

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФЕНОЛА: ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Н.А. Шинкарук[✉], С.Г. Ницкая

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

[✉] *shinkarukna@susu.ru*

Аннотация. Действующим законодательством при сбросе сточных вод в водоемы предусматриваются жесткие нормативы по остаточным концентрациям загрязняющих веществ. Проблема очистки сточных вод от фенолсодержащих соединений является одной из актуальных и требует разработки новых эффективных, экологических и экономичных способов. Условия образования сточных вод по химическому составу отличаются большим разнообразием, что предполагает применение определенных технологических условий очистки, учитывающих не только сложность компонентного состава стоков, но и наличие сопутствующих веществ, которые в большинстве случаев не рассматриваются в полном объеме. Диапазон концентраций фенолов различных производств меняется в значительных пределах. В настоящее время существуют различные методы очистки фенолсодержащих стоков. При выборе метода удаления фенола и его производных необходимо определить состав сопутствующих загрязнений, и на основании требований, которые устанавливаются к качеству очищенных стоков, принять метод очистки. В настоящее время разработка оптимальных решений очистки фенолсодержащих стоков с учетом последующего использования очищенных вод является приоритетным направлением. Применяемые методы очистки фенола можно условно разделить на две группы: методы разделения и методы деструкции. Биологическая очистка применяется преимущественно на стадии доочистки при достаточно низких концентрациях фенола, ограничения для биологической очистки стоков связаны с биоразлагаемостью загрязняющих веществ и присутствием в составе сточной воды веществ, ингибирующих рост микроорганизмов. Одним из направлений перспективных способов деструкции органических загрязнителей отмечается фотокаталитическое окисление с применением достаточно широкого круга материалов в качестве фотокатализаторов. Систематизированы и описаны основные методы очистки сточных вод от фенолов и его производных. Основное внимание уделено наиболее эффективным способам деструкции фенола, таким как фотокаталитическое окисление, электрохимическое окисление и биохимическая очистка.

Ключевые слова: фенол, деградация, фотокатализ, УФ-излучение, композитные фотокатализаторы, фотокаталитическая активность

Для цитирования: Шинкарук Н.А., Ницкая С.Г. Очистка сточных вод от фенола: технологии и перспективы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 3. С. 182–189. DOI: 10.14529/chem240313

Review article
DOI: 10.14529/chem240313

DEPHENOLIZATION OF WASTEWATER: TECHNIQUES AND PROSPECTS

N.A. Shinkaruk[✉], S.G. Nitskaya

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉] *shinkarukna@susu.ru*

Abstract. The current legislation provides for tight standards of residual concentrations of pollutants if wastewater is discharged into reservoirs. The problem of waste management for phenolic compounds in wastewater is one of the most urgent, which requires the development of new efficient, environmentally friendly and economical methods. The conditions of wastewater formation are very diverse in chemical composition; this implies the use of specific technological conditions for purification, taking into account

not only complexity of the component composition of wastewater, but also the presence of related substances, which in most cases are not fully considered. The range of concentrations of phenols in various industries varies significantly. Currently, there are various methods of wastewater dephenolization. Choosing a technique for removing phenol and its derivatives, it is necessary to determine the composition of the related contaminants, and adopt a purification method on the basis of the requirements, established for the quality of the purified wastewater. Currently, the development of optimal solutions for treatment of phenolic wastewater is a priority, taking into account the subsequent use of treated water. The applied methods of dephenolization can be divided into two groups: separation methods and destruction methods. Biopurification is mainly used at sufficiently low concentrations of phenol, the restrictions for biopurification of wastewater are associated with the biodegradability of pollutants and the presence of substances that inhibit the growth of microorganisms in the composition of wastewater. Photocatalytic oxidation with a fairly wide range of photocatalysts is considered one of the promising techniques for destruction of organic pollutants. The main methods of removal of phenols and their derivatives from wastewater are systematized and described. Attention is mainly paid to the most efficient methods of phenol degradation, such as photocatalytic oxidation, electrochemical oxidation, and biopurification.

Keywords: phenol, degradation, photocatalysis, UV radiation, composite photocatalysts, photocatalytic activity

For citation: Shinkaruk N.A., Nitskaya S.G. Dephenolization of wastewater: techniques and prospects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2024;16(3):182–189. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem240313

Проблема охраны природных водных объектов, расположенных в непосредственной близости от крупных городов и промышленных предприятий, с каждым годом приобретает все большее значение. Основным источником загрязнения поверхностных водоемов является хозяйственная деятельность человека, побочным результатом которой является присутствие в сточных водах органических токсикантов, таких как фенолы.

