



Применение каркасной загрузки для формирования иммобилизованного биоценоза в аэротенке

В.Н. Кульков¹, Е.Ю. Солопанов²✉

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Интенсификация очистки сточных вод с применением нейтральных искусственных материалов для создания на них фиксированного биоценоза, перспективное направление повышения окислительной мощности биологических сооружений с использованием нескольких биоценозов. В работе изучена кинетика концентрации свободно плавающего ила при его седиментации на каркасную загрузку – носитель адсорбированного ила. Эксперимент проведен на физической модели биореактора, представляющей собой плоскостной поперечный вертикальный разрез промышленного аэротенка-биореактора. Показана хорошая динамика формирования иммобилизованного ила на каркасной загрузке, проходящая по экспоненциальной зависимости. Отмечено неравномерное распределение адсорбированного ила по объему загрузки, что вызвано гидродинамическими потоками в поперечном сечении аэрируемого сооружения при боковом расположении мелкопузырчатого аэратора. Найдено, что эффективность воздушной среднепузырчатой регенерации иммобилизованного на каркасной загрузке ила равна ~96 %. Кинетика биохимического потребления кислорода в аэробных условиях проходит через четыре фазы: отсутствие изменений при адаптации ила; экспоненциальное уменьшение; замедление скорости уменьшения биохимического потребления кислорода и самоокисление ила при эндогенном дыхании при постоянной минимальной величине биохимического потребления кислорода. Получена зависимость динамики скорости очистки стоков по выделенным фазам изменения биохимического потребления кислорода. Зависимость имеет экстремальный характер с максимумом в зоне, соответствующей активности плавающего и сформированного на каркасной загрузке ила.

Ключевые слова: свободно плавающий ил, иммобилизованный ил, каркасная загрузка, динамика биохимического потребления кислорода, скорость очистки стоков, воздушная регенерация загрузки

Для цитирования: Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Применение каркасной загрузки для формирования иммобилизованного биоценоза в аэротенке // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 4. С. 753–763. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-4-753-763>. EDN: KIIBLF.

Original article

Application of frame loading for forming immobilized biocenosis in aeration tanks

Victor N. Kulkov¹, Evgenii Yu. Solopanov²✉

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Intensification of wastewater treatment through the use of neutral artificial materials to create a fixed biocenosis represents a promising direction for enhancing the oxidation capacity of biological facilities utilizing multiple biocenoses. The study examines the kinetics of free-floating sludge concentration during its sedimentation on frame loading, which serves as a carrier for adsorbed sludge. The experiment was carried out in a bioreactor physical model presenting a planar transverse vertical section of an industrial bioreactor aeration tank. The study revealed a good dynamics in the formation of immobilized sludge on the frame loading, following exponential dependence. Uneven distribution of adsorbed sludge by loading volume is attributed to hydrodynamic flows in the cross-section of the aerated

facility with a laterally positioned fine-bubble aerator. The efficiency of air medium-bubble regeneration of sludge immobilized on the frame loading was found to account for approximately 96%. The kinetics of biochemical oxygen consumption under aerobic conditions passes through four phases: no changes in sludge adaptation; exponential decrease; deceleration in the rate of biochemical oxygen consumption decrease and self-oxidation of sludge under endogenous respiration at constant minimum value of biochemical oxygen consumption. The results show a dependence of the dynamics of the wastewater treatment rate on the selected phases of change in biochemical oxygen consumption. The dependence exhibits an extreme character with a maximum in the zone corresponding to the activity of floating sludge and sludge formed on the frame loading.

Keywords: free-floating sludge, immobilized sludge, frame loading, dynamics of biochemical oxygen consumption, wastewater treatment rate, air loading regeneration

For citation: Kulkov V.N., Solopanov E.Yu. Application of frame loading for forming immobilized biocenosis in aeration tanks. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(4):753-763. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-4-753-763>. EDN: KIIBLF.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение дозы ила в аэротенке достигается установкой в водно-иловую смесь носителей биомассы с большой поверхностью для обрастания биопленкой. Это приводит к формированию биоценоза, образованного на инертных синтетических носителях, и к существенному росту общей концентрации биоценоза в аэротенке-биореакторе. Сообщество двух биоценозов в биореакторе значительно улучшает степень очистки сточных вод. Очистка осуществляется двумя ценозами ила: ценозом активного плавающего ила, находящимся в водно-иловой смеси, и ценозом иммобилизованного ила, сформированным на инертной каркасной загрузке. Прикрепленный ил увеличивает время пребывания активного ила в биореакторе, что позволяет очищать сложноокисляемые органические загрязнения.

Биоценоз, прикрепленный к загрузке, в меньшей степени подвержен влиянию периодически поступающих угнетающими активностью ила веществами и сверхнормативному удалению биоценоза из системы биореактор–вторичный отстойник.

Прикрепленный к инертной синтетической загрузке иммобилизованный ил обеспечивает относительно равномерное его распределение по объему биореактора, что способствует наличию фиксированной кинетике окисления загрязняющих веществ [1–7].

Увеличение общей концентрации активного ила в биореакторе снижает нагрузку на ил и подавляет бактериальное его вспухание [3].

С использованием каркасных инертных блоков адсорбция формирующегося на них биоценоза значительно повышает и стабилизирует окислительную мощность аэрируемого сооружения. Эта технология способствует

уменьшению количества секций биореактора при сохранении качества очистки сточных вод [8, 9]. Каркасные носители иммобилизованного биоценоза обеспечивают его надежное увеличение в аэротенке-биореакторе до 8–10 г/дм³, с исключением его избыточного выноса из вторичных отстойников.

