

Оригинальная статья / Original article

УДК 628.355

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-61-68>



## Очистка сточных вод в биореакторе с переменным количеством носителей иммобилизованного ила

© В.Н. Кульков, Е.Ю. Солопанов

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

**Резюме:** Применение для очистки сточных вод микроорганизмов, прикрепленных к инертной синтетической загрузке, позволяет увеличить окислительную способность аэротенка-биореактора. Изучена зависимость концентрации свободно плавающего ила от удельной длины инертной загрузки носителя иммобилизованного ила. Эксперимент проведен на физической модели биореактора, представляющей собой поперечный вертикальный разрез промышленного аэротенка-биореактора. Концентрация свободно плавающего ила контролировалась по методу светопропускания с использованием люксметра. Найдено уравнение для математического выражения зависимости концентрации свободно плавающего ила от количества удельных погонных метров ершовой загрузки, размещенной в биореакторе. Полученная формула позволяет рассчитать концентрацию свободно плавающего ила при заданной длине носителей иммобилизованного ила. Определена масса иммобилизованного ила на погонном метре ершовой загрузки в зависимости от удельного количества ершей в биореакторе. Показано изменение массы иммобилизованного ила на загрузке от количества ершей и их расположения в поперечном вертикальном сечении биореактора. Установка блоков биологической загрузки в центральном пространстве биореактора по его длине способствует увеличению дозы иммобилизованного ила по сравнению с их установкой по ширине аэротенка. Найдено, что эффективность воздушной среднепузырчатой регенерации иммобилизованного ила не зависит от удельной длины ершовой загрузки: уменьшение удельной длины загрузки с ~60 до ~10 пог. м/м<sup>3</sup> во всех опытах соответствовало ~93% эффективности регенерации. Увеличение суммарной дозы свободно плавающего и иммобилизованного ила позволяет интенсифицировать процесс очистки стоков.

**Ключевые слова:** свободно плавающий ил, иммобилизованный ил, ершовая загрузка, физическая модель биореактора, воздушная регенерация

**Для цитирования:** Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Очистка сточных вод в биореакторе с переменным количеством носителей иммобилизованного ила. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2021. Т. 11. N 1. С. 61–68. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-61-68>

## Wastewater treatment in a bioreactor with a variable number of immobilized sludge carriers

Victor N. Kulkov, Evgeny Yu. Solopanov

Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation

**Abstract:** The use of microorganisms attached to inert synthetic substrates in wastewater treatment increases the oxidative capacity of a bioreactor. In this article, the dependence of the concentration of freely floating sludge on the specific length of an inert biological module carrying immobilized sludge was studied. Experiments were carried out in a physical bioreactor model presenting a transverse vertical section of an industrial bioreactor aerotank. The concentration of freely floating sludge was controlled by the method of light transmission using a lux meter. A mathematical expression was obtained for calculating the dependence between the concentration of freely floating sludge and the number of specific meters of brush filtering modules placed in a bioreactor. This expression gives the concentration of freely floating sludge at a given length of immobilized sludge carriers. The mass of immobilized sludge along the running metre of a brush-filtering module was determined, depending on the specific number of brushes in a bioreactor. It was shown that the mass of the immobilized sludge on a biological module depends on the number of brushes and their location in the cross vertical section of a bioreactor. The installation of biological modules in the central space of the bioreactor along its length increases the amount of immobilized sludge compared to their installation along the width of the aerotank. It was found that the efficiency of air medium-bubble regeneration of immobilized sludge does not depend on the specific length of brush filtering modules: the reduction in the specific length from ~60 to ~10 run.m/m<sup>3</sup> in all the experiments corresponded to 93% regeneration efficiency.

cy. An increase in the total amount of freely floating and immobilized sludge allows for an intensification of the wastewater treatment process.

