

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»МРНТИ: 03.10.04
УДК: 628.5:577.1:546.7[DOI: 10.53002/111](https://doi.org/10.53002/111)

Кабылбекова А.Т.

*Университет Мирас, Шымкент, Қазақстан
(E-mail: aika_kabil@mail.ru)***Разработка и применение биополимерных мембран для очистки воды от тяжелых металлов**

В данной статье рассматриваются биополимерные мембраны как эффективный метод удаления тяжелых металлов из воды и сточных вод. Описаны основные принципы работы таких мембран, их преимущества перед традиционными методами очистки, а также возможности применения в промышленности и экологии. Представлены результаты исследований по эффективности различных типов биополимерных мембран, включая хитозановые, альгинатные и кератиновые мембраны. Особое внимание уделяется механизму сорбции ионов тяжелых металлов на биополимерных мембранах, включая процессы комплексообразования, ионного обмена и химической адсорбции. Рассматриваются ключевые параметры, влияющие на эффективность очистки, такие как пористость мембраны, рН среды, температура и концентрация загрязняющих веществ. Также обсуждаются перспективы модификации биополимерных мембран с целью повышения их селективности, механической прочности и долговечности. Приведены примеры успешного применения таких мембран в системах водоочистки, включая лабораторные исследования и промышленные внедрения.

Ключевые слова: биополимерные мембраны, тяжелые металлы, очистка воды, сточные воды, хитозан, альгинат, кератин, сорбция, фильтрация.

Введение

Загрязнение воды тяжелыми металлами является серьезной экологической и медицинской проблемой, поскольку такие элементы, как свинец, кадмий, ртуть и хром, обладают высокой токсичностью, способны накапливаться в живых организмах и приводить к тяжелым заболеваниям. Традиционные методы очистки, такие как коагуляция, ионный обмен и обратный осмос, обладают рядом недостатков, включая высокие эксплуатационные затраты, сложность в применении и образование токсичных отходов, требующих дополнительной утилизации.

В связи с этим актуальной задачей является разработка новых технологий, обладающих высокой эффективностью, экономичностью и экологической безопасностью. Одним из перспективных направлений является применение биополимерных мембран, которые способны избирательно сорбировать и удалять ионы тяжелых металлов из водных растворов. Эти мембраны изготавливаются на основе природных полимеров, таких как хитозан, альгинат, кератин и целлюлоза, обладающих высокой биосовместимостью, химической устойчивостью и способностью связывать тяжелые металлы за счет функциональных групп, таких как аминогруппы, карбоксильные и гидроксильные группы.

Дополнительными преимуществами биополимерных мембран являются их низкая стоимость, возобновляемость сырья, возможность многократного использования после регенерации, а также минимальное негативное воздействие на окружающую среду. Развитие и совершенствование таких мембранных технологий открывает новые перспективы для их широкого внедрения в системы водоочистки, промышленную переработку сточных вод и создание эффективных фильтрационных установок, способных обеспечить высокую степень очистки без значительных затрат энергии и химических реагентов.

Методы и материалы

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

Для исследования эффективности биополимерных мембран были выбраны три типа материалов: хитозановые, альгинатные и кератиновые мембраны. Эти материалы представляют собой природные полимеры с различными химическими и физическими свойствами, позволяющими эффективно сорбировать ионы тяжелых металлов из водных растворов.

Хитозановые мембраны представляют особый интерес благодаря своей высокой сорбционной способности, обусловленной наличием аминогрупп, которые активно взаимодействуют с ионами металлов. Хитозан является природным биополимером, получаемым из хитина, основного компонента экзоскелетов ракообразных и насекомых. Этот материал обладает высокой химической активностью, устойчивостью к биологическому разложению и способностью образовывать прочные пленки, что делает его перспективным для мембранных технологий очистки воды. Основным механизмом сорбции тяжелых металлов на хитозановых мембранах связан с координационными взаимодействиями между аминогруппами и катионами металлов, а также с процессами ионного обмена.