Существенным источником образования фенолсодержащих стоков являются промышленные предприятия различной отраслевой направленности (металлургические, нефтехимические, производство минеральных удобрений, строительных материалов и др.). Концентрация фенолов в сточных водах в зависимости от типа производства может варьироваться от 5 до 30 мг/л и выше, вместе с тем при содержании фенола более 1 г/л водный раствор считается токсичными [1]. В состав фенольных сточных вод входит значительное количество побочных веществ, таких как летучий и связанный аммиак, роданиды, цианиды, сероводород, сульфаты, хлориды и др., концентрация которых колеблется в широком диапазоне [2]. Сброс неочищенных или недостаточно очищенных производственных сточных вод является основной причиной возникновения чрезвычайных экологических ситуаций, вызванных периодическим накоплением в одной среде большого набора загрязняющих веществ.

Согласно данным Росстата [3], объем фенолсодержащих стоков, поступивших в водные объекты в 2021 году, составил 19,3 тонны, что превышает показатели предыдущих лет. По материалам Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) [4], за первую половину 2022 года отмечен рост на 15 % высоких загрязнений пресноводных водоемов по сравнению с аналогичным периодом 2021 года. Весовым источником загрязнений водных объектов выступают недостаточно неочищенные стоки промышленных производств, неэффективная работа очистных сооружений или использование методов, не обеспечивающих удовлетворительную степень очистки стоков, в том числе от органических соединений [5].

Действенным активным подходом снижения концентраций загрязняющих веществ является модернизация существующих технологических процессов, создание малоотходных технологий, наложение штрафных санкций на предприятия. Пассивный путь – строительство локальных очистных сооружений на предприятиях, модернизация действующих очистных сооружений, внедрение новых методов очистки, использование доочистки [6].

До настоящего времени проблема очистки производственных сточных вод, содержащих трудноокисляемые органические соединения, не теряет актуальности [7–12].

Значимость задачи очистки токсичных стоков диктует необходимость применения нестандартных и комплексных решений, то есть не только в общем анализе и оценке сброса токсикантов, но и в

применении частных индивидуальных подходов к очистке сточных вод, учитывающих специфику образования таких загрязнителей, поскольку система общих подходов и стандартных технологий очистки на сегодня морально устарела. При разработке технологии системы очистки сточных вод необходим учёт специфики образования загрязнителей и конкретного химического состава [13–15].

Наличие сопутствующих веществ, обуславливающих сложность компонентного состава системы, в большинстве случаев не учитывается. Трудность оценки и учета взаимного влияния таких компонентов на процессы, идущие внутри системы, усложняет технологию очистки сточных вод или делают ее неприемлемой на практике. Как правило, вещества, присутствующие в стоках в том или ином количестве и качестве (диссоциированном и недиссоциированном виде), препятствуют применению стандартных технологий и требуют комплексного подхода к способам очистки сточных вод сложного состава [14].

Совокупность отмеченных причин создает значительные проблемы в организации процесса полной очистки стоков для большинства предприятий. Поэтому поиск новых эффективных, экологических и экономичных способов очистки промышленных стоков является по-прежнему актуальным [10].

На сегодняшний день к технологиям очистки сточных вод предъявляются ряд требований – технологии должны быть малозатратными, энерго- и ресурсосберегающими, экологически чистыми, с использованием эффективных каталитически активных материалов, способных длительно работать без регенерации при низких температурах и атмосферном давлении, а также не создавать вторичных отходов.

Доминирующие, применяемые в настоящее время способы очистки от фенола основаны либо на его разделении, либо на его деструкции. К основным деструктивным методам обезвреживания сточных вод от растворенного фенола относятся термоокислительные, окислительные способы, а также электрохимическое и фотокаталитическое окисление, гидролиз и биохимическое восстановление. Выбор деструктивного метода для обезвреживания сточных вод производится главным образом с учетом расхода сточных вод, состава, количества фенола и требований к качеству очищенной воды, а также возможностью ее повторного использования. Применение регенерационных методов очистки, таких как экстракционная очистка, перегонка, ректификация, адсорбция, ионообменная очистка, обратный осмос, ультрафильтрация, этерификация, полимеризация, поликонденсация, биологическая очистка, позволяет переводить экотоксиканты в малорастворимые соединения. Этим методам посвящено множество исследований [8, 9, 16–18].