Одними из распространенных технологий наращивания иммобилизованного ценоза для надежной очистки сточных вод от биологического загрязнения являются каркасные блоки, размещенные в аэротенке (рис. 1).

Материал блоков биологической загрузки (ББЗ) – композит полимерный на основе ПНД 273. Способ их установки в сооружениях биологической очистки, необходимое количество и зона установки определяются индивидуально.

Каркасные синтетические блоки с адсорбированным биоценозом требуют их систематической регенерационной очистки от крупных взвешенных примесей и застаревшей желеобразной массы с иммобилизованным сообществом микроорганизмов [3, 10].

Жесткость конструкции блоков обеспечивается торцевым поверхностным сварочным швом, создающим надежное крепление сетчатых трубок, формирующих блок.

Форма каркасного блока позволяет достигать равномерного распределения водовоздушного потока при его регенерационной аэрации. ББЗ просты в монтаже и демонтаже, что значительно снижает эксплуатационные расходы. Их можно использовать в целях глубокой доочистки сточных вод от биогенных элементов, включая технологию химико-биологического удаления фосфатов. Они позволяют активизировать процессы нитри- и денитрификации сточных вод [11–13].

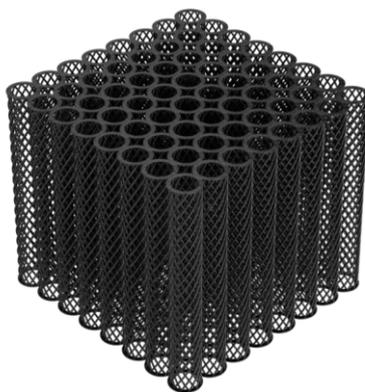


Рис. 1. Каркасный блок биологической загрузки
Fig. 1. Framework the loading

МЕТОДЫ

Лабораторная установка для изучения формирования иммобилизованного биоценоза включала модельный биореактор, выполненный из десятимиллиметрового полированного стекла. Схема установки описана в ранних работах [14–17]. Водно-иловая смесь аэрировалась мелкопузырчатым аэратором.

Блочная загрузка занимала ~30 % площади поперечного сечения лабораторного биореактора [18, 19]. Для осуществления циркуляционного движения водно-иловой смеси в поперечном сечении биореактора, блочная загрузка размещалась так, чтобы расстояние

от дна и поверхности водно-иловой смеси составляло до нее ~0,2 м.

С левой и правой сторон от каркасной загрузки существовало свободное пространство, равное 0,28 и 0,16 м соответственно (рис. 2). Оно позволяло свободно перемещаться газогидродинамическим потокам основного циркуляционного контура. Соотношение свободно плавающего и иммобилизованного ила контролировали по интенсивности потока света от лампы, проходящего через водно-иловую смесь, приготовленную из водопроводной воды и ила, взятого на действующих очистных сооружениях [14, 17].

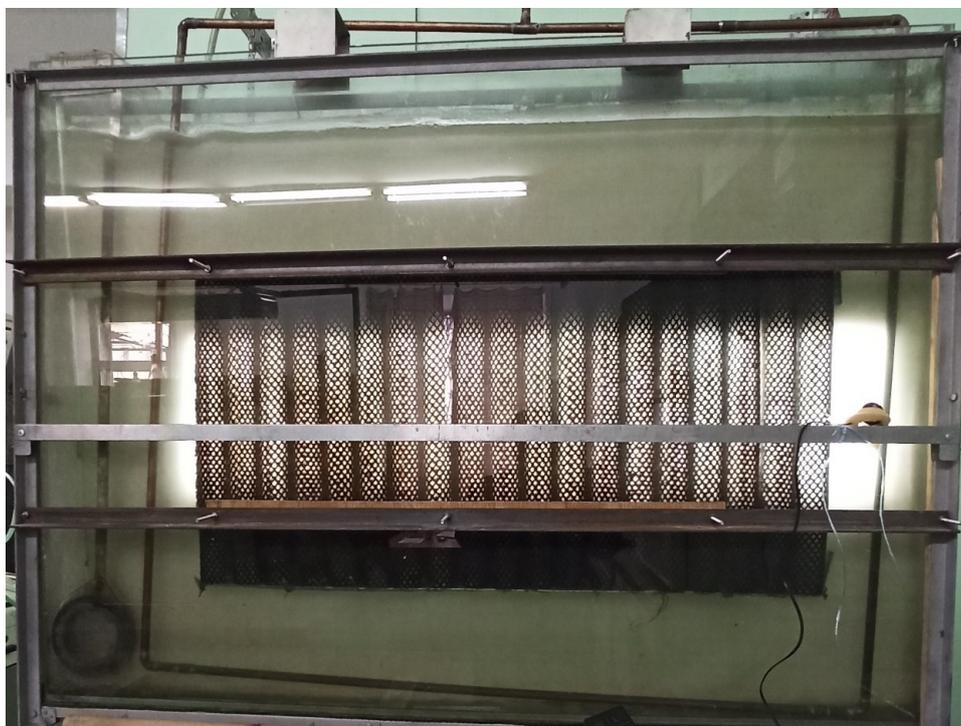


Рис. 2. Каркасная загрузка, помещенная в модель аэротенка (плоскостной вертикальный разрез)
Fig. 2. Wireframe loading placed in the aerotank model (planar vertical section)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Каркасная загрузка располагалась в центре плоскостной вертикальной модели, в зоне слабых гидродинамических потоков водно-иловой смеси. Водно-иловая смесь аэрировалась мелкопузырчатым аэратором с удельной интенсивностью $5,11 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Концентрация плавающего ила в начале эксперимента со-

ставляла $0,38 \text{ г/дм}^3$. Абсолютная величина скорости потока в центральной области модели изменялась в интервале $5\text{--}10 \text{ см/с}$. Потоки водно-иловой смеси перемещались преимущественно по периметру модельной ячейки. В области последующего размещения каркасной загрузки реализовались низкоскоростные потоки (рис. 3).

