

Перспективы использования комбинированного показателя состояния активного ила в практике водоочистки

© 2025. Е. С. Балымова, к. т. н., доцент, А. Ф. Гилязева, магистрант, Ф. Ю. Ахмадуллина, ст. преподаватель, Р. К. Закиров, к. т. н., доцент, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, e-mail: ilc2013@inbox.ru

В настоящее время для промышленных сточных вод характерно усложнение состава и повышение токсичности. Очистка промышленных сточных вод проходит в основном на биологических очистных сооружениях, отличительной особенностью которых является реализация процесса продлённой аэрации сточных вод. Для обеспечения требуемого качества биоочищенных вод обязательным условием является знание состояния активного ила в процессе биологической очистки. Поэтому целью работы являлась оценка состояния активного ила в процессе биологической очистки промышленных стоков в сравнительном аспекте и разработка нового, более перспективного показателя оценки состояния активного ила. Оценивали состояние активных илов, формирующихся на сточных водах производств органического синтеза и на сточных водах нефтехимических предприятий. Установлена аналогичная тенденция изменения состояния активного ила в процессе биологической очистки, оцениваемого по пятибалльной шкале и гидробиологическому индексу Шеннона. Исключение составляет модифицированный индекс Куба, для которого показано количественное несоответствие его изменения по сравнению с вышеуказанными параметрами. Выявлены определённый субъективизм пятибалльной шкалы оценки, связанный с профессионализмом микробиолога, и недостаточная информативность гидробиологических индексов, учитывающих только наличие индикаторных организмов активного ила. Для использования в практике водоочистки предложен новый количественный показатель, базирующийся на данных прямых аналитических измерений и равный отношению мутности надильовой жидкости к величине родового индекса Шеннона (комбинированный показатель). Показано полное соответствие изменения состояния активного ила по пятибалльной шкале оценки и комбинированному показателю, характеризующему уровень стрессирования активного ила в процессе биоочистки. Отмечена большая чувствительность комбинированного показателя, особенно при значительном снижении оценки состояния активного ила. Получена прогностическая модель, описывающая изменение состояния активного ила, формирующегося на стоках производств органического синтеза, в процессе биоочистки и его восстановительный потенциал (коэффициент детерминации 97,06%).

Ключевые слова: биологическая очистка, активный ил, пятибалльная шкала оценки, гидробиологические индексы, комбинированный показатель.

Prospects for using a combined indicator of activated sludge status in water treatment practice

© 2025. E. S. Balymova ORCID: 0000-0002-4268-7600, A. F. Gilyazeva ORCID: 0009-0002-6023-0556, F. Y. Akhmadullina ORCID: 0000-0001-6538-5616, R. K. Zakirov ORCID: 0000-0003-3771-4077, Kazan National Research Technological University, 68, Karl Marx St., Kazan, Russia, 420015, e-mail: ilc2013@inbox.ru

Currently, industrial wastewater is characterized by a more complex composition and increased toxicity. Industrial wastewater treatment takes place mainly in biological treatment plants, the distinctive feature of which is the implementation of the process of extended aeration of wastewater. To ensure the required quality of biotreated water, it is prerequisite to know the status of activated sludge during the biological treatment process. Therefore, the purpose of the work was to assess the state of activated sludge in the process of biological treatment of industrial wastewater in a comparative aspect and to develop a new, more promising indicator for assessing the activated sludge status. The article assessed the status of two activated sludges: formed on wastewater from organic synthesis plants and on wastewater from petrochemical enterprises. A similar trend has been established for changes in the activated sludge status while biological treatment, assessed on a five-point scale and the Shannon hydrobiological index. The exception is the modified Cube index, for which the quantitative discrepancy of its changes compared to the above is shown. A certain subjectivity of the five-point rating scale, associated with the microbiologist qualification, and insufficient information content of hydrobiological

indices which take into account only the presence of indicator organisms of activated sludge were revealed. For use in water treatment practice, a new quantitative indicator has been proposed. It is based on data from direct analytical measurements. It is equal to the ratio of the supernatant liquid turbidity to the generic Shannon index (combined indicator) value. The complete correspondence of the change in the activated sludge status on a five-point rating scale and a combined indicator characterizing the stress level of activated sludge during the biotreatment process is shown. Greater sensitivity of the combined indicator was noted, especially with a significant decrease in the assessment of the activated sludge status. A predictive model has been obtained that describes the change in the status of activated sludge formed from wastewater of organic synthesis plant during the water treatment and its recovery potential (coefficient of determination 97.06%).

Keywords: biological treatment, activated sludge, five-point rating scale, hydrobiological indices, combined indicator.

