

МЕХАНИЗМЫ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Чжан Хэн¹, магистр

Цзинь Лиюй², аспирант

И.В. Скопинцев², канд. техн. наук, профессор

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет

²Московский политехнический университет

¹(Россия, г. Белгород)

²(Россия, г. Москва)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-3-2-149-156

Аннотация. В статье рассматриваются механизмы синергетического действия биоразлагаемых композиционных материалов при ремедиации комплексного загрязнения водной среды. Проведён анализ структурно-функциональных характеристик композитов, включающих полимерные матрицы и функциональные наполнители, а также раскрыты адсорбционные, каталитические и биологические механизмы их взаимодействия с тяжёлыми металлами и органическими соединениями. Обоснованы подходы к регулированию эффективности очистки посредством управления структурой материала и внешними условиями процесса. Показано, что интеграция сорбции, катализа и биodeградации обеспечивает устойчивое снижение токсичности и повышает результативность комплексной ремедиации водных экосистем.

Ключевые слова: биоразлагаемые композиционные материалы; комплексное загрязнение; ремедиация водной среды; синергетический эффект; адсорбция и катализ; экологическая безопасность.

В современных условиях интенсификации промышленного производства, урбанизации и аграрной деятельности проблема комплексного загрязнения водных объектов приобретает системный характер и выходит за рамки локальных экологических рисков. В поверхностных и подземных водах одновременно присутствуют тяжёлые металлы, устойчивые органические соединения, избыточные биогенные элементы и микропластик, что формирует многокомпонентное загрязнение [1]. Его специфика определяется не только совокупностью различных по природе веществ, но и их взаимным влиянием, способствующим усилению токсичности и устойчивости загрязнителей. В подобных условиях традиционные методы водоочистки демонстрируют ограниченную эффективность. Химическая коагуляция сопровождается образованием вторичных отходов и требует дополнительных стадий обработки [2]; классические адсорбционные материалы обладают избирательностью по отношению к отдельным веществам; мембранные технологии характеризуются высокой энергоёмкостью и риском

быстрого загрязнения фильтрующих элементов. Это обуславливает необходимость поиска комплексных и экологически безопасных решений, способных одновременно воздействовать на различные классы загрязняющих веществ.

Особое внимание привлекают биоразлагаемые композиционные материалы, сочетающие полимерные матрицы природного или биосинтетического происхождения с функциональными минеральными или углеродными наполнителями. Их потенциал определяется возможностью целенаправленного конструирования структуры и свойств регулирования пористости, химической функционализации поверхности и скорости биodeградации. Такие материалы способны реализовывать совокупность механизмов воздействия, включая физико-химическую адсорбцию, ионный обмен, каталитическое окисление и стимулирование микробиологических процессов. Экологическая совместимость и способность к контролируемому разложению делают их перспективным направлением развития технологий ремедиации водных экосистем [3].

Цель настоящего исследования заключается в выявлении механизмов синергетического действия биоразлагаемых композиционных материалов при ремедиации комплексного загрязнения водной среды и в определении путей их регулирования. Достижение данной цели предполагает анализ взаимосвязи между структурными параметрами композитов и их функциональной активностью, а также установление закономерностей комплексного удаления различных типов загрязнителей.

Методологическая основа исследования носит междисциплинарный характер и включает методы физико-химического анализа структуры материалов, изучение сорбционных изотерм и кинетики процессов, элементы термодинамического моделирования, а также количественный химический анализ концентраций загрязняющих веществ. Комплексное применение указанных методов позволяет выявить взаимосвязь между морфологическими характеристиками композитов, их химическим составом и эффективностью очистки водной среды.

Научная новизна работы заключается в рассмотрении биоразлагаемых композиционных материалов как многофункциональных систем, в которых сорбционные, каталитические и биологические механизмы выступают взаимодополняющими элементами единого процесса ремедиации. Предлагается системный подход к интерпретации синергетического эффекта при комплексном загрязнении водных объектов, что расширяет теоретические представления о механизмах взаимодействия материала и загрязняющей среды и формирует основу для разработки управляемых экологически ориентированных технологий.

Таким образом, проведённое исследование имеет теоретическую и прикладную значимость. Оно способствует углублению понимания процессов комплексной очистки водных объектов и создаёт предпосылки для разработки устойчивых, экологически безопасных решений в области водоохраных технологий.