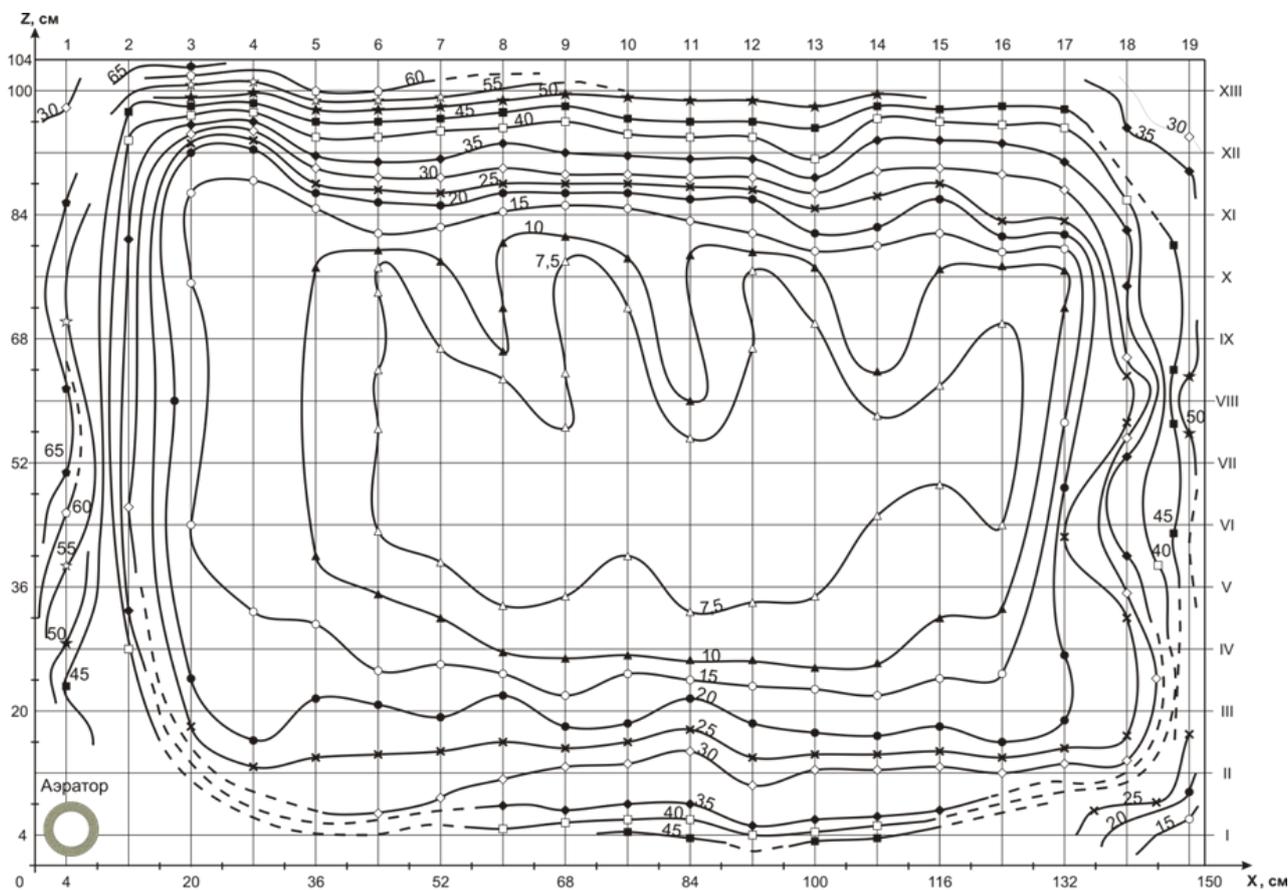


Рис. 3. Распределение скорости движения водно-иловой смеси в модели прямоугольного биореактора. Скорость течения воды (см/с): Δ – 7,5; \blacktriangle – 10; \circ – 15; \bullet – 20; \times – 25;

\diamond – 30; \blacklozenge – 35; \square – 40; \blacksquare – 45; \star – 50; \star – 55; \circ – 60; \blacklozenge – 65

Fig. 3. Distribution of the speed of movement of the water-sludge mixture in the model of a rectangular bioreactor. Water flowrate (cm/s): Δ – 7,5; \blacktriangle – 10; \circ – 15; \bullet – 20; \times – 25;

\diamond – 30; \blacklozenge – 35; \square – 40; \blacksquare – 45; \star – 50; \star – 55; \circ – 60; \blacklozenge – 65

На приведенном на рис. 3 распределении скорости движения жидкости, полученной для плоскостной вертикальной модели аэротенка с размерами: ширина 1,50 м, высота 1,10 м, глубина 0,05 м, явно просматривается «центральная» зона вращения исследуемой водно-иловой смеси [14]. Она находится между 0,4 и 0,6 м высоты, 0,44 и 1,24 м ширины модели. В ней наблюдаются скорости гидродинамических потоков со значениями $0,075 \text{ м/с}$ и менее. Таких величин скоростей потоков исследуемой жидкости недостаточно для того,

чтобы иммобилизованный на загрузки ил удалялся, т. е. образуется большая «застойная зона». В ней происходит постоянная коагуляция активного ила в крупные агломераты и их седиментации на каркасную загрузку. По объему каркасной загрузки иммобилизованный ил распределялся неравномерно, что определялось гидродинамическими потоками (рис. 4).

