

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.31:628.35

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-157-167

*И.И. ИВАНЕНКО, Е.Я. ЛАПАТИНА,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУЛЬФАТА КАК ТЕРМИНАЛЬНОГО АКЦЕПТОРА ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ОКИСЛЕНИИ ТОЛУОЛА В АНАЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ

Деструкцию насыщенных углеводородов в аэробных условиях осуществляют подавляющее большинство микроорганизмов. Анаэробной трансформации этих соединений, при реализации которой на очистных сооружениях будет достигнута существенная экономия средств на проведение процесса очистки сточных вод, посвящено небольшое количество исследований. В то же время среди аэробных культур-деструкторов нефтепродуктов встречаются штаммы, биохимические возможности которых включают способность использовать элементы с переменной валентностью как терминальные акцепторы электронов при окислении органических веществ, а способность разрушать алифатические углеводороды является определенным биохимическим признаком при идентификации некоторых из них.

Целью настоящего исследования являлось изучение способности селекционированной ассоциации иммобилизованных бактерий на волокнистом носителе использовать сульфат как терминальный акцептор электронов для окисления толуола.

Материалы и методы включают аналитическое обобщение результатов: обзор литературных источников, проведение лабораторных исследований по стандартным и современным методикам с использованием современного аналитического оборудования.

Анализ литературных исследований показал перспективность использования селекции микроорганизмов для расширения диапазона удаляемых загрязняющих веществ при биологической очистке, позволил определить основные направления интенсификации процессов путем иммобилизации активного ила на носителе. Селекция микроорганизмов – второй важный фактор интенсификации, и в лабораторных условиях исследованы способности микроорганизмов окислять толуол в бескислородных (анаэробных) условиях.

Проведенные исследования показали, что моноароматические углеводороды, а именно толуол, может быть трансформирован селекционированными ассоциациями микроорганизмов-деструкторов с использованием при окислении нитратов и сульфатов как терминальных акцепторов электронов.

Ключевые слова: углеводороды; толуол; селекция; бактерии; иммобилизация; расщепление ароматического кольца; денитрификация; анаэробные условия; волокнистый носитель.

Для цитирования: Иваненко И.И., Лапатина Е.Я. Использование сульфата как терминального акцептора электронов при окислении толуола в анаэробных условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 157–167.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-157-167

*I.I. IVANENKO, E.Y. LAPATINA,
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

SULFATE AS A TERMINAL ELECTRON ACCEPTOR IN TOLUENE OXIDATION IN ANAEROBIC CONDITIONS

In aerobic conditions, many of microorganisms cause decomposition of saturated hydrocarbons. Little publications are available relative to anaerobic transformation of these compounds, which provides substantial capital saving for waste water treatment. At the same time, cultures found among aerobic decomposers of petroleum products are characterized by the ability to use elements with variable valence as terminal electron acceptors in oxidation of organic substances. Their ability to decompose aliphatic hydrocarbons helps to identify some of them. **Purpose:** studying the ability of a selected association of immobilized bacteria on a fibrous carrier to utilize sulfate as a terminal electron acceptor for toluene oxidation. **Methodology/approach:** Analytical summarizing of results, literature review, laboratory research based on standard and modern up-to-date methodologies with the use of modern analytical equipment. **Findings:** The availability of using microorganism selection is shown for expanding the range of polluting strippants in biological purification; the main directions are determined for the process intensification by immobilization of active sludge on a fibrous carrier. The ability of microorganisms to oxidize toluene under oxygen-free (anaerobic) conditions is studied in the laboratory conditions. **Research implications:** monoaromatic hydrocarbons, toluene, in particular, can be changed by selected associations of decomposers using terminal electron acceptors in oxidation of nitrates and sulfates.

Keywords: hydrocarbons; toluene; selection; bacteria; immobilization; aromatic ring cleavage; denitrification; anaerobic conditions; fibrous carrier.