Структурно-функциональные характеристики биоразлагаемых композиционных материалов

Структурно-функциональные характеристики биоразлагаемых композиционных ма-

териалов определяют их эффективность в процессах ремедиации водной среды и формируют основу для управления синергетическими механизмами очистки. Современные экологические композиты представляют собой иерархически организованные системы, включающие полимерную матрицу и функциональные наполнители, взаимодействие которых обеспечивает сочетание механической устойчивости, сорбционной активности и контролируемой биodeградации. Как отмечают К.Г. Анисеева и соавт., свойства биоразлагаемых полимеров существенно зависят от их молекулярной структуры, степени кристалличности и характера межмолекулярных взаимодействий [4].

К числу наиболее широко используемых биоразлагаемых матриц относятся полилактид (PLA), полигидроксиалканоаты (PHA) и природные полисахариды, такие как хитозан. Полилактид представляет собой алифатический полиэфир, получаемый из возобновляемого сырья, характеризующийся хорошими механическими свойствами и регулируемой скоростью гидролитической деградации. По данным К.Н. Корнилов и соавт., кинетика разложения PLA определяется степенью кристалличности и температурными условиями эксплуатации [5].

Полигидроксиалканоаты синтезируются микроорганизмами и обладают высокой биосовместимостью. Их преимущество заключается в способности полностью минерализоваться в природной среде без образования токсичных побочных продуктов. Хитозан, получаемый из хитина, отличается наличием аминогрупп, обеспечивающих высокую сорбционную способность по отношению к ионам тяжёлых металлов за счёт комплексообразования. Благодаря выраженной гидрофильности и биологической активности хитозановые матрицы активно применяются в водоочистных технологиях.

Таким образом, выбор матрицы определяется необходимостью сочетания механической стабильности и функциональной активности, а также учётом условий водной среды, в которой предполагается эксплуатация материала.

Функциональные наполнители играют ключевую роль в формировании сорбционных и каталитических свойств композитов. Био-

уголь рассматривается как перспективный углеродсодержащий компонент благодаря высокой удельной поверхности и наличию активных функциональных групп. Т. М. Минкина и др. подчёркивают, что структура биоугля, формируемая при пиролизе биомассы, обеспечивает развитую пористость и высокую адсорбционную способность по отношению к органическим загрязнителям и ионам металлов [6].

Цеолиты, обладающие кристаллической алюмосиликатной структурой, реализуют механизм ионного обмена и демонстрируют селективность к катионам тяжёлых металлов. Их использование в составе композитов позволяет повысить устойчивость материала к химическому воздействию и расширить диапазон удаляемых загрязнителей.

Оксиды металлов и наночастицы (TiO_2 , Fe_3O_4 , ZnO) обеспечивают каталитические и фотокаталитические свойства, способствуя разложению устойчивых органических соединений. По мнению В.Р. Чжоу и соавт., фотокаталитическая активность TiO_2 обусловлена генерацией активных форм кислорода под действием ультрафиолетового излучения [7]. Интеграция подобных частиц в биоразлагаемую матрицу позволяет объединить процессы адсорбции и каталитического окисления в рамках единой системы.

Пористость и удельная поверхность композитов определяют доступность активных центров и интенсивность массопереноса. Согласно исследованиям Е.В. Кормош и Т.М. Алябьева, увеличение удельной поверхности коррелирует с ростом сорбционной ёмкости материала [8]. Формирование микро- и мезопористой структуры способствует эффективному удержанию как низкомолекулярных органических соединений, так и ионов металлов.

Гидрофильность или гидрофобность поверхности влияет на характер взаимодействия с водной фазой и загрязнителями различной природы. Повышенная гидрофильность облегчает диффузию полярных соединений, тогда как гидрофобные участки способствуют сорбции неполярных органических веществ.

Механическая устойчивость композита необходима для сохранения целостности структуры в условиях гидродинамического воздействия. Введение армирующих наполни-

телей и оптимизация межфазного взаимодействия между матрицей и частицами позволяют повысить прочностные характеристики и предотвратить преждевременную деструкцию.

Скорость биodeградации представляет собой критически важный параметр, определяющий срок службы материала и экологическую безопасность его применения. Процессы гидролиза и микробиологического разложения зависят от состава матрицы, уровня кристалличности и внешних факторов среды. Контролируемая деградация обеспечивает постепенное высвобождение функциональных компонентов и минимизацию вторичного загрязнения.

Экологическая безопасность биоразлагаемых композитов оценивается с учётом токсичности продуктов их распада и влияния на водные экосистемы. Согласно данным OECD, материалы, полностью минерализующиеся до углекислого газа, воды и биомассы, обладают минимальным экологическим риском [9]. Однако присутствие наночастиц и металлических оксидов требует дополнительного контроля, поскольку их высвобождение может оказывать воздействие на гидробионтов.