Большая концентрация иммобилизованного ила наблюдается в центральной части блока каркасной загрузки, где скорости потоков минимальны. Левая сторона каркасной загруз-

ки, кроме самой верхней части, была практически забита иммобилизованным илом. Это объясняется наличием узкого, не омываемого загрузку, газогидродинамического потока циркуляционного контура, поднимающимся от мелкопузырчатого аэратора, имеющего скорость 0,3–0,5 м/с. Правая сторона каркасной

загрузки, особенно ее правый верхний угол, была практически чистой. Это можно объяснить наличием скоростей 0,25–0,3 см/с интенсивного гидродинамического потока жидкости, поворачивающего вниз у правой стенки модели и смывающего осевший ил с каркасной загрузки.

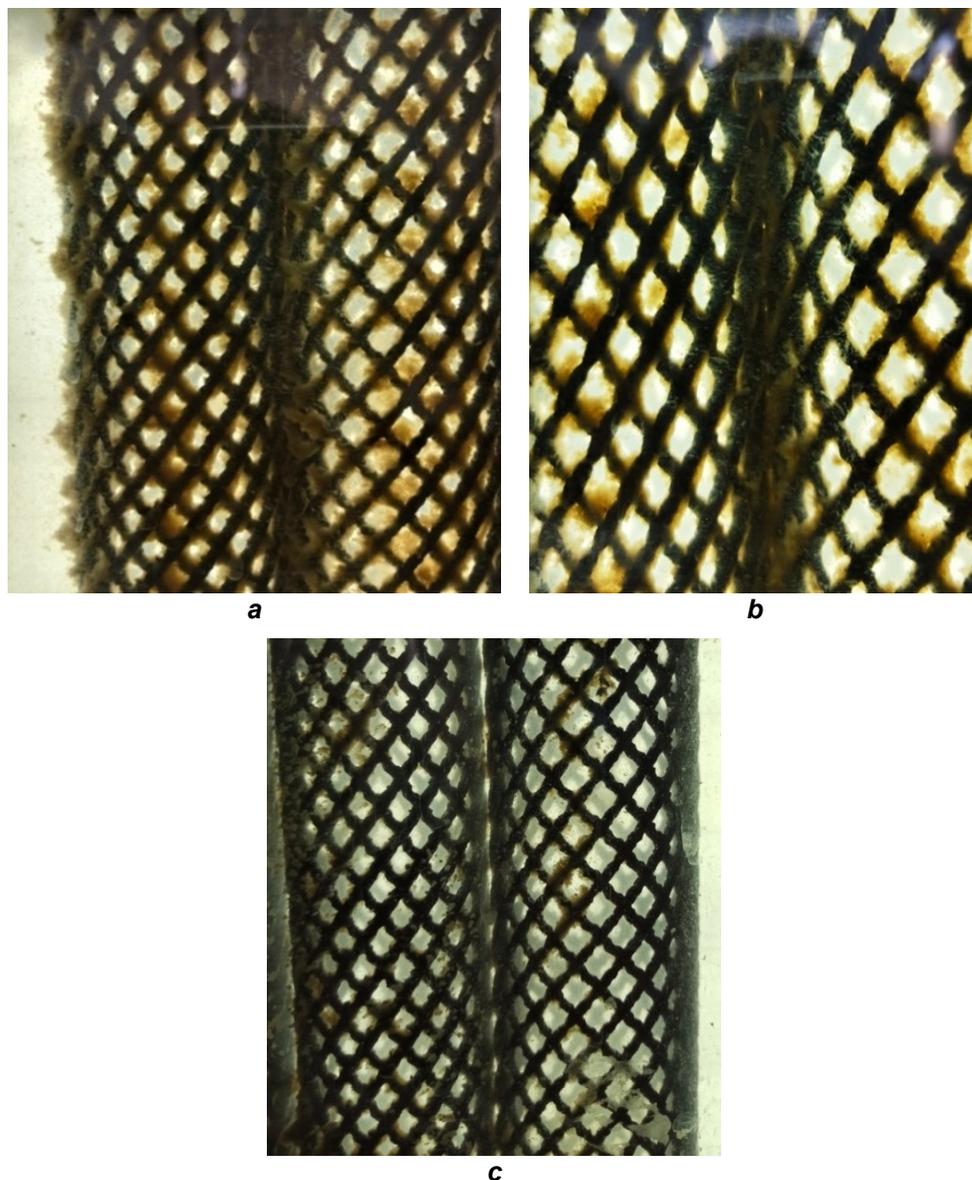


Рис. 4. Фрагменты каркасной загрузки с иммобилизованным илом: а – левая сторона загрузки (расположена на расстоянии 15 см от аэратора); б – центральной части загрузки; с – правая сторона загрузки (расположена со стороны модели без аэратора)
Fig. 4. Fragments of frame loading with immobilized sludge: a – left side of the loading (located at a distance of 15 cm from the aerator); b – the central part of the loading; c – right side of the loading (located on the side of the model without aerator)

Интенсивность светового потока, проходящего через водно-иловую смесь и измеряемая люксметром, постепенно возрастала, что свидетельствовало об уменьшении дозы плавающего ила. Кинетика седиментации плавающего ила на каркасной загрузке приведена

на рис. 5. Величину растущей концентрации ила, иммобилизованного на каркасной загрузке (рис. 6), находили вычитанием из начальной концентрации ила значения текущей концентрации свободно плавающего, определенной по рис. 5.

