

УДК 628.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ БРИКЕТИРОВАННОГО ТОРФА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ЦИНКА

Б. Н. Житенёв¹, Д. Д. Сенчук²

¹ К. т. н., доцент, профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gitenev@tut.by

² Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: senchuk.d.d@mail.ru

Реферат

В настоящее время ведутся активные исследования по методам очистки сточных вод от токсичных металлов, таких как кадмий, свинец, медь и др., с применением новых композиционных сорбентов, совершенствованию ионообменной очистке, осаждению, например, в виде сульфидов или оксалатов, сорбцией золой от сжигания древесины, биосорбцией растениями. При этом одним из перспективных направлений является применение технологий сорбционной очистки сточных вод с использованием торфа. Наличие в Республике Беларусь значительных запасов торфа создает реальные предпосылки для выпуска дешевых, экологически безопасных сорбентов на основе модифицированного брикетированного торфа. Настоящая работа является продолжением исследований сорбционных свойств измельченного брикетированного торфа и посвящена очистке сточных вод от ионов цинка. Используются физико-химические, технологические, математические методы исследования.

Выполнен анализ литературных данных по степени загрязненности природных водных объектов ионами цинка, установлено, что преимущественно ионы цинка попадают в водные объекты с недостаточно очищенными сточными водами. Наиболее эффективным способом предотвращения загрязнения водных объектов ионами цинка является более глубокая очистка производственных сточных вод. Очистка производственных сточных вод от ионов тяжелых металлов, в том числе от ионов цинка является весьма актуальной задачей, о чем свидетельствует количество научных публикаций, посвященных данной проблеме. Исследования ведутся по очистке сточных вод от цинка сорбционными методами [21–28], биосорбцией, биоаккумуляцией [30–35], электрохимическими [36–37] реагентными методами [38–41]. Исследована кинетика сорбции брикетированным торфом ионов Zn^{2+} . Установлено, что с увеличением крупности зерен брикетированного торфа эффективность сорбции снижается. Достаточная интенсивность процесса характеризуется тем, что за 5 минут контакта эффект сорбции ионов Zn^{2+} составляет $\Theta = 85,71\%$, а при 20 и 40 минутах соответственно 96 %, и 99 %; Сорбционная емкость при насыщении составляет по Zn^{2+} – 0,0045 моль/г (0,29 мг/г). С помощью уравнений диффузионной и химической кинетики установлено, что процесс сорбции идет в диффузионном режиме, при этом вклад в общую скорость процесса вносит стадия химического взаимодействия ионов металла с функциональными группами торфа.

Брикетированный торф является эффективным сорбентом для очистки сточных вод от ионов Zn^{2+} . Процесс сорбции практически заканчивается через 20 минут.

Ключевые слова: брикетированный торф, ионы Zn^{2+} , очистка сточных вод, сорбция, диффузионная и химическая кинетика.

STUDY OF SORPTION PROPERTIES OF BRIQUETTED PEAT FOR WASTEWATER TREATMENT FROM ZINC IONS

B. N. Zhitenev, D. D. Senchuk

Abstract

Currently, active research is underway on methods of wastewater treatment from toxic metals such as cadmium, lead, copper, etc., using new composite sorbents, improving ion-exchange treatment, precipitation, for example, in the form of sulfides or oxalates, sorption by ash from wood combustion, biosorption by plants. At the same time, one of the promising areas is the use of sorption wastewater treatment technologies using peat. The presence of significant peat reserves in the Republic of Belarus creates real prerequisites for the production of cheap, environmentally friendly sorbents based on modified briquetted peat. This work is a continuation of the study of the sorption properties of crushed briquetted peat and is devoted to the purification of wastewater from zinc ions. Physicochemical, technological, mathematical research methods were used.

The analysis of literary data on the degree of pollution of natural water bodies with zinc ions was performed. It was found that zinc ions mainly enter water bodies with insufficiently purified wastewater. The most effective way to prevent pollution of water bodies with zinc ions is a deeper purification of industrial wastewater. Purification of industrial wastewater from heavy metal ions, including zinc ions, is a very urgent task, as evidenced by the number of scientific publications devoted to this problem. Research is conducted on the purification of wastewater from zinc by sorption methods [21–28], biosorption, bioaccumulation [30–35], electrochemical [36–37] reagent methods [38–41]. The kinetics of sorption of Zn^{2+} ions by briquetted peat was studied. It has been established that with an increase in the grain size of briquetted peat, the efficiency of sorption decreases. Sufficient intensity of the process is characterized by the fact that for 5 minutes of contact, the effect of sorption of Zn^{2+} ions is $E = 85.71\%$, and at 20 and 40 minutes, respectively, 96 % and 99 %; The sorption capacity at saturation is for Zn^{2+} – 0.0045 mmol / g (0.29 mg / g). Using the equations of diffusion and chemical kinetics, it was established that the sorption process occurs in the diffusion mode, while the contribution to the overall rate of the process is made by the stage of chemical interaction of metal ions with the functional groups of peat.

Briquetted peat is an effective sorbent for wastewater treatment from Zn^{2+} ions. The sorption process is practically complete after 20 minutes.

Keywords: briquetted peat, Zn^{2+} ions, wastewater treatment, sorption, diffusion and chemical kinetics.

Введение

В постановлении Совета министров Республики Беларусь от 22 февраля 2022 г. № 9: «О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года» отмечается, что к 2030 году повысить качество воды посредством уменьшения загрязнения, ликвидации сброса отходов и

сведения к минимуму выбросов опасных химических веществ и материалов, сокращения вдвое доли неочищенных сточных вод и значительного увеличения масштабов рециркуляции и безопасного повторного использования сточных вод [1]. В Республике Беларусь сосредоточено большое количество предприятий приборо- и машиностроения, в технологических процессах которых широко исполь-

зуются гальванопокрытия, в результате в сточных водах присутствуют ионы тяжелых металлов. Согласно шкале стресс-факторов, учитывающей комплексное негативное воздействие на организм человека, тяжелые металлы (135 баллов) оставляют далеко позади радиоактивные отходы (40 баллов) [2]. Настоящая работа является продолжением исследований сорбционных свойств измельченного брикетированного торфа и посвящена очистке сточных вод от ионов **цинка** [3, 4]. Цинк широко используется на предприятиях приборо- и машиностроения в качестве защитного покрытия различных изделий, что является причиной загрязнения поверхностных и подземных вод этим металлом. В [5] отмечается, что на основании данных гидрохимической лаборатории одного из заводов ПО "Гомсельмаш" (за период с 2000 по 2006 г.) и специальных экспериментальных исследований, проведенных авторами в августе 2006 г., можно сделать следующие выводы: а) на концентрации загрязняющих веществ в дождевых и талых водах существенное влияние оказывают технологические процессы производства: максимальные значения концентраций характерны для гальванических цехов и производств, связанных с горячей высадкой и штамповкой металлов, а минимальные – для производств холодной высадки, различных видов механической обработки, открытого складирования готовой продукции; б) наиболее характерными загрязнителями дождевых и талых вод являются взвешенные вещества, БПК, нефтепродукты, азот аммонийный, фосфаты, железо и цинк; в) диапазоны концентраций загрязняющих веществ находятся в пределах: по взвешенным веществам – 15...90 мг/л, нефтепродуктам – 0,25...4,8, азоту аммонийному – 0,4...5,9, железу – 0,2...9,4, цинку – 0,05...4,5. В [6] констатируется, что для стран Евросоюза существует проблема защиты морских прибрежных акваторий и эстуариев от загрязнений различных видов, в том числе от тяжелых металлов, которые поступают с речной водой, с неэффективно очищенными СВ и т. д. Сообщается о разработке рамочных направлений, в которых приведены рекомендации относительно предельно-допустимого содержания в донных отложениях эстуариев и прибрежных акваторий тяжелых металлов; в частности для кадмия это 0,45 мкг/г, для хрома – 71 мкг/г, для никеля – 57 мкг/г, для мышьяка – 24 мкг/г, для ртути – 0,27 мкг/г, для свинца – 66 мкг/г, для **цинка** – 248 мкг/г. В работе [7] исследовались процессы загрязнения акватории Атлантического океана при выпадении дождевых осадков; пробы осадков отбирались на расстоянии 50 км от береговой линии. Установлено, что дождевая вода содержала моновалентные катионы натрия, калия, двухвалентные кальция, магния, цинка и меди, а также анионы – хлориды, сульфаты и нитриты; другие загрязнители присутствовали в весьма низких концентрациях. Вода имела кислую реакцию с pH преимущественно ниже 5,4, содержание большинства компонентов не превышало предельно-допустимых значений по нормам ВОЗ. Уровень бактериальной загрязненности воды характеризуется как незначительный. В [8] представлены результаты определения реакции водяной сосенки (представитель погруженных высших водных растений) на воздействие ионов цинка, фтора, соединений мышьяка и низких величин pH.

