



Прогнозирование параметров регенерации плавающей загрузки в аэротенке

В.Н. Кульков^{1✉}, Е.Ю. Солопанов²,
В.И. Дударев³, А.К. Майновская⁴

^{1,2,3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Получена математическая модель, описывающая эффективность воздушной регенерации иммобилизованного ила на плавающей биологической загрузке «ПЗ Bio-850». Для этого была разработана физическая модель аэротенка-биореактора, которая послужила основой для данного исследования. Технология с использованием биоагентов позволяет уменьшить концентрацию в воде загрязняющих веществ, представляющих угрозу для человека и окружающей среды при их сбросе в поверхностные или грунтовые воды без надлежущей очистки. Это повышает эффективность работы аэротенков, ускоряет окисление загрязнений и обеспечивает высокое качество очистки воды. Загрузка также увеличивает производительность станции биологической очистки, делает биологические сооружения более устойчивыми к резким сбросам загрязнений и способствует процессу нитрификации. Проведение аналогичных исследований на промышленном аэрируемом сооружении является технически трудным. Модельный биотенк и экспериментальная установка позволяли варьировать в широком диапазоне интенсивность воздушной средне-пузырчатой регенерации плавающей загрузки, время регенерации, удельную массу загрузки, осуществлять контроль над концентрацией свободно плавающего ила. Найдена эффективность регенерации синтетической плавающей загрузки «ПЗ Bio-850» от следующих технических параметров: времени регенерации плавающей загрузки, массы загрузки и интенсивности мелкопузырчатой аэрации водно-иловой смеси. Построена математическая модель эффективности воздушной регенерации, отражающая влияние всех вышеперечисленных параметров. Составленная прогностическая матрица значений эффективности послужила основой для создания геометрической модели поверхности эффективности. Эта модель обеспечивает возможность оптимального подбора технологических параметров при проведении воздушной регенерации иммобилизованного ила для биологической очистки сточных вод в аэротенке-биореакторе с достаточно высокой эффективностью регенерации.

Ключевые слова: иммобилизованный ил, плавающая синтетическая загрузка, воздушная регенерация загрузки, эффективность регенерации, математическая модель

Для цитирования: Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Дударев В.И., Майновская А.К. Прогнозирование параметров регенерации плавающей загрузки в аэротенке // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 4. С. 635–644. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-635-644>. EDN: LTVXBN.

Original article

Forecasting regeneration parameters of free-floating biocarriers in an aeration tank

Victor N. Kulkov ^{1✉}, Evgenii Yu. Solopanov ²,
Vladimir I. Dudarev, Arina K. Mainovskaya ⁴

^{1,2,3,4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. A mathematical model was developed to describe the efficiency of air regeneration used for immobilised biofilm on free-floating biocarriers “FB Bio-850”. For this purpose, a physical model of an aeration tank bioreactor was developed, forming the basis for this study. The use of biocarriers

© Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Дударев В.И., Майновская А.К., 2023

contributes to decreasing the concentration of water pollutants that pose a threat to humans and the environment when released into the surface or groundwater without adequate treatment. This increases the efficiency of the aeration tanks, accelerates the oxidation of pollutants and ensures high-quality water purification. In addition, biocarriers increase the performance of the biological treatment plant, promote the resilience of biological structures to abrupt discharges of pollutants and facilitate the nitrification process. Carrying out such studies on an industrial aerated facility poses significant technical challenges. The model aerated tank and the experimental setup provided the flexibility to vary the intensity of the air medium-bubble regeneration for free-floating biocarriers, regeneration time, and the specific gravity of the biocarriers across a broad range, along with controlling the concentration of free-floating sludge. The correlation between the efficiency of regeneration of the plastic carriers "FB Bio-850" and the following technical parameters was established, including the regeneration time of the biocarriers, the loading mass and the intensity of the fine bubble aeration of the water-sludge mixture. A mathematical model of the efficiency of air regeneration was developed, reflecting the influence of all the above parameters. The obtained predictive matrix for efficiency values was used to develop a geometric model of the efficiency surface. This model provides an optimal selection of technological parameters for air regeneration of immobilised biofilm in a biological wastewater treatment aeration tank bioreactor, ensuring a sufficiently high regeneration efficiency.