Таким образом, структурно-функциональные характеристики биоразлагаемых композиционных материалов определяют их потенциал в технологиях комплексной ремедиации. Оптимальное сочетание матрицы и наполнителей, а также управление физико-химическими параметрами позволяет формировать адаптивные материалы с прогнозируемыми свойствами и высокой экологической совместимостью.

Механизмы синергетического действия при ремедиации комплексного загрязнения

В условиях инженерного применения биоразлагаемые композиционные материалы функционируют как интегрированные многофункциональные системы, обеспечивающие последовательное и параллельное протекание сорбционных, каталитических и биологических процессов. Их принципиальная особенность заключается не в изолированной реализации отдельных механизмов, а в формировании управляемого технологического цикла, в котором каждый этап усиливает последующий. С инженерной точки зрения данный процесс может быть представлен в виде

структурно-функциональной схемы, отражающей логику перехода от исходного комплексного загрязнения к конечной стабилизации водной экосистемы.

Рисунок 1 иллюстрирует инженерную модель синергетического действия биоразлагаемого композиционного материала при очистке воды.

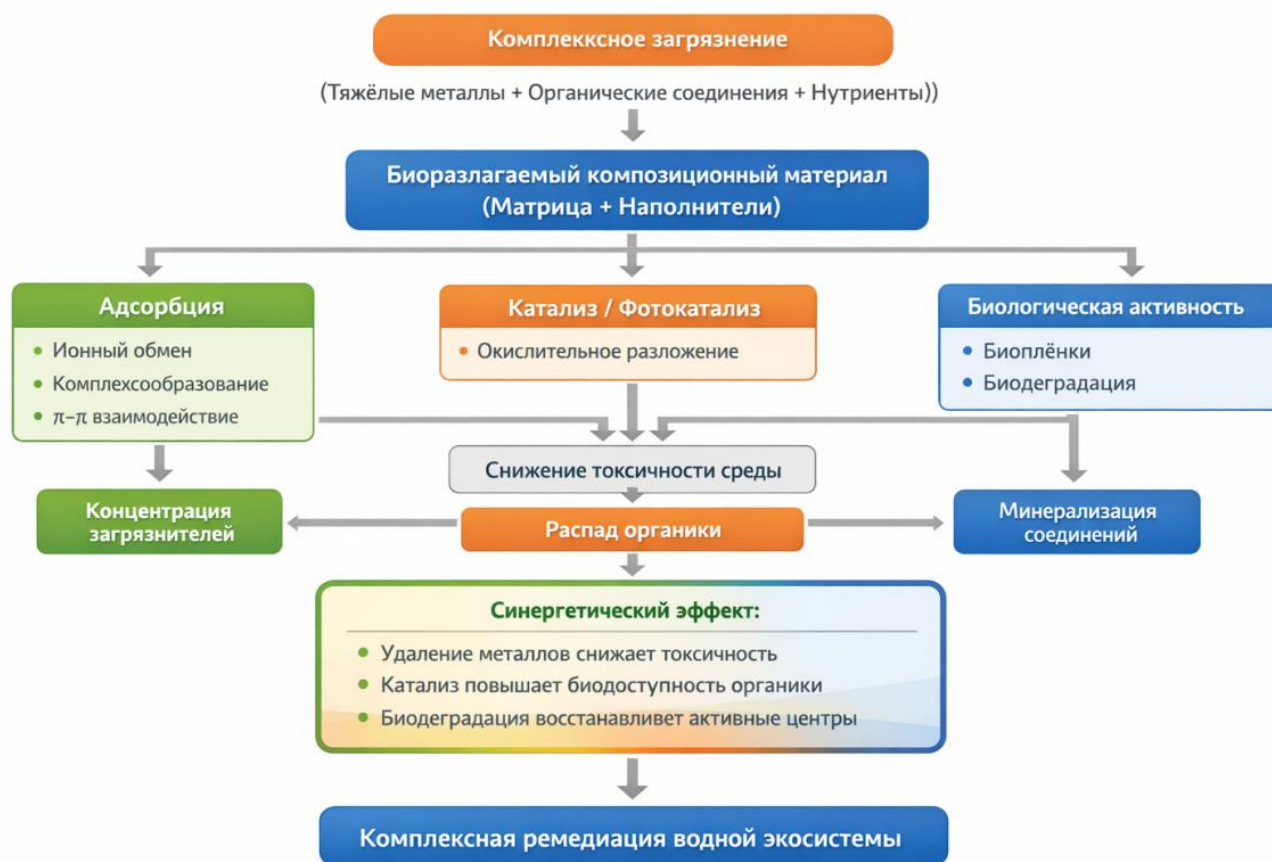


Рис. 1. Модель синергетического действия биоразлагаемого композиционного материала при очистке воды