К недостаткам используемых методов деструкции фенолов относятся высокая энергоемкость многих из них (например, экстракционных и испарительных), нерешенность вопросов регенерации сорбентов для сорбционных методов, использование агрессивных соединений (хлор, озон, пероксид водорода) в высоких концентрациях, значительный расход реагентов (экстракционные методы), невозможность снижения уровня фенола до уровня ПДК и ниже. В связи с этим в настоящее время предпринимаются попытки разработать новые способы превращения ароматических аминов и фенолов.

В течение длительного времени наиболее распространенным были биохимические методы очистки от экотоксикантов, основанные на способности микроорганизмов окислять фенолы [19]. Конечными продуктами биохимического разложения примесей, содержащихся в сточных водах, являются соединения высшей степени окисления – диоксид углерода CO_2 и вода. Весьма важным фактором, влияющим на эффективность обезфеноливания сточной воды биохимическими методами, является концентрация в ней, помимо фенолов, других химических веществ: цианидов, роданидов, сероводорода и др. Поскольку скорость разрушения фенолов выше, то количество кислорода для их окисления, подаваемого с воздухом при аэрации биологического бассейна, оказывается недостаточным. Это приводит к накоплению примесей и достижению концентраций, токсичных для микроорганизмов, в результате чего разрушение фенолов замедляется или вовсе прекращается [8].

Недостатками метода являются: высокая стоимость и значительная длительность процесса, значительные размеры бассейнов, неравномерность протекания очистки, высокая чувствительность процесса как к составу подаваемой на очистку сточной воды, так и к внешним климатическим условиям. Необходимым условием жизнедеятельности микроорганизмов и, следовательно, эффективности очистки сточных вод являются относительно низкие исходные концентрации фенола, тогда как высокие концентрации фенола приводят к гибели микроорганизмов.

Для совершенствования биологической очистки перспективно использование технологий, обеспечивающих переработку стоков с высоким содержанием органических загрязнений без стадии доочистки, обладающих устойчивостью к перегрузкам (отсутствие вспухания и вымывания ила), имеющие высокую производительность на единицу площади, а также экономически эффективных [19–22].

В настоящее время нанотехнологии являются одним из стремительно развивающихся направлений, методы очистки на основе наночастиц различного назначения позволяют эффективно, без лишних отходов очищать воду от сложных загрязнителей. Системы востребованы, экономически выгодны и, самое главное, экологически безопасны [23]. Усовершенствованные окислительные процессы для удаления фенольных загрязнений могут являться эффективной альтернативой существующим методам водоочистки.

Исследование процессов окислительной деструкции водных растворов фенола при воздействии только ультрафиолетового излучения и комбинации с пероксидом водорода показало, что при комбинированном облучении степень окисления фенола достигает 99,9 % [24, 25], отмечено влияние концентраций токсиканта и реагентов – дополнительное введение пероксида водорода в систему приводит к возрастанию степени и скорости окисления фенола по сравнению с использованием только УФ-излучения или пероксида водорода.

Авторами [26] рассмотрены возможности применения композитного катализатора на основе углеродного волокна с железом/оксидом железа для гетерогенного жидкофазного окисления фенола пероксидом водорода. Дegrаdация и удаление фенола происходит за счет реакции с гидроксил-радикалами, которые образуются из пероксида водорода в присутствии ионов Fe^{2+} на поверхности катализатора и в растворе. Исследовано влияние на эффективность удаления фенола таких факторов, как величина pH и соотношение фенол/пероксид водорода при исходной концентрации фенола, равной $0,182 \cdot 10^{-3}$ моль/л. Обнаружено оптимальное сочетание pH и мольного соотношения фенол/пероксид водорода, обеспечивающее удаление фенола из воды до 88 %. В этих условиях композит UV/(Fe, оксид железа) является эффективным гетерогенным катализатором дegrаdации и удаления фенола из воды.