Наблюдаемая ситуация на сегодняшний день – значительное загрязнение поверхностных водоёмов из-за возрастающего антропогенного воздействия вследствие поступления недоочищенных промышленных и сельскохозяйственных стоков в водоприёмники [1–3]. В результате резко снизилась их самоочищающая способность, и возникла острая необходимость осуществления превентивных мероприятий по их восстановлению [4, 5].

Одно из наиболее возможных и реализуемых решений этой проблемы – усовершенствование работы очистных сооружений, большинство из которых были запущены в эксплуатацию ещё в прошлом веке. Учитывая радикальное изменение и усложнение состава современных промышленных стоков, качество биоочищенных вод не всегда отвечает нормативным требованиям. Эффективность биологической очистки промышленных стоков зависит от состояния активного ила, осуществляющего процесс водоочистки, знание этого в динамике очень важно для оценки и прогнозирования его восстановительного потенциала на окончание процесса биологической очистки сточных вод (БОВ), что позволит предусмотреть проведение превентивных рекультивационных мероприятий при необходимости (в случае неудовлетворительного состояния активного ила).

Для количественной оценки состояния активного ила используют как балльную [6], так и приоритетные на сегодняшний день системы, базирующиеся на индексах биоразнообразия (индексы Шеннона и Куба) [7, 8].

Традиционная балльная система учитывает состояние всех составляющих иловой суспензии: состояние индикаторных микроорганизмов активного ила, его хлопьев и надиловой жидкости. Но стоит отметить определённый субъективизм балльной системы, связанный с профессионализмом микробиолога, оценивающего состояние активного ила.

Что касается индексационных систем оценки состояния активного ила, то они

учитывают только наличие индикаторных микроорганизмов биоценоза активного ила, что недостаточно информативно.

Целью исследования являлась оценка состояния активного ила в процессе биологической очистки промышленных стоков в сравнительном аспекте и возможность использования в практике водоочистки нового, более перспективного показателя оценки состояния активного ила.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – активные илы, формирующиеся на сточных водах производств органического синтеза и предприятий нефтехимического комплекса. Отбор проб иловых суспензий осуществляли на выходе из зоны регенерации совмещённого аэротенка. Для достижения поставленной цели работа проводилась с илами, различающимися по исходному состоянию, что характерно для очистки сточных вод, непостоянных и сложных по составу.

Микроскопирование активного ила осуществляли с использованием препарата «раздавленная капля» в неокрашенных препаратах, применяя микроскоп МИКМЕД-5 при увеличении $\times 100$ и $\times 400$ по ПНД Ф СБ 14.1.77-96.

Токсичность надиловой жидкости оценивали методом биотестирования с использованием в качестве тест-объекта равноресничных инфузорий *Paramecium caudatum* по ГОСТ Р 57166-2016.

Определение контрольных показателей сточных вод и активного ила проводили по методикам измерений: ХПК – по ПНД Ф 14.1:2.3.100-97, pH – по ПНД Ф 14.1:2.3:4.121-97, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ) – по ПНД Ф 14.1:2.247-07, фенол – по ПНД Ф 14.1:2.104-97, мутность надиловой жидкости – по ПНД Ф 14.1:2.4.213-05, дозу активного ила – по ФР 1.31.2008.04397.

Оценку состояния активного ила в процессе БОВ осуществляли по пятибалльной

шкале [6], индексу Шеннона [7] и модифицированному индексу Куба [8]. В основе первой оценочной системы: визуальное изучение активного ила, включая состояние хлопьев активного ила, надилловой жидкости и физиологическое состояние индикаторных микроорганизмов с последующей оценкой в соответствии с рекомендациями [9]. Учитывая сложность и продолжительность экспериментального определения видового состава микроорганизмов активного ила, в работе использовали модификации индексов видового биоразнообразия Шеннона и Куба, базирующиеся на родовом составе гидробионтов.

Экспериментальные исследования предполагали проведение полного факторного эксперимента в трёхкратной повторности. Проанализировано более 700 проб для каждого активного ила (формирующегося на сточных водах производств органического синтеза [10] и стоках предприятий нефтехимического комплекса [11]). Статистическую обработку полученных данных проводили в пакете прикладных программ Statistica 13.5; значение доверительной вероятности $P=0,95$.

Результаты и обсуждение

Для корректного сопоставления полученных результатов оценки активных илов с различным исходным состоянием использовали относительные характеристики изменения состояния активного ила в процессе очистки сточных вод производств органического синтеза, приняв за 100% оценку исходного состояния активного ила, независимо от системы оценки состояния активного ила (рис. 1).