**Keywords:** freely floating sludge, immobilized sludge, brush filtering, physical bioreactor model, air regeneration

**For citation:** Kulkov VN, Solopanov EYu. Wastewater treatment in a bioreactor with a variable number of immobilized sludge carriers. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(1):61–68. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-61-68>

## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение концентрации активного ила в аэротенках с применением иммобилизованного ила на носителях является одним из разрабатываемых способов биологической очистки сточных вод. Микроорганизмы, адсорбированные на инертной загрузке, менее подвержены высоким залповым концентрациям ядовитых веществ, неконтролируемому выносу их из вторичных отстойников, нитчатому вспуханию и воздействию других негативных технологических параметров очистки стоков. Иммобилизованный биоценоз позволяет равномерно распределить активный ил по всему объему биореактора, поддерживая его оптимальную и фиксированную массу [1–5].

Адсорбция должна осуществляться на загрузке, отвечающей следующим требованиям: быть химически стойкой в используемой среде, иметь максимальную удельную поверхность и минимальный объем. Синтетические носители иммобилизованного биоценоза нуждаются в их периодическом обновлении, очищении от различных крупных примесей и желеподобной массы с иммобилизованными микроорганизмами [6–10]. Количество наполнителя не должно превышать 30% от общего объема аэрационной части [2, 11].

Загрузочные материалы с адсорбированным биоценозом, позволяющие повысить эффективность биологической очистки стоков, целесообразно устанавливать при модернизации существующих аэротенков.

Носителями иммобилизованного биоценоза могут быть свободно плавающие и стационарно закрепленные в блоке биологической загрузки насадки разнообразной формы, выполненные из различных материалов, способные увеличить дозу ила в биореакторе до 8–10 г/дм<sup>3</sup>, с надежной работой вторичных отстойников. Наличие прикрепленного биоценоза в аэротенках способствует снижению илового индекса свободно плавающего активного ила, улучшению его гидробиологического состава, повышению общей биомассы прикрепленного ила в блоке биореактор – вторичный отстойник и последующему увеличению окислительной мощности биореактора [2, 12–16].

Распространенным материалом инертного носителя прикрепленной микрофлоры является ершковая загрузка из капронового волокна, на которой происходит седиментация и равномерное распределение значительной удельной массы микроорганизмов. Биологическая очистка

стоков осуществляется сообществом прикрепленных к волокнистой (ершовой) насадке и свободно плавающих микроорганизмов, поддерживаемых в объеме сооружений системой аэрации [10, 17–19].

Используемая в глубокой биологической очистке сточных вод ершковая загрузка изготавливается из искусственного материала в виде щетины, укрепленной равномерно по длине стальной нержавеющей проволоки, обеспечивающей надежную установку ершей в блоке. В блоках ершковая загрузка крепится вертикально определенным способом с различной плотностью, и затем блоки помещаются в расчетном количестве в объеме аэрируемого сооружения или фильтрах предварительной доочистки воды. На ершах установленных блоков формируется объемный биоценоз из микроорганизмов разнообразного видового состава, обеспечивающих беспрепятственную фильтрацию насыщенной кислородом водно-иловой смеси [7, 8, 12, 13, 16].

Конструктивной особенностью очистных сооружений с ершковой загрузкой является ее размещение и крепление к каркасу блока биологической загрузки в соответствии с принятым при расчете количеством погонных метров ершей в одном кубической метре объема ступеней биореактора. Для возможности конвекции поперечного гидродинамического потока в аэротенке биореакторе блоки с загрузкой размещаются в аэрируемом сооружении выше дна и ниже поверхности воды [6, 11].

При использовании инертной загрузки (диаметр 120 мм), иммобилизующей ил и повышающей его дозу на погонный метр ершковой загрузки до 15–20 гр, окислительная мощность биореактора возрастает, процесс обработки сточных вод стабилизируется, глубина биологической очистки повышается, а объем аэрируемого очистного сооружения уменьшается [2, 4].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Масса иммобилизованного ила и его соотношение со свободно плавающим илом зависит от количества погонных метров загрузки, приходящейся на один метр кубический объема биореактора. Контролировать соотношение свободно плавающего и иммобилизованного ила возможно по интенсивности потока света, проходящего через смесь, приготовленную из водопроводной воды и ила, взятого на действующих очистных сооружениях [20].