Исследования [9] связаны с тем, что в прибрежных зонах заливов имеются мелководные участки, в которые периодически во время штормов поступает вода, кроме того, в них может собираться загрязненная вода от поверхностных водоисточников. Обследовался ряд таких мелководий, при этом отбирались пробы донных отложений (ДО), размер фракций ДО составлял от 13 до 646 мкм. В ДО определялось содержание сорбированных загрязнителей. Установлено, что в зависимости от места отбора пробы концентрация полихлорированных бифенилов составляла от менее чем 0,0004 до 0,704 мг/кг ДО; для полициклических ароматических углеводородов – 0,2–80 мг/кг; для свинца, кадмия и цинка 0,02–4670 мг/кг. В [10] приводятся результаты обследования эстуария, связанного с гаванью, в него впадали несколько притоков; в донных отложениях (ДО) гавани и эстуария определялись ртуть, свинец, кадмий, хром, медь, цинк и алюминий, а также фосфор, азот, органические соединения, масла и др. Установлено, что содержание кадмия в ДО составляло в среднем 0,58 мг/кг (наименьшее значение для всех металлов) и цинка 596 мг/кг (наибольшее значение). При этом содержание металлов в ДО было значительно выше в местах впадения речных притоков, чем в среднем для эстуария. Сообщается [11], что при разработке

месторождения металлических руд выделялись кислые дренажные воды (ДВ), поступающие в речную воду; их расход намного увеличивался при наводнениях. При обследовании реки установлено, что в наибольших концентрациях ДВ содержали железо, цинк и алюминий. Кроме того, присутствовали марганец, медь, мышьяк, свинец и др. Установлено также, что на расстоянии 3,5 км от точки сброса речная вода обладала высокой токсичностью, которая быстро убывала при разбавлении; при дистанции 25 км в воде фиксировались остаточные концентрации металлов. В работе [12] сообщается, что дренаж речной воды содержал различные металлы, в том числе кадмий, свинец, цинк и др. – всего 9 металлов. Они присутствовали в следовых концентрациях. Изучались процессы диффузии металлов, с этой целью использовался гель с толщиной слоя 0,16–2 мм. Установлено, что граница диффузионного слоя была наиболее стабильна для кадмия, свинца и цинка и наименее для марганца. В лабораторных экспериментах [13] исследовались процессы десорбции металлов морскими донными отложениями (ДО), при этом использовались реальные ДО, которые предварительно насыщались ионами кадмия, меди, свинца, цинка и содержали их в концентрациях 86, 240, 700 и 3000 мг/кг соответственно (по сухой массе). Величина pH в опытах составляла 5,5–8, концентрация растворенного кислорода 3–8 мг/л, солесодержание также менялось в широких пределах. В опытах применялось два вида перемешивания: механическое и биологическое, когда струя создавалась выбросом от моллюсков. Установлено, что более эффективно перемешивание механическое, свинец и цинк более эффективно выделялись в присутствии сульфидов. Исследуемая территория с мангровыми [14] периодически затоплялась во время приливов. В донных отложениях (ДО) и биомассе растительности определялось содержание ионов тяжелых металлов, меди, свинца и цинка. Установлено, что ДО и биомасса аккумулировали металлы примерно с одинаковой эффективностью, при этом способность растительности к аккумуляции была для стеблей в среднем на 50 % выше, чем для листьев, в наибольших количествах металлы накапливались в корнях. Представлено распределение ионов различных металлов в ДО. В работе [15] обзор литературы и собственные исследования авторов показали, что наиболее приемлемым сорбентом для очистки сточных вод от цинка является зола от ТЭЦ. Проведены исследования [16] по удалению $^{152+154}\text{Eu}$ и ^{65}Zn из радиоактивных растворов активированным углем в периодичном и непрерывном режиме. Исследовалось влияние времени установления равновесия, дозы угля, pH раствора. Сорбционные данные интерпретированы с использованием моделей Лэнгмюр и Фрейндлиха. Полученные данные указывают на возможность использования активированного угля для удаления радиоактивных катионов европия и цинка из сточных вод. В [17] представлены результаты исследований по загрязнению цинком речных вод и донных отложений в районе свинцово-цинкового рудника на о. Tsushima (Япония). Рудник является одним из самых старейших предприятий Японии. Проведенный анализ воды показал, что 64 % проб имели превышение нормы в 0,03 мкг/мл. Концентрация цинка в отложениях составляла 86,75–7490,07 мкг/г и также превышала допустимую норму. Предполагается, что воды р. Shiine и донные отложения также загрязнены сульфидными рудами. Исследования [18] связаны с тем, что присутствующие в речной воде медь и цинк находятся в составе различных соединений и играют существенную роль в плане обеспечения реакционного потенциала водной экосистемы, играет роль их способность к биоаккумуляции, представляемая водной биотой, к образованию токсичных форм. В [19] исследовалось качество речной воды, протекающей вначале через парковую городскую зону (ПЗ), а затем через территорию с высокой концентрацией различных производств (ТП). Установлено, что в зоне ТП содержание таких тяжелых металлов, как цинк, медь, хром и свинец было значительно выше, чем для ПЗ, однако кадмий в ПЗ и ТП содержался примерно в одинаковых концентрациях. Содержание азота и фосфора было высоким в обеих зонах, но в ТП концентрации нитратов и органического азота были более высокими, чем в ПЗ. Предлагается увеличить эффективность работы очистных сооружений, сбрасывающих СВ в реку в ТП. Проведено исследование [20] по определению тенденций распределения загрязнителей в заливе Elefsis (Греция) и определен подход к классификации загрязнителей

в соответствии с их потенциальной опасностью. Пробы брались на побережье и в самом заливе. Определено, что основными загрязнителями являются четыре металла: свинец, цинк, хром и медь. Определены также временные тенденции концентрации загрязнителей в окружающей среде залива за 18 лет. Отмечено снижение концентрации Сг как на побережье, так и в воде залива.

Очистка воды от цинка

Молотый брусит может быть эффективным реагентом для удаления из воды ионов тяжелых металлов, в том числе меди, цинка и железа [21]. Наиболее эффективно (с меньшими расходами реагента) удаляются ионы тяжелых металлов при использовании мелкодисперсных фракций (0–45 мкм). Менее эффективно (при остаточной концентрации 0,5 мг/л) удаляются бруситом ионы никеля. Результаты проведенных исследований [22] показали, что извлечение цинка возможно как отходами горно-металлургической промышленности, так и минеральным сырьем (известняк, доломит и магнезит). Для концентрированных растворов применяется метод гальванокоагуляции, при котором даже кратковременная обработка позволяет извлечь до 100 % цинка. Из карбонатных минералов для извлечения цинка наряду с известняком может применяться магнезит. В [23] сообщается, что промышленные СВ содержали тяжелые металлы, очистка СВ производилась в многоступенчатой схеме, однако на выходе они содержали эти металлы в остаточных концентрациях. В лабораторных экспериментах разрабатывался процесс сорбционной доочистки этих СВ, в качестве модельного металла использовался цинк. Сообщается о синтезе сорбента с нанокристаллической структурой, который обозначался как минерал акагенит, он имел вид гранулята, которым заполнялась сорбционная колонка, при оптимальном режиме сорбции обеспечивалась высокая эффективность удаления ионов цинка. В фундаментальной работе [24] теоретически обоснована и практически подтверждена целесообразность использования новых углеродных сорбентов, полученных из длиннопламенных каменных и бурых углей, а также сорбента ИПИ-Т. Методом порометрии установлена неоднородность пористой структуры исследуемых сорбентов с преобладанием мезопор. Выявлено, что окислительное модифицирование кислородом воздуха позволяет получить сорбенты с развитой мезопористой структурой и химией поверхности селективной к сорбции металлов из жидких сред. Доказан полифункциональный характер поверхности сорбентов с доминированием карбоксильных, фенольных, карбонильных и эфирных групп. Установлено, что комплексообразование преимущественно идет с участием карбоксилат-иона и гидроксильной группы. Наиболее эффективен этот процесс для сорбентов из бурых углей. Впервые установлены закономерности сорбции, кинетики сорбции ионов меди, цинка, железа, хрома, ртути, кадмия, свинца из производственных растворов новыми сорбентами из бурых и каменных углей и их модификаций. Доказано, что сорбция ионов металлов на сорбентах из углей и их модификаций носит монослойный характер, подчиняется уравнению Ленгмюра, на сорбенте ИПИ-Т – принадлежит к полимолекулярной сорбции и подчиняется уравнению БЭТ. Определены коэффициенты распределения и избирательности сорбентов по отношению к металлам, подтверждающие селективность сорбента АБЗ по отношению к ртути, установлены ряды селективности металлов в кислой и щелочной среде, обусловленные электронным строением элементов. Впервые теоретически обоснованы и экспериментально доказаны механизмы сорбции ионов тяжелых цветных металлов новыми углеродными сорбентами. Значения дифференциальных теплот сорбции и энергии активации свидетельствуют о протекании процессов сорбции в переходной от диффузионной к кинетической области. Вычисленные термодинамические показатели процесса сорбции, константы устойчивости образующихся комплексов в исследуемых системах позволяют говорить о сложном механизме сорбции: физическая, электрохимическая. Комплексные ионы, сорбированные на поверхности УС за счет дисперсионных сил, взаимодействуя с активными центрами, образуют новые комплексные соединения, включая хелаты, путем присоединения, замещения или отщепления лигандов. В [25] для очистки СВ рекомендован волокнистый хемосорбент марки КН-1 в Na-форме. Очистка реальных СВ показала, что концентрация цинка, меди, свинца