Следует отметить практически аналогичную тенденцию изменения состояния активного ила, выраженного в баллах и единицах родового индекса Шеннона (рис. 1а, б). Что касается оценки состояния биоценоза активного ила по родовому индексу Куба (рис. 1в), то наблюдаемое количественное несоответствие изменения данного индекса по сравнению с вышеуказанными, видимо, связано с более высокой чувствительностью индекса Куба к изменению количественного, а не качественного состава микроорганизмов активного ила – биоиндикаторов [8].

Сравнительный анализ изменения состояния активного ила в процессе биологической очистки сточных вод производств органического синтеза (рис. 1) и активного ила, формирующегося на сложных по составу биорезистентных стоках предприятий

нефтехимического комплекса (рис. 2), показал аналогичность тенденций изменения относительной оценки состояния активного ила, оцениваемого по пятибалльной шкале и гидробиологическому индексу Шеннона.

Но при этом, для системы, базирующейся на использовании родового индекса Шеннона, не учитывающего состояния хлопьев активного ила и надилловой жидкости, характерно завышение результатов количественной оценки состояния активного ила, что искажает достоверность полученной информации.

С другой стороны, определённый субъективизм 5-балльной шкалы оценки снижает её преимущество и диктует необходимость использования количественного показателя, учитывающего как фактор биоразнообразия микробиоценоза, так и состояние хлопьев активного ила.

В связи с этим, предложено для оценки состояния активного ила искусственных экосистем в процессе биологической очистки использовать комбинированный показатель, абсолютная величина которого характеризует уровень стресса активного ила при воздействии экотоксикантов в процессе водоочистки непостоянных по составу и токсичных промышленных сточных вод:

$$КП = \frac{M}{H_{\text{мод}}} \quad (1)$$

где M – мутность надилловой жидкости, мг/дм³; $H_{\text{мод}}$ – родовый индекс Шеннона.

Использование мутности надилловой жидкости обосновано тем, что данный показатель опосредованно указывает на состояние хлопьев активного ила: рост мутности надилловой жидкости свидетельствует об их дефлокуляции, наличии большого числа свободноплавающих клеток [12, 13]. При этом, ухудшение условий функционирования искусственной экосистемы должно приводить к повышению величины этого показателя и, наоборот, при стабильной работе очистных сооружений.

К преимуществам комбинированного показателя следует отнести объективный характер оценки состояния активного ила и более высокую точность, так как он базируется на данных прямых экспериментальных определений (фотометрический метод и микроскопирование) [14].

Сопоставление двух показателей – индекса Шеннона и комбинированного показателя, характеризующего уровень стрессирования активного ила в процессе водоочистки, – показало полное соответствие их изменения в