Установка для определения концентрации свободно плавающего ила с переменным количеством носителей иммобилизованного ила состоит из модельного биореактора, выполненного из десятимиллиметрового полированного стекла. Схема установки приведена ранее [8, 9]. Мелкопузырчатую аэрацию водно-иловой смеси осуществляли компрессором, а расход воздуха контролировали ротаметром. Восстановление иммобилизованного биоценоза осуществляли определенной подачей воздуха от компрессора в трубку с отверстиями для создания среднепузырчатой регенерации. Регенератор, представленный медной трубкой диаметром 10 мм с семью отверстиями диаметром по 2 мм, помещался под ершовой занавеской, собранной из семи вертикальных нитей.

В биореакторе размещалась синтетическая ершовая загрузка диаметром 50 мм и длиной ~0,62 м так, чтобы ~50 пог. м ершей приходилось на кубический метр объема модельной ячейки. Для циркуляционного движения водно-иловой смеси в поперечном сечении биореактора ерши крепились вертикально к раме с шагом ~100 мм и размещались на ней так, чтобы расстояние до дна и поверхности водно-иловой смеси составляло ~0,1 м [9]. Ершовая занавеска размещалась в модельном биореакторе таким образом, чтобы с ле-

вой стороны (над мелкопузырчатый аэратором) и с правой стороны ячейки (в интервале 13–17 см) ерши отсутствовали. Интенсивность мелкопузырчатой аэрации –  $\sim 5,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

По интенсивности потока света от лампы подсветки через водно-иловую смесь, для регистрации которой использовали люксметр, определялась концентрация свободно плавающего ила, находящегося в модели биореактора [20].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По показаниям люксметра построена зависимость интенсивности освещенности  $\lambda$  от удельной длины  $l$  носителя иммобилизованного ила (рис. 1).

Переход к последующей уменьшенной длине носителя осуществлялся после воздушной среднепузырчатой регенерации ершовой загрузки интенсивностью  $7,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  в течение 1 мин.

На рис. 2 приведена динамика концентрации взвешенного ила  $C_{\text{сп}}$  в зависимости от приведенной длины ершовой загрузки  $l$ . Для определения концентрации ила использовали калибровочный график – изменение концентрации свободно плавающего ила в зависимости от вариации интенсивности света, проходящего через модельную ячейку со смесью ила и воды.

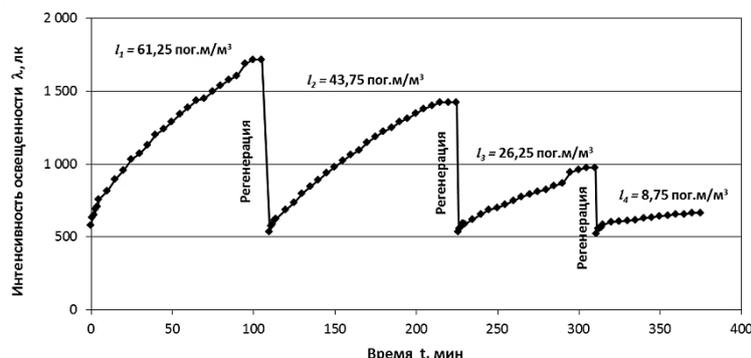


Рис. 1. Динамика интенсивности освещенности при изменении удельной длины загрузки с иммобилизованным илом

Fig. 1. Dynamics of illumination intensity when changing the specific length of the loading with immobilized sludge