Как показано на рисунке 1, процесс начинается с поступления в систему многокомпонентного загрязнения, включающего тяжёлые металлы, органические соединения и биогенные элементы. После контакта с биоразлагаемым композиционным материалом реализуется первичный сорбционный этап, обеспечивающий концентрирование загрязнителей на поверхности композита за счёт ионного обмена, комплексообразования и π - π взаимодействий. Данный этап играет ключевую роль в снижении подвижности токсичных компонентов и формировании локальной реакционной зоны.

Следующий уровень инженерного процесса связан с каталитическим и фотокаталитическим разложением органических соединений. Предварительная адсорбция повышает

локальную концентрацию субстратов вблизи активных центров, что ускоряет окислительно-восстановительные реакции и способствует разрушению устойчивых органических молекул. В результате снижается токсичность среды и образуются промежуточные соединения с более высокой биодоступностью.

Одновременно развивается биологический компонент процесса, представленный формированием биоплёнок и активизацией микроорганизмов на поверхности материала. Пористая структура композита создаёт благоприятные условия для закрепления микробных сообществ, что обеспечивает дополнительную минерализацию органических веществ. Удаление тяжёлых металлов на ранней стадии снижает ингибирующее воздействие на мик-

робиоту, тем самым усиливая эффективность биodeградации.

Согласно представленной схеме, синергический эффект проявляется во взаимном усилении трёх процессов: сорбция повышает эффективность катализа за счёт концентрационного эффекта, катализ облегчает биотрансформацию органических соединений, а биodeградация предотвращает накопление промежуточных продуктов и способствует регенерации активных центров поверхности. Такая координация механизмов приводит к устойчивому снижению токсичности и обеспечивает комплексную ремедиацию водной экосистемы.

Таким образом, инженерная модель, представленная на рисунке 1, демонстрирует, что биоразлагаемый композиционный материал функционирует как многостадийная реакционно-сорбционная система с элементами биокатализа. Практическая значимость данного подхода заключается в возможности масштабирования технологии и адаптации параметров материала к конкретным гидрохимическим условиям, что делает возможным переход от лабораторных исследований к промышленному внедрению экологически безопасных решений очистки воды.

Механизмы регулирования и оптимизации эффективности очистки

Эффективность ремедиации комплексного загрязнения с использованием биоразлагаемых композиционных материалов определяется не только наличием сорбционно-каталитических и биологических механизмов, но и возможностью их целенаправленного регулирования. В инженерной практике оптимизация процесса очистки предполагает управление структурными параметрами материала, контроль внешних условий функционирования, а также учёт кинетических и термодинамических закономерностей протекающих процессов. Системный подход к регулированию позволяет повысить стабильность работы материала, увеличить степень удаления загрязнителей и обеспечить предсказуемость результата в условиях реальных водных объектов [3].

Управление структурой материала является первичным уровнем регулирования. Изменение состава матрицы позволяет варьировать механическую прочность, гидрофильность и

скорость биodeградации. Например, увеличение доли гидрофильных полимеров способствует усилению массопереноса в водной фазе, тогда как повышение степени кристалличности полиэфирных матриц замедляет их гидролитическое разрушение и продлевает срок службы материала. Введение сополимеров или пластификаторов может корректировать эластичность и устойчивость к гидродинамическим нагрузкам.

Модификация поверхности направлена на повышение селективности и реакционной способности материала. Функционализация карбоксильными, аминными или сульфогруппами увеличивает количество активных центров для связывания ионов металлов. Наноструктурирование поверхности способствует росту удельной площади контакта и снижению диффузионных ограничений. Включение каталитически активных частиц в поверхностный слой обеспечивает локализацию реакций окисления и уменьшает потери активных компонентов.

Регулирование размера пор является ключевым фактором оптимизации массопереноса. Формирование микро- и мезопористой структуры позволяет адаптировать материал к удалению загрязнителей различного молекулярного размера. Мелкопористая структура эффективна для фиксации ионов металлов, тогда как развитая мезопористость облегчает диффузию органических молекул и обеспечивает условия для формирования биоплёнок. Контролируемая пористость также влияет на распределение потоков в динамических системах очистки.