For citation: Ivanenko I.I., Lapatina E.Y. Ispol'zovanie sulfata kak terminal'nogo akseptora elektronov pri okislenii toluola v anaerobnykh usloviyakh [Sulfate as a terminal electron acceptor in toluene oxidation in anaerobic conditions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 157–167.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-157-167

Введение

Биологическая трансформация углеводов в присутствии кислорода – известное и достаточно хорошо изученное явление [1]. В аэробных условиях большинство гетеротрофных микроорганизмов используют углеводородные соединения как единственный источник питания. Общеизвестно, что нефтепродукты миллионы лет надежно хранятся в подземных пластах при полностью пригодных для жизни температурных и других условиях для жизнедеятельности микроорганизмов, но при отсутствии кислорода. В то же время доказано, что кислород не является единственным и незаменимым акцептором электронов при микробном окислении углеводов, потому что существуют микроорганизмы, которые способны переносить электроны из

органических соединений на элементы с переменной валентностью, в частности на азот, серу, хром, железо, марганец, и т. п., в их частично или полностью окисленной форме [2].

Актуальность темы исследований. Моноароматические углеводороды, такие как толуол, бензол, этил-бензол, ксилол и другие, определяются в грунтовых водах часто в концентрациях, которые значительно превышают существующие водные стандарты и нормативы [3]. Практически повсеместное присутствие их является доказательством того, что естественные природные условия неблагоприятны для биологической трансформации этих загрязнений, и, прежде всего, это связано с отсутствием доступных акцепторов электронов для окисления углеводородов, питательных веществ, которые необходимы для нормального метаболизма клеток, а также высокоактивных культур бактерий с соответствующим метаболизмом.

Обзор исследований. Микробное расщепление углеводородов при отсутствии молекулярного кислорода в среде предопределяется наличием альтернативных акцепторов электронов, решающее значение для начала реакции трансформации углеводородов, скорости протекания этой реакции имеет величина окислительно-восстановительного потенциала среды, как показали исследования последних лет различных авторов. Например, в ходе исследований было установлено, что мутанты денитрифицирующих штаммов способны расти на толуоле и использовать его как единственный источник углерода и энергии [4]. Денитрифицирующая культура способна трансформировать толуол, м- и о-ксилол [5]. Деструкция толуола в культуре происходит также при использовании $Mn(+4)$ как терминального акцептора электронов в строго анаэробных условиях [6]. Окисление толуола сопровождается выделением углекислого газа и снижением концентрации $Mn(+4)$. Количество образованного CO_2 значительно меньше расчетных величин, т. к. часть толуола используется для синтеза биомассы. На каждый моль окисляемого толуола используется приблизительно 14 моль диоксида марганца. Скорость деструкции толуола была выше, когда культура непосредственно взаимодействовала с твердым диоксидом марганца, что связано со способностью бактерий прикрепляться к частицам диоксида. Это влияло на прямое и быстрое перенесение электронов с толуола на $Mn(+4)$. Авторами исследований отмечено, что после нескольких пересеваний культур их способность к окислению толуола $Mn(+4)$ теряется. Эффективность расщепления толуола стимулируется внесением в культуральную среду дополнительных органических соединений, таких как щавелевая кислота. Авторы работы допускают, что переносчики электронов в $Mn(+4)$ – редуцирующей культуре содержатся в клеточной оболочке и для роста бактерий необходим физический контакт с нерастворимым диоксидом марганца. Бактерии, которые используют $Fe(+3)$ для окисления органических соединений, являются конкурентоспособными с сульфатредуцирующими бактериями при применении бензола как единственного источника углерода и энергии [7]. Исследователи считают, что использование окислов $Mn(+4)$ и $Fe(+3)$ как конечных акцепторов электронов в биотехнологических процессах защиты окружающей среды имеет большое значение, потому что эти соединения можно применять в замкнутом цикле окисления органических загрязнений.

Расщепление бензола также возможно селекционированной сульфатредуцирующей ассоциацией и сопровождается приростом биомассы этой популяции [8, 9]. В загрязненных же естественных природных условиях недостаточно эффективное расщепление бензола в сульфатнасыщенных зонах водоносных пластов может быть связано с отсутствием активных бензол-расщепляющих бактерий и другими неблагоприятными для их метаболизма условиями.