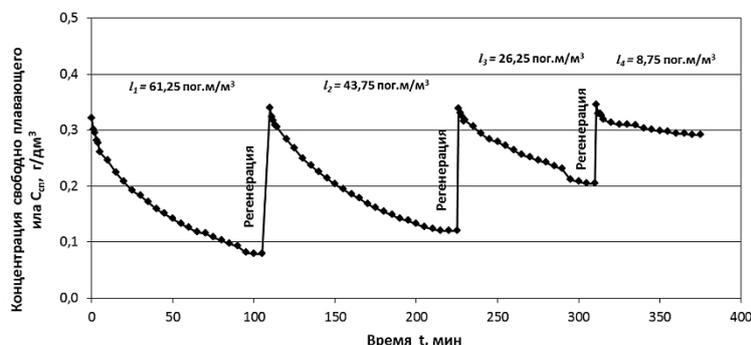


Рис. 2. Изменение концентрации взвешенного ила во времени при вариации удельной длины загрузки с иммобилизованным илом

Fig. 2. Concentration of suspended sludge over the time when varying the specific length of the loading with immobilized sludge

Контроль за  $C_{\text{св}}$  проводили до перехода седиментации ила на ерши в квазистационарное состояние (показания люксметра не изменились).

Определено, что уменьшение длины ершовой загрузки приводило к повышению концентрации свободно плавающего ила при достижении квазистационарного состояния процесса адсорбции ила. Так, при удельной длине загрузки  $l$ , равной  $61,25 \text{ пог. м/м}^3$ , квазистационарная концентрация свободно плавающего ила  $C_{\text{св}}$  равна  $0,078 \text{ г/дм}^3$ , а при  $l = 8,75 \text{ пог. м/м}^3$   $C_{\text{св}} = 0,29 \text{ г/дм}^3$ , что приблизительно в четыре раза больше. Из эксперимента видно, что эффективность средне-пузырчатого воздушного способа обновления адсорбированного ила не зависит от длины нитей ершовой загрузки [9]. Уменьшение удельной длины загрузки с  $\sim 60$  до  $\sim 10 \text{ пог. м/м}^3$  во всех опытах соответствовало  $\sim 93\%$  эффективности регенерации.

Известно, что концентрация свободно плавающего ила в биореакторе зависит от длины носителей иммобилизованного ила. С увеличе-

нием длины нитей ершовой загрузки происходило уменьшение концентрации ила по степенной зависимости (рис. 3) с высоким коэффициентом детерминации – 0,9967:

$$C_{\text{св}} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot l^2 - 0,0067 \cdot l + 0,348,$$

где  $C_{\text{св}}$  – концентрация свободно плавающего ила,  $\text{г/дм}^3$ ;  $l$  – удельная длина загрузки,  $\text{пог. м/м}^3$ .

В нашем эксперименте концентрация свободно плавающего ила уменьшилась примерно в четыре раза при увеличении удельной длины ершовой загрузки. По полученной математической зависимости можно подобрать удельную длину носителя иммобилизованного ила при заданной дозе свободно плавающего ила.

Количество иммобилизованного ила, приходящегося на погонный метр ершовой загрузки, уменьшается с увеличением удельного количества ершей по квадратичной зависимости (рис. 4).

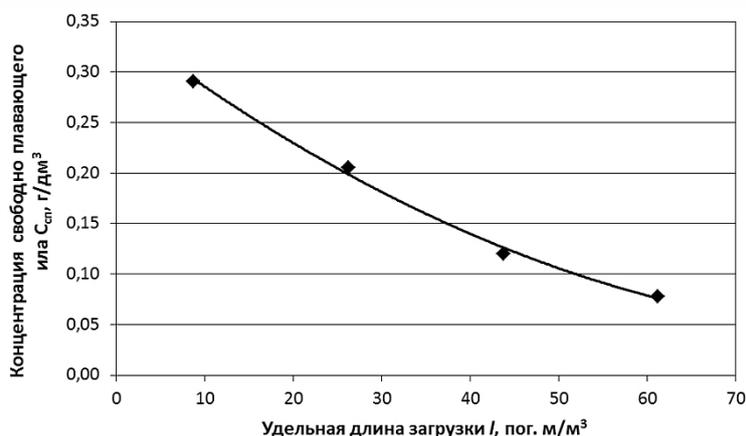


Рис. 3. Зависимость концентрации свободно плавающего ила от количества удельных погонных метров ершовой загрузки в биореакторе