Keywords: immobilized sludge, floating synthetic loading, air regeneration of the loading, efficiency of regeneration, mathematical model

For citation: Kulkov V.N., Solopanov E.Yu., Dudarev V.I., Mainovskaya A.K. Forecasting regeneration parameters of free-floating biocarriers in an aeration tank. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(4):635-644. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-635-644>. EDN: LTVXBN.

ВВЕДЕНИЕ

Биореактор, с использованием двух биоценозов активного ила, свободно плавающего и иммобилизованного, обеспечивает высокую очистку сточных вод. Устойчивая работа биотенков, входящих в состав канализационных очистных сооружений биологической очистки, обеспечивается однородно расположенной в объеме биореактора плавающей загрузкой с иммобилизованным илом [1–4].

Биомасса сорбированного биоценоза на инертной загрузке обеспечивает защищенность денитрифицирующих микроорганизмов от высоких концентраций вредных веществ в поступающих стоках. Прикрепленный к инертной загрузке ил увеличивает суммарную дозу активного ила в биотенке, что значительно увеличивает окислительную мощность аэрируемого сооружения [5–8].

Инертную синтетическую загрузку «ПЗ Bio-850», которую использовали в качестве носителя иммобилизованной биомассы, необходимо периодически обновлять, так как при движении в гидродинамических потоках в объеме биореактора осуществляется частичное самопроизвольное отделение сорбированного ила. Скорость гидродинамических потоков в биотенке изменяется от 0,05 м/с до 0,07 м/с, что недостаточно для полной регенерации прикрепленного ила. Обновление иммобилизованного ила будет производится

средне-пузырчатой воздушной регенерацией [9–12].

Математическая многофакторная модель воздушной регенерации иммобилизованного ила позволит подобрать технические параметры для биологической очистки сточных вод в биореакторе [13].

МЕТОДЫ

Для проведения исследований по применению воздушной регенерации иммобилизованного ила была разработана экспериментальная установка с моделью биореактора [14]. Эта модель представляет собой вертикальный поперечный разрез промышленного агрегата. Модельный биотенк изготовлен из силикатного полированного стекла с размерами 0,06×0,77×0,88 (м). Мелкопузырчатый аэратор АКВА-ЛАЙН находился в левом нижнем углу биотенка и обеспечивал аэрацию водно-иловой смеси [15].

Для проведения исследований по применению воздушной регенерации иммобилизованного ила была разработана специальная лабораторная установка с модельным биореактором [14]. Этот биореактор представляет собой вертикальный поперечный разрез промышленного агрегата. Модельный биотенк изготовлен из силикатного полированного стекла и имеет размеры 0,06×0,77×0,88 (м).

Для обеспечения аэрации водно-иловой смеси в левом нижнем углу биотенка разме-

щен мелкопузырчатый аэратор «Аква-Лайн» [15].

Водно-иловая смесь биореактора содержала активный ил с концентрацией $\sim 0,3$ г/дм³. Ил адсорбировался на плавающей загрузке, которая перемещалась по биотенку гидродинамическими потоками.

Водно-иловую смесь аэрировали с удельной интенсивностью $\sim 7,5$ м³/(м²·ч). Для определения изменения концентрации свободно плавающего ила в биореакторе пользовались полученной зависимостью концентрации свободно плавающего ила от интенсивности светового потока, проходящего через водно-иловую смесь (калибровочный график). Интенсивность светового потока измерялась люксметром в квазистационарном состоянии седиментации ила на плавающей загрузке.



Рис. 1. Плавающая загрузка типа «ПЗ Bio-850»
Fig. 1. Floating loading type "PZ Bio-850"

При достижении квазистационарного процесса, т.е. равенства скоростей адсорбции и десорбции ила на загрузке ($C_{\text{ила}} \approx 0.2$ г/дм³ = Const) в биореакторе, проводили воздушную регенерацию плавающей загрузки с удельной интенсивностью $9,5$ м³/(м²·ч). Эффективность регенерации иммобилизованного ила рассчитывали по остаточной концентрации ила на плавающей загрузке. Для нахождения математической модели многофакторной зависимости эффективности воздушной регенерации плавающей загрузки, применяли метод геометрических преобразований [13]. Данный метод заключается в моделировании гиперповерхности, имеющей каркас из кусков кривых линий, которые проходят через общую точку.