Алкилбензолы используются культурой сульфатредуцирующих бактерий в мезофильных условиях как единственный источник углерода [10]. Анализы ДНК изолированных штаммов обнаружили их идентичность культурам *Desulfobacterium cetonicum* та *Desulfosarcina variabilis*. Культуры способны к полной минерализации о- и м-ксилола в условиях сульфатредукции. Один из отделенных штаммов, близкий к *Desulfococcus multivorans*, будет утилизировать толуол, о-этилтолуол, м-изопропилтолуол, бензол, м-метилбензол. Изолированные штаммы растут в анаэробных условиях на неочищенном машинном масле, редуцируя сульфат в сульфид.

Эффективность и скорость протекания процесса биологической очистки зависит от концентрации активного ила в аэротенке, биореакторе, биотенке и ином сооружении биологической очистки сточных вод [11, 12]. Увеличение дозы активного ила является одним из возможных путей интенсификации работы биологических сооружений, а иммобилизация клеток-деструкторов загрязнителей на носителях – несомненно, новое, перспективное и сложное направление в технологии водоподготовки. Иммобилизация биоценоза имеет ряд преимуществ:

- одновременное присутствие свободноплавающего и иммобилизованного активного ила позволяет повысить окислительную мощность биореактора и очистной станции в целом [11];

- загрузка может увеличить производительность станции биологической очистки, улучшить и сделать возможным процесс очистки стоков от трудноокисляемых органических веществ [13];

- традиционный свободноплавающий активный ил может самоокисляться и загнивать при поступлении стоков в условиях крайне неравномерного характера. Иммобилизованный активный ил начинает терять влажность на воздухе, сохраняя жизнедеятельность организмов в течение некоторого периода времени. Хранение иммобилизованного ила в модулях на синтетической загрузке возможно в течение месяца и более в определенных условиях [14, 15];

- применение иммобилизованного ила приводит к повышению возраста ила и увеличивает общее время пребывания активного ила в системе, что, соответственно, повышает эффективность очистки, приводит к улучшению седиментационных и влагоотдающих свойств избыточного ила. Возраст активного ила на носителях больше, чем у свободноплавающего ила во взвешенном состоянии [13].

При использовании загрузок в сооружениях применяются синтетические материалы: ерши, петельчатые загрузки и другие пространственные структуры [16, 17]. В процессе эксплуатации загрузки подвержены «зарастанию», и для правильной их эксплуатации во избежание возможных вторичных загрязнений необходимо обеспечение периодической регенерации загрузки,

что требует дополнительных затрат и создает сложности при эксплуатации [18, 19]. Работ, посвященных способам регенерации синтетической инертной загрузки, существует немного, а еще меньше способов регенерации загрузок реализовано на практике, на очистных станциях. Все реализованные способы очистки загрузки трудоемки, энерго- и трудозатратны [20, 21].

Эффективность действия иммобилизованных микроорганизмов, так же как и свободноплавающих, зависит от большого ряда параметров биотехнологического процесса (рН, температуры, концентрации различных ионов, давления), которые должны соответствовать оптимальным условиям жизнедеятельности иммобилизованных микроорганизмов [22–24]. При иммобилизации клеток микроорганизмов путем прикрепления особое внимание следует уделять правильному подбору носителя [25]. Важность выбора носителя обуславливается целым рядом факторов – характеризующим как свойства носителя для возможности закрепления микроорганизмов (например, пористость), так и возможными изменениями свойств носителя с течением времени и под действием внешних, изменяющихся (например, прочность, деформация и т. д.). В качестве носителей для микроорганизмов возможно использовать как органические носители: древесные стружки или кору, керамзит, цеолит, гранулированный уголь, глину, вулканические породы [26], а также песок, торф, вермикулит и т. д., так и различные синтетические материалы: стекловолокно, капрон, корд и др. Органические, как правило, лучше работают при почвенных деструкциях, синтетические используются в основном для очистки сточных вод.