Fig. 3. Relationship between free-floating sludge concentration and the number of specific linear meters of brush loading in the bioreactor

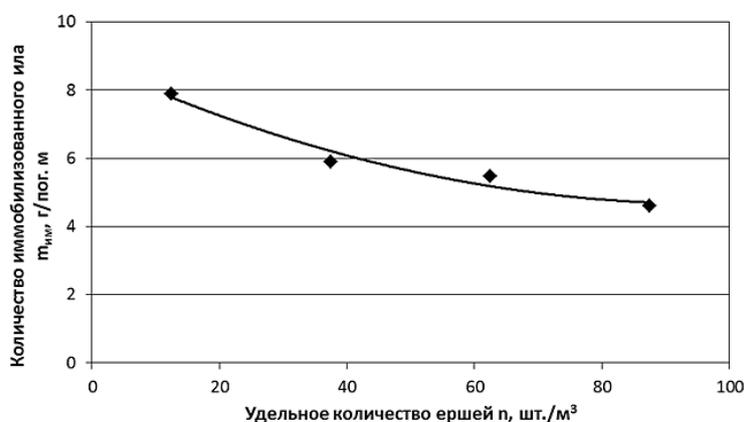


Рис. 4. Зависимость количества иммобилизованного ила от удельного количества ершей в биореакторе

Fig. 4. Relationship between the immobilized sludge amount and specific amount of brush loading in the bioreactor

Поместив заданное удельное количество ершей в биореактор, можно определить количество иммобилизованного ила, приходящегося на метр погонный загрузки. Зависимость описывается степенным выражением с точностью 0,9645:

$$m_{\text{им}} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 - 0,085 \cdot n + 8,7786,$$

где  $m_{\text{им}}$  – количество иммобилизованного ила, г/пог. м;  $n$  – удельное количество ершей длиной 0,7 м, шт./м<sup>3</sup>.

Уменьшение количества иммобилизованного ила, приходящегося на метр погонный ершовой загрузки, с увеличением удельного количества ершей объясняется газогидродинамической обстановкой в зоне установки ершовых носителей в биореакторе. На рис. 5 приведена диаграмма движения жидкости в вертикальной модели аэрируемого сооружения размерами 0,05×1,50×1,10 м. Интенсивность аэра-

ции в модели составляла 7,3 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) [6].

На представленной диаграмме определяется центр вращения исследуемой жидкости. Центр смещен вправо от барботера и расположен на пересечении 11-й вертикали и VII-й горизонтали. Центральная зона поперечного вертикального сечения биореактора при боковом расположении аэратора водно-иловой смеси характеризуется гидропотоками со скоростями менее 0,075 м/с, что недостаточно для смывания иммобилизованного ила с загрузки.

Установка ершей вправо и влево от центрального ерша с шагом 0,1 м приводит к их попаданию в гидродинамическое поле со скоростями потока ~0,2 м/с, что способствует частичному смыванию иммобилизованного ила с ершовой загрузки.

