоценоза целесообразно проводить воздушной среднепузырчатой регенерацией.

Цель представленной работы – оценить видовой состав биоценоза, его динамику и жизнеспособность при запуске биореактора с адаптированным иммобилизованным илом, находящимся десять дней в «полусухом» биореакторе при его вынужденной остановке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Установка для изучения видового состава биоценоза иммобилизованного ила в биореакторе с использованием среднепузырчатой регенерации загрузки представлена на рис. 1.

Активный ил концентрации 0,58 г/дм³, находящийся в биореакторе, оседал на синтетической загрузке, распределяясь гидродинамическими потоками. Средняя скорость в поверхностном слое потока жидкости составляла 0,6–0,65 м/с и обеспечивалась мелкопузырчатым аэратором, установленным в левом нижнем углу биореактора. Удельная интенсивность аэрации водно-иловой смеси составляла 6,37 м³/(м²·ч) [12–14].

Для определения динамики видов микроорганизмов в иммобилизованном иле был использован многоступенчатый метод подсчета откалиброванной капли, предложенный О.Г. Никитиной [15]. Оперативный контроль количества микроорганизмов проводили в два этапа.

1 этап. На предметное стекло микропипеткой наносилась калиброванная капля хорошо перемешанной иловой смеси объемом 0,01 см³ и покрывалась покровным стеклом 9×9 мм. Просматривались все поля зрения препарата, укрепленного в препаратодателе, начиная от левого верхнего угла покровного стекла. При увеличении 100х подсчитывались все микроорганизмы.

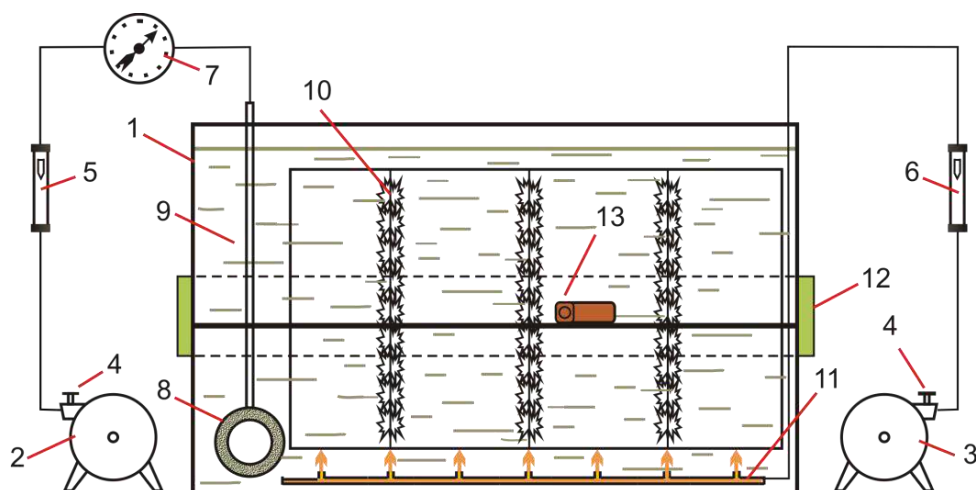


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с воздушной регенерацией:
1 – модельный биореактор; 2 – компрессор с ресивером для аэрации водно-иловой смеси;
3 – компрессор с ресивером для регенерации; 4 – кран для регулирования расхода воздуха и сброса его в атмосферу;
5, 6 – ротаметр; 7 – манометр; 8 – мелкопузырчатый аэратор; 9 – водно-иловая смесь; 10 – инертная синтетическая загрузка типа «ерш»;
11 – среднепузырчатый регенератор загрузки; 12 – лампа для освещения водно-иловой смеси; 13 – люксметр

Fig. 1. Scheme of experimental installation with air regeneration:
1 – model bioreactor; 2 – compressor with a receiver for aeration of water-sludge mixture;
3 – compressor with receiver for regeneration; 4 – valve to regulate the flow of air and its discharge into the atmosphere;
5, 6 – rotameter; 7 – manometer; 8 – fine-bubble aerator; 9 – water-sludge mixture; 10 – inert synthetic loading of "Brush"; 11 – medium bubble loading regenerator;
12 – lamp for illumination of water-sludge mixture; 13 – luxmeter

II этап. На предметное стекло наносилась капля иловой смеси объемом 0,1 см³ и накрывалась покровным стеклом 24×24 мм. Так же, как и на первом этапе, просматривались все без исключения поля зрения. При увеличении 70х подсчитывали только те организмы, которые на первом этапе не встречались.