Рассмотрим математическую модель, описывающую эффективность процесса воздушной регенерации плавающей загрузки. В данной модели у нас имеются один зависимый и

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетику адсорбции активного ила на плавающей загрузке типа «ПЗ Bio-850» (рис. 1), плотностью $0,93-0,97$ г/дм³, изучали в физической модели биореактора объемом 80 дм³. Для этого помещали в модель 10 кг загрузки «ПЗ Bio-850», что соответствовало 125 кг/м³ удельной массы ее. Загрузка находится в динамике под воздействием гидродинамических потоков, что способствует постоянному частичному обновлению биопленки. Это определяет очистку сточных вод от соединений азота, так как обновленный слой биопленки активнее воздействуют на эти загрязнения. Конструкция загрузки предусматривает закрытые зоны, в которых формируется адсорбированный биоценоз, способствующий быстрому росту биопленки на открытых поверхностях.

три независимых параметра. Исследуемая модель выражается следующим образом:

$$\mathcal{E} = f(t, m, J_g), \quad (1)$$

где \mathcal{E} – эффективность восстановления иммобилизованного ила, %; t – время воздушной регенерации, с; m – удельная масса плавающей загрузки, кг/м³; J_g – удельная интенсивность воздушной регенерации, м³/(м²·ч).

Модель разрабатывали по результатам обработки экспериментальных данных, представленных в табл. 1.

Были получены парные функциональные зависимости эффективности регенерации плавающей загрузки от данных параметров (рис. 2–4):

$$\mathcal{E}_t = \varphi(t); \quad \mathcal{E}_m = \varphi(m); \quad \mathcal{E}_{J_g} = \varphi(J_g). \quad (2)$$

Таблица 1. Параметры воздушной регенерации и их эффективность

Table 1. Regeneration parameters and their efficiency

t , с	\mathcal{E}_t , %	m , кг/м ³	\mathcal{E}_m , %	J_g , м ³ /(м ² ·ч)	\mathcal{E}_{J_g} , %
30	75	37.5	82	5.2	70
60	86	62.5	87	7.5	88
120	94	125.0	92	9.5	96
180	95	187.5	97	12.0	98

Эффективность воздушной регенерации плавающей загрузки \mathcal{E}_t от времени её регенерации t изучали в интервале от 0,5 до 3 минут (рис. 2). Воздушная регенерация проводилась интенсивностью $J_g = 9,5$ м³/(м²·ч). Удельная масса синтетической загрузки m , находящейся в биореакторе, составляла 125 кг/м³. Рост эффективности регенерации иммобилизованного ила наблюдается приблизительно до 2,5 мин. Эффективность воздушной регенерации плавающей загрузки \mathcal{E}_t от изменения ее удельной массы m изучали в интервале от 37,5 кг/м³ до 187,5 кг/м³ (рис. 3). Эффективность регенерации изменяется с 82% и достигает 97% при массе плавающей загрузки равной ~188 кг/м³.

На рис. 4. представлена эффективность воздушной регенерации плавающей загрузки \mathcal{E}_{J_g} в зависимости от интенсивности её регенерации J_g .

Для нахождения оптимальной величины интенсивности воздушной регенерации плавающей загрузки с иммобилизованным илом в биореакторе использовался воздушный средне-пузырчатый регенератор [14], с помощью которого можно было варьировать удельную интенсивность воздушной регенерации в пределах 5,2 м³/(м²·ч) – 12,4 м³/(м²·ч). Время регенерации плавающей загрузки t составляло 120 сек., а удельная ее масса m – 125 кг/м³.