Таким образом, представленные научные исследования свидетельствуют о том, что микробное расщепление многих углеводов возможно в бескислородной среде. Его осуществляют многочисленные представители разных родов бактерий, которые относятся к факультативным, облигатно-анаэробным, а при некоторых условиях даже и к облигатно-аэробным группам микроорганизмов. Использование специальных сообществ микроорганизмов для трансформации загрязнений и применение их иммобилизованных форм для размещения в сооружениях биологической ступени очистки является весьма перспективным направлением интенсификации процесса с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами.

Задачей настоящего исследования являлось изучение способности селектированной ассоциации иммобилизованных бактерий на волокнистом носителе использовать сульфат как терминальный акцептор электронов для окисления толуола.

Материалы и методы. Опыты проводили в лабораторном биореакторе объемом 3 дм³ при непрерывном культивировании. В установке размещали волокнистый носитель из расчета 5 г/дм³ с иммобилизированной ассоциацией бактерий – деструкторов нефтепродуктов. Количество биомассы на носителе равнялось 0,1 г на 1 г волокна (по сухой массе). С помощью перистальтического насоса в нижнюю часть лабораторного биореактора подавали минеральный раствор, приготовленный на основе водопроводной воды, который содержал источник фосфора для питания микроорганизмов и нитрат калия в концентрации 0,5 г/дм³. Водный раствор с сульфатом подавали в сооруже-

ние непрерывно с использованием перистальтического насоса, а толуол вносили периодически по 25 мг через каждые 2 ч. Концентрация сульфата составляла 300 мг/дм³. Контроль анаэробности среды проводили с помощью раствора индикатора – резазурина.

Селекцию бактерий, которые окисляют углеводороды альтернативным аэробному путем, проводили из биоценоза, который долгое время контактировал с этими соединениями при ограниченном доступе кислорода [27], для этого отобраны образцы почвы и воды вносили в загрязненную углеводородами воду. Из анаэробной денитрифицирующей ассоциации было выделено несколько штаммов бактерий, которые относятся к роду *Pseudomonas*. Они способны редуцировать нитратный азот до элементарного состояния и, как описано в литературе, могут восстанавливать Cr(+4) и сульфаты. Культуры идентифицированы как *P. mendocina* P-13, *P. fluorescens* var. *Pseudo-iodinum* P-11, *P. aeruginosa* P-1. С целью предотвращения диффузии кислорода на поверхности воды размещивали слой нефтепродуктов толщиной 2–2,5 см. В воду также добавляли источник фосфора, нитрат и сульфат как потенциальные акцепторы электронов. По мере прироста биомассы в растворе, которую определяли по оптической плотности, воду отбирали на анализ. В ходе исследований использовали расщепляющее действие иммобилизации селекционированного биоценоза на носителе из капронового волокна с гидрофобными свойствами. В ходе исследований проводилось изучение деструктивных свойств иммобилизованной ассоциации. Адгезия бактериальных клеток, которые выросли на углеводородах, протекала очень эффективно, потому что биомасса, которая вырастает, потребляя углеводороды, также имеет резко выраженные гидрофобные свойства.

После внесения в биореактор с волокнистым носителем, на котором иммобилизована селекционированная ассоциация микроорганизмов-деструкторов, минерального раствора с сульфатом и биогенными элементами, а также 50 мг/дм³ толуола установка оставалась без протока до наступления облигатного анаэробноза. Об этом свидетельствовало обесцвечивание резазурина. В биореактор помещали также бактерии сульфатредукции, потому что толуол – очень токсичное соединение даже для сульфатредуктирующих бактерий. Кроме того, в ходе опытов следили за образованием черного осадка, который также является свидетельством протекания процесса сульфатредукции. Проточное культивирование в лабораторном биореакторе началось через 5 сут после его заполнения соответствующими растворами.

Концентрацию толуола в среде определяли на спектрофотометре Specord UV VIS с помощью салицилата натрия и нитритов реактивом Грисса [28, 29]. В ряде опытов использовался качественный анализ нитратов и нитритов в воде с использованием стандартных методик.