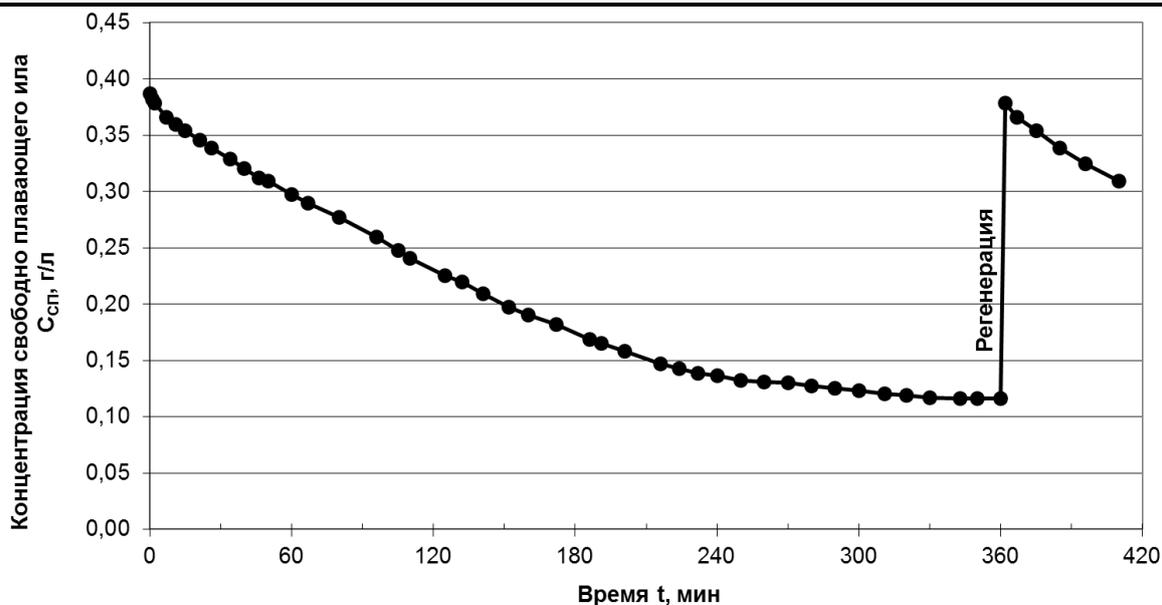


Рис. 5. Кинетика седиментации свободно плавающего ила на каркасную синтетическую загрузку

Fig. 5. Kinetics of sedimentation of free-floating sludge on a frame synthetic loading

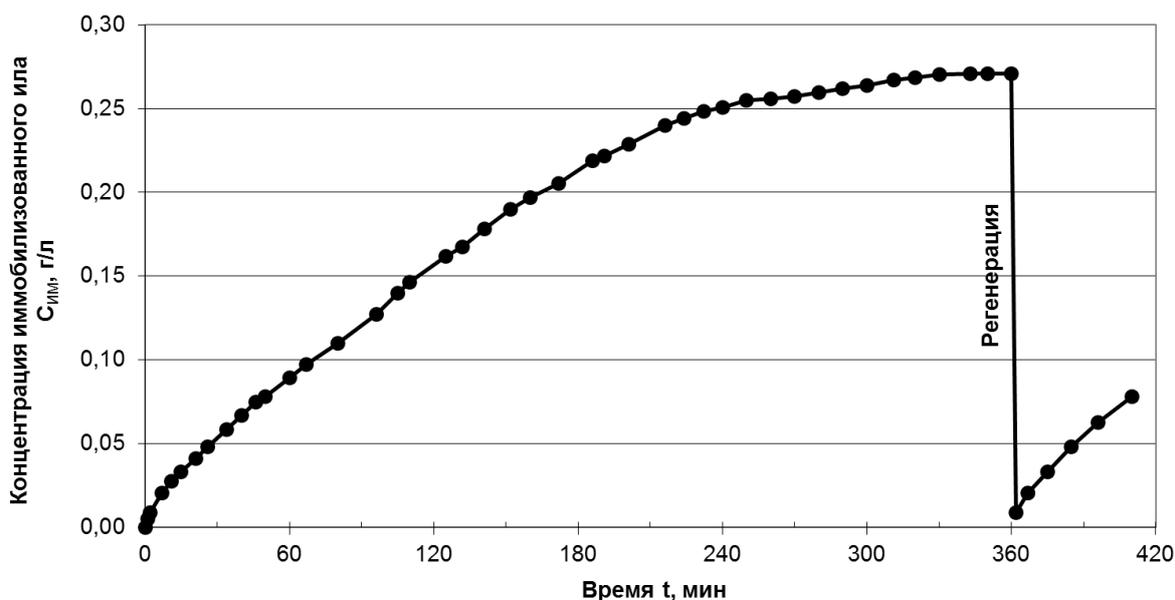


Рис. 6. Кинетическая зависимость концентрации иммобилизованного ила на каркасной загрузке и процесса его воздушной регенерации

Fig. 6. Kinetic dependence of the concentration of immobilized sludge in the frame loading and the process of its regeneration with the help of air

Необходимо отметить, что седиментация плавающего ила происходила достаточно медленно. Выход процесса седиментации в квазистационарное состояние наблюдали во всех опытах через шесть часов. Для сравнения, для ершовой загрузки это состояние достигалось приблизительно через полтора часа для идентичной интенсивности мелкопузырчатой аэрации [17]. Это различие определяется в первую очередь кинетикой формиро-

вания иммобилизованного ила, а она, в определенной степени, зависит от удельной поверхности адсорбции загрузки, которая для ершовой загрузки равна $500 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а для каркасной загрузки находится в интервале $50\text{--}300 \text{ м}^2/\text{м}^3$ [19, 20].