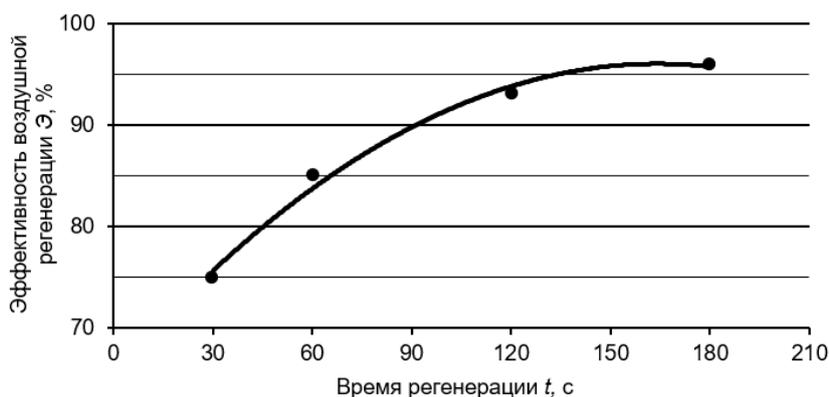


Рис. 2. Зависимость эффективности \mathcal{E} от времени регенерации t
Fig. 2. Dependence of the efficiency \mathcal{E} on regeneration time t

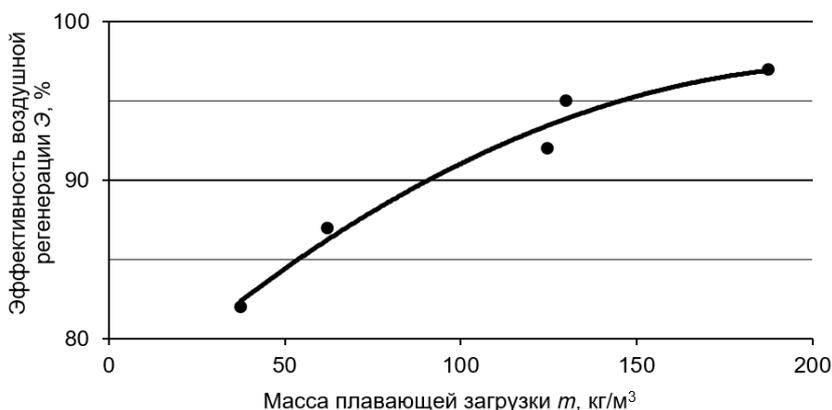


Рис. 3. Зависимость эффективности воздушной регенерации плавающей загрузки от массы загрузки
Fig. 3. The efficiency of airy regeneration of the loading on its mass

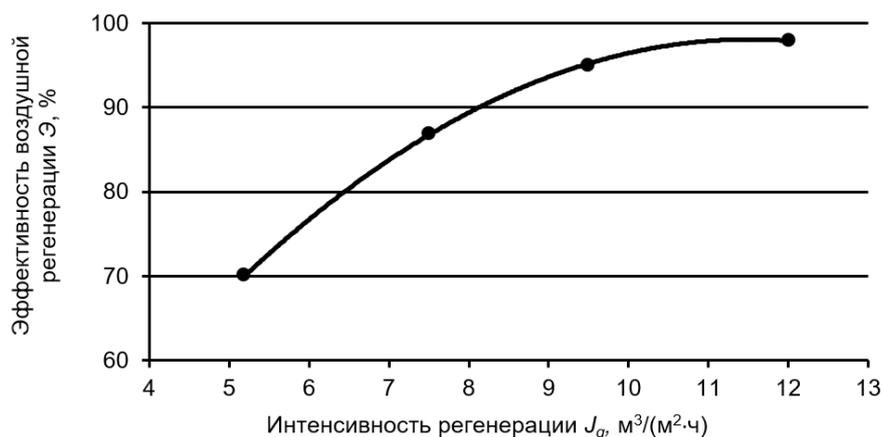


Рис. 4. Зависимость эффективности воздушной регенерации загрузки от интенсивности регенерации.