В настоящий момент исследователей привлекает процесс гетерогенного фотокатализа, который также можно применять в очистке стоков от органических загрязнителей. Так, авторами работы [27] для очистки сточных вод от органических токсикантов предложен метод озонирования в присутствии гетерогенного катализатора NiO–MoO₃/Al₂O₃. Предложенный способ очистки позволяет снизить содержание фенола и нефтепродуктов в сточных водах производства древесностружечных строительных материалов до нормативного показателя качества питьевой воды, величину ХПК на 96 % и таким образом решить проблему вредного воздействия таких веществ на водные экосистемы.

Озонирование – широко используемый способ глубокой очистки воды от фенолов и его производных. Озон обладает высокой окислительной способностью, оказывает значительное бактерицидное действие, устраняет неприятный запах и привкус и возвращает воде естественный цвет [28]. Окислительные свойства озона в воде могут проявляться в реакциях прямого окисления, озонлиза, катализа, окисления радикалами и полимеризации. Каталитическое действие озона заключается в иницировании реакций окисления растворенным в воде кислородом. Окисление озоном протекает по месту двойной связи бензольного кольца, и параллельно окисляется гидроксильный радикал с последующей рекомбинацией пероксирадикалов, пероксид водорода реагирует с озоном, образуя воду и кислород [1].

В работе [29] для деструкции фенола предложен реактор, способный генерировать озон и радикалы ОН. Озон генерировался УФ-облучением кислорода воздуха (метод Чепмена), т. е. облучением кислорода УФ-светом. Для генерации радикалов ОН использовалась комбинация трех типов окислительной обработки: озона, УФ-света и полупроводникового фотокатализатора. В качестве фотокатализатора применяли химически стабильный и безопасный TiO₂. В реакторе разложение фенола изучали при использовании одного фактора озона или УФ-облучения, а также комбинации озона, УФ-излучения и TiO₂. Комплексное воздействие O₃ – UV – TiO₂ показало наибольшую активность разложения фенола, а удаление ХПК достигло 100 %.

Существенным достижением последних лет являются фотокаталитически активные композиты. Один из наиболее широко используемых материалов в этой области – диоксид титана. Соз-

дание материалов на основе TiO_2 , сенсibilизированного к фотонам низкой энергии без потерь его активности является актуальной, задачей [30].

Фотокатализ – изменение скорости или возбуждение химических реакций под действием света или в присутствии веществ (фотокатализаторов), которые поглощают кванты света и обеспечивают химические превращения участников реакции, многократно вступая с ними в промежуточные взаимодействия и регенерируя свой химический состав после каждого цикла таких взаимодействий [31–33].

Сущность фотокаталитического окисления состоит в разложении и окислении токсичных примесей на поверхности фотокатализатора под воздействием ультрафиолетового излучения или видимого света. Реакции протекают при комнатной температуре, при этом примеси не накапливаются, а разрушаются до безвредных компонентов, причем фотокаталитическое окисление не делает разницы между токсинами или микроорганизмами – результат один и тот же – их уничтожение [34].

В настоящее время существует значительное количество фотокатализаторов, способных разрушить токсичные вещества до малотоксичных или нетоксичных соединений [34]. Наиболее перспективным среди фотокатализаторов считается диоксид титана благодаря своим оптическим, электрическим и фотохимическим свойствам, механической прочности, низкой стоимости, нетоксичности, а также высокой эффективности преобразования солнечной энергии. Основным ограничением применения TiO_2 в качестве фотокатализатора является его спектральная область поглощения ($\lambda < 380$ нм), что делает невозможным использование солнечного излучения при проведении фотокатализа. Существует несколько методов, позволяющих расширить область поглощения TiO_2 в видимую область спектра, наиболее эффективный из которых — допирование кристаллической решетки TiO_2 атомами металлов и неметаллов [35, 36].

Допирование структуры диоксида титана переходными металлами или другими веществами является наиболее перспективным подходом для модифицирования TiO_2 , позволяющим расширить спектр его поглощения, а также повысить фотокаталитическую активность. Известно, что при допировании диоксида титана кремнеземом происходит его сенсibilизация к видимому спектру света. Диоксид кремния применяется в качестве носителя активной фазы катализаторов и фотокатализаторов благодаря его уникальным физико-химическим свойствам. Введение оксидов переходных металлов в матрицу TiO_2 повышает стабильность каталитически активных фаз [35]. Исследования показали, что титаносиликатные композиты проявляют фотокаталитическую активность как в УФ, так и в видимом спектре света. В работе [36] отмечено, что допирование диоксида титана лантаном позволяет получить фотокатализаторы, удовлетворительные как с точки зрения простоты и доступности синтеза, так и с точки зрения получаемых фотокаталитических свойств. Синтезированные образцы мезопористого допированного лантаном диоксида титана La-TiO_2 обладают большей фотокаталитической активностью по сравнению с недопированными образцами.