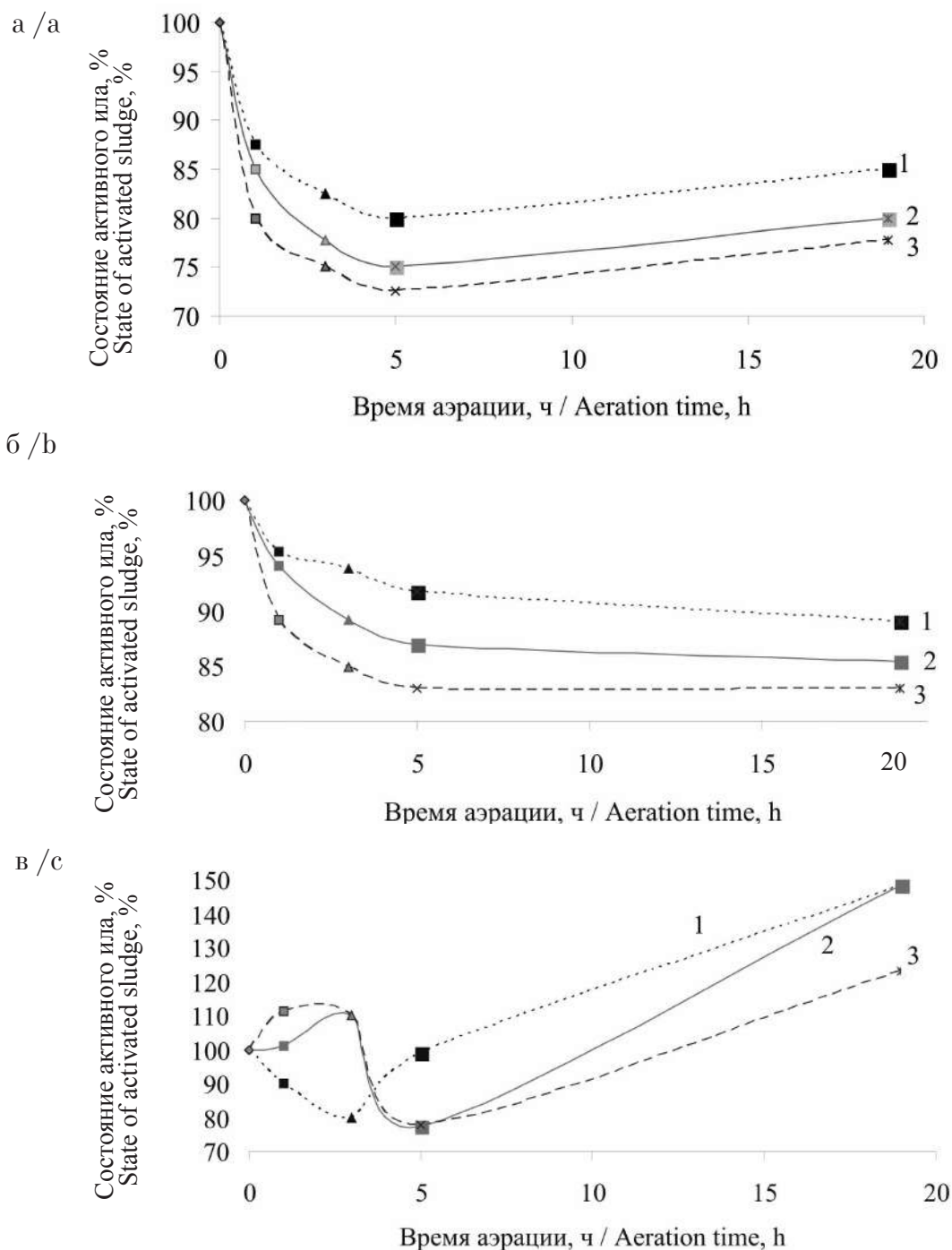


Рис. 1. Изменение состояния активного ила в процессе биологической очистки сточных вод производств органического синтеза ($C_{\text{СПАВ}}=10 \text{ мг/дм}^3$, $C_{\text{Фенол}}=10 \text{ мг/дм}^3$, $C_{\text{Глицерин}}=150 \text{ мг/дм}^3$) при варьировании ХПК (1 – 650 мгО/дм^3 , 2 – 1000 мгО/дм^3 , 3 – 2000 мгО/дм^3): а – в баллах; б – по индексу Шеннона, в – по индексу Куба (при $P=0,95$)

Fig. 1. The activated sludge status during wastewater biological treatment of organic synthesis plant (at the concentration of synthetic surfactants 10 mg/dm^3 , phenol – 10 mg/dm^3 , glycol – 150 mg/dm^3) with varying COD (1 – 650 mgO/dm^3 , 2 – 1000 mgO/dm^3 , 3 – 2000 mgO/dm^3): а – on a five-point scale, б – on the Shannon index, c – on the Cube index (at $P=0.95$)

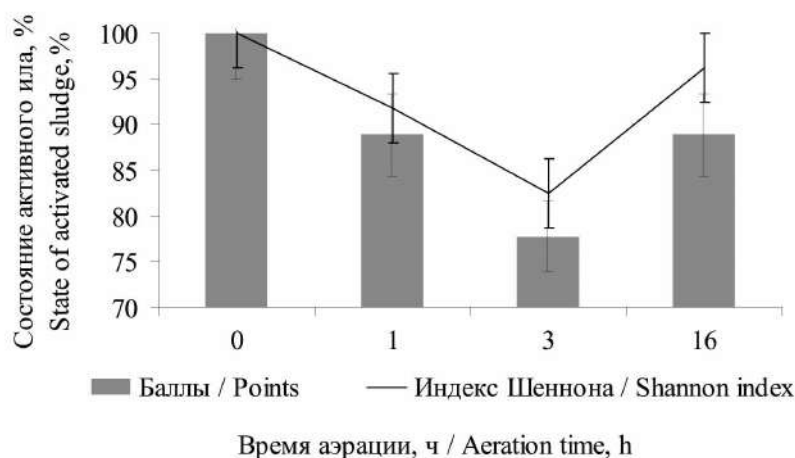


Рис. 2. Изменение состояния активного ила, формирующегося на стоках предприятий нефтехимического комплекса, в процессе биологической очистки (при $P=0,95$)

Fig. 2. Changes in the state of activated sludge, formed from wastewater of petrochemical enterprises, during biological treatment (at $P=0.95$)