Fig. 4. Efficiency of airy regeneration of the loading on the intensity of its regeneration

Из приведенных на рис. 2–4 зависимостей видно, что все экспериментальные данные очень хорошо аппроксимируются квадратичными уравнениями

$$\mathcal{E} = a_0 + a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot x_i^2, \quad (3)$$

где a_i – коэффициенты уравнений, найденные в результате математической обработки массива экспериментальных данных, $i = 1, 2, 3$; x_i – три независимых параметра, соответственно, t , m или J_g .

Полученные уравнения (3) были исследованы на оптимальные значения входных и выходного параметров. Для этого производные каждого уравнения $d\mathcal{E}/dx_i$ приравнивали нулю:

$$d\mathcal{E}/dx = 2a_2 \cdot x + a_1 = 0, \quad (4)$$

и определили максимум рассматриваемых уравнений:

$$x_i^{\text{опт}} = -a_1 / (2 \cdot a_2), \quad (5)$$

где $x_i^{\text{опт}}$ – точка экстремума i -го параметра.

Для нахождения оптимальной эффективности для параметра соответствующей зависимости, подставим $x_i^{\text{опт}}$ в уравнение (3)

Эффективность воздушной регенерации плавающей загрузки \mathcal{E}_t от времени её регенерации t , приведенная на рис. 2, можно представить следующим равенством

$$\mathcal{E}_t = -0.0011 \cdot t^2 + 0.372 \cdot t + 65.53; \quad R^2 = 0.989, \quad (6)$$

где R^2 – коэффициент детерминации, характеризующий тесноту связи между эффективностью воздушной регенерацией и параметром t . Очевидно, что чем ближе к единице R^2 , тем качественней построенная модель ложится на имеющиеся данные и ближе к этой модели лежат истинные точки наблюдения. Используя уравнения (4) и (5), рассчитали опти-

мальное значение времени регенерации $t^{\text{опт}} = 168.9$ с. Подставив его в уравнение (6), получили $\mathcal{E}_t^{\text{опт}} = 96.9\%$, т.е. оптимальную эффективность регенерации для этого параметра.

Зависимости эффективности воздушной регенерации плавающей загрузки от её удельной массы в биореакторе (рис. 3), удельной интенсивности ее регенерации (рис. 4), описываются следующими уравнениями:

$$\mathcal{E}_m = -0.0005 \cdot m^2 + 0.204 \cdot m + 75.41; \quad R^2 = 0.973, \quad (7)$$

$$\mathcal{E}_{J_g} = -0.702 \cdot J_g^2 + 16.163 \cdot J_g + 4.997; \quad R^2 = 0.998, \quad (8)$$

Аналогично выше приведенным расчетам, по уравнениям (4)–(6), получены оптимальные значения и оптимальные эффективности для удельной массы загрузки – $m^{\text{опт}} = 204$ кг/м³ и $\mathcal{E}_m^{\text{опт}} = 96.2\%$; удельной интенсивности ее регенерации – $J_g^{\text{опт}} = 11.5$ м³/(м²·ч) и $\mathcal{E}_{J_g}^{\text{опт}} = 98.1\%$.

Была оценена также точность аппроксимации: расчет показал, что средняя относительная ошибка не превышает 0,005%, которой можно пренебречь.

Для построения математической модели поверхности, связывающей эффективность воздушной регенерации с тремя независимыми параметрами t , J_g и m , взяли в качестве одномерных образующих аппроксимирующие параболы второго порядка (6)–(8).

В результате найдено уравнение поверхности эффективности:

$$\mathcal{E} = f(t, m, J_g) = \frac{1}{3} (0.00037 \cdot t^2 + 0.00017 \cdot m^2 + 0.23383 \cdot J_g^2 + 0.12387 \cdot t + 0.068 \cdot m + 5.3877 \cdot J_g + 48.647). \quad (9)$$

По полученному уравнению (9) рассчитали эффективность модели, используя для расчета значения найденных оптимальных параметров. В результате получили, что эффективность составляет ~97%.