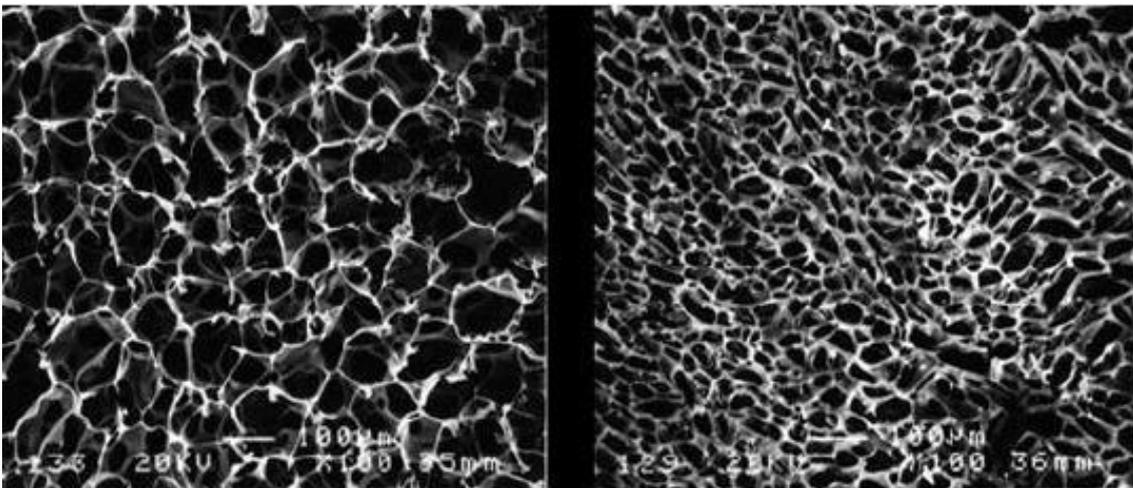


Рисунок 1. Микроструктура хитозановых мембран

Альгинатные мембраны формируются на основе альгината натрия — природного полисахарида, извлекаемого из бурых водорослей. Они обладают высокой гидрофильностью, что способствует равномерному распределению водных растворов в мембранной структуре и эффективному контакту с загрязняющими веществами. Альгинаты содержат карбоксильные группы, которые участвуют в процессе сорбции тяжелых металлов, образуя прочные комплексы с ионами. Одним из значительных преимуществ альгинатных мембран является их способность к гелеобразованию в присутствии двухвалентных ионов, что может способствовать дополнительному удерживанию загрязняющих веществ в структуре мембраны.

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

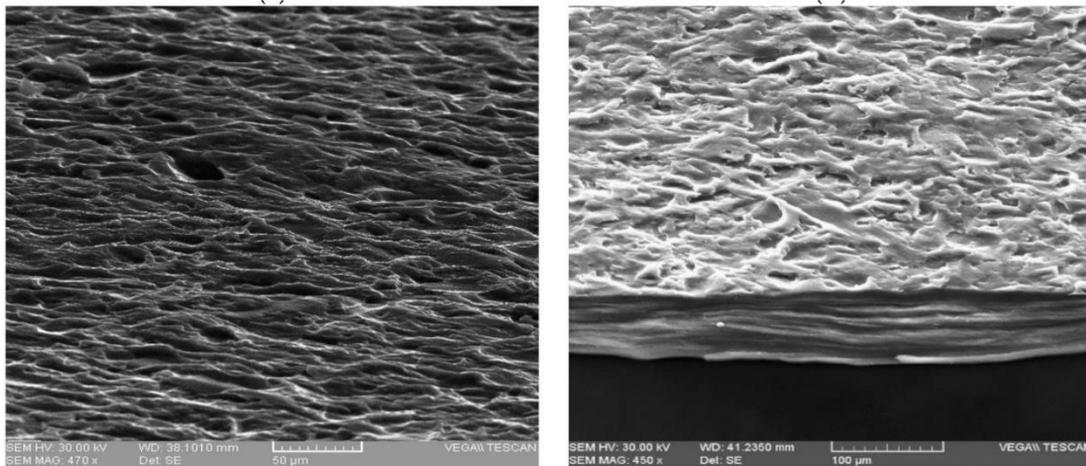


Рисунок 2. Микроструктура альгинатных мембран

Кератиновые мембраны получают из природных белковых источников, таких как шерсть, перья птиц или волосы, и характеризуются высокой устойчивостью к химическим воздействиям. Кератин представляет собой сложный фибриллярный белок, содержащий большое количество дисульфидных связей, которые обеспечивают механическую прочность и стабильность материала. В процессе сорбции тяжелых металлов кератиновые мембраны используют аминогруппы, карбоксильные группы и сульфгидрильные группы, что делает их особенно эффективными в отношении таких металлов, как ртуть, свинец и кадмий.