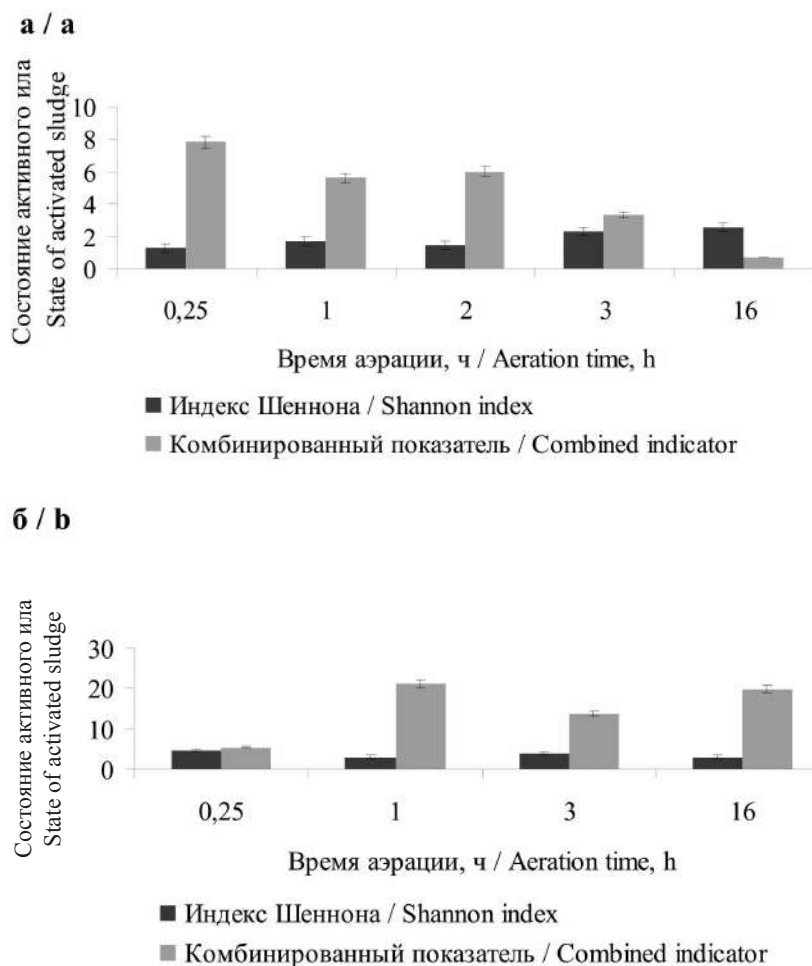


Рис. 3. Изменение состояния активного ила в процессе биологической очистки вод: а – активный ил, формирующийся на сточных водах производств органического синтеза; б – активный ил, формирующийся на сточных водах предприятий нефтехимического комплекса (при $P=0,95$)

Fig. 3. Changes in the state of activated sludge in the water treatment process: а – activated sludge, formed from wastewater of organic synthesis plants; б – activated sludge, formed from wastewater of petrochemical enterprises (at $P=0.95$)