По уравнению (9) рассчитали значение эффективности регенерации для следующих данных: J_g^{opt} и $m^{opt} = const$, время t изменялась от 30 до 180 с; τ^{opt} и $m^{opt} = const$, интенсивность регенерации J_g – от 5,2 до 12,0 $м^3/(м^2 \cdot ч)$; τ^{opt} и $J_g^{opt} = const$, масса загрузки – от 37,5 до 187,5 кг. Значения изменяющихся параметров (по числу экспериментальных точек каждого параметра) приведены в табл. 1.

Из рассчитанных величин эффективности регенерации сформировали исходную матрицу значений эффективности (табл. 2). По исходной матрице значений эффективности по-

строена геометрическая модель поверхности эффективности, которая приведена на рис. 5.

Оптимальное значение удельной массы $m^{opt} = 204 \text{ кг/м}^3$ плавающей загрузки в биореакторе не входило в число экспериментальных точек, по которым рассчитывалась исходная матрица значений эффективности.

Для учета данного параметра добавим дополнительный ряд №5 заданных значения независимых параметров, например: $t = 205 \text{ с}$; $m = 210 \text{ кг/м}^3$; $J_g = 14.4 \text{ м}^3/(м^2 \cdot ч)$ и составим прогностическую матрицу значений эффективности (табл. 3).

Геометрическая интерпретация прогностической матрицы представлена на рис. 6. Точка на поверхности эффективности (рис. 6) соответствует максимальному значению эффективности математической модели, учитывающей все найденные оптимальные параметры.

Таблица 2. Исходная матрица значений эффективности

Table 2. Initial matrix of efficiency values

J_g^{opt} и $m^{opt} = const$	τ^{opt} и $m^{opt} = const$	τ^{opt} и $J_g^{opt} = const$
89,861913	92,35905	87,5041321
92,579013	93,63405	93,0656678
96,015213	95,95455	95,8908478
96,787413	96,82155	96,7917353

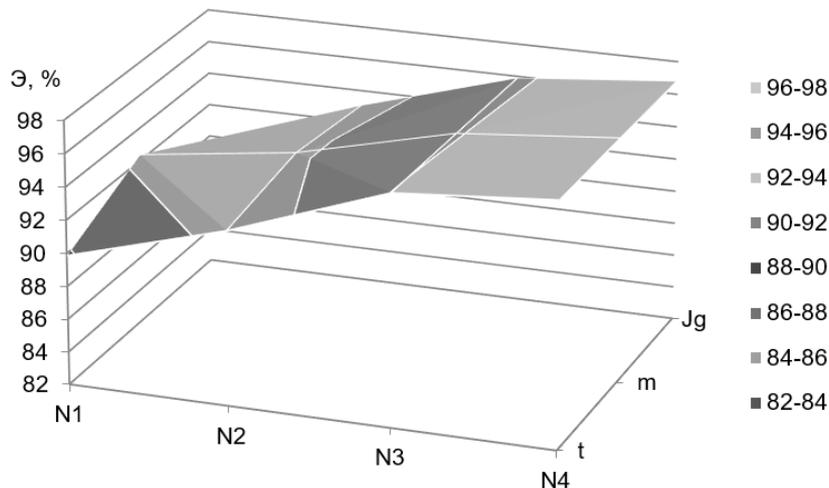


Рис. 5. Геометрическая интерпретация модели, построенной по исходной матрице эффективности

Fig. 5. Geometric surface of the efficiency based on the original matrix of efficiency

Полученные матрицы эффективности и построенные поверхности эффективности легко анализируются.

Видно, при каких значениях технологических параметрах можно подобрать наиболее выгодные параметры для повышения эффективности работы оборудования.

Следовательно, использование математической модели эффективности воздушной регенерации плавающей загрузки позволяет проектировать и осуществлять процесс эффективной работы биореактора с применением заданных входных параметров регенерации.