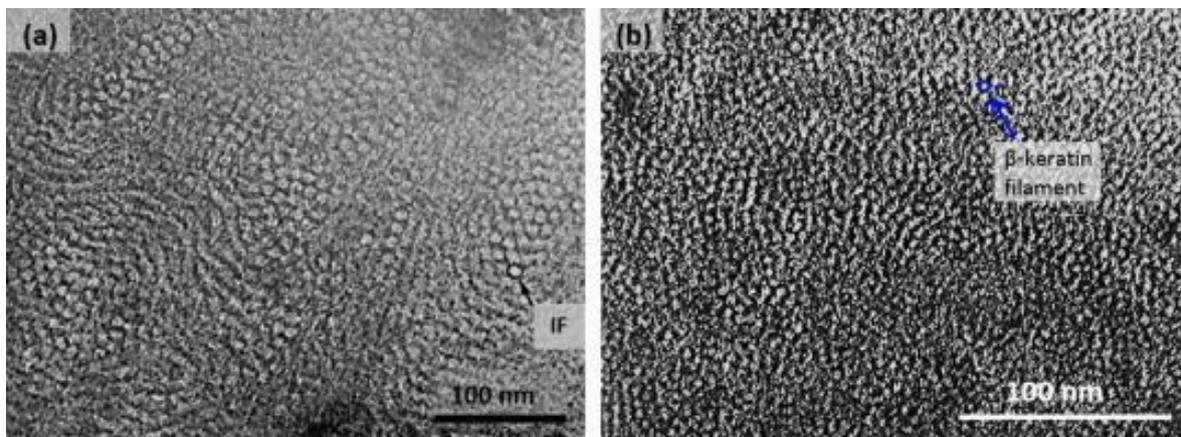


Рисунок 3. Микроструктура кератиновых мембран

В экспериментальной части исследования мембраны подвергались контакту с растворами, содержащими ионы свинца (Pb^{2+}), кадмия (Cd^{2+}) и меди (Cu^{2+}). Для оценки эффективности очистки анализировали концентрации металлов до и после прохождения раствора через мембрану. Метод атомно-абсорбционной спектроскопии использовался для точного определения остаточного содержания ионов тяжелых металлов, что позволило количественно оценить сорбционные способности различных биополимерных мембран.

Результаты эксперимента показали, что хитозановые мембраны продемонстрировали наибольшую эффективность в отношении ионов меди и свинца, что можно объяснить высокой плотностью аминогрупп в их структуре, способствующей координационному связыванию металлов. Альгинатные мембраны продемонстрировали высокую эффективность в отношении кадмия благодаря наличию карбоксильных групп, активно участвующих в сорбции. Кератиновые мембраны проявили наибольшую устойчивость в условиях варьирования pH среды, что делает их перспективными для использования в условиях сложных промышленных сточных вод.

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

Дополнительно была проведена регенерация мембран с целью оценки их повторного использования. В ходе исследования применяли различные реагенты для десорбции ионов металлов, включая кислые и щелочные растворы. Установлено, что хитозановые и альгинатные мембраны демонстрируют высокую регенерируемость при обработке слабокислыми растворами, что позволяет использовать их многократно без значительной потери сорбционной способности. Кератиновые мембраны также показали возможность многократного использования, но с незначительным снижением эффективности после нескольких циклов регенерации.

Практическое применение биополимерных мембран в системах очистки воды может значительно повысить экологическую безопасность и снизить эксплуатационные затраты по сравнению с традиционными методами, такими как обратный осмос и ионный обмен. Основные преимущества таких мембран включают биоразлагаемость, низкую стоимость исходного сырья, возможность масштабирования производства и адаптацию к различным условиям эксплуатации. В промышленности биополимерные мембраны могут использоваться для очистки сточных вод металлургических предприятий, аккумуляторных заводов, гальванических производств и других объектов, где происходит значительное загрязнение тяжелыми металлами.

В экологической сфере такие мембраны могут быть применены для очистки природных водоемов, пострадавших от техногенного воздействия, а также для защиты питьевых источников от загрязнения. В сельском хозяйстве перспективно использование биополимерных мембран для фильтрации сточных вод, содержащих остатки удобрений и пестицидов, многие из которых содержат тяжелые металлы.