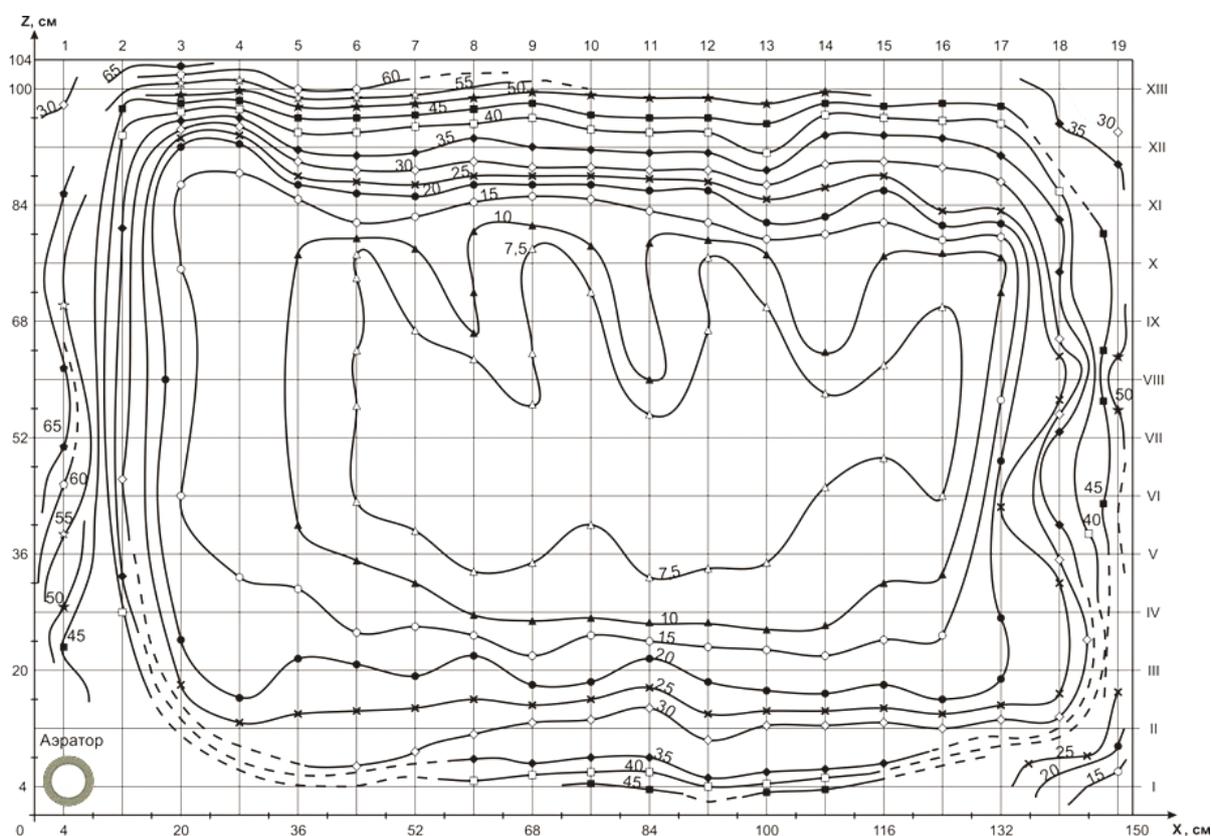


Рис. 5. Диаграмма скорости движения водно-иловой смеси в прямоугольной модели биореактора с нижним боковым расположением мелкопузырчатого барботера. Скорость течения воды (см/с):

△ – 7,5; ▲ – 10; ○ – 15; ● – 20; × – 25; ◇ – 30; ◆ – 35; □ – 40; ■ – 45; ★ – 50; ☆ – 55; ◊ – 60; ◆ – 65

Fig. 5. Speed diagram of the water-sludge mixture movement in a rectangular model of a bioreactor with a lower lateral arrangement of a fine bubble bubbler. Water flow rate (cm/s):

△ – 7,5; ▲ – 10; ○ – 15; ● – 20; × – 25; ◇ – 30; ◆ – 35; □ – 40; ■ – 45; ★ – 50; ☆ – 55; ◊ – 60; ◆ – 65

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием физической модели биореактора изучена динамика концентрации свободно плавающего ила при изменении удельной длины загрузки носителей иммобилизованного ила.