уменьшалась соответственно в 4,3, 34,3, 9,7 и 1,1 раз. Способность металлов сорбироваться на волокнистом хемосорбенте КН-1 в лабораторных условиях из реальной водной системы (имеющей примесь нефтепродуктов и взвесь) уменьшалась в ряду медь>цинк>железо>>свинец. Выполненная работа является по сути основой новой технологии дополнительной очистки поверхностных стоков от тяжелых металлов. Различные образцы АУ были получены при обработке активирующего агента (H_2PO_4) с разными концентрациями и при разных температурах [26]. Результаты экспериментов показали снижение сорбции с повышением концентрации. Высокие концентрации кислоты приводят к получению мезопористой структуры за счет микропористой. Обработка при 450 °С ведет к увеличению микро- и мезопористой структуры АУ. Сорбенты с удельной поверхностью >1723 м²/г были получены при соответствующих концентрациях кислоты и температурах. Полученные образцы АУ были успешно использованы для удаления ионов Zn из водных растворов. В [27] исследовано влияние pH, дозы адсорбента, концентрации ионов Cu и Zn, температуры и времени контакта для определения оптимальных условий очистки сточных вод. Сорбционная способность угольной золы по отношению к меди 4,71 мг/г, по отношению к цинку 5,75 мг/г при 18 °С. Определены термодинамические параметры процесса сорбции на основании константы Ленгмюра. В [28] отмечается, что присутствие в природных водоисточниках и донных отложениях токсичных металлов отрицательно влияет на состояние здоровья людей и животных, на развитие растений. В данных исследованиях модельными металлами являлись медь и цинк. Исследовалась возможность снижения их концентрации в воде с использованием гидроксиапатита (синтетического). Установлено, что удаление металлов происходило в две стадии: на первой на поверхности минерала образовывался комплекс металл/минерал; на второй формировался осаждающийся продукт. При использовании металлов в растворах по отдельности сорбционная емкость гидроксиапатита для меди и цинка была практически одинаковой (от 0,015 до 0,764 ммоль/г), для смесей металлов в различных концентрациях/соотношениях емкость относительно одного из металлов снижалась на 10–76 %. Разработан [29] композиционный оксидно-гидроксидный сорбент на основе активированного угля и исследованы его сорбционные свойства по отношению к ионам металлов в статических и динамических условиях. В исследованиях [30] разрабатывался метод удаления из грунтовых и поверхностных вод тяжелых металлов. Пилотная установка представляла собой контейнер диаметром 15 см, заполненный летучей золой, выделявшейся при сжигании углей, и бентонитом. В эту среду высаживался вид декоративной растительности, выращиваемой на плантации, а через зола/бентонит фильтровалась исходная вода. Через шесть месяцев мышьяк, хром, свинец и кадмий содержались в концентрациях 29, 12,8, 119, 16,43, 98,3 и 7,8 мг/кг, при этом медь и никель аккумулировались преимущественно в корнях, цинк и хром – в корнях и стеблях, приводятся временные зависимости накопления и др. В [32] отмечается, что за последние 10 лет увеличилось количество теоретических и практических разработок, связанных с удалением из СВ тяжелых металлов с использованием сульфатредуцирующих бактерий (СРБ). Указывается, что одной из проблем при этом является чувствительность СРБ к токсикантам и высоким значениям ХПК. Проводились эксперименты, в ходе которых чувствительность СРБ к токсичному воздействию металлов компенсировалась за счет их иммобилизации в слое геля, а потребность в органических соединениях, необходимых в процессах восстановления, обеспечивалась также путем включения последних в состав геля. В приводимом примере

цинк в этой системе удалялся на 99 %, сообщается о разработке модели процесса и др. Целью работы [33] было изучение возможности извлечения тяжелых металлов (кадмий, медь, цинк) из концентрированных сточных вод методом фиторемедиации с помощью высших водных растений. Анализ полученных данных показал: 1) несмотря на чрезвычайно высокие (залповые) концентрации тяжелых металлов Zn, Cd в воде, высшие водные растения криптокорины и лимнофила способны к их извлечению и накоплению в фитомассе; 2) скорость и степень удаления металлов не одинаковы и зависят от природы фитосорбента, природы и концентрации извлекаемого металла. Из высококонцентрированных растворов с наиболее высокой скоростью происходит извлечение кадмия как криптокориной, так лимнофилой. В растворах концентрации 100 мг/л, и криптокорины и лимнофила способны к наибольшему накоплению Zn как в течение первого часа, так и по истечении пяти часов; далее следует Cd и с наименьшей скоростью извлекается медь; 3) установлено, что даже в случае гибели растения удерживают до 45 % извлеченного цинка и 30 % кадмия; 4) рекомендуется изъятие погибших и высадку новых растений по истечении 8...10 дней для чрезвычайно высоких концентраций (залповых) и 15...18 дней для менее концентрированных растворов, прежде чем начнется процесс отторжения растением ТМ. В [34] исследована сорбция ионов Cu и Zn биомассой шиек *Punusylvestrus L.* Полученные результаты показали, что адсорбция ионов металлов увеличивается с увеличением pH и резко падает с уменьшением pH. Максимальная сорбция Cu и Zn 67 % и 30 % соответственно. Изучен процесс [35] поглощения меди и цинка из раствора биомассой сухих дрожжей в зависимости от времени, исходной концентрации тяжелых металлов, размера частиц pH раствора. Выявлена зависимость процесса поглощения меди и цинка культурами микроорганизмов от размера частиц. В [36] описан способ очистки в том числе и от цинка, включающий обработку импульсными высоковольтными разрядами с одновременным насыщением воды диспергированным воздухом и последующую очистку на зернистых и сорбционных фильтрах в присутствии коагулянта. Разряд создают в водной среде в присутствии в зоне разряда гранул металла, образующего нерастворимые гидроксиды. Воду обрабатывают последовательностью импульсных разрядов с энергией импульса 0,3–0,7 кДж/дм³ частотой 0,5...2,0 Гц. Гранулы металла за счет гидравлических ударов образуют псевдооживленный слой и равномерно распределяются в объеме очищаемой воды. Последующую очистку осуществляют в трехслойном зернистом фильтрующем материале, образующем в водной среде электрохимический источник тока. Сначала фильтруют по направлению движения воды через слой гранул электроотрицательного материала, затем через диэлектрический материал, а затем через слой гранул электроположительного углеводородсодержащего материала со скоростью 5–10 м/ч. Природные и сточные воды могут быть очищены от железа, марганца, цинка, органических загрязнений, нефтепродуктов, вирусов. Сообщается [37], что вода природного источника, используемая при водоподготовке, содержала тяжелые металлы, в данном примере Zn²⁺ и Ni²⁺, а также линейные алкилбензолсульфонаты (ЛАС), применяемые в качестве ПАВ. Разработана лабораторная установка, предназначенная для обработки этой воды. В ней комбинировались электрохимический реактор для удаления ионов металлов и реактор для фотокаталитического окисления органических соединений, в которой разрушались ЛАС. Этот реактор снабжался УФ-излучателем и в него дозировался катализатор в виде порошка TiO₂. Сообщается, что в оптимальных условиях цинк и никель удалялись на 86 и 56 % соответственно и ЛАС на 76 %. В [38] отмечается, что в зависимости от вида производства СВ могут содержать различные тяжелые металлы, в том числе цинк, медь, никель, свинец, ртуть, кадмий, серебро и др., или их смесь. Предлагается флотационный метод их очистки с использованием ступени флокуляции, схема содержит напорный флотатор, промежуточный усреднитель с большим временем пребывания и флокулятор, они замкнуты в контур циркуляции. Степень флокуляции имеет статический усреднитель, на его вход подается флокулянт с удельно статический усреднитель, на его вход подается флокулянт с удельной массой до 100000 и выше, предусмотрено регулирование производительности дозатора, флотат удаляется скребками и обезвоживается на фильтр-прессе. В испытаниях схемы