Авторами [37] рассмотрены различные фотоактивные полупроводниковые материалы, в том числе диоксид титана ($n\text{-TiO}_2$), оксид цинка, оксид вольфрама, гематит, а также композиты на основе $n\text{-TiO}_2$, легированного металлами, неметаллами, углеродом и полимерными материалами, а также показано влияние структурных факторов и выбора электролита на фотоэлектрохимическую генерацию и эффективность активных реагентов для окисления основных компонентов органических загрязнителей, а также влияние адсорбции компонентов электролита на фотоэлектрокаталитические характеристики электродов. При этом эффективность работы фотоэлектрода в большой степени зависит от состава, морфологии и ширины запрещенной зоны полупроводника, а также от толщины активного слоя фотоэлектрода. Наиболее распространенными и изученными являются фотоаноды на основе TiO_2 вследствие его нетоксичности, оптических свойств, дешевизны и биосовместимости. Однако разрабатываются и исследуются и другие полупроводниковые фотоактивные материалы, такие как WO_3 , ZnO , Fe_2O_3 , SnO_2 , BiVO_4 , BiPO_4 и др., а также композиты на их основе.

Большой интерес представляют системы TiO_2 с неметаллами: преимущественно с легированным азотом и углеродом. Теоретически объясняется, что фотокаталитические свойства TiO_2 на основе легирования атомами углерода и азота могут повышаться от УФ-области к видимой области спектра. В литературе распространены системы, легированные атомом азота [38].

Предложенный [39] подход для получения фотокаталитически активных нанопорошков диоксида титана с помощью золь-гель метода учитывает высокую степень молекулярной сепарации

при разбавлении реагентов, большое соотношение вода/алкоголят, высокую скорость смешения реагентов и воздействие рН. С помощью данного подхода из золей выделены порошки с кристаллической структурой анатаза и большой площадью поверхности (100–310 м²/г), зависящей от рН синтеза. Установлено, что скорость разложения красителей под воздействием УФ-излучения зависит от свойств поверхности диоксида титана (включая площадь поверхности, ζ-потенциал) и от особенностей гидратации.

С использованием TiO₂ в виде анатаза и смешанных композитов проведено множество фотохимических реакций, в основном с использованием TiO₂ в виде анатаза и смешанных композитов [38].

Диоксид титана TiO₂ в фазе анатаза является непрямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны (ШЗЗ) около 3,2 эВ. Благодаря своей способности генерировать пространственно разделенные электрон-дырочные пары при облучении ультрафиолетом, анатаз выступает основой многих коммерческих фотокатализаторов [40, 41].

Одной из ключевых проблем, ограничивающих использование фотокаталитического метода водоочистки, является то, что большинство коммерчески доступных фотокатализаторов представлены в виде нанодисперсных частиц, которые достаточно сложно удаляются из воды после завершения фотокаталитического процесса [42], так как в большинстве своем их предполагается применять в коллоидном состоянии, в виде водных суспензий.

Однако наночастицы в водной среде склонны к агрегации, в результате чего изменяется размер частиц суспензии и величина их удельной поверхности. Также суспензии обладают собственной оптической активностью, оказывают влияние на светорассеяние, абсорбцию фотонов наночастицами, а значит и на процесс фотоиндуцирования электронно-дырочной пары на поверхности наночастиц и в конечном счете на их фотокаталитическую активность.

Для решения этой проблемы наночастицы пытаются иммобилизовать в различные матрицы [42], например, в полимерные гидрогели, которые представляют собой сшитые полимеры на основе гидрофильных макромолекул, способные к равновесному и обратимому набуханию в воде и водных растворах. Также данное ограничение можно преодолеть путем нанесения фотокатализатора на инертную легкоизвлекаемую подложку. Оптимальный выбор метода иммобилизации фотокаталитического материала, а также материала носителя чрезвычайно важны для эффективного функционирования композитной фотокаталитической системы [43].