В целях уменьшения случайной ошибки эксперимента подсчет микроорганизмов проводился трижды на каждом этапе. Для нахождения количества экземпляров организмов использовали среднеарифметическое значение, округленное до целого числа.

Для определения количества микроорганизмов, K , шт./мл, в пробе исследуемого ила применяли формулу

$$K = \frac{\Sigma}{V_k \cdot m},$$

где Σ – количество экземпляров, шт.; V_k – объем капли (0,01 мл); m – доза ила по массе, г/дм³.

Для ежедневного контроля видового состава ила его проба отбиралась с ершовой загрузки перед проведением воздушной регенерации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Кинетика восстановления видового состава иммобилизованного ила оценивалась по биоценозу промышленного ила. Для этого ершовая

загрузка в количестве трех штук (диаметр – 50 мм, длина – 0,7 м) опускалась в азотенк № 10 БОС-1 г. Ангарска¹. После ~5 ч она извлекалась и помещалась в модельную ячейку на ~20 мм выше зеркала водно-иловой смеси, расположенной на дне (рис. 2). Ершовая загрузка находилась в полусухой ячейке 10 дней (имитировалась вынужденная остановка биореактора).

Ершовая насадка, обросшая микроорганизмами, содержит два вида биоценозов. В цилиндрическом объеме ершей периферийные концы волокон хорошо обеспечиваются кислородом, и на них расселяется нитрифицирующий биоценоз.

К внутреннему стержню ерша пузырьки воздуха не проникают и там создаются анаэробные условия, что способствует образованию вокруг стержня денитрифицирующего биоценоза. Эти два вида биоценозов хорошо дополняют друг друга, так как нитрифицирующий биоценоз дает подкисление сточной жидкости, а денитрифицирующий – подщелачивание. Прирост нитрифицирующей биомассы микроорганизмов дает питание денитрифицирующему биоценозу при ее отмирании [4].

После изучения видового состава ила, находящегося в желеобразной массе загрузки на воздухе, модельный биореактор заполняли исходной сточной водой с дозой ила 0,58 г/дм³.

¹ В экспериментальной работе принимала участие С.С. Буянова, инженер БОС-1 ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» (г. Ангарск).



Рис. 2. Имобилизованный ил на ершовой загрузке

Fig. 2. Immobilized sludge on brush loading

Аэрацию водно-иловой смеси осуществляли непрерывно с интенсивностью $6,37 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ в течение всей продолжительности цикла культивирования биоценоза в условиях аэробного биологического процесса.

В процессе восстановления биоценоза ежедневно отбирали пробы для анализа видового состава иммобилизованного ила. Лабораторный анализ биоценоза выполняли на электронном микроскопе LEICA DM 1000. Проба отбиралась перед воздушной регенерацией, ее масса фиксировалась. Регенерация «полуживого» иммобилизованного ила осуществлялась воздушной среднепузырчатой аэрацией в течение 2 мин с интенсивностью $7,47 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$. Наблюдалось ежедневное увеличение массы иммобилизованного ила по сухому веществу на погонный метр. За 10 дней культивирования масса увеличилась с $\sim 10,4$ до $\sim 11,6 \text{ г/м.п.}$ (рис. 3).