содержание тяжелых металлов достигало 58 мг/л, свинец на выходе содержался менее 0,1 мг/л. Исследования [39] связаны с тем, что в урбанизированном регионе Туниса вода природного источника содержала ионы тяжелых металлов (ТМ), в том числе свинца, кадмия, меди и цинка. Разрабатывался метод их сорбционного удаления с использованием в качестве дешевого сорбента фосфорной руды, содержащей фосфаты. В одном варианте применялись фосфаты немодифицированные, в другом они предварительно модифицировались (ФМ). В экспериментах изменялись температура, pH, экспозиция и др. Показана возможность эффективного удаления ТМ с применением ФМ, при этом оптимальным значением pH при удалении Pb²⁺ являлась величина три, для Cd²⁺, Cu²⁺ и Zn²⁺ этот показатель равнялся шести. Сообщается [40], что при эксплуатации железнорудного месторождения добыча руды была прекращена в результате его истощения, однако фильтрация дренажных шахтных вод в грунтовые воды (ГВ) продолжалась; в результате ГВ содержали никель, цинк, мышьяк и т. д. В лабораторных и пилотных экспериментах разрабатывался метод удаления из ГВ тяжелых металлов в процессе коагуляции/осаждения, при этом колонка заполнялась смесью гранулята извести и карбоната кальция. Установлено, что в зависимости от долевого соотношения реагентов и гидравлического режима удаление никеля и цинка превышало 97 %, для мышьяка эти показатели находились в пределах 50–96 %, кадмий удалялся на 96 %. Сообщается [41], что СВ содержали медь, кобальт, никель, цинк, железо и серебро. На первых стадиях эксперимента для удаления этих катионов применялся процесс ультрафильтрации без дополнительных воздействий на СВ, однако при этом ионы задерживались мембраной неэффективно. На последующих стадиях в СВ дозировался высокомолекулярный комплексобразователь в виде поливинилового спирта, он образовывал крупные агрегаты комплексов с ионами металлов, которые эффективно задерживались на мембране, при этом эффективность удаления металлов составляла выше 97 %.

Выводы

Очистка производственных сточных вод от ионов тяжелых металлов, в том числе от ионов цинка, является весьма актуальной задачей, о чем свидетельствует количество научных публикаций, посвященных данной проблеме. Исследования ведутся по очистке сточных вод от цинка сорбционными методами [21–28], биосорбцией, биоаккумуляцией [30–35], электрохимическими [36–37], реагентными методами [38–41].

Экспериментальная часть. Материалы и методы исследований

В процессе исследований использовались физико-химические, технологические, математические методы. В данной работе объектом исследования являлась проба производственной сточной воды, полученной с предприятия СП ОАО "Брестгазоаппарат" 05 февраля 2025 года. Проба была отобрана из резервуара объемом 500 м³, где собираются сточные воды со всего завода. Концентрация ионов цинка в технологической воде до взаимодействия с торфом составила 2,1 мг/дм³.

В работе выполнялось экспериментальное исследование влияния крупности гранул измельченного брикетированного торфа и времени контакта его с пробой воды на величину снижения концентрации ионов цинка в производственных сточных водах СП ОАО "Брестгазоаппарат".

Для выполнения эксперимента использовался торфобрикет марки БТ-2, произведенный на ТБЗ «Гатча-Осовский», расположенном в Жабинковском районе Брестской области. Опыты осуществлялись следующим образом. Брикет механическим способом измельчался, затем рассеивали через набор сит калибром 1,0–2,0–3,0–4,0 мм. В результате были получены образцы крупностью < 1 мм, 1,00–2,0 мм, 2,0–3,0 мм, 3,0–4,0 мм. Далее исследовалась сорбция ионов цинка Zn²⁺. Исходный сток, объемом 100 мл, заливали в колбу и добавляли 10 г гранул торфа. Затем суспензию непрерывно перемешивали с помощью магнитной мешалки (рисунок 1) в течение 1, 3, 5, 10, 15, 20 и 40 минут. Растворы фильтровали через бумажный фильтр сорта «Синяя лента» (рисунок 2) и определяли остаточное содержание ионов цинка Zn²⁺.

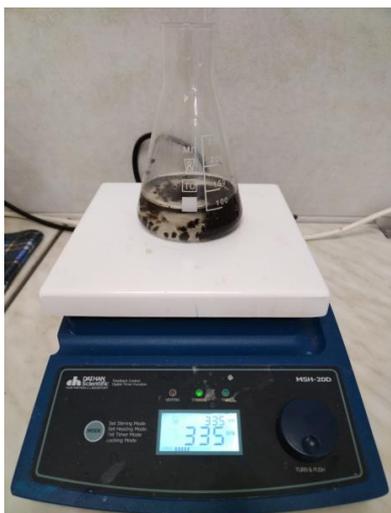


Рисунок 1 – Механическое перемешивание

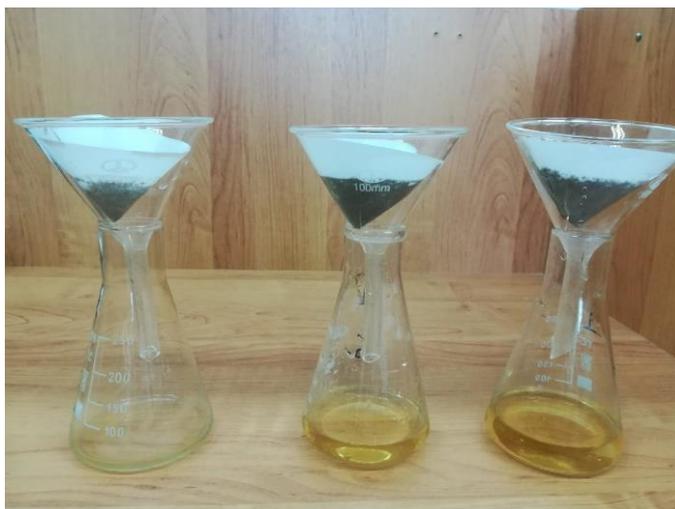


Рисунок 2 – Фильтрационное отделение сорбента

Процесс сорбции ионов цинка на торфобрикетных зернах исследовали с использованием спектрофотометра СФ-2000 (рисунок 3) с кварцевыми кюветами толщиной слоя 1 см. Диапазон сканирования составлял до 620 нм, количество сканирований каждой пробы – 3. По результатам спектрофотометрических исследований оценивалась степень очистки сточных вод.



Рисунок 3 – Спектрофотометр СФ-2000

Результаты и их обсуждение

Предварительно изучалась зависимость эффекта очистки сточных вод от крупности зерен брикетированного торфа. Исследовали эффективность сорбции для гранул средних размеров 1 мм, 2 мм, 3 мм и 4 мм, при продолжительности контакта 15 минут, результаты приведены на рисунке 5.

Из рисунка 4 видно, что с увеличением крупности гранул сорбента эффективность сорбции снижается, это является следствием того, что уменьшается площадь межфазовой границы между сорбентом и раствором. Дальнейшие исследования выполнялись с гранулами размером около 2 мм.

На рисунке 4 эффективность процесса сорбции ионов цинка на брикетированном торфе выражена через эффект снижения концентрации ионов Zn^{2+} в сточной воде, определяемый по формуле

$$\xi = \frac{C_{исх} - C_{обр}}{C_{исх}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где $C_{исх}$ – массовая концентрация ионов цинка в пробе воды до опыта;
 $C_{обр}$ – массовая концентрация ионов цинка в пробе воды после опыта.

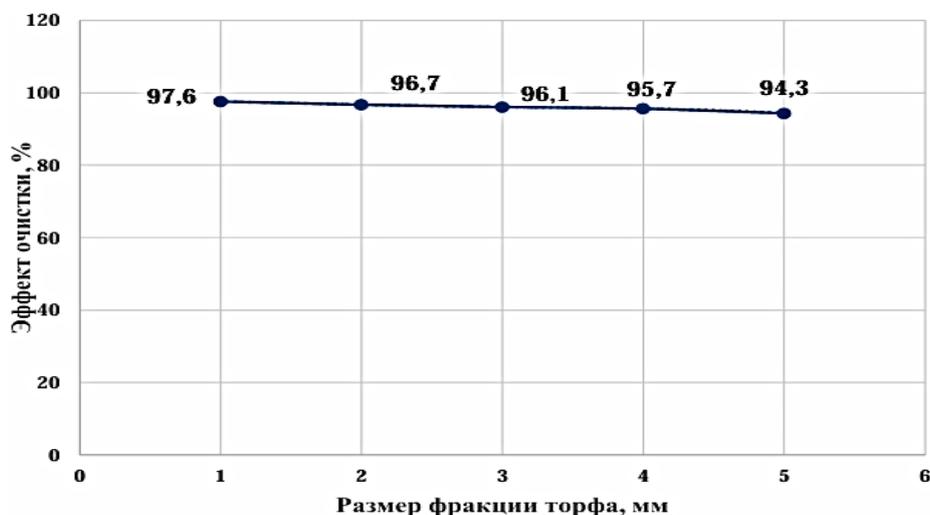


Рисунок 4 – Влияние размеров зерен брикетированного торфа на эффективность сорбции при продолжительности контакта 15 минут

Наиболее эффективно процесс сорбции ионов брикетированным торфом протекает в течении 20 минут контакта, затем он замедляется. В течении 20 минут удаляется до 96 % ионов Zn^{2+} (рисунок 5) и практически наступает сорбционное равновесие. Степень достиже-

ния равновесия F показывает, какая часть общего количества вещества сорбируется к данному моменту времени и для брикетированного торфа она составила $F = 0.86$ при продолжительности контакта 5 минуты и $F = 0.99$ при контакте 40 минут (рисунок 6).