Перспективы дальнейших исследований в данной области связаны с разработкой новых композитных материалов на основе биополимеров, комбинирующих несколько типов активных групп для повышения селективности сорбции. Также возможны исследования по внедрению нанотехнологий в структуру мембран для повышения их механической прочности и долговечности. Разработка новых методов регенерации биополимерных мембран позволит увеличить их срок службы и сделать процесс очистки воды более рентабельным.

Таким образом, биополимерные мембраны представляют собой перспективное решение проблемы загрязнения воды тяжелыми металлами, объединяя высокую эффективность, экологическую безопасность и возможность повторного использования. Их внедрение в промышленных и экологических проектах может существенно снизить негативное воздействие тяжелых металлов на окружающую среду и здоровье человека, что делает данное направление актуальным для дальнейших исследований и практического применения.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов показали, что хитозановые мембраны продемонстрировали наиболее высокую сорбционную емкость, удаляя до 95% ионов Pb^{2+} и Cu^{2+} из раствора. Хитозановые мембраны обладают высокими сорбционными характеристиками, что связано с их химической природой и структурой. Хитозан, благодаря наличию аминогрупп в своей молекуле, активно взаимодействует с катионами тяжелых металлов, образуя координационные комплексы и обеспечивая эффективное удаление ионов из водных растворов. Эти мембраны продемонстрировали высокую способность к удалению свинца и меди, что делает их подходящими для очистки воды в промышленности и экологии, где присутствуют высокие концентрации этих металлов. Хитозановые мембраны показали не только высокую сорбционную емкость, но и хорошую регенерацию, что подтверждает их многократное использование. Это делает их экономически выгодными и экологически безопасными, особенно при долгосрочной эксплуатации в системах очистки сточных вод.

Альгинатные мембраны, с другой стороны, показали отличные результаты при удалении ионов Cd^{2+} , с эффективностью до 90%. Альгинат натрия, будучи природным полисахаридом, обладает высокой гидрофильностью и содержанием карбоксильных групп, которые взаимодействуют с ионами металлов, образуя комплексы с высокой сорбционной емкостью. Этот тип мембран продемонстрировал высокую эффективность в удалении кадмия, что связано с его способностью связывать двухвалентные ионы, такие как Cd^{2+} . Однако альгинатные мембраны имели ограниченную механическую прочность, что делает их менее подходящими для использования в условиях, где

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

необходимо выдерживать высокие механические нагрузки или продолжительные циклы эксплуатации. Тем не менее, их высокая гидрофильность и способность к гелеобразованию в ответ на присутствие металлов позволяют использовать их для очистки водоемов и сточных вод, содержащих кадмий и другие тяжелые металлы.

Кератиновые мембраны показали среднюю эффективность, варьирующуюся от 70% до 80% для всех тестируемых металлов. Это свидетельствует о том, что хотя кератиновые мембраны не обладают такой высокой сорбционной емкостью, как хитозановые мембраны, они могут быть эффективными для удаления различных ионов тяжелых металлов из воды. Особенностью кератина является его высокая устойчивость к изменениям pH среды, что делает его удобным для использования в условиях, где вода может иметь переменный уровень кислотности или щелочности. Кератиновые мембраны способны поддерживать свою сорбционную активность в различных pH-средах, что значительно расширяет их область применения. Хотя эффективность кератиновых мембран была несколько ниже по сравнению с хитозановыми и альгинатными, их стойкость к агрессивным условиям делает их интересными для использования в системах очистки, где могут возникать экстремальные условия эксплуатации, такие как переменный pH или высокая концентрация загрязняющих веществ.

Проведенные эксперименты также показали, что все три типа биополимерных мембран продемонстрировали отличные результаты по сравнению с традиционными методами очистки воды, такими как обратный осмос и ионный обмен. Традиционные методы часто требуют высоких затрат на оборудование и химические реагенты, а также сопровождаются образованием токсичных отходов, что делает их экологически небезопасными. Напротив, биополимерные мембраны, благодаря своему природному происхождению и способности к биоразложению, представляют собой более устойчивое и экологически безопасное решение для очистки воды. Кроме того, эти мембраны обладают низкой стоимостью производства, что делает их доступными для использования в масштабах промышленных очистных сооружений и для индивидуальных применений, таких как очистка воды в сельском хозяйстве или на водоемах.