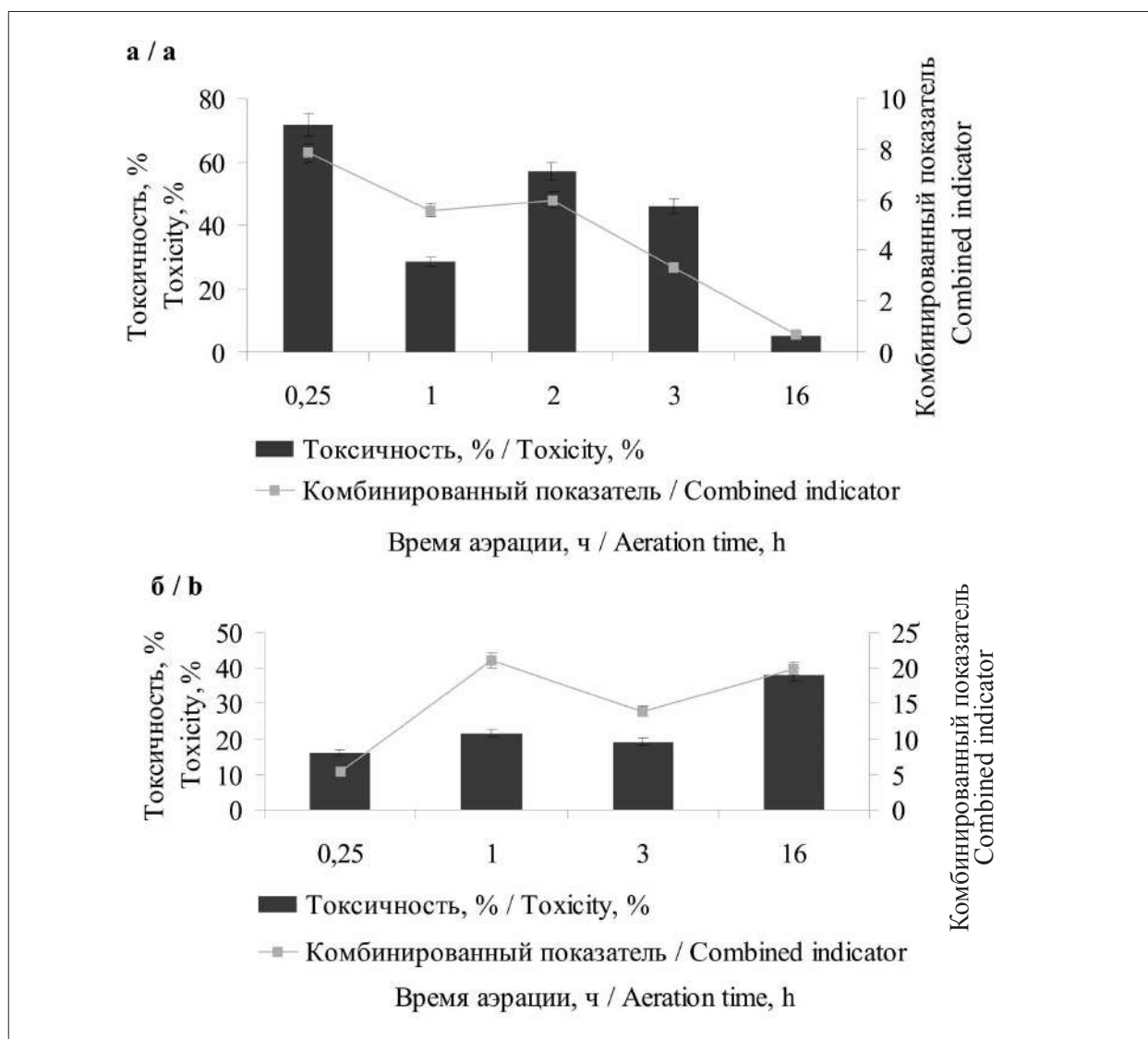


Рис. 4. Изменение комбинированного показателя и токсичности надидовой жидкости в процессе БОВ: а – активный ил, формирующийся на сточных водах производств органического синтеза; б – активный ил, формирующийся на сточных водах предприятий нефтехимического комплекса (при $P=0,95$)

Fig. 4. Changes in the combined indicator and toxicity of supernatant during the water treatment process: а – activated sludge, formed from wastewater of organic synthesis plants; б – activated sludge, formed from wastewater of petrochemical enterprises (at $P=0.95$)

процессе биологической очистки вод (БОВ) (рис. 3), но большую чувствительность последнего.

Использование комбинированного показателя позволяет получить более четкое представление об изменении состояния активного ила в процессе биологической очистки сточных вод, что и следовало ожидать, так как данный показатель учитывает не только данные микроскопирования биоценоза, но и состояние надидовой жидкости и, как следствие, хлопьев ила.

Следует отметить также наблюдаемую согласованность результатов по изменению

комбинированного показателя и токсичности надидовой жидкости в процессе БОВ (рис. 4), что может служить ещё одним аргументом, свидетельствующим об универсальном характере комбинированного показателя, достоверно описывающего состояние активного ила в процессе водоочистки, и подтверждающим возможность и целесообразность его использования на практике.

Перспективность и правомочность использования комбинированного показателя для описания изменения состояния активного ила в процессе БОВ и прогнозирования его восстановительного потенциала также получили