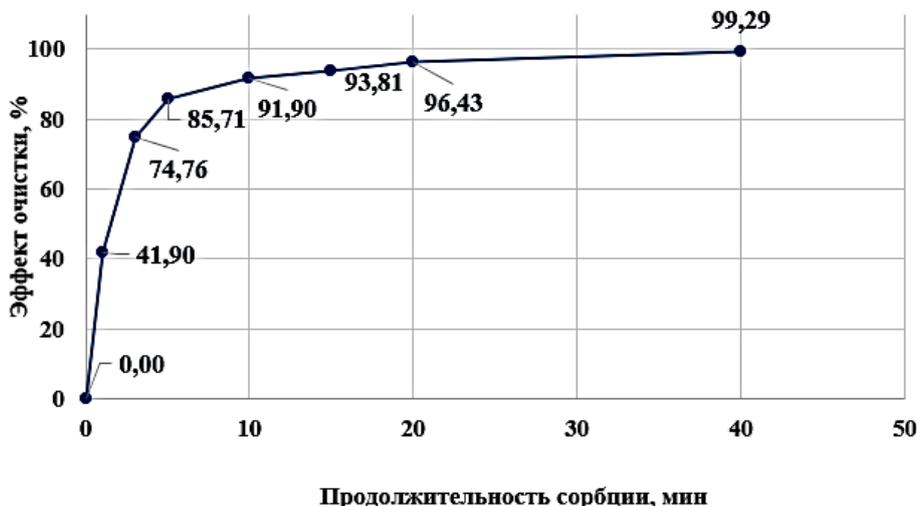


Рисунок 5 – Зависимость эффекта сорбции ионов Zn^{2+} от продолжительности контакта, мин

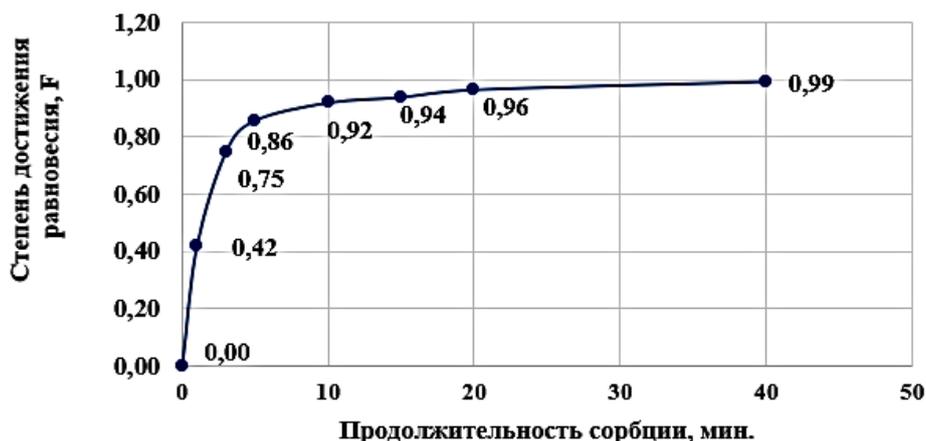


Рисунок 6 – Зависимость степени достижения равновесия от продолжительности контакта брикетированного торфа с раствором содержащим ионы Zn^{2+}

Для установления адсорбционной емкости брикетированного торфа был использован концентрированный раствор, содержащий 46 мг/л ионов цинка. После взаимодействия с навеской измельченного торфа в течение 20 минут остаточная концентрация ионов цинка составила 17 мг/л. Кинетическая кривая сорбции представлена на рисунке 7. Адсорбционная емкость брикетированного торфа рассчитывалась по уравнению

$$A = (C_1 - C_{равн}) \cdot \left(\frac{V}{m}\right), \quad (2)$$

где V – Объем раствора, $дм^3$;

m – масса навески брикетированного торфа, г;

C_1 – исходная концентрация ионов Zn^{2+} в растворе, $мМоль/дм^3$;

$C_{равн}$ – равновесная концентрация ионов Zn^{2+} в растворе после сорбции, $мМоль/дм^3$.

Для выяснения механизма сорбции ионов цинка Zn^{2+} брикетированным торфом результаты экспериментов были обработаны с помощью уравнений диффузионной кинетики. Кинетическая кривая для внешне диффузионных процессов должна быть линейной в координатах $-\ln(A_e - A_t) - t$ (рисунок 8),

где A_e и A_t – количество сорбируемого иона металла на единицу массы сорбента в состоянии равновесия и в момент времени t .

Кривая сорбции для ионов Zn^{2+} на начальном этапе описывается прямой, следовательно, диффузия в пленке раствора вносит вклад в

общую скорость процесса. При дальнейшем контакте график сорбции ионов цинка искривляется. Согласно литературным данным [36], это свидетельствует о том, что диффузия в зерне сорбента контролирует общую скорость процесса. В случае химического взаимодействия торфа с ионами тяжелых металлов (реакция ионного обмена) вклад в кинетику может вносить стадия собственно химической реакции между сорбируемым ионом и функциональными группами поглотителя. Поэтому для выявления вклада химической стадии при описании сорбционного процесса брикетированным торфом использовали модели псевдопервого и псевдвторого порядка [36]. Линейные формы этих моделей представлены в виде уравнений (3) и (4):

$$\ln(A_e - A_t) = \ln A_e - k_1 \cdot t, \quad (3)$$

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 \cdot A_e^2} + \frac{1}{A_t} \cdot t, \quad (4)$$

где k_1 – константа скорости сорбции в модели псевдопервого порядка;

k_2 – константа скорости сорбции в модели псевдвторого порядка.

Для установления модели, оптимально описывающей сорбцию [37] на брикетированном торфе (рисунок 8) сравнивались коэффициенты корреляции псевдопервого и псевдвторого порядка. Установлено, что сорбция ионов Zn^{2+} наиболее точно описывается моделью псевдвторого порядка (рисунок 8 Б).