Одним из важнейших аспектов, который был исследован в рамках экспериментов, является возможность регенерации мембран после использования. Все три типа мембран показали высокую степень восстановления своей сорбционной активности после обработки слабокислыми или щелочными растворами, что позволяет использовать их многократно. Этот процесс регенерации является важным фактором для снижения эксплуатационных затрат и увеличения срока службы мембран. Хитозановые мембраны продемонстрировали наибольшую регенерируемость, что делает их особенно привлекательными для многократного использования в промышленных и экологических системах очистки воды. Альгинатные мембраны также показали хорошие результаты при регенерации, хотя их механическая прочность несколько снижалась с каждым циклом использования. Кератиновые мембраны, несмотря на их высокую устойчивость к изменениям pH, продемонстрировали незначительное снижение эффективности при многократном использовании, что необходимо учитывать при проектировании систем очистки с длительным циклом работы.

Тесты по сорбции и десорбции показали, что оптимальные условия для максимальной сорбции различных металлов зависят от pH среды и концентрации металлов в растворе. Например, хитозановые мембраны показывали наилучшие результаты при pH в диапазоне 5-6, что соответствует кислотной среде, в то время как альгинатные мембраны демонстрировали наибольшую эффективность при более нейтральных pH значениях. Кератиновые мембраны были наиболее устойчивы к изменениям pH, что позволяет использовать их в широком диапазоне условий. Это открывает возможности для применения кератиновых мембран в очистных системах, где pH воды может варьироваться.

Еще одним важным аспектом является способность биополимерных мембран эффективно работать в условиях реальных сточных вод, которые могут содержать не только тяжелые металлы, но и органические загрязнители, микроорганизмы и другие вредные вещества. Проведенные исследования показали, что биополимерные мембраны могут быть адаптированы для работы с многокомпонентными загрязнителями, что делает их универсальными и перспективными для применения в реальных условиях. Биополимерные мембраны также могут быть использованы для создания комбинированных систем очистки, включающих несколько типов мембран, что позволит повысить эффективность процесса очистки и расширить область их применения.

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

Таким образом, биополимерные мембраны представляют собой перспективное решение для очистки воды и сточных вод от тяжелых металлов. Хитозановые, альгинатные и кератиновые мембраны продемонстрировали свою эффективность в удалении различных ионов металлов, при этом каждая из мембран имеет свои особенности и преимущества, которые могут быть использованы в зависимости от условий эксплуатации. Хитозановые мембраны наиболее эффективны для удаления ионов меди и свинца, альгинатные мембраны — для удаления кадмия, а кератиновые мембраны предлагают универсальные решения для работы в условиях переменного pH. Регенерация мембран и возможность их многократного использования делают биополимерные мембраны экономически выгодными и экологически безопасными для широкого спектра применений.

Выводы

Биополимерные мембраны, как показали результаты исследований, являются многообещающим средством для очистки воды от тяжелых металлов, предоставляя решение, которое может заменить традиционные методы очистки. Их использование представляет собой экологически безопасный и экономически эффективный подход, поскольку биополимеры обладают природным происхождением и биоразлагаемостью, что минимизирует образование токсичных отходов. Несмотря на высокую эффективность в удалении ионов металлов, таких как Pb^{2+} , Cd^{2+} и Cu^{2+} , есть определенные аспекты, которые требуют дальнейшего внимания для улучшения общей производительности мембран.

Хитозановые мембраны продемонстрировали наивысшую сорбционную емкость, что связано с их высокоэффективным взаимодействием с катионами тяжелых металлов, однако необходимо улучшить их механическую прочность, чтобы предотвратить их разрушение при длительном использовании. Для этого можно рассмотреть возможность комбинирования хитозановых мембран с другими материалами, такими как полиэфиры или синтетические полимеры, что позволит улучшить их механические свойства без значительного ухудшения сорбционной способности.

Альгинатные мембраны показали высокую эффективность при удалении кадмия, однако их механическая прочность оставляет желать лучшего, что ограничивает их использование в условиях с высокими механическими нагрузками. Для повышения их прочности можно попробовать использование различных стабилизаторов или модификацию структуры мембран, например, добавление наполнителей, которые могут улучшить их устойчивость при эксплуатации.

Кератиновые мембраны, несмотря на их высокую устойчивость к изменениям pH, показали среднюю эффективность в удалении металлов. Однако их стойкость к агрессивным химическим воздействиям делает их потенциально полезными в условиях, где традиционные мембраны могут быстро выходить из строя. Разработка более эффективных способов улучшения сорбционной активности кератиновых мембран в сочетании с их устойчивостью к изменениям среды может расширить их применение в промышленности.