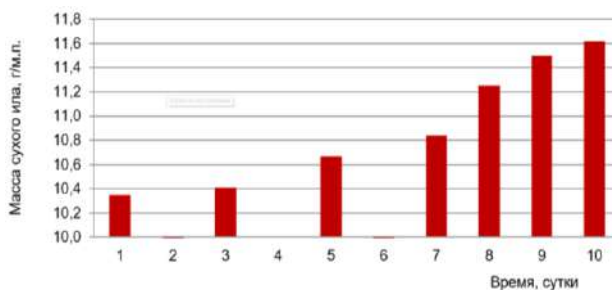


Рис. 3. Кинетика массы сухого ила на ершовой загрузке

Fig. 3. Kinetics of sludge dry mass at brush loading

В первый день культивирования биоценоза в аэробных условиях при достаточном количестве питательных веществ были обнаружены: малоцетинковый червь, пустые веточки колониальных амёб с преобладанием раковинных амёб. Хлопья ила неплотные, что свидетельствует о недостатке кислорода. На метр погонный ершовой загрузки приходилось $10,35 \text{ г}$ ила по сухому веществу.

На пятый день началось восстановление первоначального видового состава иммобилизованного ила. Масса сухого вещества незначительно увеличилась и составила $10,67 \text{ г/м.п.}$ Появилось большое количество нитчатых микроорганизмов, а нематоды исчезли. Чаще встречались раковинные амёбы и их цисты.

На восьмой день восстановления масса сухого вещества увеличилась до $11,25 \text{ г/м.п.}$ Возросло количество амёб, цист, мелких жгутиковых (в виде цветка).

На десятый день культивирования биоценоза произошло полное восстановление его первоначального видового состава. Появились колониальные, прикрепленные и брюхоночные инфузории. Масса сухого ила на метр погонный ершовой загрузки составила $11,62 \text{ г}$. Увеличилась суммарная доза ила, определенная гравиметрическим методом [1].

После воздушной среднепузырчатой регенерации иммобилизованного ила его остаточная концентрация на ершовой загрузке была равна $\sim 0,17 \text{ г/дм}^3$, что составляет $\sim 30\%$ от суммарной дозы ила (рис. 4). Остаточная концентрация иммобилизованного ила рассчитывалась вычитанием из общей дозы величины концентрации свободно плавающего ила, которая контролировалась люксметром.

Гидродинамические потоки водно-иловой смеси со скоростью $\sim 0,05 \text{ м/с}$ в объеме ершовой загрузки способствовали седиментации ила на ершах. Осаждение ила до квазистационарного состояния происходило за $\sim 70 \text{ мин}$. Далее проводили следующую регенерацию ила, процесс повторялся (см. рис. 4).

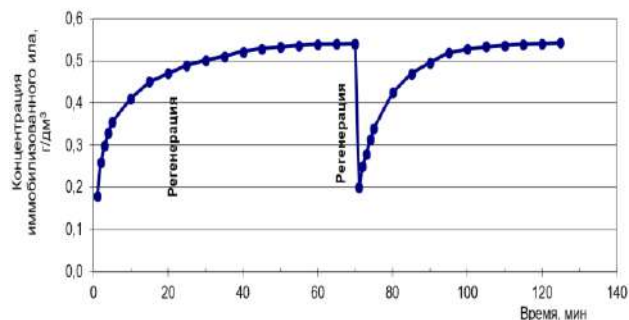


Рис. 4. Изменение концентрации иммобилизованного ила при его седиментации на ершовой загрузке и двухминутной воздушной регенерации

Fig. 4. Change in the concentration of immobilized sludge during its sedimentation on the brush loading and two-minute air regeneration

По изменению концентрации иммобилизованного ила в момент регенерации оценивали эффективность воздушной среднепузырчатой регенерации Э по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{C_{\text{иммоб}}^{\text{н}} - C_{\text{иммоб}}^{\text{к}}}{C_{\text{иммоб}}^{\text{н}}} \cdot 100\%,$$

где $C_{\text{иммоб}}^{\text{н}}$, $C_{\text{иммоб}}^{\text{к}}$ – концентрация иммобилизованного ила до и после регенерации соответственно.