Наряду со структурными параметрами существенное влияние оказывают внешние факторы среды. Значение pH определяет заряд поверхности материала и степень диссоциации функциональных групп, что напрямую влияет на эффективность ионного обмена и комплексообразования. В кислой среде повышается растворимость некоторых металлов, тогда как в щелочной – усиливается гидролиз полимерной матрицы. Оптимальный диапазон pH подбирается с учётом специфики загрязнения и состава композита.

Температура воздействует на кинетику сорбционных и каталитических процессов, увеличивая скорость диффузии и реакций при её повышении. Однако чрезмерное нагрева-

ние может ускорять деградацию полимерной матрицы и снижать долговечность материала. Концентрация загрязнителей определяет степень насыщения активных центров и влияет на характер изотерм адсорбции. При высоких концентрациях возможно проявление конкурентных эффектов между различными компонентами загрязнения.

Гидродинамические условия, включая скорость потока и турбулентность, оказывают влияние на толщину диффузионного слоя и интенсивность массопереноса. В проточных системах повышение скорости потока снижает внешние диффузионные ограничения, но может увеличивать механическую нагрузку на материал. Следовательно, проектирование очистных установок требует баланса между эффективностью контакта и устойчивостью структуры композита.

Кинетические аспекты процесса отражают временную динамику удаления загрязнителей. Для описания сорбции часто применяются модели псевдопервого и псевдвторого порядка, позволяющие оценить скорость достижения равновесия и определить лимитирующую стадию процесса. Каталитические реакции подчиняются законам химической кинетики, где важную роль играют концентрация реагентов и наличие активных центров. Биологическая деградация характеризуется зависимостью скорости процесса от концентрации субстрата и активности микроорганизмов.

Термодинамические параметры, включая изменения энтальпии, энтропии и свободной энергии Гиббса, позволяют оценить спонтанность и характер взаимодействия загрязнителя с материалом. Экзотермический характер сорбции указывает на преимущественно физическое взаимодействие, тогда как эндотермические процессы могут свидетельствовать о химической природе связывания. Комплексный анализ кинетики и термодинамики необходим для оптимизации условий эксплуатации и прогнозирования поведения материала в длительной перспективе.

Перспективы масштабирования технологии связаны с переходом от лабораторных образцов к промышленным модулям очистки. Для этого требуется разработка форм композитов, пригодных для использования в фильтрующих картриджах, реакторах периодического или непрерывного действия, а также в мо-

бильных установках для локальной очистки. Особое значение имеет оценка долговечности, возможности регенерации и экономической эффективности. Внедрение подобных материалов в природоохранную практику должно сопровождаться экологическим мониторингом, оценкой жизненного цикла и анализом потенциальных рисков высвобождения вторичных продуктов разложения.

Таким образом, регулирование и оптимизация эффективности очистки представляют собой многоуровневый процесс, включающий управление структурой материала, адаптацию к внешним условиям и учёт фундаментальных закономерностей кинетики и термодинамики. Комплексный подход обеспечивает устойчивость функционирования биоразлагаемых композиционных систем и создаёт предпосылки для их успешного применения в современных технологиях защиты водных экосистем.

Заключение

В рамках настоящего исследования были системно проанализированы механизмы синергетического действия биоразлагаемых композиционных материалов при ремедиации комплексного загрязнения водной среды и обоснованы подходы к регулированию и оптимизации их эффективности. Проведённый теоретико-методологический анализ позволил рассмотреть данные материалы не как совокупность отдельных функциональных компонентов, а как интегрированные многоуровневые системы, в которых сорбционные, каталитические и биологические процессы взаимосвязаны и формируют единый технологический цикл очистки.

Установлено, что структурно-функциональные характеристики композитов, включая тип полимерной матрицы, природу и дисперсность наполнителей, пористость и химическую функционализацию поверхности, определяют их способность к одновременному удалению тяжёлых металлов и органических соединений. Показано, что адсорбционные механизмы (ионный обмен, комплексообразование, π - π взаимодействие) обеспечивают первичную фиксацию загрязнителей и формирование реакционно-активной зоны, тогда как каталитические и фотокаталитические процессы способствуют деструкции устойчивых органических молекул. Биологи-

ческий компонент усиливает глубину очистки за счёт минерализации промежуточных продуктов и стабилизации экологического состояния среды. Таким образом, синергетический эффект проявляется в последовательном и параллельном усилении процессов сорбции, катализа и биodeградации, что обеспечивает более высокую степень ремедиации по сравнению с использованием однокомпонентных технологий.