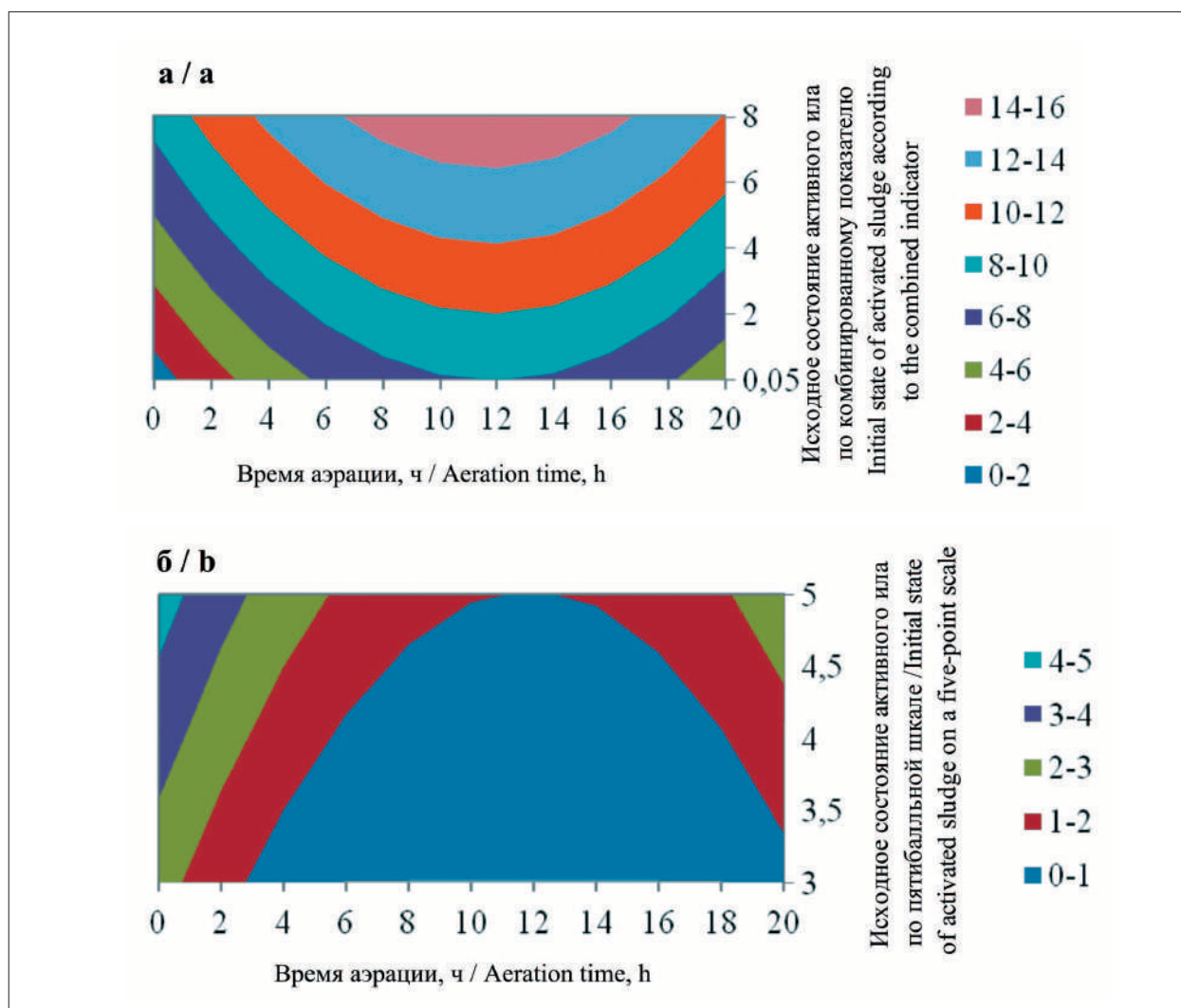


Рис. 5. Состояние активного ила в процессе водоочистки от фенола, неионогенных СПАВ и гликолей при аномальных условиях его функционирования: а – по комбинированному показателю; б – по 5-балльной шкале оценки (при $P=0,95$)

Fig. 5. The state of activated sludge in the water treatment process from phenol, nonionic surfactants and glycols under abnormal operating conditions: а – according to the combined indicator; б – according to a five-point rating scale (at $P=0.95$)

подтверждение при сопоставлении регрессионных уравнений, адекватно описывающих зависимость состояния активного ила в процессе водоочистки от контрольных стрессоров, полученных на основании двух количественных показателей состояния активного ила: пятибалльная шкала оценки (коэффициент детерминации 90,11%) и комбинированный показатель (коэффициент детерминации 97,06%) [10, 11, 15].

В качестве контрольных стрессоров выступали фенол (50 мг/дм³) и неионогенные СПАВ (50 мг/дм³) и гликоли (250 мг/дм³) при ХПК=1500 мгО/дм³ (рис. 5).

Наблюдается хорошее согласование результатов, описывающих состояние активного ила в динамике по пятибалльной шкале оценке (рис. 5б, см. цв. вкладку II) или уровень стрессирования (обратный аналог) по комбинированному показателю (рис. 5а, см. цв. вкладку II), но более высокая чувствительность комбинированного показателя, глубже отражающего изменения, происходящие в активном иле, особенно при значительном снижении оценки состояния активного ила, оцениваемого по пятибалльной шкале (1–2 балла).