Результаты исследований. В таблице и на рисунке приведены результаты работы биореактора по очистке воды от толуола при условиях сульфатредукции. Как видно из таблицы, полное расщепление толуола в биореакторе наступает лишь через девять суток культивирования. За этот период происходит постепенное снижение окислительно-восстановительного потенциала

(ОВП) до -150 мВ, причем в первые четверо суток значение ОВП оставалось неизменным на уровне 450 мВ.

Эффективность окисления толуола сульфатредукцирующими бактериями

Длительность культивирования, ч (сут)	Концентрация толуола в очищенной воде, мг/дм ³	Эффективность деструкции, %	ОВП, мВ
0	100	0	450
24 (1)	99,5	17	450
48 (2)	77	32	450
72 (3)	65	45	440
96 (4)	39	61	400
120 (5)	26	74	300
144 (6)	13	87	230
168 (7)	5	95	100
192 (8)	2	98	-80
216 (9)	0	100	-150
240 (10)	0	100	-150



Результаты опытов по биологическому разложению толуола

Заключение

Проведенные исследования показали, что моноароматические углеводороды, а именно толуол, может быть трансформирован селекционированными ассоциациями микроорганизмов-деструкторов с использованием при окислении нитратов и сульфатов как терминальных акцепторов электронов.

Деструкцию насыщенных углеводородов в аэробных условиях осуществляют подавляющее большинство микроорганизмов. Анаэробной же трансформации этих соединений посвящено небольшое количество исследований. В то же время среди аэробных культур – деструкторов нефтепродуктов – встречаются штаммы, биохимические возможности которых включают способность использовать элементы с переменной валентностью как терминальные акцепторы электронов при окислении органических веществ, а способность разрушать алифатические углеводороды является определенным биохимическим признаком при идентификации некоторых из них.

Авторы благодарят руководство университета СПбГАСУ за предоставление гранта на проведенные исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимергазина И.Ф., Переходова Л.С. К проблеме биологического окисления нефтепродуктов углеводородоокисляющими микроорганизмами // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. С. 1–28.
2. Иваненко И.И., Новикова А.М., Духовской В.Д. Элементы с переменной степенью окисления при микробном окислении органических загрязнений воды // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 2 (78). С. 24–31. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.24-31.
3. Перечень рыбохозяйственных нормативов (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды объектов, имеющих рыбохозяйственное назначение. Москва : Изд-во ВНИРО, 1994. 304 с.
4. Coschigano P.W., Young L.Y. Identification and sequence analysis of two regulatory genes involved in anaerobic toluene metabolism by strain T1 // Appl. Envir. Microbiol. 1997. V. 63. № 2. P. 652–660.
5. Evans P.J., Mang D.T., Young L.Y. Degradation of toluene and m-xylene and transformation of o-xylene by denitrifying enrichment cultures // Appl. Envir. Microbiol. 1991. V. 57. P. 450–454.
6. Langenhoff A.A.M., Brouwers-Ceiler D.L., Engelberting J.H. et al. Microbial reduction of manganese coupled to toluene oxidation // FEMS Microbiology Ecology. 1997. V. 22. P. 119–127.
7. Kartik Dhar, Suresh R. Subashchandrabose, Kadiyala Venkateswarlu, Kannan Krishnan, Malavarapu Megharaj. Anaerobic Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Comprehensive Review // Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. 2019. V. 251. P. 25–108.
8. Rabus R., Fukui M., Wilkes H., Widdle F. Degradative capacities and 16S rRNA-targeted whole-cell hybridization of sulfate-reducing bacteria in an anaerobic enrichment culture utilizing alkylbenzenes from crude oil // Appl. Envir. Microbiol. 1996. V. 65. № 10. P. 2605–3613.
9. Lovley D.R., Cvates J.D., Woodward J.C., Phillips E.J. Benzene oxidation coupled to sulfate reduction // Appl. Envir. Microbiol. 1995. V. 61. P. 953–958.
10. Harms G., Zender P.C., Pabus P., et al. Anaerobic oxidation of o-xylene, m-xylene, and homologous alkylbenzenes by new types of sulfate-reducing- bacteria // Appl. Envir. Microbiol. 1999. V. 65. № 3. P. 999–1004.
11. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Камалов Р.Т. Использование иммобилизованного ила в аэротенке-биореакторе для интенсификации очистки сточных вод // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. № 1 (28). С. 90–97. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-1-90-97
12. Глебова М.А., Семенова Е.Н., Бахирева О.И. Иммобилизация активного ила как способ интенсификации биологической очистки // Химия. Экология. Урбанистика. 2019. № 1. С. 372–376.
13. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. Москва : АКВАРОС, 2003. 512 с.