При достижении квазистационарного состояния седиментации плавающего ила на каркасной загрузке проводили воздушную регенерацию (удаление) иммобилизованного

ила. Удельная интенсивность среднепузырчатой регенерации равнялась $7,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Эффективность воздушной регенерации, проведенной в течение двух минут, составила $\mathcal{E}_{\text{max}} = 96,5 \%$ (рис. 5 и 6). Высокая эффективность удаления адсорбированного ила в большой степени определялась трубчатой перфорированной конструкцией каркасной загрузки. Динамику биохимического потребления кислорода (БПК), при формировании им-

мобилизованного ила на каркасной загрузке, изучали на реальной водно-иловой смеси, привезенной с канализационных очистительных сооружений г. Шелехова. Водно-иловая смесь имела следующие характеристики: доза ила $a_i = 1,54 \text{ г/дм}^3$; взвешенные вещества (ВВ) = 88 мг/дм^3 ; БПК = 68 мг/дм^3 ; иловый индекс $J_i = 110 \text{ см}^3/\text{г}$. Полученная зависимость имеет сложный вид с явно обозначенными пятью зонами динамики БПК (рис. 7).

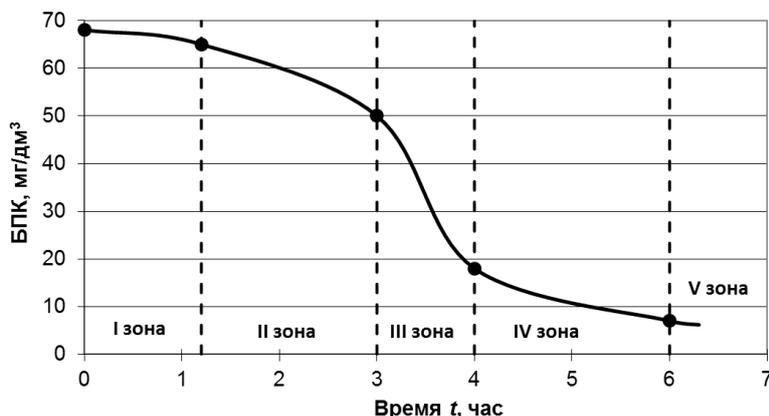


Рис. 7. Динамика биохимического потребления кислорода в аэробных условиях в модели биореактора с каркасной загрузкой

Fig. 7. Dynamics of biochemical oxygen consumption under aerobic conditions in a bioreactor model with frame loading

В начале эксперимента наблюдается зона адаптации активного плавающего ила при возобновленной аэрации водно-иловой смеси (зона I), что соответствует почти не изменяющейся величине БПК.

Экспоненциальное уменьшение величины БПК в зонах II и III объясняется наличием двух биоценозов и активным приростом ила равным $\sim 7 \text{ г}$ (при обозначенных величинах ВВ и БПК в модели биореактора, объемом 80 дм^3), что составляет $\sim 6 \%$ от начальной концентрации ила в модели.

Нагрузка на ил [2], рассчитанная по формуле (1), составила $13,6 \text{ мг}/(\text{г} \cdot \text{ч})$, что соответствовало средней нагрузке.

$$q_i = \frac{L_{ea}}{a_i (1 - S) t_{at}}, \quad (1)$$

где L_{ea} – БПК_п залитой в модель водно-иловой смеси, мг/дм^3 ; a_i – доза ила, г/дм^3 ; S – зольность ила, доля единицы; t_{at} – длительность аэрации водно-иловой смеси, ч.

Средняя нагрузка на ил определяет наибольшее изъятие загрязнений из водно-иловой смеси, что и наблюдается в начале зоны IV – величина БПК уменьшилась до $\sim 8 \text{ мг/дм}^3$. В зоне V, в квазистационарных условиях седиментации плавающего ила,

осуществляется процесс самоокисления обоих видов биоценоза, при недостатке питательных веществ. БПК практически не изменялась.

Расчет и построение графика динамики скорости очистки стоков (рис. 8) в плоскостной модели биореактора, с размещенной в центральной области каркасной загрузки, осуществляли по данным, взятым с рис. 7, с учетом выделенных зон динамики БПК.

Скорость очистки стоков [2] рассчитывали по формуле (2).

$$\rho_i = \frac{L_{ea} - L_{ex}}{a_i (1 - S) t_{at}}, \quad (2)$$

где L_{ea} – БПК_п сточной воды в начале принятой зоны динамики БПК, мг/дм^3 ; L_{ex} – БПК_п в конце принятой зоны, мг/дм^3 .

Зависимость динамики скорости очистки стоков имеет экстремальный характер с четко выделенным максимумом в III зоне, соответствующей активности плавающего ила, с учетом прироста, и сформированного на каркасной загрузке иммобилизованного ила.

В IV зоне скорость очистки уменьшается с $29,7$ до $9,3 \text{ мг}/(\text{г} \cdot \text{ч})$, что свидетельствует о начале процесса самоокисления ила, при очевидном недостатке питательных веществ.