Особое внимание в работе уделено механизмам регулирования эффективности очистки. Доказано, что управление составом матрицы, модификация поверхности и контроль пористой структуры позволяют адаптировать материал к конкретным гидрохимическим условиям. Влияние внешних факторов, таких как pH, температура, концентрация загрязнителей и гидродинамический режим, рассматривается как ключевой элемент оптимизации технологического процесса. Анализ кинетических и термодинамических параметров поз-

волил определить условия, обеспечивающие устойчивость и спонтанность протекающих реакций, а также прогнозировать долговременное поведение материала в природной среде.

Полученные результаты позволяют сформулировать вывод о том, что биоразлагаемые композиционные материалы обладают высоким потенциалом в технологиях комплексной очистки водных объектов. Их преимущество заключается в возможности интеграции нескольких механизмов удаления загрязнителей в рамках единой системы с контролируемой деградацией и минимальным экологическим риском. Предложенная концептуальная модель синергетического действия и разработанные подходы к регулированию эффективности создают научную основу для дальнейшего совершенствования композитных материалов и их масштабирования в природоохранной практике.

Библиографический список

1. Казбулатова Г.М., Мичурин С.В., Карамова А.М. Геоэкологическая оценка состояния поверхностных вод Авзянского золоторудного района Республики Башкортостан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 8. – С. 139-152.
2. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Технология процесса утилизации отходов, содержащих органические компоненты // Химическая физика и мезоскопия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 425-433.
3. Салищева О.В., Ворошилин Р.А. От традиционных процессов адсорбции до биоремедиации: современные технологии очистки природных вод от загрязнителей // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2025. – Т. 25, № 2. – С. 205-234.
4. Анисеева К.Г., Сафин Р.Р. Обзор свойств древесно-полимерных композитов на основе биоразлагаемых полимеров // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 4 (60). – С. 160-169.
5. Корнилов К.Н., Роева Н.Н. Исследование кинетики биологического разложения биоопластика, полученного из крахмала тапиоки // Health, Food & Biotechnology. – 2023. – Т. 5, № 3. – С. 37-50.
6. Минкина Т.М., Бауэр Т.В., Тимофеева А.Г. и др. Сопиролиз осадка сточных вод и лигнин-содержащей биомассы как устойчивая и экологически безопасная технология переработки отходов // Актуальная биотехнология. – 2024. – № 2. – С. 31-35.
7. Чжоу В.Р., Бакина О.В., Сулиз К.В. и др. Бикомпонентные наночастицы TiO₂-Ag с двойным гетеропереходом для фотохимической и антибактериальной очистки сточных вод // Перспективные технологии и материалы: материалы науч. конф. – 2022. – С. 102-105.
8. Кормош Е.В., Алябьева Т.М. Разработка эффективных сорбционно-активных материалов для очистки сточных вод от нефтепродуктов // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 5. – С. 20-24.
9. O'Malley L.P. Evaluation and modification of the OECD 301F respirometry biodegradation test method with regard to test substance concentration and inoculum // Water, Air, and Soil Pollution. – 2006. – Vol. 177, № 1. – P. 251-265.

**MECHANISMS OF SYNERGISTIC ACTION AND REGULATION IN THE APPLICATION
OF BIODEGRADABLE COMPOSITE MATERIALS FOR THE REMEDIATION
OF COMPLEX WATER POLLUTION**

Zhang Heng¹, *Master*

Jin Liyu², *Postgraduate Student*

I.V. Skopintsev², *Candidate of Technical Sciences, Professor*

¹**Belgorod State National Research University**

²**Moscow Polytechnic University**

¹**(Russia, Belgorod)**

²**(Russia, Moscow)**

Abstract. *The article examines the mechanisms of synergistic action of biodegradable composite materials in the remediation of complex water pollution. An analysis of the structural and functional characteristics of composites, including polymer matrices and functional fillers, is presented. Adsorptive, catalytic, and biological mechanisms governing their interaction with heavy metals and organic pollutants are discussed. Approaches to regulating remediation efficiency through structural modification of materials and control of external operating conditions are substantiated. It is demonstrated that the integration of adsorption, catalysis, and biodegradation ensures sustainable toxicity reduction and enhances the overall effectiveness of comprehensive water ecosystem remediation.*

Keywords: *biodegradable composite materials; complex pollution; water remediation; synergistic effect; adsorption and catalysis; environmental safety.*