Таблица 3. Прогностическая матрица значений эффективности
Table 3. Predictive matrix of efficiency values

$J_g^{опт}$ и $m^{опт} = const$	$\tau^{опт}$ и $m^{опт} = const$	$\tau^{опт}$ и $m^{опт} = const$
89,861913	92,35905	87,5041321
92,579013	93,63405	93,0656678
96,015213	95,95455	95,8908478
96,787413	96,82155	96,7917353
96,322913	96,83111	94,9067465

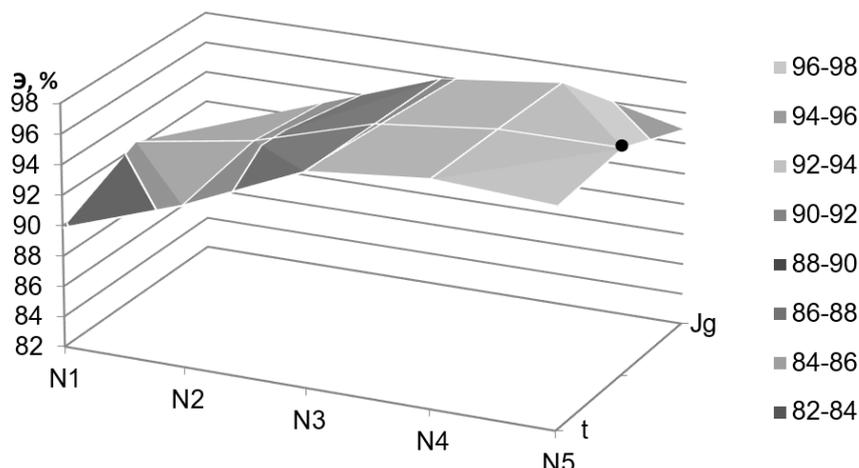


Рис. 6. Геометрическая поверхность эффективности
Fig. 6. Geometric surface of efficiency

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздушная регенерация плавающей загрузки с иммобилизованным илом происходила в физической модели аэротенка-биореактора. Найдена многофакторная модель эффективности регенерации иммобилизованного ила воздухом на плавающей загрузке. По полученной математической модели можно найти эффективность воздушной регенерации от следующих параметров: времени и удельной интенсивности регенерации, а также удельной массы плавающей загрузки. С использованием математической модели была построена геометрическая поверхность эффективности регенерации, определяющая влияние всех приведенных параметров.

Получены зависимости эффективности средне-пузырчатой воздушной регенерации иммобилизованного ила на плавающей загрузке и определены оптимальные параметры регенерации плавающей загрузки, необходимые для высокой эффективности: время регенерации равняется ~2,5 мин; удельная интенсивность воздушной регенерации составляет 12 м³/(м²·ч); удельная масса загрузки равна ~200 кг/м³.

Следовательно, применение математической модели предоставляет возможность выбрать технические параметры воздушной регенерации иммобилизованного ила при определенной высокой эффективности регенерации для биологической очистки сточных вод.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.
2. 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.
3. 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. № 2. С. 33–40. EDN: НУКХWX.
4. 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>.

5. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Водовоздушная регенерация ершовой загрузки в аэротенке: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. 162 с.
6. 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 // Тр. БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2013. № 4 (160). С. 219–223. EDN: SOBOLV.
7. Куликов Н.И., Найманов А.Я., Омельченко Н.П., Чернышов В.Н. Теоретические основы очистки воды. Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 2009. 297 с.
8. Hamza R.A., Sheng Zh., Ternalorhemen O., Zaghoul M.Sh., 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>.
9. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Евтеева И.В., Разум А.С. Газогидродинамическая обстановка и распределение активного ила в сооружениях биологической очистки сточных вод // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2008. № 4 (36). С. 48–52. EDN: JWXIVV.
10. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Оценка эффективности регенерации синтетической загрузки в био-реакторе // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 3 (18). С. 77–84. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2016-3-77-84>. EDN: WMNBBZ.
11. 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>.
12. Abdalla Kh.Z., Khafagy Kh. Upgrading of activated sludge systems using immobilized Nitrifiers in polymer pellets // *International journal of scientific & engineering research*. 2014. Vol. 5. Iss. 2. P. 619–623.
13. Вертинская Н.Д. Многомерное математическое моделирование многофакторных и многопараметрических процессов в многокомпонентных системах. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2001. 289 с. EDN: KVBGTR.
14. Первых И.А., Зеленин А.М., Сосна В.М. Физическое моделирование газогидродинамической обстановки в аэротенке-вытеснителе // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 8 (79). С. 89–93. EDN: RASWZH.
15. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Кудрявцева Е.В. Использование информационных технологий для математического моделирования биологической очистки сточных вод // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 6 (666). С. 66–73. EDN: SXHLPP.