Для двухминутной регенерации эффективность составила $\sim 80 \%$.

Седиментация биоценоза на инертную загрузку осуществлялась быстрее с каждым днем, что свидетельствовало о повышении жизнеспособности микроорганизмов.

Динамика увеличения видового состава биоценоза с 2 до 6 шт., находящегося на ершовой синтетической загрузке после запуска биореактора, приведена на рис. 5. Видовой состав восстановился до первоначального количества микроорганизмов [16].

На примере инфузорий хорошо просматривается жизненная активность биоценоза (рис. 6).

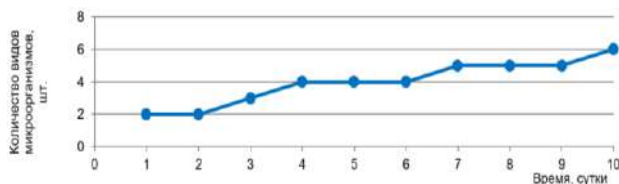


Рис. 5. Динамика количественного увеличения видового состава биоценоза в период восстановления

Fig. 5. Dynamics of a quantitative increase in the species composition of the biocenosis during the recovery period

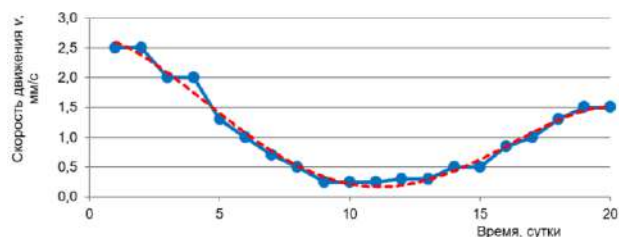


Рис. 6. Динамика жизненной активности инфузории

Fig. 6. Dynamics of the infusoria vital activity

Инфузория – наиболее активный микроорганизм со скоростью перемещения 2,0–2,5 мм/с. Она устойчива к разрушению хлопьев ила, повышению мутности среды обитания, недостатку кислорода и повышенным нагрузкам на

ил по органическим веществам. В процессе культивирования биоценоза доминирование получают хищные свободно плавающие и брюхо-ресничные инфузории, ползающие по поверхности хлопьев и выедающие бактерии. Множественное появление брюхо-ресничных инфузорий свидетельствует о том, что хлопья сформировались и могут служить опорой для передвижения.

Жизненная активность инфузорий в процессе восстановления биоценоза описывается степенной зависимостью.

$$v = -0,0002t^4 + 0,0072t^3 - 0,0748t^2 - 0,045t + 2,7094.$$

В процессе восстановления биоценоза с использованием адаптированного иммобилизованного ила жизненная активность инфузорий, характеризующая скоростью движения 0,25 мм/с, наблюдалась в 10-й и 11-й дни в полусухой модельной ячейке. После заполнения ячейки водно-иловой смесью и создания аэробных условий жизненная активность инфузорий увеличивалась и на 20-й день от начала эксперимента достигла скорости 1,5 мм/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены установка и методика для изучения культивирования биоценоза в биореакторе с использованием адаптированного иммобилизованного на ершовой загрузке ила.

Показана динамика культивирования биоценоза с использованием микроскопического анализа. Видовой состав микроорганизмов увеличился до первоначальных 6 видов за десять суток, а физиологическое состояние биоценоза характеризовалось как удовлетворительное.

Применение биореакторов с иммобилизованным на загрузке илом позволяет запустить биологическую очистку КОС созданием аэробных условий и циклического перевода иммобилизованного ила в свободно плавающий ил с помощью воздушной среднепузырчатой аэрации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.
2. Жмур Н.С. Новые аспекты причин вспухания активного ила на очистных сооружениях // Экология и промышленность России. 2011. N 4. С. 44–50.
3. Litti Yu.V., Nekrasova V.K., Siman'kova M.V., Nozhevnikova A.N., Kulikov N.I. Detection of anaerobic processes and microorganisms in immobilized activated sludge of a wastewater treatment plant with intense // Microbiology. 2013. Vol. 82. Issue 6. P. 690–697. <https://doi.org/10.1134/S00026261713060076>
4. Маркевич Р.М., Гребенчикова И.А., Роденко А. В., Вострова Р.Н. Особенности биоценоза активного ила, находящегося в свободном

состоянии и иммобилизованного на полимерном носителе // Труды БГТУ. № 4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2013. N 4 (160). С. 219–223.