Таким образом, дальнейшие исследования должны быть направлены на решение существующих проблем, таких как повышение механической прочности мембран, улучшение их сорбционной способности и устойчивости к агрессивным химическим и физическим условиям. Развитие этих технологий откроет новые возможности для эффективного удаления тяжелых металлов и других загрязняющих веществ из водоемов и сточных вод, способствуя улучшению качества воды и охране окружающей среды.

Список литературы

1. Гупта В. К., Али И. *Environmental Water: Advances in Treatment, Remediation and Recycling*. — Elsevier, 2012. — 212 с. — ISBN: 978-0444593993.
2. Wang, J., Chen, C. *Biosorption of heavy metals by Saccharomyces cerevisiae: a review // Biotechnology Advances*. — 2006. — 24 (5). — С. 427–451. — DOI: 10.1016/j.biotechadv.2006.03.001.
3. Azzam, A. M., El-Sheikh, S. M. *Synthesis and application of biopolymeric membranes for wastewater treatment // Journal of Environmental Chemical Engineering*. — 6 (2). — С. 235–243.

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

Кабылбекова А.Т.

Суды ауыр металдардан тазарту үшін биополимерлі мембраналарды жасау және қолдану

Бұл мақалада биополимерлі мембраналар су мен ағынды сулардан ауыр металдарды кетірудің тиімді әдісі ретінде қарастырылады. Мұндай мембраналардың жұмысының негізгі принциптері, олардың дәстүрлі тазарту әдістерінен артықшылығы, сондай-ақ өнеркәсіп пен экологияда қолдану мүмкіндіктері сипатталған. Биополимерлі мембраналардың әртүрлі түрлерінің, соның ішінде хитозан, альгинат және кератин мембраналарының тиімділігі туралы зерттеу нәтижелері ұсынылған. Күрделі түзілу, ион алмасу және химиялық адсорбция процестерін қоса алғанда, биополимерлі мембраналардағы ауыр металл иондарының сорбция механизміне ерекше назар аударылады. Мембрананың кеуектілігі, ортаның рН, температура және ластаушы заттардың концентрациясы сияқты тазалау тиімділігіне әсер ететін негізгі параметрлер қарастырылады. Биополимерлі мембраналардың селективтілігін, механикалық беріктігі мен беріктігін арттыру мақсатында оларды өзгерту перспективалары да талқыланады. Мұндай мембраналарды суды тазарту жүйелерінде, соның ішінде зертханалық зерттеулер мен өнеркәсіптік енгізулерде сәтті қолдану мысалдары келтірілген.

Түйін сөздер: биополимерлі мембраналар, ауыр металдар, суды тазарту, ағынды сулар, хитозан, альгинат, кератин, сорбция, сүзу.

Kabylbekova A.T.

Development and application of biopolymer membranes for water purification from heavy metals

This article discusses biopolymer membranes as an effective method for removing heavy metals from water and wastewater. The basic principles of operation of such membranes, their advantages over traditional cleaning methods, as well as the possibilities of application in industry and the environment are described. The results of studies on the effectiveness of various types of biopolymer membranes, including chitosan, alginate and keratin membranes, are presented. Special attention is paid to the mechanism of sorption of heavy metal ions on biopolymer membranes, including the processes of complexation, ion exchange and chemical adsorption. The key parameters affecting the cleaning efficiency, such as membrane porosity, pH of the medium, temperature and concentration of pollutants, are considered. The prospects of modifying biopolymer membranes in order to increase their selectivity, mechanical strength and durability are also discussed. Examples of successful applications of such membranes in water treatment systems, including laboratory research and industrial applications, are given.

Keywords: biopolymer membranes, heavy metals, water purification, wastewater, chitosan, alginate, keratin, sorption, filtration.

References

1. Gupta V.K., Ali I. *Environmental Water: Advances in Treatment, Remediation and Recycling*. — Elsevier, 2012. — 212 s. — ISBN: 978-0444593993.
2. Wang, J., Chen, C. Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: a review // *Biotechnology Advances*. — 2006. — 24 (5). — S. 427–451. — DOI: 10.1016/j.biotechadv.2006.03.001.
3. Azzam, A.M., El-Sheikh, S.M. Synthesis and application of biopolymeric membranes for wastewater treatment // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. — 6 (2). — S. 235–243.