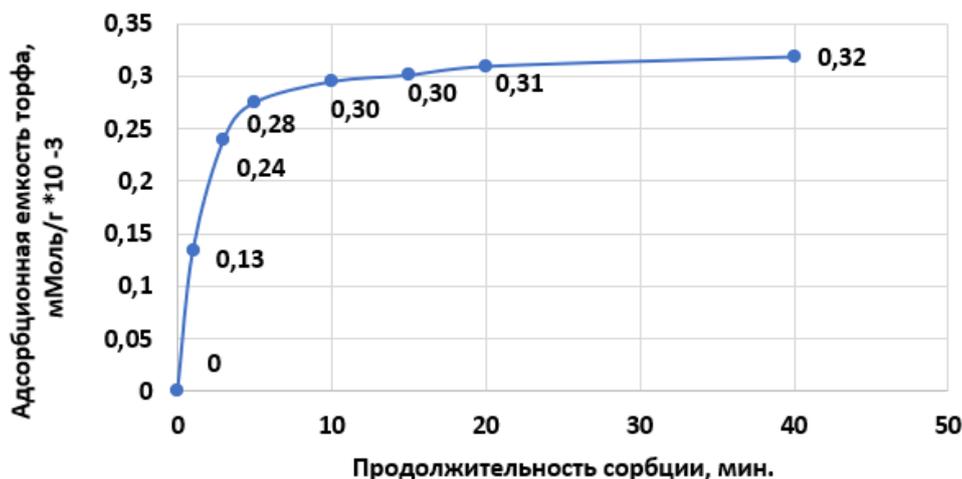


Рисунок 7 – Кинетическая кривая сорбции ионов Zn²⁺ брикетированным торфом

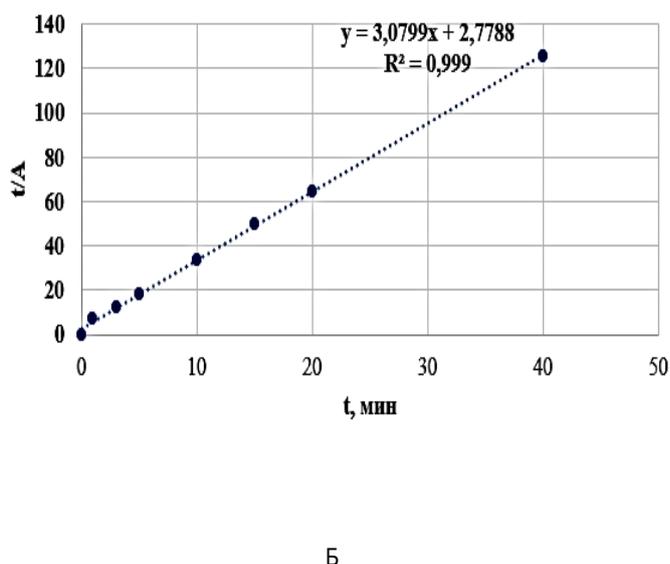
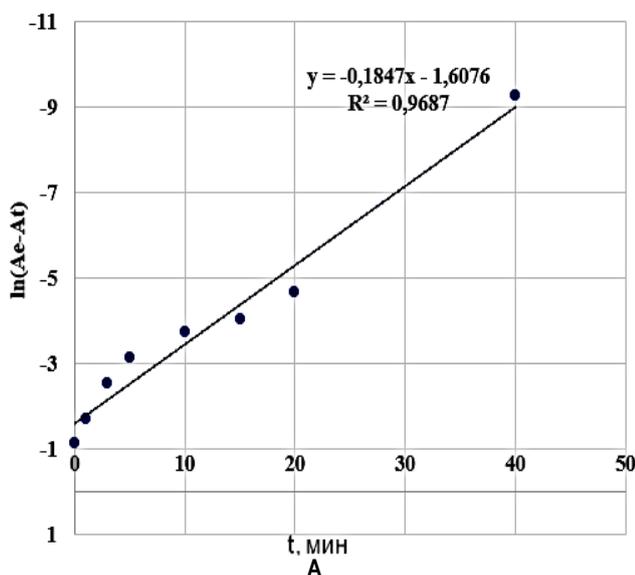


Рисунок 8 – Кинетические кривые сорбции ионов цинка брикетированным торфом в моделях псевдопервого (А) и псевдвторого (Б) порядков

Заключение

• На основании обзора литературных источников: одним из распространенных ионов тяжелых металлов, загрязняющих природную среду, являются ионы цинка. Цинк попадает в водные объекты в результате сброса недостаточно очищенных сточных вод, присутствует в воде водотоков и водоемов, донных отложениях, а также биоаккумулируется в водной растительности. Наиболее эффективным способом предотвращения загрязнения водных объектов ионами цинка является более глубокая очистка производственных сточных вод.

• По результатам проведенных исследований снижения концентрации ионов цинка в сточных водах СП ОАО "Брестгазоаппарат" процессом сорбции брикетированным торфом было установлено:

– увеличением крупности зерен брикетированного торфа эффективность сорбции снижается;

– достаточная интенсивность процесса характеризуется тем, что за пять минут контакта эффект сорбции ионов Zn²⁺ составляет Э = 85,71 %, а при 20 и 40 минутах – соответственно 96 %, и 99 %;

– сорбционная емкость при насыщении составила по Zn²⁺-0,0045 мМоль/г (0,29 мг/г);

– согласно уравнениям диффузионной и химической кинетики процесс сорбции идет в диффузионном режиме, при этом вклад в общую скорость процесса вносит стадия химического взаимодействия ионов металла с функциональными группами торфа.

• Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности использования брикетированного торфа в качестве эффективного сорбента для очистки сточных вод от ионов Zn²⁺.

Список цитированных источников

1. О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22 февраля 2022 г. № 91 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22200091> (дата обращения: 23.01.2025).
2. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий : монография / Е. А. Урецкий. – Брест : БрГТУ, 2008. – 320 с.
3. Житенёв, Б. Н. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов / Б. Н. Житенёв, Д. Д. Сенчук // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоснабжения, геозология. – 2019. – № 2 (104). – С. 61–64.
4. Житенев, Б. Н. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди / Б. Н. Житенев, А. Д. Гуринович, Д. Д. Сенчук // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, Вып. 11. – С. 1534–1545. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1534-1545.

5. Колобаев, А. Н. Влияние технологических процессов производства на загрязненность поверхностного стока с территории предприятий сельскохозяйственного машиностроения / А. Н. Колобаев, О. К. Новикова // V Международный конгресс по управлению отходами и природоохранными технологиями (Вэистэк-2007), 29 мая – 1 июня 2007 г., Москва : сборник докладов. – М. : СИБИ-КО Инт. 2007. – С. 345–346.
6. Maximum likelihood mixture estimation to determine metal background values in estuarine and coastal sediments within the European Water Framework Directive / J. G. Rodriguez, I. Tueros, A. Borja [et al.] // Science of the Total Environment. – 2006. – Vol. 370, Iss. 2–3. – P. 278–293.
7. Chemical and bio-logical characteristics of dew and rain water in an urban coastal area (Bor-deaux, France) / D. Beysens, C. Ohayon, M. Muselli, O. Clus // Atmospheric Environment. – 2006. – Vol. 40, Iss. 20. – P. 3710–3723.
8. Попов, А. Н. Влияние соединений металлов, фтора, мышьяка (III+) и величины pH на процессы жизнедеятельности высшей водной растительности. 1. Влияние ионов цинка (2+), мышьяка (Ш+), фтора (-1) и величины pH на процессы жизнедеятельности водной сосенки / А. Н. Попов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2008. – № 3. – С. 46–56.
9. Runoff of particle bound pollutants from urban impervious surfaces studied by analysis of sediments from stormwater traps / Jartun Morten, Ottesen Rolf Tore, Steinnes Eiliv, Volden Tore // Science of the Total Environment. – 2008. – Vol. 396, Iss. 2–3. – P. 147–163.
10. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan / Chen Chiu-Wen, Kao Chih-Ming, Chen Chih-Feng, Dong Cheng-Di // Chemosphere. – 2007. – Vol. 66, Iss. 8. – P. 1431–1440.
11. Water chemistry and ecotoxicity of an acid mine drainage-affected stream in subtropical China during a major flood event / C. Lin, Y. Wu, W. Lu [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 142, Iss. 1–2. – P. 199–207.
12. In situ measurements of metal complex exchange kinetics in freshwater / Warnken Kent W., Davison William, Zhang Hao [et al.] // Environmental Science and Technology. – 2007. – Vol. 41, Iss. 9. – P. 3179–3185.
13. Atkinson, Clare A. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen, salinity and sediment disturbances on metal release and sequestration from metal contaminated marine sediments / Clare A. Atkinson, Dianne F. Jolley, Stuart L. Simpson // Chemosphere. – 2007. – Vol. 69, Iss. 9. – P. 1428–1437.
14. MacFarlane, Geoff R. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies / Geoff R. MacFarlane, Claudia E. Koller, Simon P. Blomberg // Chemosphere. – 2007. – Vol. 69, Iss. 9. – P. 1454–1464.
15. Research concerning the purification of the wastewater resulted from the galvanic processes. I. The retention of the Zn ions resulted / Maria Harja, Lacramioara Rusu, Florin Bandrabur, Constantin Harja // Modelling and Optimization in the Machines Building Field. – 2007. – Vol. 13, Iss. 2. – P. 321–326.
16. Omar, H. A. Use of activated carbon in removal of some radioisotopes from their waste solutions / H. A. Omar, H. Moloukhia // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 157, Iss. 2–3. – P. 242–246.
17. Shikazono, N. Zinc contamination in river water and sediments at Taisyu Zn-Pb mine area, Tsushima Island, Japan / N. Shikazono, H. M. Zakir, Y. Sudo // Journal of Geochemical Exploration. – 2008. – Vol. 98, Iss. 3. – P. 80–88.
18. Hoffmann, Stephen R. Strong colloidal and dissolved organic ligands binding copper and zinc in rivers / Stephen R. Hoffmann, Martin M. Shafer, David E. Armstrong // Environmental Science and Technology. – 2007. – Vol. 41, Iss. 20. – P. 6996–7002.
19. Surface water quality of factory-based and vegetable-based peri-urban areas in the Yangtze River Delta region, China / Zhang Qing Li, Shi Xue Zheng, Huang Biao [et al.] // Catena. – 2007. – Vol. 69, Iss. 1. – P. 57–64.
20. Pollutant trends and hazard ranking in Elefsis Bay, Greece / M. Pantazidou, S. Kapnariar, A. Katsiri, A. Christidis // Desalination. – 2007. – Vol. 210, Iss. 1–3. – P. 69–82.
21. Эффективность применения молотого брусита в технологиях очистки воды / А. Белевцев, С. Байкова, В. Жаворонкова [и др.] // Аква-Маг. – 2007. – № 4. – С. 20–21.
22. Чалкова, Н. Л. Извлечение цинка из модельной воды сорбционными и гальванокоагуляционными методами / Н. Л. Чалкова, Д. А. Чалков // Вестник МГТУ (Магнитогорск). – 2008. – № 3. – С. 79–82, 94, 99.
23. Deliyanni, E. A. Removal of zinc ion from water by sorption onto iron-based nanoadsorbent / E. A. Deliyanni, E. N. Peleka, K. A. Matis // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 141, Iss. 1. – P. 176–184.
24. Домрачева, В. А. Развитие теории и практики сорбционной технологии извлечения ценных компонентов из сточных вод и техногенных образований: автореф. дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук / В. А. Домрачева ; Иркут. гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2006. – 43 с.
25. Мисин, В. М. Использование промышленных волокнистых хемосорбентов для очистки поверхностных стоков от ионов тяжелых металлов / В. М. Мисин, Е. В. Майоров // Экология речных бассейнов ЭРБ – 2007 : IV Международная научно-практическая конференция, Владимир, 28–30 сент. 2007 г. : труды. – Владимир : Владим. гос. ун-т, 2007. – С. 414–419.
26. Adsorption of Zn(II) in aqueous solution by activated carbons prepared from evergreen oak (*Quercus rotundifolia* L.) / M. del Mar Gomez-Tamayo, Antonio Macias-Garcia, M. Diez Angeles Diaz, M. Cuerda-Correa Eduardo // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 153, Iss. 1–2. – P. 28–36.
27. Thermal power plants ash as sorbent for the removal of Cu(II) and Zn(II) ions from wastewaters / Tofan Lavinia, Padurarur Carmen, Bilba Doina, Rotariu Mugurel // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 156, Iss. 1–3. – P. 1–8.
28. Corami, Alessia. Copper and zinc decontamination from single- and binary-metal solutions using hydroxyapatite / Alessia Corami, Silvano Mignardi, Vincenzo Ferrini // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 146, Iss. 1–2. – P. 164–170.
29. Козырева, В. П. Разработка сорбционного процесса очистки сточных вод от ионов меди, цинка, кадмия / В. П. Козырева, Е. А. Фарберова, А. В. Виноградова // Химия и экология : тезисы докладов IX Краевой конференции студентов и молодых ученых, Пермь, 19 апр. 2007 г. – Пермь : ПГТУ, 2007. – С. 27–29.
30. Li Qiansheng. Heavy metal leaching from coal fly ash amended container substrates during *Syngonium* production / Li Qiansheng, Chen Jianjun, Li Yuncong // Journal of Environmental Science and Health – Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes. – 2008. – Vol. 43, Iss. 2. – P. 179–186.
31. Sadecka, Zofia. Metaleciezkie w trzciniepospolitej (*Phragmites australis*) / Zofia Sadecka // Przemysl Chemiczny. – 2008. – Vol. 87, Iss. 5. – P. 557–562.
32. Control of metal toxicity, effluent COD and regeneration of gel beads by immobilized sulfate-reducing bacteria / Min Xiaobo, Chai Liyuan, Zhang Chuanfu [et al.] // Chemosphere. – 2008. – Vol. 72, Iss. 7. – P. 1086–1091.
33. Очистка сточных вод от тяжелых металлов / Л. Н. Ольшанская, Ю. А. Тарушкина, О. Н. Колесникова, Н. А. Собгайда // Энергосбережение в Саратов. обл. – 2008. – № 2. – С. 17–19.
34. Ucu, Handan. Copper(II) and zinc(II) biosorption on *Pinus sylvestris* L. / Ucu Handan, Aksakal Ozkan, Yildiz Ergun // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 161, Iss. 2–3. – P. 1040–1045.
35. Газнабиева, Р. Т. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов / Р. Т. Газнабиева, Г. А. Козлова // Химия и экология : тезисы докладов IX Краевой конференции студентов и молодых ученых, Пермь, 19 апр., 2007 г. – Пермь : ПГТУ, 2007. – С. 71–72.
36. Патент 2337070 Россия, МПК С 02 F 9/12 (2006.01). Способ очистки природных и сточных вод и устройство для его осуществления : № 2003107632/15 : заявл. 20.03.2003 : опубл. 27.10.2008 / Назаров В. Д., Алексеев С. А., Назаров М. В. ; гос. образ. учрежд. высш. проф. образ. «Уфим. гос. нефть. технич. ун-т».
37. Doan, H. D. Simultaneous removal of metal ions and linear alkylbenzene sulfonate by combined electrochemical and photocatalytic process / H. D. Doan, M. Saidi // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 158, Iss. 2–3. – P. 557–567.