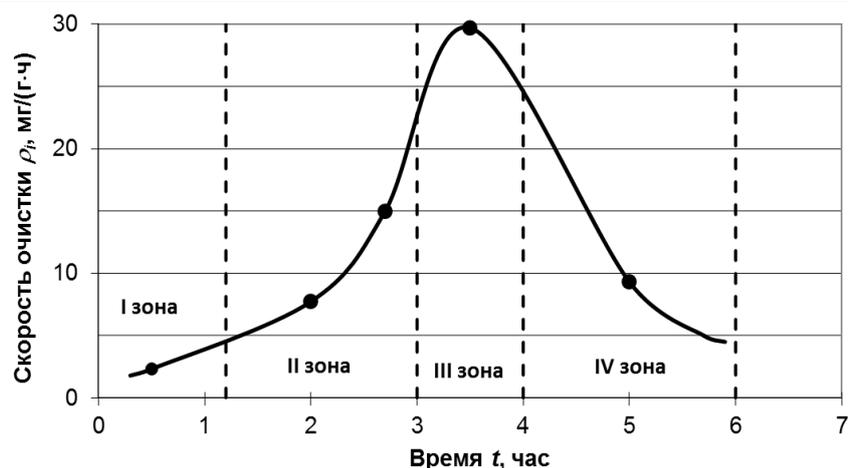


Рис. 8. Динамика скорости очистки стоков в аэробных условиях в модели биореактора с каркасной загрузкой по зонам изменения биохимического потребления кислорода
Fig. 8. The dynamics of the rate of wastewater treatment under aerobic conditions in a bioreactor model with frame loading by zones of change in biochemical oxygen consumption.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена динамика седиментации плавающего ила на каркасной загрузке, установленной в модели аэротенка-биореактора.

Показана хорошая динамика формирования иммобилизованного ила на загрузке, размещенной в центральной зоне биореактора, которая описывается экспоненциальной зависимостью. Отмечено неравномерное распределение адсорбированного ила по объему каркасной загрузки, вызванное гидродинамическими потоками в поперечном сечении аэротенка. Показана высокая эффективность воздушной регенерации иммобилизованного

ила, составляющая ~96 %. Кинетика БПК в аэробных условиях проходит через четыре фазы: отсутствие изменений при адаптации ила; экспоненциальное уменьшение; замедление скорости уменьшения БПК и самоокисление ила при эндогенном дыхании при постоянной величине БПК.

Зависимость динамики скорости очистки стоков, по выделенным фазам изменения БПК, имеет экстремальный характер с максимумом. В финальной зоне, характеризующейся недостатком питательных веществ, скорость очистки стоков уменьшается с 29,7 до 9,3 мг/(г·ч).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Промышленная очистка сточных вод как управляемый процесс // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. № 2 (70). С. 18–27. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.20.2.18-27>. EDN: ZTSOHV.
2. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 507 с. EDN: QNKHNB.
3. Кирей В.А., Юхневич Г.Г. Влияние технологического режима аэротенков очистных сооружений канализации на видовой состав активного ила // Актуальные проблемы экологии: сб. науч. статей по материалам XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Гродно, 04–06 октября 2017 г.). Гродно, 2017. С. 208–210. EDN: XORLIT.
4. 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. № 10–2. С. 25–31. EDN: MVREYB.
5. Словцов А.А. Совершенствование процессов биологической очистки сточных вод с помощью прикрепленных биоценозов // Вестник МГСУ. 2008. № 3. С. 80–85. EDN: MUXOIR.
6. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Восстановление видового состава биоценоза аэрируемых сооружений после длительного простоя // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. № 1. С. 77–83. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-77-83>. EDN: INFDUR.
7. 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. № 4 (160). С. 219–223. EDN: SOBOLV.

8. Kulkov V.N., Solopanov E.Yu. Intensification of Biological Wastewater Treatment in A Bioreactor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 667. P. 1–9. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012051>.
9. Стрелков А.К., Гриднева М.А., Стрелков Д.А, Афанаскин Н.Д. Техничко-экономическое сравнение доочистки бытовых сточных вод в условиях канализационных очистных сооружений г. Бузулук // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сб. ст. Самара: Самарский государственный технический университет, 2018. С. 260–266. EDN: YNEUDB.
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. Iss. 6. P. 690–697. <https://doi.org/10.1134/S0026261713060076>.
11. Долженко Л.А. Иммуобилизация активного ила на носителях биореактора в условиях нитрификации и денитрификации // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2016. № 4. С. 150–158. EDN: VVTIMX.
12. Ferrera I., Sánchez O. Insights into Microbial Diversity in Wastewater Treatment Systems: How Far Have We Come? // Biotechnology Advances. 2016. Vol. 34. Iss. 5. P. 790–802. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.04.003>.
13. Rania Ahmed Hamza, Zhiya Sheng, Oliver Terna Iorhemen, Mohamed Sherif Zaghoul, Joo Hwa Tay Impact of Food-To-Microorganisms Ratio On the Stability of Aerobic Granular Sludge Treating High-Strength Organic Wastewater // Water Research. 2018. Vol. 147. Iss. 21. P. 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.061>.
14. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Гидродинамика в аэротенке с пневматической аэрацией // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 7. С. 66–74. EDN: OZIBEH.
15. Kulkov V.N. Biological Wastewater Treatment Using Regenerated Immobilized Sludge // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 219. P. 1–9. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021903002>.
16. Первых И.А., Зеленин А.М., Сосна В.М. Физическое моделирование газогидродинамической обстановки в аэратенке-вытеснителе // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 8. С. 89–93. EDN: RASWZH.
17. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Водовоздушная регенерация ершовой загрузки в аэротенке: монография. Иркутск: ИРНТУ, 2020. 162 с.
18. Студеникина Л.Н., Дочкина Ю.Н., Шелкунова М.В., Корчагин В.И Оценка эффективности иммуобилизации активного ила на композитных материалах «полиэтилен:полисахариды» // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 4. С. 356–360. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-356-360>. EDN: SUNXHV.
19. Куликов Н.И., Райманов А.Я., Омельченко Н.П., Чернышов В.Н. Теоретические основы очистки воды. Донецк: НОУЛИДЖ, 2009. 298 с.
20. Роденко А.В. Применение полимерного носителя биомассы на сооружениях биологической очистки сточных вод // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2016. № 2 (98). С. 77–80. EDN: VTVLYO.