В связи с этим гидрогели и нанесенные на легкоизвлекаемую подложку фотокатализаторы могут придавать новые свойства композиционному материалу, создавая тем самым новый класс фотовосприимчивых композиционных материалов [42].

Таким образом, нанесение TiO₂ на подходящий носитель позволяет не только увеличить удельную поверхность катализаторов, но и доступность реагентов к активным центрам TiO₂ и фотокаталитическую активность систем. Еще одним направлением улучшения свойств диоксида титана является допирование атомами неметаллов, наночастицами металлов. Это позволяет получить дополнительное поглощение в видимом диапазоне спектра и одновременно повышает эффективность процесса разделения зарядов. Многообразие методов формирования фотокатализаторов для очистки воды определяет актуальность работы по исследованию путей получения высокодисперсного титаноксидного фотокатализатора и роли промотирующих добавок TiO₂ [44].

В настоящее время существует широкий спектр методов очистки сточных вод от фенолов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

К наиболее перспективным методам очистки сточных вод от фенолов относятся фотокаталитическое и электрохимическое окисление.

Фотокаталитическое окисление обладает рядом преимуществ перед другими способами вследствие высокой эффективности очистки, возможности использования для облучения солнечного света, способности обработки сточных вод с высоким содержанием органических загрязнителей.

Для повышения фотокаталитической активности диоксида титана, наиболее широко используемого фотокатализатора, проводится его модификация путем допирования различными веществами, такими как металлы, неметаллы, углерод, полимерные материалы.

В перспективе для увеличения эффективности и экономичности предполагается дальнейшее развитие методов очистки сточных вод от фенолов, основанных на фотокаталитическом и электрохимическом окислении.

Список источников

1. Мазитова А.К., Сухарева И.А., Сидоров Г.М. и др. // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 2. С. 164. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-164-170.
2. Потапова М. О. Гигиенические аспекты охраны водных объектов: учебное пособие. Иркутск: ИГМУ, 2023. 96 с.
3. Охрана окружающей среды в России. 2022: Статистический сборник. Росстат. 0-92 М., 2022. 115 с.
4. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2022 год Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). // www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90.
5. Носенко М.О. // Вестник Евразийской науки, 2020. №4. DOI: 10.15862/32SAVN420.
6. Коростелёва А.В., Тюрденева С.В. // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2013. Т. 2, № 9 (13). С. 164.
7. Иванцова Н.А., Кузин Е.Н., Чурина А.А. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, Вып. 3. С. 275. DOI: 10.18500/1816-9775-2022-22-3-275-281.
8. Смирнова В.С., Худорожкова С.А., Ручкинова О.И. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 2. С. 52. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.05
9. Будыкина Т.А., Будыкина К.Ю. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 2 (34). С. 73. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.2.73.
10. Сулимова М.А. Разработка технологии очистки сточных вод металлургических предприятий от фенолов и цианистых соединений многофункциональным сорбентом на основе железомарганцевого сорбента на основе железомарганцевых конкреций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 30 с.
11. Андреева С.А., Хузиахметова К.Р. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 4 (36). С. 82. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.82.
12. Коваль К.А., Иванцова Н.А., Кузин Е.Н. // Труды научной конференции «Успехи в химии и химической технологии». 2021. Т. XXXV, № 12 (247). М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2021. С. 79. EDN: FNNBXN
13. Бетц С.А., Сомин В.А., Комарова Л.Ф. // Ползуновский вестник. 2014. № 3. С. 243. EDN: ТВЕКРР
14. Духопельникова Н.Р. // Alfabuild. 2018. № 1 (3). С. 7. EDN: LBFHKL
15. Андреева С.А., Хузиахметова К.Р. // Известия КГАСУ. 2015. № 4 (34) С. 223. EDN: UXWJHN
16. Смирнова В.С., Худорожкова С.А., Ручкинова О.И. // Construction and Geotechnics. 2017. Т. 8, № 2. С. 52. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.05
17. Пупырев Е.И. // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, вып. 11. С. 1365. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1365-1407.
18. Юрко А.В., Комаров А.Ю., Романов В.А. // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2012. № 2 (3). С. 87. EDN: PLTYBT
19. Кузнецов А.Е. Высокоэффективные экологически чистые совмещенные системы микробиологического синтеза и очистки сточных вод с оксидативным стрессовым воздействием: дис. ... д-ра техн. наук: 03.01.06: М., 2021. 708 с.
20. Коростелева А.В. // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. 2011. № 25. С. 585–589. EDN: OQPDID
21. Тихонов К.В. // Сборник докладов XIV Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева и 90-летию со дня создания факультета «ВиВ». МГСУ, 2019. С. 249. EDN: ZIPWHJ
22. Шарифуллин В.Н., Зитдинов Н.Н. // Химическая промышленность. 2000. № 4. С. 41.
23. Кадырова М.Э. // Экологическая химия. 2022. Т. 31, № 5. С. 276. EDN: VGQCTH