Заключение

Проведённые исследования показали перспективность использования комбинированного показателя для получения достоверной прогностической информации о состоянии активного ила в процессе биологической очистки сточных вод и восстановительном потенциале активного ила, осуществляющего очистку сточных вод, содержащих фенолы, неионогенные СПАВ и гликоли при изменении нагрузки по ХПК, что обусловлено его более высокой чувствительностью к изменению интенсивности воздействия стресс-факторов на активный ил по сравнению с индексационной и балльной системами оценки состояния. Полученная прогностическая модель позволит предусмотреть проведение превентивных технологических мероприятий для обеспечения безопасной эксплуатации очистных сооружений.

References

1. Khan N.A., López-Maldonado E.A., Majumder A., Singh S., Varshney R., López J.R., Méndez P.F., Ramamurthy P.C., Khan M.A., Khan A.H., Mubarak N.M., Amhad W., Shamshuddin S.Z.M., Aljundi I.H. A state-of-art-review on emerging contaminants: Environmental chemistry, health effect, and modern treatment methods //

Chemosphere. 2023. No. 344. Article No. 140264. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.140264

2. Hussain A., Kumari R., Sachan S.G., Sachan A. Biological wastewater treatment technology: Advancement and drawbacks // Microbial ecology of wastewater treatment plants. Elsevier, 2021. P. 175–192. doi: 10.1016/B978-0-12-822503-5.00002-3

3. Ashikhmina T.Ya., Skugoreva S.G., Adamovich T.A., Tovstik E.V. Assessment of the state of surface water bodies in the area of the pesticide disposal site // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 104–111 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-104-111

4. Kondrashin K.G. Processes of self-purification of natural waters and their laboratory model // Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatel'nosti. 2022. V. 30. No. 2. P. 107–115 (in Russian). doi: 10.22363/2313-2310-2022-30-2-107-115.

5. Shlekova I.Yu., Knysh A.I. Increasing the efficiency of aerobic biological treatment of oil-containing wastewater // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209

6. Belyaeva M.A., Gunter L.I. On the characteristics of activated sludge biocenoses in high-load aeration tanks and aeration tanks with a long period of aeration // Nauchnye trudy vysshey shkoly. 1969. No. 7. P. 98–103 (in Russian).

7. Pielou E.C. Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and misuse // Amer. Natur. 1966. V. 100. No. 914. P. 463–465. doi: 10.1086/282439

8. Zhmur N.S. Technological and biochemical processes of wastewater treatment in facilities with aeration tanks. Moskva: AKVAROS, 2003. 512 p. (in Russian).

9. Kutikova L.A. Fauna of aeration tanks (Atlas). Leningrad: Nauka, 1984. 264 p. (in Russian).

10. Balymova E.S., Akhmadullina F.Yu., Zakirov R.K. Biomonitoring of activated sludge in the process of extended aeration of wastewater // Voda: khimiya i ekologiya. 2010. No. 9. P. 29–34 (in Russian).

11. Akhmadullina F.Yu., Gilyazeeva A.F., Gilyazeeva I.F., Gazizova O.V., Kunda D., Balymova E.S. Opportunity and prospects of use of the method of bioindication for assessment of operating conditions of knot of the denitrification of the biological research station // Butlerov Communications. 2022. V. 69. No. 2. P. 91–97 (in Russian). doi: 10.37952/ROI-jbc-01/22-69-2-91

12. Wilén B.M., Keiding K., Nielsen P.H. Anaerobic deflocculation and aerobic reflocculation of activated sludge // Water Research. 2000. V. 34. No. 16. P. 3933–3942. doi: 10.1016/S0043-1354(00)00274-8

13. Bott C.B., Love N.G. Investigating a mechanistic cause for activated-sludge deflocculation in response to shock loads of toxic electrophilic chemicals // Water Environ. Res. 2002. V. 74. No. 3. P. 306–315. doi: 10.2175/106143002x140044

14. Balymova E.S., Shulnikova A.A., Novikova A.R., Zakirov R.K., Akhmadullina F.Yu. Ecological and biological characteristics of sewage treatment plants activated sludge biocenosis by seasons // *Butlerov Communications*. 2023. V. 76. No. 12. P. 151–158 (in Russian). doi: 10.37952/ROI-jbc-01/23-76-12-151

15. Achmadulina F.Y., Zakirov R.K., Balymova E.S., Denisova V., Brovdová T., Trögl J., Neruda M. Comparison of bioindicator eukaryotes of activated sludge biocenoses on two water-treatment plants: a case study // *Nova Biotechnologica et Chimica*. 2017. V. 16. No. 1. P. 54–60. doi: 10.1515/nbec-2017-0008