5. Кирей В.А., Юхневич Г.Г. Влияние технологического режима аэротенков очистных сооружений канализации на видовой состав активного ила // Актуальные проблемы экологии: сб. науч. ст. по материалам XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гродно, 04–06 октября 2017 г.). Гродно: ЮрСа-Принт, 2017. С. 208–210.

6. Швецов В.Н., Морозова К.М., Смирнова И.И., Семенов М.Ю., Лежнев М.Л., Рыжаков Г.Г. [и др.]. Использование блоков биологической загрузки на сооружениях очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. N 10.

Ч. 2. С. 25–31.

7. Швецов В.Н., Морозова К.М., Смирнова И.И., Семенов М.Ю., Лежнев М.Л., Рыжаков Г.Г. [и др.]. Технологическая эффективность биозагрузки производства ООО «Техводполимер» // Водоснабжение и санитарная техника. 2007. N 2. С. 33–39.

8. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Промышленная очистка сточных вод как управляемый процесс // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. N 2. С. 18–26. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.20.2.18-27>

9. Martí-Calatayud M.C., Schneider S., Yüce S., Wessling M. Interplay between physical cleaning, membrane pore size and fluid rheology during the evolution of fouling in membrane bioreactors // Water Research. 2018. Vol. 147. P. 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.017>

10. Hamza R.A., Sheng Z., Iorhemen O.T., Zaghloul M.S., Tay J.H. Impact of food-to-microorganisms ratio on the stability of aerobic granular sludge treating high-strength organic wastewater // Water Research. 2018. Vol. 147. P. 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.061>

11. Пат. N 2270809, Российская Федерация. Установка комбинированной очистки сточных вод / Н.И. Куликов, А.И. Судын, Е.Н. Куликова; патентообладатель Н.И. Куликов; заявл. 05.01.2004; опубл. 27.02.2006. Бюл. № 6.

12. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Сосна В.М. Кинетика иммобилизованного и свободно плавающего ила в биореакторе при среднепузырчатой регенерации ершовой загрузки // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. N 2 (17). С. 146–152. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2016-2-146-152>

13. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Зеленин А.М., Сосна В.М. Использование иммобилизованного ила для запуска биологической очистки КОС после аварийных разрушений аэротенка // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2014. N 3 (8). С. 39–50.

14. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Оценка эффективности регенерации синтетической загрузки в биореакторе // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. N 3 (18). С. 77–84. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2016-3-77-84>

15. Никитина О.Г., Свешников В.Н. К методике подсчета микроорганизмов активного ила // Жилищное и коммунальное хозяйство. 1976. N 8. С. 35–36.

16. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Камалов Р.Т. Динамика и видовой состав биоценоза иммобилизованного ила на ершовой загрузке // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. N 1. С. 60–66. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-1-60-66>

REFERENCES

1. Zhmour NS. Technological and biochemical processes of waste water treatment on treatment plants with aerotanks. Moscow: AKVAROS; 2003, 512 p. (In Russian)

2. Zhmour NS. *New Aspects in Diagnostics of the Causes of Active Silt Swelling at Sewage Treatment Plants. Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = Ecology and Industry of Russia. 2011; 4:44–50. (In Russian)

3. Litti YuV, Nekrasova VK, Siman'kova MV, Nozhevnikova AN, Kulikov NI. Detection of anaerobic processes and microorganisms in immobilized activated sludge of a wastewater treatment plant with intense. *Microbiology*. 2013;82(6):690–697. <https://doi.org/10.1134/S0026261713060076>