Получена зависимость и найдено математическое выражение для определения концентрации свободно плавающего ила в зависимости от количества удельных погонных метров ершовой загрузки в биореакторе. Полученная формула позволяет

рассчитать концентрацию свободно плавающего ила при заданной длине носителей иммобилизованного ила.

Определено количество иммобилизованного ила на погонном метре ершовой загрузки и зависимость этого параметра от удельного количества ершей в биореакторе. Показано, что эффективность воздушной среднепузырчатой регенерации иммобилизованного ила от удельной длины ершовой

загрузки не зависит: уменьшение удельной длины загрузки с ~60 до ~10 пог. м/м<sup>3</sup> во всех опытах соответствовало ~93% эффективности регенерации.

Расположение блоков биологической загрузки в центральном пространстве биореактора по его длине позволяет значительно увеличить дозу иммобилизованного ила по сравнению с установкой блоков по его ширине.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Промышленная очистка сточных вод как управляемый процесс // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2017. N 2 (70). С. 18–26. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.20.2.18-27>
2. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.
3. Кирей В.А., Юхневич Г.Г. Влияние технологического режима аэротенков очистных сооружений канализации на видовой состав активного ила // *Актуальные проблемы экологии: сб. науч. ст. XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гродно, 04–06 октября 2017 г.)*. Гродно: ЮрСаПринт, 2017. С. 208–210.
4. 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. 33–40.
5. 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.
6. Долженко Л.И. Иммобилизация активного ила на носителях биореактора в условиях нитрификации и денитрификации // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2016. N 4. С. 150–158
7. Залетова Н.А., Воронов Ю.В. Новые технологии для решения современных задач очистки сточных вод // *Вестник МГСУ*. 2012. N 2. С. 109–111.
8. Саблий Л.А., Бляшина М.В. Использование анаэробно-аэробного биореактора для очистки сточных вод // *Водоочистка*. 2013. N 4. С. 19–23.
9. Жмур Н.С. Новые аспекты причин вспухания активного ила на очистных сооружениях // *Экология и промышленность России*. 2011. N 4. С. 44–50.
10. Litti Yu.V., Nekrasova V.K., Kulikov N.I., Siman'kova M.V., Nozhevnikova A.N. 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/S0026261713060076>
11. Куликов Н.И., Райманов А.Я., Омельченко Н.П., Чернышов В.Н. Теоретические основы очистки воды. Донецк: НОУЛИДЖ, 2009. 298 с.
12. 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>
13. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Восстановление видовой 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>
14. 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*. N 4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2013. N 4 (160). С. 219–223.
15. Delforno T.P., Lacerda G.V.Jr., Sierra-Garcia I.N., Okada D.Y., Macedo T.Z., Varesche M.B.A., et al. Metagenomic analysis of the microbiome in three different bioreactor configurations applied to commercial laundry wastewater treatment // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 587-588. P. 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.170>
16. Kul'kov V.N., Solopanov E.Yu. Intensification of biological wastewater treatment in a bioreactor // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 667. P. 012051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012051>
17. Ferrera I., Sánchez O. Insights into microbial diversity in wastewater treatment systems: how far have we come? // *Biotechnology Advances*. 2016. Vol. 34. Issue 5. P. 790–802. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.04.003>
18. 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>
19. Hamza R.A., Sheng Z., Iorhemen O.T., Zaghoul 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>
20. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Водовоздушная регенерация ершовой загрузки в аэротенке: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. 162 с.