REFERENCES

1. Zhmur N.S. Technological and biochemical processes for wastewater treatment at facilities with aerotanks. Moscow: Akvaros Publ.; 2003. 512 p. (In Russ.).
2. Shvetsov V.N., Morozova K.M., Smirnova I.I., Semenov M.Yu., Lezhnev M.L., Ryzhakov G.G., et al. The use of bioblocks at wastewater treatment facilities. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2010;10:25-31. (In Russ.). EDN: MVREYB.
3. Shvetsov V.N., Morozova K.M., Smirnova I.I., Semenov M.Yu., Lezhnev M.L., Ryzhakov G.G., et al. Technological efficiency of biomedica produced by Tekhvodpolimer Co. Ltd. *Vodosnabzhenie i sanitarnayatekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2007;2:33-40. (In Russ.). EDN: HYKXWX.
4. 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>.
5. Kulkov V.N., Solopanov E.Yu. Water-air regeneration of a synthetic brush loading located in an aerotank. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2020. 162 p. (In Russ.).
6. 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 = Proceedings of BSTU. № 4. Chemistry, organic substances technology and biotechnology*. 2013;4:219-223. (In Russ.). EDN: SOBOLV.
7. Kulikov N.I., Naimanov A.I., Omelchenko N.P., Chernyshov V.N. Theoretical based water purification. Makееvka: Donbass National Academy of Construction and Architecture; 2009. 298 p. (In Russ.).
8. Hamza R.A., Sheng Zh., Ternalorhemen O., Zaghoul M.Sh., 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>.
9. Kulkov V.N., Solopanov E.Yu., Evteeva I.V., Razum A.S. Gas and hydrodynamic condition and distribution of active silt in the installations of biological cleaning of sewages. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2008;4:48-52. (In Russ.). EDN: JWXIVV.

10. Kulkov V.N., Solopanov E.Iu. 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. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2016-3-77-84>. (In Russ.). EDN: WMNBBZ.
11. 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;147:393-402. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.017>.
12. Abdalla Kh.Z., Khafagy Kh. Upgrading of activated sludge systems using immobilized Nitrifiers in polymer pellets. *International journal of scientific & engineering research*. 2014;5(2):619-623.
13. Vertinskaya N.D. Multidimensional mathematical modeling of multifactor and multiparametric processes in multicomponent systems. Irkutsk: Irkutsk state technical university; 2001. 289 p. (In Russ.). EDN: KVBGTR.
14. Pervykh I.A., Zelenin A.M., Sosna V.M. Physical modeling of gas hydrodynamic conditions in continuous flow aeration tank. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2013;8:89-92. (In Russ.). EDN: RASWZH.
15. Kulkov V.N., Solopanov E.Yu., Kudryavtseva E.V. Use of information technology of mathematical modeling the biological wastewater treatment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = News of higher educational institutions. Construction*. 2014;6:66-73. (In Russ.). EDN: SXHLPP.

Информация об авторах

Information about the authors

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

Victor N. Kulkov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Urban
Construction and Economy,
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

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

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

Дударев Владимир Иванович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры химии и биотехнологии
им. В.В. Тутуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>
Author ID: 676659

Vladimir I. Dudarev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry
and Biotechnology named after V.V. Tuturina,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>
Author ID: 676659

Майновская Арина Константиновна,

специалист по учебно-методической работе
кафедры городского строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: daarishka99@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6413-2991>
Author ID: 1211009

Arina K. Mainovskaya,

Specialist in Educational and Methodological
Work of the Department of Urban Construction
and Management,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: daarishka99@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6413-2991>
Author ID: 1211009

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 04.09.2023.
Одобрена после рецензирования 19.09.2023.
Принята к публикации 20.09.2023.

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 04.09.2023.
Approved after reviewing 19.09.2023.
Accepted for publication 20.09.2023.