14. Nadir Dizge, Berrin Tansel, Banu Sizerici. Process intensification with a hybrid system: A tubular packed bed bioreactor with immobilized activated sludge culture coupled with membrane filtration // *Chemical Engineering and Processing*. 2011. № 50. P. 766–772.
15. Туякбаева А.У. Использование иммобилизованных углеводородокисляющих микроорганизмов в очистке загрязненных сред // International Scientific Conference «Actual Questions and Innovations in Science» Craiova, Romania, May 12, 2019. С 103–107.
16. Пукемо М.М. Совершенствование контактных биореакторов для очистки сточных вод : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва : МГСУ, 1990. 160 с.
17. Ленденев В.С., Солопанов Е.Ю. Интенсификация биологической очистки сточных вод с использованием инертной ершовой загрузки // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2017. № 3 (22). С. 82–87.
18. Швецов В.Н., Морозова К.М., Смирнова И.И., Семенов М.Ю., Лежнев М.Л., Рыжаков Г.Г., Краснов А.А. Технологическая эффективность биоагрузки производства ООО «Техводполимер» // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2007. № 2. С. 33–40.
19. Швецов В.Н., Морозова К.М., Смирнова И.И., Семенов М.Ю., Лежнев М.Л., Рыжаков Г.Г., Губайдуллин Т.М. Использование блоков биологической загрузки на сооружениях очистки сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2010. № 10. Ч. 2. С. 25–31.
20. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Сосна В.М. Регенерация синтетической загрузки в биореакторе // *Известия вузов. Строительство*. 2013. № 1. С. 92–101.
21. 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. V. 147. P. 287–298.
22. Демидова Ю.Е. Иммобилизация клеток микроорганизмов // *Научно-технический сборник*. № 35. Москва, 2001. С. 112–115.
23. Синицын А.П., Райнина Е.И., Лозинский В.И. и др. Иммобилизованные клетки микроорганизмов. Москва : Изд-во МГУ, 1994. 288 с.
24. Вебб К. Иммобилизованные клетки: экологическая биотехнология. Ленинград : Химия, 1990. С. 166–189.
25. Коваленко Г.А., Кузнецова Е.В., Ленская В.М. Углеродминеральные носители для адсорбционной иммобилизации растущих бактериальных клеток // *Биотехнология*. 1998. № 1. С. 47–56.
26. Никовская Г.Н. Адгезионная иммобилизация микроорганизмов в очистке воды // *Химия и технология воды*. 1989. Т. 11. № 2. С. 158–169.
27. Иваненко И.И. Исследование особенности дыхания бактерий // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 62. С. 155–160.
28. Аналитическая химия промышленных сточных вод / под ред. Ю.Ю. Лурье. Москва : Химия, 1984. 448 с.
29. Унифицированные методы анализа вод / под ред. Ю.Ю. Лурье. Москва : Химия, 1971. 376 с.