## REFERENCES

1. Ermolin YuA, Alekseev MI. Industrial wastewater treatment as a controlled process. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya = Water and Ecology*. 2017;2:18–27. (In Russian) <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.20.2.18-27>
2. Zhmur NS. *Technological and bio-chemical processes of waste water treatment on constructions with aerotanks*. Moscow: AKVAROS; 2003, 512 p. (In Russian)
3. 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 XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Actual problems of ecology: Proceedings of XII International Scientific and Practical Conference*. 04–06 October 2017, Grodno. Grodno: YurSaPrint; 2017, p. 208–210. (In Russian)
4. Shvetsov VN, Morozova KM, Smirnova II, Semenov MYu, Lezhnev ML, Ryzhakov GG, et al. Technological efficiency of biomedias produced by Tekhvodpolimer Co. Ltd. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2007;2:33–40. (In Russian)
5. Shvetsov VN, Morozova KM, Smirnova II, Semenov MYu, Lezhnev ML, Ryzhakov GG, Gubaidullin TM. The Use of Bioblocks at Wastewater Treatment Facilities. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. = Water Supply and Sanitary Technique*. 2010;10:25–31. (In Russian)
6. Dolzhenko LA. Immobilization of the active sludge from carriers in bioreactors under nitrification and denitrification condition. *Obrazovaniye i nauka v so-vremennom mire. Innovatsii*. 2016;4:150–158. (In Russian)
7. Zaletova NA, Voronov JuV. New technologies to solve the present-day challenges of waste water treatment. *Vestnik MGSU. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal po stroitel'stvu i arhitekture = Vestnik MGSU. Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2012;2:109–111. (In Russian)
8. Sabliy LA, Blyashina MV. The use of an anaerobic-aerobic bioreactor for wastewater treatment. *Vodo-ochistka*. 2013;4:19-23. (In Russian)
9. 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)
10. Litti YuV, Nekrasova VK, Kulikov NI, Siman'kova MV, Nozhevnikova AN. 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>
11. Kulikov NI, Raimanov AY, Omelchenko NP, Chernyshov VN. Theoretical based water purification. Donetsk: Noulidzh; 2009, 298 p. (In Russian)
12. Kul'kov VN, Solopanov EYu, Kamalov RT. Dynamics and species composition of biocoenosis in immobilized sludge under brush filtering. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2018;9(1):60–66. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-1-60-66>
13. 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>
14. Markevich RM, Grebenchikova IA, Rodenko AV, Vostrova RN. Features of activated sludge biocoenosis in a free state and immobilized on a polymeric carrier. *Trudy BGTU. No. 4. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya = Proceedings of BSTU. No. 4. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*. 2013;4:219–223. (In Russian)
15. Delforno TP, Lacerda GVJr, Sierra-Garcia IN, Okada DY, Macedo TZ, Varesche MBA, et al. Metagenomic analysis of the microbiome in three different bioreactor configurations applied to commercial laundry wastewater treatment. *Science of the Total Environment*. 2017;587–588:389–398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.170>
16. Kul'kov VN, Solopanov EYu. Intensification of biological wastewater treatment in a bioreactor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;667:012051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012051>
17. Ferrera I, Sánchez O. Insights into microbial diversity in wastewater treatment systems: how far have we come? *Biotechnology Advances*. 2016; 34(5):790–802. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.04.003>
18. 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>
19. Hamza RA, Sheng Z, Iorhemen OT, Zaghloul MS, Tay J-H. 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>
20. Kulkov VN, Solopanov EYu. *Water-air regeneration of a brush loading in the aerotank*. Irkutsk: Izdatel'stvo IRNITU; 2020. 162 p. (In Russian)

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Кульков Виктор Николаевич**,  
д.т.н., профессор, 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 отделения прикладной математики и информатики,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
e-mail: evgursolo@mail.ru

**Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 03.03.2020.  
Одобрена после рецензирования 21.04.2020.  
Принята к публикации 28.02.2021.*

**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),  
Department of Applied Mathematics and Computer Science,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation,  
e-mail: evgursolo@mail.ru

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Conflict 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.*

*The article was submitted 03.03.2020.  
Approved after reviewing 21.04.2020.  
Accepted for publication 28.02.2021.*