REFERENCES

1. Ermolin Yu.A., Alekseev M.I. Industrial Wastewater Treatment as A Controlled Process. *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2017;2(70):18-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.20.2.18-27>. EDN: ZTSOHV.
2. Zhmur N.S. *Technological and Biochemical Processes of Wastewater Treatment in Facilities with Aeration Tanks*. Moscow: AQUAROS, 2003. 507 p. (In Russ.). EDN: QNKHHB.
3. Kirej V.A., Yuhnevich G.G. 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 = Current Problems of Ecology: A Collection of Scientific Articles Based On the Materials of the XII International Scientific and Practical Conference*. 04–06 October 2017, Grodno. Grodno; 2017. p. 208–210. (In Russ.). EDN: XORLIT.
4. Shvetsov V.N., Morozova K.M., Smirnova I.I., Semenov M.Yu., Lezhnev M.L., Ryzhakov G.G. [et al.] Use of Biological Loading Units at Wastewater Treatment Facilities. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2010;10–2:25-31. (In Russ.). EDN: MVREYB.
5. Slovtsov A.A. Improving Biological Wastewater Treatment Processes Using Attached Biocenoses. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2008;3:80-85. (In Russ.). EDN: MUXOIR.
6. Kulkov V.N., Solopanov E.Yu. Restoring Biocoenotic Species Composition in Aerated Structures Following Prolonged Downtime. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(1):77-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-77-83>. EDN: INF DUR.

7. Markevich R.M., Grebenchikova I.A., Rodenko A.V., Vostrova R.N. Special Properties of Free-Floating and Immobilized Active Sludge Biotic Community. *Trudy BGTU. № 4. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya*. 2013;4(160):219-223. (In Russ.). EDN: SOBOLV.
8. Kulkov V.N., Solopanov E.Yu. Intensification of Biological Wastewater Treatment in A Bioreactor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;667:1-9. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012051>.
9. Strelkov A.K., Gridneva M.A., Strelkov D.A., Afanaskin N.D. Technical and Economic Comparison of Post-Treatment of Domestic Wastewater in The Conditions of Sewage Treatment Plants in Buzuluk. In: *Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction Technologies: Collection of Articles*. Samara: Samara State Technical University, 2018. p. 260–266. (In Russ.). EDN: YNEUDB.
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;82(6):690-697. <https://doi.org/10.1134/S0026261713060076>.
11. Dolzhenko L.A. Immobilization of The Active Sludge from Carrieres in Bioreactors Under Nitrification and Denitrification Conditions. *Образование и наука в современном мире. Innovatsii*. 2016;4:150-158. (In Russ.). EDN: VVTIMX.
12. 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>.
13. Rania Ahmed Hamza, Zhiya Sheng, Oliver Terna Iorhemen, Mohamed Sherif Zaghloul, Joo Hwa Tay Impact of Food-To-Microorganisms Ratio On the Stability of Aerobic Granular Sludge Treating High-Strength Organic Wastewater. *Water Research*. 2018;147(21):287-298. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.061>.
14. Kulkov V.N., Solopanov E.Yu. Hydrodynamics in an Aeration Tank with Pneumatic Aeration. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010;7:66-74. (In Russ.). EDN: OZIBEH.
15. Kulkov V.N. Biological Wastewater Treatment Using Regenerated Immobilized Sludge. *E3S Web of Conferences*. 2020;219:1-9. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021903002>.
16. Pervykh I.A., Zelenin A.M., Sosna V.M. Physical Modeling of Gas Hydrodynamic Conditions in Continuous Flow Aeration Tank. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;8:89-93. (In Russ.). EDN: RASWZH.
17. Kulkov V.N., Solopanov E.Yu. *Water-Air Regeneration of Brush Loading in an Aeration Tank: Monograph*. Irkutsk: IRNITU, 2020. 162 p. (In Russ.).
18. Studenikina L.N., Dochkina J.N., Shelkunova M.V., Korchagin V.I. Evaluation of The Effectiveness of Immobilization of Activated Sludge on Composite Materials "Polyethylene:Polysaccharides". *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018;80(4):356-360. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-356-360>. EDN: SUNXHV.
19. Kulikov N.I., Raimanov A.Ya., Omel'chenko N.P., Chernyshov V.N. *Theoretical Foundations of Water Purification*. Donetsk: NOULIDG, 2009. 298 p. (In Russ.).
20. Rodenko A.V. Use of The Polymeric Carrier of Biomass On Constructions of Biological Sewage Treatment. *Vestnik Brest State Technical University*. 2016;2(98):77-80. (In Russ.). EDN: VTVLYO.

Информация 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, Россия,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3838-0777>
Author ID: 730720

Солопанов Евгений Юрьевич,

к.т.н., доцент отделения прикладной
математики и информатики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: evgursolo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4063-7252>
Author ID: 518365

Information about the authors

Victor N. Kulkov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Engineering
Communications and Life Support Systems,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3838-0777>
Author ID: 730720

Evgenii Yu. Solopanov,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor
of the Department of Applied Mathematics
and Computer Science,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉e-mail: evgursolo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4063-7252>
Author ID: 518365

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.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.07.2024.
Одобрена после рецензирования 26.08.2024.
Принята к публикации 29.08.2024.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

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 article

The article was submitted 31.07.2024.
Approved after reviewing 26.08.2024.
Accepted for publication 29.08.2024.