REFERENCES

1. Timergazina I.F., Perekhodova L.S. K probleme biologicheskogo okisleniya nefteproduktov uglevodorodookislyayushchimi mikroorganizmami [Biological oxidation of petroleum products by hydrocarbon-oxidizing microorganisms]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2012. V. 7. Pp. 1–28. (rus)
2. Ivanenko I.I., Novikova A.M., Duhovskoj V.D. Elementy s peremennoj stepen'yu okisleniya pri mikrobnom okislenii organicheskikh zagryaznenij vody [Variable oxidation elements for microbial oxidation of organic water contaminants]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2019. No. 2 (78). Pp. 24–31. (rus) DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.24-31
3. Perechen' rybo-hozyajstvennykh normativov (PDK) i orientirovochno bezopasnykh urovnej vozdejstviya (OBUV) vrednykh veshchestv dlya vody ob"ektov, imeyushchih rybo-hozyajstvennoe naznachenie [List of fishery regulations and approximately safe levels of exposure to harmful substances in water of fisheries management facilities]. Moscow: VNIRO, 1994. 304 p. (rus)

4. Coschigano P.W., Young L.Y. Identification and sequence analysis of two regulatory genes involved in anaerobic toluene metabolism by strain T1. *Applied and Environmental Microbiology*. 1997. V. 63. No. 2. Pp. 652–660.
5. Evans P.J., Mang D.T., Young L.Y. Degradation of toluene and m-xylene and transformation of o-xylene by denitrifying enrichment cultures. *Applied and Environmental Microbiology*. 1991. V. 57. Pp. 450–454.
6. Langenhoff A.A.M., Brouwers-Ceiler D.L., Engelberting J.H., et al. Microbial reduction of manganese coupled to toluene oxidation. *FEMS Microbiology Ecology*. 1997. V. 22. Pp. 119–127.
7. Kartik Dhar, Suresh R. Subashchandrabose, Kadiyala Venkateswarlu, Kannan Krishnan, Mallavarapu Megharaj. Anaerobic microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: A comprehensive review. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2019. V. 251. Pp. 25–108.
8. Rabus R., Fukui M., Wilkes H., Widdle F. Degradative capacities and 16S rRNA-targeted whole-cell hybridization of sulfate-reducing bacteria in an anaerobic enrichment culture utilizing alkylbenzenes from crude oil. *Applied and Environmental Microbiology*. 1996. V. 65. No. 10. Pp. 2605–3613.
9. Lovley D.R., Cvates J.D., Woodward J.C., Phillips E.J. Benzene oxidation coupled to sulfate reduction. *Applied and Environmental Microbiology*. 1995. V. 61. Pp. 953–958.
10. Harms G., Zender P.C., Pabus P., et al. Anaerobic oxidation of o-Xylene, m-Xylene, and homologous alkylbenzenes by new types of sulfate-reducing- bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. 1999. V. 65. No. 3. Pp. 999–1004.
11. Kul'kov V.N., Solopanov E.Yu., Kamalov R.T. Ispol'zovanie immobilizovannogo ila v aerotenkebioreaktore dlya intensifikacii ochistki stochnyh vod [Immobilized sludge in aerotank bioreactor for intensification of wastewater treatment]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2019. V. 9. No. 1 (28). Pp. 90–97. (rus)
12. Glebova M.A., Semenova E.N., Bahireva O.I. Immobilizaciya aktivnogo ila kak sposob intensifikacii biologicheskoy ochistki [Immobilization of active sludge for intensification of biological purification]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2019. No. 1. Pp. 372–376. (rus)
13. Zhmur N.S. Tekhnologicheskie i biohimicheskie processy ochistki stochnyh vod na sooruzheniyah s aerotenkami [Technological and biochemical processes for wastewater treatment in aerotank facilities]. Moscow: AKVAROS, 2003. 512 p. (rus)
14. Nadir Dizge, Berrin Tansel, Banu Sizirici. Process intensification with a hybrid system: A tubular packed bed bioreactor with immobilized activated sludge culture coupled with membrane filtration. *Chemical Engineering and Processing*. 2011. No. 50. Pp. 766–772.
15. Tuyakbaeva A.U. Ispol'zovanie immobilizovannyh uglevodorodokislyayushchih mikroorganizmov v ochistke zagryaznennyh sred [Immobilized hydrocarbon-oxidizing microorganisms in cleaning contaminated media]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Actual Questions and Innovations in Science'*. Craiova, Romania, 2019. Pp. 103–107. (rus)
16. Pukemo M.M. Sovershenstvovanie kontaktnykh bioreaktorov dlya ochistki stochnykh vod: disertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Immobilized hydrocarbon-oxidizing microorganisms in cleaning contaminated media. PhD Thesis]. Moscow: MGSU, 1990. 160 p. (rus)
17. Lendenev V.S., Solopanov E.Yu. Intensifikaciya biologicheskoy ochistki stochnyh vod s ispol'zovaniem inertnoj ershovoij zagruzki [Waste water biological treatment intensification using brush loading]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2017. No. 3 (22). Pp. 82–87. (rus)
18. Shvecov V.N., Morozova K.M., Smirnova I.I., Semenov M.Yu., Lezhnev M.L., Ryzhakov G.G., Krasnov A.A. Tekhnologicheskaya effektivnost' biozagruzki proizvodstva OOO "Tekhvodpolymer" [Efficiency of biological loading manufactured by OOO "Tekhvodpolymer"]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2007. No. 2. Pp. 33–40. (rus)
19. Shvecov V.N., Morozova K.M., Smirnova I.I., Semenov M.Yu., Lezhnev M.L., Ryzhakov G.G., Gubajdullin T.M. Ispol'zovanie blokov biologicheskoy zagruzki na sooruzheniyah ochistki stochnyh vod [Biological loading units in wastewater treatment facilities]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2010. V. 2. No. 10. Pp. 25–31. (rus)