38. United States Patent 7332079, IPC C 02 F 1/24 (2006.01), C 02 F 1/56 (2006.01), NPK 210/221.2. Flotation process for removal of heavy metal and associated apparatus : N 10/641844 : filing date 15.08.2003 : publ. date 19.02.2008 / Industrial Waste Water Services, LLC, Lamar Coleman C. (Jr). – URL: <https://patents.google.com/patent/US7332079B2> (date of access: 19.01.2025).
39. Heavy metal removal from aqueous solutions by activated phosphate rock / Z. Elouear, J. Bouzid, N. Boujelben [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 156, Iss. 1–3. – P. 412–420.
40. Remediation of heavy metal contaminated groundwater originated from abandoned mine using lime and calcium carbonate / Lee Minhee, Paik In Sung, Kim Insu [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 144, Iss. 1–2. – P. 208–214.
41. Mimoune Scheherazade. Purification of aqueous solutions of metal ions by ultrafiltration / Mimoune Scheherazade, Belazzougui Rafik Eddine, Amrani Farouk // *Desalination*. – 2007. – Vol. 217, Iss. 1–3. – P. 251–259.
- References**
1. O Nacional'noj strategii upravleniya vodnymi resursami v usloviyah izmeneniya klimata na period do 2030 goda : postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 22 fevralya 2022 g. № 91 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22200091> (data obrashcheniya: 23.01.2025).
2. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii v vodnom hozyajstve promyshlennykh predpriyatij : monografiya / E. A. Ureckij. – Brest : BrGTU, 2008. – 320 s.
3. ZHitenyov, B. N. Issledovanie sorbcionnykh svojstv briketirovannogo torfa dlya ochistki stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov / B. N. ZHitenyov, D. D. Senchuk // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Seriya: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika, geokologiya. – 2019. – № 2 (104). – S. 61–64.
4. ZHitenyov, B. N. Issledovanie sorbcionnykh svojstv briketirovannogo torfa dlya ochistki stochnykh vod ot ionov kadmiya, svinca i medi / B. N. ZHitenyov, A. D. Gurinovich, D. D. Senchuk // *Vestnik MGSU*. – 2020. – T. 15, Vyp. 11. – S. 1534–1545. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1534-1545.
5. Kolobaev, A. N. Vliyanie tekhnologicheskikh processov proizvodstva na zagryaznennost' poverhnostnogo stoka s territorii predpriyatij sel'skohozyajstvennogo mashinostroeniya / A. N. Kolobaev, O. K. Novikova // V Mezhdunarodnyj kongress po upravleniyu othodami i prirodohraneniyu tekhnologiyami (VejsTtek-2007), 29 maya – 1 iyunya 2007 g., Moskva : sbornik dokladov. – M. : SIBI-KO Int. 2007. – S. 345–346.
6. Maximum likelihood mixture estimation to determine metal background values in estuarine and coastal sediments within the European Water Framework Directive / J. G. Rodriguez, I. Tueros, A. Borja [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2006. – Vol. 370, Iss. 2–3. – P. 278–293.
7. Chemical and bio-logical characteristics of dew and rain water in an urban coastal area (Bor-deaux, France) / D. Beysens, C. Ohayon, M. Muselli, O. Clus // *Atmospheric Environment*. – 2006. – Vol. 40, Iss. 20. – P. 3710–3723.
8. Popov, A. N. Vliyanie soedinenij metallov, ftora, mysh'yaka (III+) i velichiny rN na processy zhiznedeyatel'nosti vysshej vodnoj rastitel'nosti. 1. Vliyanie ionov cinka (2+), mysh'yaka (SH+), ftora (-1) i velichiny rN na processy zhiznedeyatel'nosti vodyanoj sosenki / A. N. Popov // *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. – 2008. – № 3. – S. 46–56.
9. Runoff of particle bound pollutants from urban impervious surfaces studied by analysis of sediments from stormwater traps / Jartun Morten, Ottesen Rolf Tore, Steinnes Eiliv, Volden Tore // *Science of the Total Environment*. – 2008. – Vol. 396, Iss. 2–3. – P. 147–163.
10. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan / Chen Chiu-Wen, Kao Chih-Ming, Chen Chih-Feng, Dong Cheng-Di // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 66, Iss. 8. – P. 1431–1440.
11. Water chemistry and ecotoxicity of an acid mine drainage-affected stream in subtropical China during a major flood event / C. Lin, Y. Wu, W. Lu [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 142, Iss. 1–2. – P. 199–207.
12. In situ measurements of metal complex exchange kinetics in freshwater / Warnken Kent W., Davison William, Zhang Hao [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2007. – Vol. 41, Iss. 9. – P. 3179–3185.
13. Atkinson, Clare A. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen, salinity and sediment disturbances on metal release and sequestration from metal contaminated marine sediments / Clare A. Atkinson, Dianne F. Jolley, Stuart L. Simpson // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 69, Iss. 9. – P. 1428–1437.
14. MacFarlane, Geoff R. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies / Geoff R. MacFarlane, Claudia E. Koller, Simon P. Blomberg // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 69, Iss. 9. – P. 1454–1464.
15. Research concerning the purification of the wastewater resulted from the galvanic processes. I. The retention of the Zn ions resulted / Maria Harja, Lacramioara Rusu, Florin Bandrabur, Constantin Harja // *Modelling and Optimization in the Machines Building Field*. – 2007. – Vol. 13, Iss. 2. – P. 321–326.
16. Omar, H. A. Use of activated carbon in removal of some radioisotopes from their waste solutions / H. A. Omar, H. Moloukhia // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 157, Iss. 2–3. – P. 242–246.
17. Shikazono, N. Zinc contamination in river water and sediments at Taisyu Zn-Pb mine area, Tsushima Island, Japan / N. Shikazono, H. M. Zakir, Y. Sudo // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2008. – Vol. 98, Iss. 3. – P. 80–88.
18. Hoffmann, Stephen R. Strong colloidal and dissolved organic ligands binding copper and zinc in rivers / Stephen R. Hoffmann, Martin M. Shafer, David E. Armstrong // *Environmental Science and Technology*. – 2007. – Vol. 41, Iss. 20. – P. 6996–7002.
19. Surface water quality of factory-based and vegetable-based peri-urban areas in the Yangtze River Delta region, China / Zhang Qing Li, Shi Xue Zheng, Huang Biao [et al.] // *Catena*. – 2007. – Vol. 69, Iss. 1. – P. 57–64.
20. Pollutant trends and hazard ranking in Elefsis Bay, Greece / M. Pantazidou, S. Kapniaris, A. Katsiri, A. Christidis // *Desalination*. – 2007. – Vol. 210, Iss. 1–3. – P. 69–82.
21. Effektivnost' primeneniya molotogo brusita v tekhnologiyah ochistki vody / A. Belevcev, S. Bajkova, V. ZHavoronkova [i dr.] // *Akva-Mag*. – 2007. – № 4. – S. 20–21.
22. CHalkova, N. L. Izvlechenie cinka iz model'noj vody sorbcionnymi i gal'vanokoagulyacionnymi metodami / N. L. CHalkova, D. A. CHalkov // *Vestnik MGTU (Magnitogorsk)*. – 2008. – № 3. – S. 79–82, 94, 99.
23. Deliyanni, E. A. Removal of zinc ion from water by sorption onto iron-based nanoadsorbent / E. A. Deliyanni, E. N. Peleka, K. A. Matis // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 141, Iss. 1. – P. 176–184.
24. Domracheva, V. A. Razvitie teorii i praktiki sorbcionnoj tekhnologii izvlecheniya cennykh komponentov iz stochnykh vod i tekhnogennykh obrazovaniy: avtoref. dis. na soisk. uch. step. dokt. tekhn. nauk / V. A. Domracheva ; Irkut. gos. tekhn. un-t. – Irkutsk, 2006. – 43 s.
25. Misin, V. M. Ispolzovanie promyshlennykh voloknistykh hemosorbentov dlya ochistki poverhnostnykh stokov ot ionov tyazhelykh metallov / V. M. Misin, E. V. Majorov // *Ekologiya rechnykh bassejnov ERB* – 2007 : IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, Vladimir, 28–30 sent. 2007 g. : trudy. – Vladimir : Vladim. gos. un-t, 2007. – S. 414–419.
26. Adsorption of Zn(II) in aqueous solution by activated carbons prepared from evergreen oak (*Quercus rotundifolia* L.) / M. del Mar Gomez-Tamayo, Antonio Macias-Garcia, M. Diez Angeles Diaz, M. Cuerda-Correa Eduardo // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 153, Iss. 1–2. – P. 28–36.
27. Thermal power plants ash as sorbent for the removal of Cu(II) and Zn(II) ions from wastewaters / Tofan Lavinia, Paduraru Carmen, Bilba Doina, Rotariu Mugurel // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 156, Iss. 1–3. – P. 1–8.