24. Иванцова Н.А., Паничева Д.А., Кузнецова О.Ю. // Химия высоких энергий. 2020. Т. 54, № 1. С. 13. DOI: 10.31857/S0023119320010076
25. Селюков А.В., Скурлатов Ю.И., Козлов Ю.П. // Водоснабжение и санитарная техника. 1999. № 12. С. 25.
26. Артемьянов А.П., Земскова Л.А., Иванов В.В. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60, вып. 8. С. 88.
27. Мазитова А.К., Сухарева И.А., Сидоров Г.М. и др. // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 2. С. 164. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-164-170.
28. Аминова А.Ф. Разработка способа очистки фенолсодержащих сточных вод: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2019. 130 с.
29. Suzuki H., Araki S., Yamamoto H. // Journal of Water Process Engineering. 2015. V. 7. P. 54. DOI: 10.1016/j.jwpe.2015.04.011
30. Палатова А.В. // Материалы XXII Международной экологической студенческой конференции «Экология России и сопредельных территорий». 2017. С. 128. EDN: VWKFWY
31. Пармон В.Н. Фотокатализ: Вопросы терминологии. Новосибирск: Наука, 1991. 17 с.
32. Иванцова Н.А., Кузин Е.Н., Чурина А.А. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 275. DOI: 10.18500/1816-9775-2022-22-3-275-281
33. Савинов Е.Н. // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, № 11. С. 52 .
34. Гаглошвили М.М., Козлова Н.П., Рылов Ю.Б. // Сборник научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов: «Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития». 2013. Вып. IV, С. 192 .
35. Цыратьева А.В., Тюкавкина В.В. // Химия и материаловедение. Вып. 5. 2021. Т. 11, № 2. С. 273. DOI: 10.37614/2307-5252.2021.2.5.054.
36. Кайдарова А.О., Шмелев А.А., Шафигулин Р.В. // Секция «Химия». Материалы XLVIII Самарской областной студенческой научной конференции. Том 1, 11–22 апреля 2022 г. С. 257. EDN: MFYEVV
37. Гринберг В.А., Емец В.В., Цодиков М.В. и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2021, Т. 57, № 4. С. 381. DOI: 10.31857/S0044185621040100
38. Кадырова М.Э. // Экологическая химия. 2022. Т. 31, № 5. С. 276. EDN: VGQSTH
39. Агафонов А.В., Редозубов А.А., Козик В.В. и др. // Журнал неорганической химии. 2015. Т. 60, № 8. С. 1001. DOI: 10.7868/S0044457X15080024
40. Морозов А.Н. Синтез и каталитические свойства наноструктурированных покрытий диоксида титана: дис. ... канд. хим. наук, М., 2014. 160 с.
41. Авдин В.В., Буланова А.В., Уржумова А.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 2. С. 135. DOI: 10.14529/chem220214
42. Мансуров Р.Р. Термодинамика межфазного взаимодействия и фотокаталитическая активность полимерно-коллоидных систем с наночастицами оксидов металлов: дис. ... канд. хим. наук. Екатеринбург, 2018. 139 с.
43. Горшков А.А., Авдин А.В., Жеребцов Д.А. и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2023. Т. 15, № 1. С. 138. DOI: 10.14529/chem230113.
44. Сидак И.Л., Раков В.Ф., Погибко В.М. // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции: «Инновационные перспективы Донбасса». Т. 4: Перспективные направления развития экологии и химической технологии. 2020. С. 30. EDN: OMRUGX

Шинкарук Наталья Анатольевна – директор центра коллективного пользования «Эко-аналитика» Института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: shinkarukna@susu.ru.

Ницкая Светлана Георгиевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Экология и химическая технология» Института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: nitckaiasg@susu.ru

*Статья поступила в редакцию 22 января 2024 г.
The article was submitted 22 January 2024.*