4. Markevich RM, Grebenchikova IA, Rodenko AV, Vostrova RN. Special properties of free-floating and immobilized active sludge biotic community. *Trudy BGTU. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya* = Proceedings of BSTU. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology. 2013;4:219–223. (In Russian)

5. Kirej VA, Yukhnovich GG. The influence of the technological regime of the aerotanks of sewage treatment facilities on the species composition of active sludge. In: *Aktual'nye problemy ekologii: sbornik nauchnykh statei po materialam XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* = Actual problems of ecology: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference. 04–06 October 2017, Grodno: YurSaPrint; 2017, p. 208–210. (In Russian)

6. Shvetsov VN, Morozova KM, Smirnova II, Semenov MYu, Lezhnev ML, Ryzhakov GG, et al. Use of Bioblocks at Wastewater Treatment Facilities. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* = Water Supply and Sanitary Technique. 2010;10-2:25–31. (In Russian)

7. Shvetsov VN, Morozova KM, Smirnova II, Semenov MYu, Lezhnev ML, Ryzhakov GG, et al. Technological Efficiency of Biomedica Produced by “Tekhvodpolimer” Co. Ltd. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* = Water Supply and Sanitary Technique. 2007;2:33–39. (In Russian)

8. Ermolin YuA, Alekseev MI. Industrial wastewater treatment as a controlled process. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* = Water and Ecology. 2017;2:18–26. (In Russian) <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.20.2.18-27>

9. Martí-Calatayud MC, Schneider S, Yüce S, Wessling M. Interplay between physical cleaning, membrane pore size and fluid rheology during the evolution of fouling in membrane bioreactors. *Water Research*. 2018;147:393–402. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.017>

10. Hamza RA, Sheng Z, Iorhemen OT, Zaghloul MS, Tay JH. Impact of food-to-microorganisms ratio on the stability of aerobic granular sludge treating high-strength organic wastewater. *Water Research*. 2018;147:287–298. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.061>

11. Kulikov NI, Sudin AI, Kulikova EN. *Installation for combined wastewater treatment*. Patent RF, no. 2270809; 2006. (In Russian)

12. Kulkov BN, Solopanov EYu, Sosna VM. Kinetics of immobilized and free flowing silt in the bioreactor during the mid-foamy regeneration of brush loading. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost* = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2016;2:146–152. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2917-2016-2-146-152.

13. Kulkov VN, Solopanov EYu, Zelenin AM, Sosna VM. The use of immobilized silt to start the biological cleaning of the sewage constructions after the emergency destruction of the airtank. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost* = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2014;3:39–50. (In Russian)

14. Kulkov VN, Solopanov EYu. Assessment of effectiveness of regeneration of synthetic loading

in a bioreactor. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost* = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2016;3: 77–84. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2016-3-77-84>

15. Nikitina OG, Sveshnikov VN. By the method of counting microorganisms of activated sludge. *Zhilishchnoe i kommunal'noe khozyaistvo* = Housing and Communal Services. 1976;8:35–36. (In Russian)

16. Kulkov VN, Solopanov EYu, Kamalov RT. Dynamics and species composition of biocenosis in immobilized sludge under brush filtering. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2019;9(1):60–66. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-1-60-66>

Критерии авторства

Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кульков Виктор Николаевич,
д.т.н., профессор кафедры
инженерных коммуникаций
и систем жизнеобеспечения,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
✉ e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru

Солопанов Евгений Юрьевич,
к.т.н., доцент кафедры информатики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: evgursolo@mail.ru

Contribution

Victor N. Kulkov, Evgeny Yu. Solopanov carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Victor N. Kulkov, Evgeny Yu. Solopanov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victor N. Kulkov,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Department of Engineering Communications
and Life Support Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
✉ e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru

Evgeny Yu. Solopanov,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Department of Computer Science,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
e-mail: evgursolo@mail.ru