28. Corami, Alessia. Copper and zinc decontamination from single- and binary-metal solutions using hydroxyapatite / Alessia Corami, Silvano Mignardi, Vincenzo Ferrini // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 146, Iss. 1–2. – P. 164–170.
29. Kozyreva, V. P. Razrabotka sorbcionnogo processa ochestki stochnyh vod ot ionov medi, cinka, kadmiya / V. P. Kozyreva, E. A. Farberova, A. V. Vinogradova // *Himiya i ekologiya : tezisy dokladov IX Kraevoy konferencii studentov i molodyh uchenykh, Perm'*, 19 apr. 2007 g. – Perm' : PGU, 2007. – S. 27–29.
30. Li Qiansheng. Heavy metal leaching from coal fly ash amended container substrates during Syngonium production / Li Qiansheng, Chen Jianjun, Li Yuncong // *Journal of Environmental Science and Health – Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*. – 2008. – Vol. 43, Iss. 2. – P. 179–186.
31. Sadecka, Zofia. Metaleciezkie w trzciniepospolitej (*Phragmitesaustralis*) / Zofia Sadecka // *Przemysl Chemiczny*. – 2008. – Vol. 87, Iss. 5. – P. 557–562.
32. Control of metal toxicity, effluent COD and regeneration of gel beads by immobilized sulfate-reducing bacteria / Min Xiaobo, Chai Liyuan, Zhang Chuanfu [et al.] // *Chemosphere*. – 2008. – Vol. 72, Iss. 7. – P. 1086–1091.
33. Ochestka stochnyh vod ot tyazhelyh metallov / L. N. Ol'shanskaya, YU. A. Tarushkina, O. N. Kolesnikova, N. A. Sobgajda // *Energoberezhenie v Saratov. obl.* – 2008. – № 2. – S. 17–19.
34. Ucun, Handan. Copper(II) and zinc(II) biosorption on *Pinus sylvestris* L. / Ucun Handan, Aksakal Ozkan, Yildiz Ergun // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 161, Iss. 2–3. – P. 1040–1045.
35. Gaznabieva, R. T. Ochestka stochnyh vod ot ionov tyazhelyh metallov / R. T. Gaznabieva, G. A. Kozlova // *Himiya i ekologiya : tezisy dokladov IX Kraevoy konferencii studentov i molodyh uchenykh, Perm'*, 19 apr., 2007 g. – Perm' : PGU, 2007. – S. 71–72.
36. Patent 2337070 Rossiya, MPK C 02 F 9/12 (2006.01). Sposob ochestki prirodnyh i stochnyh vod i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya : № 2003107632/15 : zayavl. 20.03.2003 : opubl. 27.10.2008 / Nazarov V. D., Alekseev S. A., Nazarov M. V. ; gos. obraz. uchrezhd. vyssh. prof. obraz. «Ufim. gos. neft. tekhnich. un-t».
37. Doan, H. D. Simultaneous removal of metal ions and linear alkylbenzene sulfonate by combined electrochemical and photocatalytic process / H. D. Doan, M. Saidi // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 158, Iss. 2–3. – P. 557–567.
38. United States Patent 7332079, IPC C 02 F 1/24 (2006.01), C 02 F 1/56 (2006.01), NPK 210/221.2. Floatation process for removal of heavy metal and associated apparatus : N 10/641844 : filing date 15.08.2003 : publ. date 19.02.2008 / Industrial Waste Water Services, LLC, Lamar Coleman C. (Jr). – URL: <https://patents.google.com/patent/US7332079B2> (date of access: 19.01.2025).
39. Heavy metal removal from aqueous solutions by activated phosphate rock / Z. Elouear, J. Bouzid, N. Boujelben [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 156, Iss. 1–3. – P. 412–420.
40. Remediation of heavy metal contaminated groundwater originated from abandoned mine using lime and calcium carbonate / Lee Minhee, Paik In Sung, Kim Insu [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 144, Iss. 1–2. – P. 208–214.
41. Mimoune Scheherazade. Purification of aqueous solutions of metal ions by ultrafiltration / Mimoune Scheherazade, Belazzougui Rafik Eddine, Amrani Farouk // *Desalination*. – 2007. – Vol. 217, Iss. 1–3. – P. 251–259.

Материал поступил 21.02.2025, одобрен 10.03.2025, принят к публикации 11.03.2025