20. Kul'kov V.N., Solopanov E.Yu., Sosna V.M. Regeneracii sinteticheskoy zagruzki v bioreaktore [Regeneration of synthetic loading in bioreactor]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2013. No. 1. Pp. 92–101. (rus)
21. Hamza R.A., Sheng Z., Iorhemen O.T., Zaghloul M.S., Tay J.H. Impact of food-to-microorganisms ratio on the stability of aerobic granular sludge treating high-strength organic wastewater. *Water Research*. 2018. V. 147. Pp. 287–298.
22. Demidova Yu.E. Immobilizaciya kletok mikroorganizmov [Immobilization of microorganism cells]. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik*. 2001. No. 35. Pp. 112–115. (rus)
23. Sinicyn A.P., Rajnina E.I., Lozinskij V.I., et al. Immobilizovannye kletki mikroorganizmov. [Immobilized microorganism cells]. Moscow: MSU, 1994. (rus)
24. Vebb K. Immobilizovannye kletki: ekologicheskaya biotekhnologiya [Immobilized cells: Environmental biotechnology]. Leningrad: Khimiya, 1990. Pp. 166–189. (rus)
25. Kovalenko G.A., Kuznecova E.V., Lenskaya V.M. Uglerodmineral'nye nositeli dlya adsorbcionnoj immobilizacii nerastushchih bakterial'nyh kletok [Carbon-mineral carriers for adsorption immobilization of non-growing bacterial cells]. *Biotekhnologiya*. 1998. No. 1. Pp. 47–56. (rus)
26. Nikovskaya G.N. Adgezionnaya immobilizaciya mikroorganizmov v ochildke vody [Adhesion immobilization of microorganisms in water purification]. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 1989. V. 11. No. 2. Pp. 158–169. (rus)
27. Ivanenko I.I. Issledovanie osobennosti dyhaniya bakterij [Bacterial breathing characteristics]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No. 62. Pp. 155–160. (rus)
28. Lur'e Yu.Yu. (Ed.) Analiticheskaya himiya promyshlennyh stochnyh vod [Analytical chemistry of industrial wastewater]. Moscow: Khimiya, 1984. 448 p. (rus)
29. Lur'e Yu. Yu. (Ed.) Unificirovannye metody analiza vod [Unified methods of water analysis]. Moscow: Khimiya, 1971. 376 p. (rus)

Сведения об авторах

Иваненко Ирина Ивановна, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, i5657@mail.ru

Лапатина Елена Яковлевна, химик-микробиолог, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4

Authors Details

Irina I. Ivanenko, PhD, A/Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, i5657@mail.ru

Elena Ya. Lapatina, Assistant Lecturer, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia