



А.А. Мынбаева, А.Аманжолкызы*, Ш.Н. Жумагалиева, Ж.А. Абилов

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект аль-Фараби, 71

*e-mail: arai13_95@list.ru

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ: ПЕРСПЕКТИВЫ В ЛЕЧЕНИИ ТРОФИЧЕСКИХ ЯЗВ

Аннотация: Хронические раны представляют серьезную проблему для современной медицины. В особенности сейчас можно наблюдать тенденцию увеличения числа пациентов с диабетическими ранами стопы. Поэтому разработка перевязочных материалов с идеальными характеристиками является одной из ключевых задач в современной медицине. Целлюлоза представляет собой перспективный материал для разработки раневых покрытий благодаря своей биосовместимости, доступности и экологичности. В данной статье поставлена цель проведения обзора исследований по гидрогелям и пленкам на основе производных целлюлозы и ее композиций для покрытия ран, опубликованных в научной литературе за последние десятилетия. Особое внимание уделено материалам, содержащим бентонит, и его влиянию на механические, сорбционные и биомедицинские свойства перевязочных покрытий. Проведён анализ отечественных и зарубежных исследований, посвящённых композитным материалам на основе карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и бентонита. Анализ, имеющихся на сегодняшний день исследований показывает, что введение бентонита в полимерные матрицы способствует увеличению механической прочности, влагопоглощающей способности и структурной стабильности покрытий. Включение глинистых частиц позволяет регулировать процесс высвобождения лекарственных веществ, повышая таким образом эффективность терапевтического воздействия. Исследования, проведенные Казахстанскими учеными, подтверждают перспективность использования местных бентонитовых глин в разработке перевязочных материалов. Развитие композитных гидрогелей и плёнок на основе производных целлюлозы и бентонита открывает новые возможности для создания эффективных биосовместимых раневых покрытий. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию их состава и структуры для повышения функциональных характеристик и терапевтической эффективности.

Ключевые слова: карбоксиметилцеллюлоза, бентонит, композиционные материалы, раневые покрытия, гидрогели, пленки, заживление раны.

Введение

Кожа – крупнейший орган человека, играющий ключевую роль в поддержании гомеостаза и защите организма от внешних воздействий. Она выполняет множество жизненно важных функций включая барьерную, терморегуляторную, сенсорную и метаболитическую. Благодаря сложной структуре, включающий эпидермис, дерму и гиподерму, этот орган обладает уникальной способностью к саморегенерации [1]. Однако, при травмировании кожных покровов, а в особенности при наличии хронических или затяжных повреждений – например, у пациентов с диабетическими язвами стопы (ДЯС) – происходит серьезное нарушение естественных защитных механизмов и процессов восстановления [2]. По данным опубликованным ВОЗ глобальным оценкам здоровья за 2019 год сахарный диабет впервые вошел в список основных причин смертности земного населения. И численность людей с сахарным диабетом растет с каждым годом [3]. По оценкам, около 20% из этих пациентов подвергается язвам нижних конечностей. Основными причинами появления язвы при сахарном диабете являются плохое кровоснабжение в стопах и периферическая невропатия [4]. Так как язва повреждает суставы глубоко, он требует постоянного ухода и значительно

ухудшает жизненный уровень пациентов. Тем самым он еще может быть причиной возникновения психологических травм у пациентов [5].

По степени выраженности поражений тканей стопы выделяют 5 стадий развития болезни (классификация Меггитт-Вагнера) (рис. 1) [6]. Этапы развития заболевания представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Стадии развития диабетической язвы стопы

Стадия	Характеристика
0	Нет поражений
1	Неинфицированное поверхностное поражение в виде язвы
2	Более глубокое поражение, охватывающее сухожилию, кости или суставную капсулу
3	Поражение глубоких тканей, развивается абсцесс, остеомиелит или тендинит
4	Гангрена пальцев ног или передней части стопы
5	Гангрена распространяется на всю стопу или ее часть, необходимо провести ампутацию

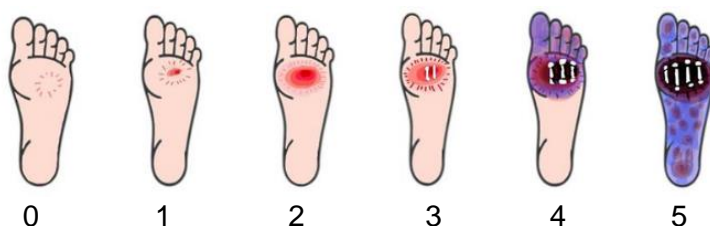


Рисунок 1 – Стадии поражения стопы [7]

Так как язва стопы является хронической болезнью от него полностью вылечится невозможно. Есть несколько подходов к ее лечению такие как своевременная обработка раны, предотвращение появления инфекции (применение антибактериальных препаратов), реваскуляризация (при наличии показаний) и разгрузка стопы [8].

Из-за того, что язва стопы медленно заживает, есть большой риск инфицирования, что может привести к ампутации конечностей вплоть до бедер [9]. Чтобы предотвратить такое течение болезни, нужно вовремя обрабатывать раневое ложе и обеспечить необходимую среду, способствующую к заживлению. Поэтому правильно подобранное раневое покрытие имеет ключевую роль. Есть несколько основных характеристик, которыми должны обладать раневые повязки. Это способность эффективно впитывать образующийся экссудат, проявление необходимой механической стойкости, предотвращение высыхания раны за счет создания влажной среды, обеспечение газообмена через материал без препятствий, нетоксичность и совместимость с живыми тканями, исключение прилипания к раневой поверхности, комфортное ношение и легкость снятия. Кроме того, она должна обладать антигрибковыми свойствами для дополнительной защиты от микробов [10]. При лечении хронических ран традиционные перевязочные материалы (марля, бинты, вата) имеют множество недостатков. Например, они недостаточно защищают от инфекций, плохо поддерживают влажность в ране, недостаточно абсорбируют при обильном выделении экссудата. Вдобавок они могут прилипать к поверхности раны, что вызывает дискомфорт пациентам при смене повязки. По этой причине в современной медицине все больше дается предпочтение к интерактивным раневым покрытиям на полимерной основе. У них имеется множество видов: пленки, гидрогели, гидроколлоиды, пены и гидроволокна [11]. Благодаря биосовместимости и схожести с биологическими молекулами для получения интерактивных раневых покрытий используются биополимеры (коллаген, полисахариды и их производные) [12].

Этот обзор посвящен ключевым достижениям в области полимерных композитов для заживления хронических ран, структурным особенностям, физико-химическим свойствам и методам получения раневых покрытий из целлюлозы и его производных, также возможностям использования органоминеральных композитных медицинских материалов на основе производных целлюлозы для лечения трофических ран.

Свойства целлюлозы и его производных

Целлюлоза широко распространенный в природе биоразлагаемый материал, получаемый в основном из растений, а также из бактерий [13]. Молекулярная структура целлюлозы состоит из последовательных молекул β -D-глюкопиранозы, которые связаны

через ковалентные ацетальные связи между экваториальными ОН-группами атома С₄ и С₁ (рис. 2) [14].

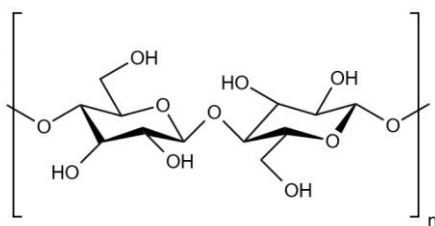


Рисунок 2 – Молекулярная структура целлюлозы

На основе химического строения целлюлозы следует отметить наличие множества сильно полярных гидроксильных групп на глюкопиранозильном кольце. Эти группы активно способствуют формированию как внутримолекулярных, так и межмолекулярных водородных связей. Природная целлюлоза имеет ряд свойств, которые затрудняют его использование биомедицинских и фармацевтических направлениях, такие как, низкая растворимость в большинстве сред, недостаточная термообрабатываемость, высокая гигроскопичность, слабое адгезионное взаимодействие и затруднения при технологической обработке. Одним из выходов устранения этих недостатков является химическая модификация, то есть получение производных целлюлозы, которое позволяет улучшить свойства природных полимеров (полисахаридов) [15].

Производные целлюлозы отличаются друг от друга химическими структурами, гигроскопичностью, поверхностной активностью и растворимостью. Они имеют обширное применение в лечении хронических ран (табл. 2) [16].

Таблица 2 – Краткое описание производных целлюлозы

Название	Свойства	Применение	Ссылки
Метилцеллюлоза (МЦ)	Термочувствительность, стабильность	Пролонгирование лекарственных веществ	[17]
Этилцеллюлоза (ЭЦ)	Термопластичность, нетоксичность, гибкость	Пленки, использования в микрокапсуляции, фармацевтической промышленности	[18]
Гидроксипропил-метилцеллюлоза (ГПМЦ)	Высокая растворимость, низкая токсичность, биосовместимость	Пленки для покрытия ран	[19]
Карбоксиметил-целлюлоза (КМЦ)	Гидрофильный, нетоксичный, биоадгезивный	Пленки и гидрогели с хорошими адсорбционными свойствами	[20]
Ацетат целлюлозы (АЦ)	Биосовместимость, биоразлагаемость, термическая стабильность	Системы для замедления высвобождения лекарственного средства	[21, 22]

Среди производных целлюлозы КМЦ показала себя как перспективный материал для создания раневых повязок: благодаря высокой гидрофильности, полной биологической совместимости, не вызывающей иммунного ответа и способствующей стимуляции производства цитокинов [23]. КМЦ – производное эфира целлюлозы, обладающая водорастворимым свойством, полученный полусинтетическим путем. На рисунке 3 представлено структура и химическая реакция получения КМЦ [27].

Большинство коммерческих гидрогелей, используемых в раневой терапии, изготавливаются на основе КМЦ с добавлением синтетических и природных полимеров и вспомогательных веществ неорганической природы (табл. 3).

Таким образом, приведенные выше результаты работ показывают, перспективность КМЦ в качестве раневого покрытия, которые будут широко использоваться в терапии хронических ран.

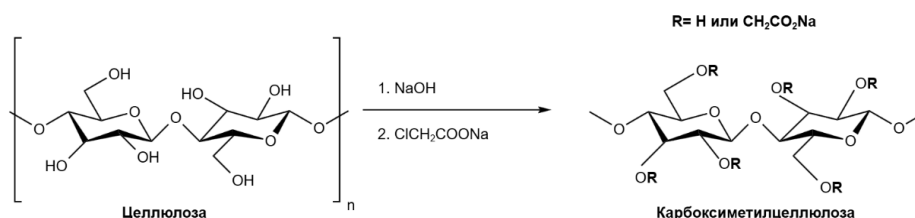


Рисунок 3 – Синтез и химическая структура КМЦ

Таблица 3 – Некоторые примеры гидрогелей на основе КМЦ, используемые в лечении хронических ран

Название продукта	Название компании	Состав	Ссылки
Purilon Gel®	Coloplast	Натриевая соль карбоксиметилцеллюлоза и более 90% очищенной воды	[24]
Intrasite Gel®	Smith & Nephew	Карбоксиметилцеллюлоза и пропиленгликоль	[25]
Solosite®	Smith & Nephew	Натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы, глицерин и очищенная вода	
Granugel®	ConvaTec	Пектин, карбоксиметилцеллюлоза и пропиленгликоль	[26]

Раневые покрытия на основе карбоксиметилцеллюлозы

Материалы для перевязки ран на основе карбоксиметилцеллюлозы, обычно, получают методами физического и химического сшивания. Так, например, в [28] работе гидрогели-суперабсорбенты получали из КМЦ и ПЭГ, с помощью химического сшивания лимонной кислотой. Это позволило создать гибридную гелевую сетку. Процесс синтеза проходил в водной среде при низкой температуре, что делает этот подход экологичным. Полученные в результате гидрогели проявили высокую способность к набуханию (до 5000%) и механическую прочность, благодаря сшиванию. Также гидрогели показали совместимость с клетками, что обеспечивает необходимый уровень клеточной целостности (более 95%). Эти характеристики имеют существенное значение для применения в медицине, особенно, для заживления хронических ран. С целью установления влияния пленок на основе КМЦ и ПЭГ авторы в [29] работе проводили эксперимент заживления ран в здоровых и диабетических условиях на моделях крыс. В результате, авторы пришли к выводу, что чистые пленки КМЦ более эффективны при заживлении ран. Это можно объяснить полисахаридной природой КМЦ, которая схожа с компонентами дермального слоя, что в свою очередь способствует образованию грануляционной ткани и уменьшению времени заживления раны. В исследовательской работе [30] так же была использована лимонная кислота в качестве сшивающего агента для получения гидрогелевых пленок на основе NaКМЦ и ГПМЦ. В ходе работы были исследованы загрузка, высвобождение лекарственных средств и антимикробная активность, в результате которых пленки показали большую степень загрузки катионных препаратов чем, анионных. А также, пленки могли высвобождать лекарственный препарат в течение длительного времени, до 72 часов. Они сохраняли антимикробную активность в течение трех дней после высвобождения лекарственного препарата, это дает дополнительное преимущество полимерным материалам для использования в лечении ран.

В работе [31] авторы получили несколько пленок в различных соотношениях N-(2-гидрокси)-пропил-3-триметиламмоний хлорид хитозан (ГТХХ)/ПВС/ NaКМЦ и исследовали структурные взаимодействия, физические и антибактериальные свойства бинарного состава (ПВС/ГТХХ) пленок с добавлением NaКМЦ. Добавление NaКМЦ в смесь ГТХХ/ПВС значительно увеличило механическую прочность, гибкость и способность к набуханию пленок. А также в [32] работе были получены гидрогели на основе ПВС и Na-КМЦ методом циклического замораживания и оттаивания.

В ходе лечения хронических ран немаловажную роль играет применение лекарственных препаратов в течение продолжительного времени, для того чтобы предотвратить инфицирование тканей. Поэтому исследование и получение раневых покрытий с загруженными лекарственными веществами является перспективным направлением в фармацевтике. Так, в работе [32] было исследовано эффективность гидрогеля ПВС/NaКМЦ как носителя антибиотика фузидата натрия в сравнении с его

традиционной мазевой формой. Было установлено, что, полученный гидрогель улучшил заживление ран по сравнению с традиционной мазью с фузидатом натрия.

В работе [33] были исследованы разработки многослойных пленочных материалов на основе NaKMC, содержащих ибупрофен в качестве активного компонента. Авторы применили метод послойного покрытия, обеспечивающий необходимое высвобождение из матрицы. Проведенный анализ показал, что использование суспензии ибупрофена является стандартом рекомендованного и длительного высвобождения лекарств, что крайне важно для разработки средств для лечения хронических ран. Полученные пленки характеризовались высокой технической прочностью, умеренной способностью к набуханию и достижением уровня pH поверхности, что обеспечивает благоприятную среду для заживления. Таким образом, результаты работы демонстрируют впечатляющую перспективность применения NaKMC для разработки эффективных повязок с комбинированным терапевтическим эффектом, включая обезболивание и поддержание влажного заживления тканей. Разработка композитных пленок на основе арабинооксиана (AK) и карбоксиметилцеллюлозы (KMC), предназначенных для приготовления антибиотиков амикацина (AMK), продемонстрировала их эффективность при лечении инфицированных ран. Пленки, полученные методом литья из раствора, обладают высокой цитосовместимостью, прочностью и способностью к продленному высвобождению антибиотика в течение 24 часов. Благодаря использованию AK и KMC удалось достичь улучшенных механических характеристик и устойчивости материала в условиях раневой среды. Кроме того, проведены тесты проявления выраженной антибактериальной активности пленок против *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* и *Pseudomonas aeruginosa*, что подтверждает их перспективность для применения в качестве повязок с контролируемым высвобождением лекарственных средств [23].

Разработка систем доставки лекарственных веществ, на основе карбоксиметилцеллюлозы, направлена на обеспечение пролонгированного высвобождения препаратов, снижение побочных эффектов и повышение эффективности терапии. Поэтому сейчас развивается направление изучения multifunctional систем, объединяющих свойства матрицы на основе гидрогелей и пленок с уникальными характеристиками наночастиц. Например, серебряные наночастицы демонстрируют выраженную антибактериальную активность, что делает их идеальными для интеграции в системы доставки лекарств. Например, оксиды таких металлов как цинка, меди, титана и серебра, а также графен и его оксид известны своими антибактериальными свойствами [34]. В [35] исследовательской работе были представлены гибридные гидрогели на основе карбоксиметилцеллюлозы (KMC) и поливинилового спирта (ПВС), модифицированных наночастицами серебра (AgNP), для применения в условиях хронических диабетических ран. Синтез гидрогелей осуществлялся методом химической сшивки с использованием лимонной кислоты, а наночастицы серебра образовывались непосредственно в полимерной матрице с использованием экологически безопасного водного процесса. Полученные гидрогели показали выраженную антибактериальную активность в отношении ряда патогенных организмов, что обеспечивает их потенциал в лечении и терапии инфекционных заболеваний, характерных для хронических ран. Уникальное сочетание антимикробных свойств наночастиц серебра и способности гидрогелей поддерживать влажную окружающую среду делает данные материалы перспективными для использования в регенеративной медицине. В то же время другие авторы [36] использовали оксид серебра (Ag_2O) в составе композитных материалов на основе KMC и коллагена для усиления антибактериальных свойств. В отличие от гидрогелей, композиты, полученные методом лиофилизации, демонстрировали высокую устойчивость к деградации под воздействием ферментов, таких как коллагеназа, и сохраняли свои свойства в течение 24 часов. Дополнительное сшивание с использованием глутарового альдегида позволило улучшить механическую стабильность и пористость матрицы, что способствовало лучшему переносу влаги и кислорода к ране. Сравнивая две работы, можно отметить, что гидрогели на основе KMC и ПВС предоставляют гибкость и адаптивность к форме раны, что делает их подходящими для лечения хронических повреждений. В то время как композиты с коллагеном ориентированы на долговечность и устойчивость в условиях сложных раневых инфекций. Оба подхода демонстрируют высокую антибактериальную активность против *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*. В работе [37] созданы нанокомпозиты на основе карбоксиметилцеллюлозы (KMC) с добавлением оксида графена (Exf-GO), акцент сделан на

разработке биосовместимых материалов для лечения ран. Синтез материалов осуществлялся методом растворного литья, позволяющего получить однородные композиты с равномерными распределениями Exf-GO в матрице. Нанокompозиты продемонстрировали антибактериальную активность против золотистого стафилококка, что подчёркивает их потенциал для предотвращения бактериальных эффектов. Это исследование подчёркивает полимерных наноматериалов для создания многофункциональных медицинских изделий.

Из-за специфических требований к полимерным перевязочным материалам они должны обеспечивать нетравматичное снятие, не оказывая прилипания к раневой поверхности. Поэтому для улучшения их эластичности и прочности к ним добавляют армирующие наноразмерные наполнители. Среди них в последнее время обрело особую популярность глинистые минералы, из-за их эффективной ассоциации с полимерной матрицей [38]. В целом, необходимо отметить нарастание интереса к раневым покрытиям на основе КМЦ в сочетании с полимерами, различными антибактериальными компонентами как органического, так и неорганического происхождения [39].

Получение композитных полимерных материалов с добавлением глинистых минералов

Несмотря на эффективность самого КМЦ в качестве основы в раневых покрытиях, специфичные требования при терапии трофических язв и хронических ран требуют расширения спектра полезных свойств [40] и ограничение таких свойств КМЦ, как высокая набухающая способность, быстрая разлагаемость, прочность материалов на ее основе, термостойкость. В целях улучшения свойств природных полимеров, в частности КМЦ, часто прибегают к получению композиционных материалов, в которых в качестве наполнителя выступает минеральный компонент. В роли усилителя свойств в композициях хорошо зарекомендовала себя бентонитовая глина, совместимая, также набухающая в воде и обладающая гелеобразующей способностью.

Глины образуются в природе под влиянием атмосферных факторов, которые воздействуют на силикаты, превращая их в алюмосиликатные соединения с характерной слоистой структуры. Поэтому, глины имеют пластинчатую структурную организацию. В зависимости от расположения тетраэдрических и октаэдрических слоев глины разделяются на три основных группы и обозначаются как: 1:1, 2:1, 2:1:1 [41] (табл. 4).

Таблица 4 – Основные группы глин

Название	Примеры	Структурные особенности
1:1	Каолинит Галлуазит	Один слой тетраэдров чередуется с одним слоем октаэдров
2:1	Смектиты (монтмориллонит, лапонит, гекторит, т.д.), вермикулиты, тальк-пирофиллиты, мика	Один слой октаэдров заключен между двумя слоями тетраэдров
2:1:1	Клоизит	Два слоя тетраэдров и один слой октаэдров имеют дополнительный слой октаэдров

Среди данных групп глин смектиты имеют высокую степень набухаемости. Это объясняется тем, что их трёхслойная структура обладает отрицательным зарядом, возникающим в результате изоморфного замещения в кристаллической решётке. Такой заряд формируется за счёт замещения трёхвалентных элементов (Al^{3+} , Fe^{3+}) на двухвалентные (Al^{2+} , Fe^{2+}) в октаэдрическом слое, а также замещения четырёхвалентного кремния (Si^{4+}) на трёхвалентный алюминий (Al^{3+}) в тетраэдрическом слое. Данный обменный процесс может происходить одновременно в обоих слоях, что приводит к формированию межслоевого отрицательного заряда. Для компенсации этого заряда в межслоевом пространстве располагаются одно-, двух- и трёхвалентные катионы, которые, связываясь с молекулами воды, образуют гидратные оболочки. Именно наличие этих гидратных слоёв и определяет способность смектитов к набуханию. Щелочные металлы, такие как натрий, демонстрируют наибольшую гидратообразующую способность, что особенно важно при создании нанокompозитных материалов, где контролируемая степень набухаемости играет ключевую роль в формировании пористой структуры и управляемом высвобождении лекарственных веществ. Монтмориллонит, являясь одним из представителей смектитовых глин, обладает значительной способностью к набуханию благодаря наличию натрия в качестве основного

обменного катиона. Глина, содержащая не менее 70% минерала монтмориллонита, называется бентонитом [42, 43]. К ряду еще одного достоинства бентонита входит его антибактериальная активность против различных типов бактерий [44]. В [45] исследовании рассмотрен процесс получения нанокомпозитных плёнок на основе гидроксиэтилцеллюлозы (ГЭЦ) и бентонита с акцентом на их структурные и функциональные свойства. Композитные материалы были сформированы методом диспергирования бентонита в растворе полимера, что обеспечило равномерное распределение минерального наполнителя в матрице. Согласно результатам рентгенодифракционного анализа, введение бентонита привело к увеличению межслоевого расстояния в его структуре, что свидетельствует о формировании интеркалированного нанокомпозита. Добавление бентонита привело к значительному улучшению механических характеристик плёнок, включая прочность на разрыв и эластичность, а также повысило их устойчивость к набуханию. Кроме того, было выявлено, что полученные композиты проявляют фунгистатическую активность в отношении *Candida albicans*, что расширяет их потенциальные области применения. Полученные результаты подтверждают, что введение бентонита в состав полимерных матриц, не обладающих собственной антимикробной активностью, может существенно улучшать физико-химические свойства материалов и наделять их дополнительными функциями. Так же были разработаны нанокомпозитные плёнки на основе хитозана и бентонита, предназначенные для применения в раневой терапии. Плёнки синтезированы методом растворного литья, что обеспечило равномерное распределение компонентов в полимерной матрице. Взаимодействие отрицательно заряженного бентонита и положительно заряженного хитозана было подтверждено методом ИК-Фурье-спектроскопии, а их морфология изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии. Физико-химические исследования показали, что добавление бентонита значительно повышает механическую прочность и способность к поглощению влаги, что является важным свойством для раневых покрытий. Наличие бентонита также улучшило гибкость материала, повышая его устойчивость к многократному сгибанию. Кроме того, исследования антибактериальной активности продемонстрировали выраженный ингибирующий эффект нанокомпозитных плёнок в отношении как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий, что подтверждает их потенциальную эффективность в профилактике инфекций [46].

Крупные природные скопления натриевых бентонитов в Казахстане представлены Манракским месторождением на востоке, Кызыл-Жарским на западе и Кынгракским на юге страны [43]. Широкое распространение бентонитовых глин на территории Казахстана создаёт благоприятные условия для развития исследований в области композиционных материалов на их основе. Отечественные исследователи изучали композиционные гидрогели на основе натрий-карбоксиметилцеллюлозы (NaКМЦ) и бентонита, стремясь улучшить их механические и сорбционные свойства. Так, например в [47] работе были получены гидрогели при различных массовых соотношениях (75:25, 50:50, 25:75) Na-КМЦ к бентониту. Анализ набухаемости показал, что степень набухаемости глины в растворах NaКМЦ достигает максимума при низкой концентрации полисахарида (0.1 %), однако при дальнейшем увеличении концентрации (0.3 %) набухаемость снижается почти в два раза, что связано с агрегацией частиц. Исследование методом электрофореза подтвердило стабильность комплексов за счет водородных связей, а сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) выявила образование однородных структур. Дополнительно была изучена сорбция и высвобождение местного анестетика рихлокаина. Установлено, что сорбция достигает 75-95 % в течение 3-4 часов, процесс десорбции продолжается до 24 часов. То есть достигается постепенное и продолжительное высвобождение местного анестетика. Таким образом, результаты данного исследования подтверждают перспективность разработки композитных материалов на основе Na-КМЦ и бентонита с улучшенными механическими и сорбционными характеристиками, что делает их потенциально применимыми в качестве раневых покрытий и сорбционных материалов для биомедицинских целей.

Необходимо отметить, что производные целлюлозы и глинистые минералы являются экологичными, природными и доступными компонентами многофункциональных материалов. Так, на основе глин в последние годы создаются композиционные носители [48-54] наночастиц, энзимов, протеинов, лекарственных веществ для применения в различных областях медицины. Имеющиеся немногочисленные работы в области создания

композиционных материалов Na-KМЦ и бентонитовой глины представляют для исследователей широкое поле для дальнейших исследований, а свойства самих материалов показывают перспективу создания раневых покрытий и носителей биологически активных веществ на их основе.

Заключение

В данном обзоре рассматривались исследования по получению раневых покрытий на основе NaКМЦ, бентонита и их композитов. Показано, что такие материалы обладают хорошими адгезионными, гидрофильными и биосовместимыми свойствами, что делает их перспективными для медицинского применения. Однако количество работ, посвященных исследованию композиционных материалов на основе NaКМЦ и бентонита, остается ограниченным, что открывает возможности для проведения исследований в данной области. В частности, актуальными направлениями являются оптимизация состава и структуры композитов для повышения химической прочности и регулирования скорости деградации в биологических средах. Отмечено, что Казахстан обладает значительными запасами бентонита, что делает использование этого минерала в составе раневых покрытий перспективным направлением для развития науки и промышленности в стране. Локальное производство таких биоматериалов позволит снизить дефицит импортных медицинских продуктов, а также открыть новые возможности для использования ресурсов страны в медицине.

Список литературы

1. 3D Cell Printing of Perfusable Vascularized Human Skin Equivalent Composed of Epidermis, Dermis, and Hypodermis for Better Structural Recapitulation of Native Skin / B.S. Kim et al // *Advanced Healthcare Materials*. – 2019. – V. 8, Issue 7. <https://doi.org/10.1002/adhm.201801019>.
2. Advances in Skin Regeneration Using Tissue Engineering / K. Vig et al // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2017. – V. 18, Issue 4. – P. 789. <https://doi.org/10.3390/ijms18040789>.
3. The top 10 causes of death. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>.
4. Shengji ointment combined with bromelain promotes granulation of exposed tendons in diabetic foot ulcers: A multicenter, randomized, positive-controlled clinical trial / X. Sun et al // *Heliyon*. – 2024. – V. 10, Issue 22. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39716>.
5. Prevalence, risk level and risk factors of diabetic foot ulcer among adult individuals with diabetes in the Southeastern Anatolia Region of Türkiye / M. Kilic et al // *Journal of Tissue Viability*. – 2024. – V. 34, Issue 1. <https://doi.org/10.1016/j.jtv.2024.12.003>.
6. The Dysvascular Foot: A System for Diagnosis and Treatment / F.W. Wagner // *Foot & Ankle*. – 1981. – V.2, Issue 2. – P. 64-122. <https://doi.org/10.1177/107110078100200202>.
7. Hyperglycaemia-Linked Diabetic Foot Complications and Their Management Using Conventional and Alternative Therapies / P. Ansari et al // *Applied Sciences*. – 2022. – V. 12, Issue 22. <https://doi.org/10.3390/app122211777>.
8. Management of diabetic foot ulcers / K. Alexiadou et al // *Diabetes therapy: research, treatment and education of diabetes and related disorders*. – 2012. – V. 3, Issue 1. – P. 4. <https://doi.org/10.1007/s13300-012-0004-9>.
9. Application of a collagen matrix dressing on a neuropathic diabetic foot ulcer: a randomised control trial / G.E. Djavid et al // *Journal of wound care*. – 2020. – V. 29, Issue 3. – P. 13-18. <https://doi.org/10.12968/jowc.2020.29.sup3.s13>.
10. Wound Healing: From Passive to Smart Dressings / M. Farahani et al // *Advanced healthcare materials*. – 2021. – V. 10, Issue 16. <https://doi.org/10.1002/adhm.202100477>.
11. Interactive dressings and topical agents / R.J. Morin et al // *Clinics in plastic surgery*. – 2007. – V. 34, Issue 4. – P. 643-658. <https://doi.org/10.1016/j.cps.2007.07.004>.
12. Design and evaluation of new wound dressings based on collagen-cellulose derivatives / E-E. Tudoroiu // *Materials & Design*. – 2023. – V. 236. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112469>.
13. Cellulose ionogels: Recent advancement in material, design, performance and applications / Q. Chen et al // *Resources Chemicals and Materials*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.recmm.2024.12.001>.
14. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material / D. Klemm et al // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2005. – V. 44, Issue 22. – P. 3358-3393. <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>.

15. Cellulose-Based Gels / H. Kang et al // *Macromolecular Chemistry and Physics*. – 2016. – V. 217. – P. 1322-1334. <http://doi.org/10.1002/macp.201500493>.
16. An Overview of Cellulose Derivatives-Based Dressings for Wound-Healing Management / E.E. Tudoroiu et al // *Pharmaceuticals*. – 2021. – V. 14, Issue 12. – P. 1215. <https://doi.org/10.3390/ph14121215>.
17. Thermo-responsive keratin-methylcellulose self-healing injectable hydrogel accelerating full-thickness wound healing by – promoting rapid epithelialization / K. Dixit et al // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – V. 263, Issue 1. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130073>.
18. Fabrication of honey-loaded ethylcellulose/gum tragacanth nanofibers as an effective antibacterial wound dressing / M. Ghorbani // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2021. – V. 621. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126615>.
19. Porous antimicrobial crosslinked film of hydroxypropyl methylcellulose/carboxymethyl starch incorporating gallic acid for wound dressing application / V. Pitpisutkul et al // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – V. 256, Issue 1. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128231>.
20. Asymmetric chitosan-derivative/carboxymethylcellulose layer-by-layer film combining antimicrobial and vascular regeneration for the repair of infected wounds / F. Yang et al // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – V. 269, Issue 2. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132031>.
21. Medicated tri-layer fibers based on cellulose acetate and polyvinylpyrrolidone for enhanced antibacterial and wound healing properties / M. Wang et al // *Carbohydrate Polymers*. – 2025. – V. 348 <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122856>.
22. Nanoparticles loaded triple-layered cellulose-acetate based multifunctional dressing for wound healing / S.S. Dugam et al // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – V. 276. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133837>.
23. Arabinoxylan-Carboxymethylcellulose Composite Films for Antibiotic Delivery to Infected Wounds / N.K. Alruwaili et al // *Polymers*. – 2022. – V. 14, Issue 9. – P. 1769. <https://doi.org/10.3390/polym14091769>.
24. WoundRes Collagen Hydrogel. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.coloplast.us/woundres-collagen-hydrogel-1-en-us.aspx>.
25. Health Care Professionals. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.smith-nephew.com/en/health-care-professionals>.
26. ConvaTec. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.convatec.co.uk/>.
27. Chitosan/carboxymethyl cellulose wound dressings supplemented with biologically synthesized silver nanoparticles from the ligninolytic fungus *Anamorphous Bjerkandera* sp. R1 / Echavarría J. Osorio et al // *Heliyon*. – 2022. – V. 8, Issue 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10258>.
28. Superabsorbent crosslinked carboxymethyl cellulose-PEG hydrogels for potential wound dressing applications / N.S.V. Capanema et al // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2018. – V. 106. – P. 1218–1234. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.124>.
29. Characterization and Evaluation of Carboxymethyl Cellulose-Based Films for Healing of Full-Thickness Wounds in Normal and Diabetic Rats / P. Basu // *ACS omega*. – 2018. – V. 3, Issue 10. – P. 12622–12632. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02015>.
30. Fabrication, characterization and drug loading efficiency of citric acid crosslinked NaCMC-HPMC hydrogel films for wound healing drug delivery applications / K. Dharmalingam et al // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2019. – V. 134. – P. 815-829. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.027>.
31. Quaternized chitosan/polyvinyl alcohol/sodium carboxymethylcellulose blend film for potential wound dressing application / D. Hu et al // *Wound Medicine*. – 2017. – V. 16. – P. 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.wndm.2016.12.003>.
32. Wound healing evaluation of sodium fucidate-loaded polyvinylalcohol/sodium carboxymethylcellulose-based wound dressing / J.H. Lee et al // *Archives of pharmacological research*. – 2010. – V. 33, Issue 7. – P. 1083–1089. <https://doi.org/10.1007/s12272-010-0715-2>.
33. Formulation of Novel Layered Sodium Carboxymethylcellulose Film Wound Dressings with Ibuprofen for Alleviating Wound Pain / L. Vinklárková et al // *BioMed research international*. – 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/892671>.

34. Nanomaterial strategies in wound healing: A comprehensive review of nanoparticles, nanofibres and nanosheets / M. Afshar et al // *International Wound Journal*. – 2024. – V. 21, Issue 7. <https://doi.org/10.1111/iwj.14953>.
35. Bioengineered Water-Responsive Carboxymethyl Cellulose/Poly(vinyl alcohol) Hydrogel Hybrids for Wound Dressing and Skin Tissue Engineering Applications / N.S.V. Capanema et al // *Gels*. – 2023. – V. 9, Issue 2. – P. 166. <https://doi.org/10.3390/gels9020166>.
36. Collagen-Carboxymethylcellulose Biocomposite Wound-Dressings with Antimicrobial Activity / I.A. Neacsu et al // *Materials*. – 2021. – V. 14. – P. 1153. <https://doi.org/10.3390/ma14051153>.
37. Graphene Oxide Carboxymethylcellulose Nanocomposite for Dressing Materials / M.L. Saladino et al // *Materials*. – 2020. – V. 13. – P. 1980. <https://doi.org/10.3390/ma13081980>.
38. PVA–clay nanocomposite hydrogels for wound dressing / M. Kokabi et al // *European Polymer Journal*. – 2007. – V. 43, Issue 3. – P. 773-781. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2006.11.030>.
39. A review of carboxymethyl cellulose composite-based hydrogels in drug delivery applications. Y. Gupta et al // *Results in Chemistry*. – 2024. – V. 10. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101695>.
40. Biodegradable Cellulose-based Hydrogels: Design and Applications / A. Sannino et al // *Materials*. – 2009. – V. 2. – P. 353-373. <https://doi.org/10.3390/ma2020353>.
41. The Use of Some Clay Minerals as Natural Resources for Drug Carrier Applications / M. Massaro et al // *Journal of Functional Biomaterials*. – 2018. – V. 9, Issue 4. – P. 58. <https://doi.org/10.3390/jfb9040058>.
42. Возможности использования бентонитовых глин в медицине / Н.Т. Гылымхан и др. // *Доклады Национальной академии Республики Казахстан*. – 2016. – № 4. – С. 24-33.
43. Application of montmorillonite in bentonite as a pharmaceutical excipient in drug delivery systems / J. Park et al // *Journal of Pharmaceutical Investigation*. – 2016. – V. 46, Issue 4. – P. 363-375. <https://doi.org/10.1007/s40005-016-0258-8>.
44. Лечебные свойства бентонита / Ф.Ш. Назарова и др. // *Достижения науки и образования*. – 2020. – № 5. – С. 59.
45. Структура и биологическая активность композитов гидроксипропилцеллюлозы/бентонит / Е.В. Гараско и др. // *Успехи современного естествознания*. – 2015. – № 11-1. – С. 20-25.
46. Preparation and characterization of chitosan-bentonite nanocomposite films for wound healing application / N. Devi et al // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2017. – V. 104. – P. 1897-1904. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.080>.
47. Глинистые композиции натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы в качестве носителя рихлокаина / Ш.Н. Жумагалиева // *Известия НАН РК. Серия химическая*. – 2008. – № 5. – С. 63-66.
48. Exploring the cellular uptake of hectorite clay mineral and its drug carrier capabilities / M. Notarbartolo // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. – 2022. – V. 220. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112931>.
49. Functionalizing graphene with clay nanosheets as a protein carrier / Q. Wang et al // *Colloid and Interface Science Communications*. – 2022. – V. 48. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2022.100618>.
50. Clay/au nanoparticle composites as acetylcholinesterase carriers and modified-electrode materials: A comparative study / A. Phongphut et al // *Applied Clay Science*. – 2020. – V. 194. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105704>.
51. Clay/chitosan biocomposite systems as novel green carriers for covalent immobilization of food enzymes / I. Cacciotti et al // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – V. 8, Issue 4. – P. 3644-3652. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.002>.
52. Preparation and characterization of dicarboxylic acid modified starch-clay composites as carriers for pesticide delivery / Sh. Jain et al // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2020. – V. 13, Issue 11. – P. 7990-8002. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.09.028>.
53. Evaluation of clay-ionene nanocomposite carriers for controlled drug delivery: Synthesis, in vitro drug release, and kinetics / H. El-Hamshary et al // *Materials Chemistry and Physics*. – 2019. – V. 225. – P. 122-132. <https://doi.org/10.3390/molecules28155895>.
54. Complex of chitosan pectin and clay as diclofenac carrier / D. Cheikh et al // *Applied Clay Science*. – 2019. – V. 172. – P. 155-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2019.03.004>.

References

1. 3D Cell Printing of Perfusable Vascularized Human Skin Equivalent Composed of Epidermis, Dermis, and Hypodermis for Better Structural Recapitulation of Native Skin / B.S. Kim et al // *Advanced Healthcare Materials*. – 2019. – V. 8, Issue 7. <https://doi.org/10.1002/adhm.201801019>. (In English).
2. Advances in Skin Regeneration Using Tissue Engineering / K. Vig et al // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2017. – V. 18, Issue 4. – R. 789. <https://doi.org/10.3390/ijms18040789>. (In English).
3. The top 10 causes of death. [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>. (In English).
4. Shengji ointment combined with bromelain promotes granulation of exposed tendons in diabetic foot ulcers: A multicenter, randomized, positive-controlled clinical trial / X. Sun et al // *Heliyon*. – 2024. – V. 10, Issue 22. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39716>. (In English).
5. Prevalence, risk level and risk factors of diabetic foot ulcer among adult individuals with diabetes in the Southeastern Anatolia Region of Türkiye / M. Kilic et al // *Journal of Tissue Viability*. – 2024. – V. 34, Issue 1. <https://doi.org/10.1016/j.jtv.2024.12.003>. (In English).
6. The Dysvascular Foot: A System for Diagnosis and Treatment / F.W. Wagner // *Foot & Ankle*. – 1981. – V.2, Issue 2. – P. 64-122. <https://doi.org/10.1177/107110078100200202>. (In English).
7. Hyperglycaemia-Linked Diabetic Foot Complications and Their Management Using Conventional and Alternative Therapies / P. Ansari et al // *Applied Sciences*. – 2022. – V. 12, Issue 22. <https://doi.org/10.3390/app122211777>. (In English).
8. Management of diabetic foot ulcers / K. Alexiadou et al // *Diabetes therapy: research, treatment and education of diabetes and related disorders*. – 2012. – V. 3, Issue 1. – P. 4. <https://doi.org/10.1007/s13300-012-0004-9>. (In English).
9. Application of a collagen matrix dressing on a neuropathic diabetic foot ulcer: a randomised control trial / G.E. Djavid et al // *Journal of wound care*. – 2020. – V. 29, Issue 3. – P. 13-18. <https://doi.org/10.12968/jowc.2020.29.sup3.s13>. (In English).
10. Wound Healing: From Passive to Smart Dressings / M. Farahani et al // *Advanced healthcare materials*. – 2021. – V. 10, Issue 16. <https://doi.org/10.1002/adhm.202100477>. (In English).
11. Interactive dressings and topical agents / R.J. Morin et al // *Clinics in plastic surgery*. – 2007. – V. 34, Issue 4. – P. 643-658. <https://doi.org/10.1016/j.cps.2007.07.004>. (In English).
12. Design and evaluation of new wound dressings based on collagen-cellulose derivatives / E-E. Tudoroiu // *Materials & Design*. – 2023. – V. 236. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112469>. (In English).
13. Cellulose ionogels: Recent advancement in material, design, performance and applications / Q. Chen et al // *Resources Chemicals and Materials*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.recm.2024.12.001>. (In English).
14. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material / D. Klemm et al // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2005. – V. 44, Issue 22. – P. 3358-3393. <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>. (In English).
15. Cellulose-Based Gels / H. Kang et al // *Macromolecular Chemistry and Physics*. – 2016. – V. 217. – P. 1322-1334. <http://doi.org/10.1002/macp.201500493>. (In English).
16. An Overview of Cellulose Derivatives-Based Dressings for Wound-Healing Management / E.E. Tudoroiu et al // *Pharmaceuticals*. – 2021. – V. 14, Issue 12. – P. 1215. <https://doi.org/10.3390/ph14121215>. (In English).
17. Thermoresponsive keratin-methylcellulose self-healing injectable hydrogel accelerating full-thickness wound healing by – promoting rapid epithelialization / K. Dixit et al // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – V. 263, Issue 1. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130073>. (In English).
18. Fabrication of honey-loaded ethylcellulose/gum tragacanth nanofibers as an effective antibacterial wound dressing / M. Ghorbani // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2021. – V. 621. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126615>. (In English).
19. Porous antimicrobial crosslinked film of hydroxypropyl methylcellulose/carboxymethyl starch incorporating gallic acid for wound dressing application / V. Pitpisutkul et al // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – V. 256, Issue 1. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128231>. (In English).

20. Asymmetric chitosan-derivative/carboxymethylcellulose layer-by-layer film combining antimicrobial and vascular regeneration for the repair of infected wounds / F. Yang et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – V. 269, Issue 2. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132031>. (In English).
21. Medicated tri-layer fibers based on cellulose acetate and polyvinylpyrrolidone for enhanced antibacterial and wound healing properties / M. Wang et al // Carbohydrate Polymers. – 2025. – V. 348 <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122856>. (In English).
22. Nanoparticles loaded triple-layered cellulose-acetate based multifunctional dressing for wound healing / S.S. Dugam et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – V. 276. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133837>. (In English).
23. Arabinoxylan-Carboxymethylcellulose Composite Films for Antibiotic Delivery to Infected Wounds / N.K. Alruwaili et al // Polymers. – 2022. – V. 14, Issue 9. – P. 1769. <https://doi.org/10.3390/polym14091769>. (In English).
24. WoundRes Collagen Hydrogel. [Ehlektronnyi resurs] – Rezhim dostupa: <https://www.coloplast.us/woundres-collagen-hydrogel-1-en-us.aspx>. (In English).
25. Health Care Professionals. [Ehlektronnyi resurs] – Rezhim dostupa: <https://www.smith-nephew.com/en/health-care-professionals>. (In English).
26. ConvaTec. [Ehlektronnyi resurs] – Rezhim dostupa: <http://www.convatec.co.uk/>. (In English).
27. Chitosan/carboxymethyl cellulose wound dressings supplemented with biologically synthesized silver nanoparticles from the ligninolytic fungus Anamorphous Bjerkandera sp. R1 / Echavarría J. Osorio et al // Heliyon. – 2022. – V. 8, Issue 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10258>. (In English).
28. Superabsorbent crosslinked carboxymethyl cellulose-PEG hydrogels for potential wound dressing applications / N.S.V. Capanema et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2018. – V. 106. – P. 1218–1234. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.124>. (In English).
29. Characterization and Evaluation of Carboxymethyl Cellulose-Based Films for Healing of Full-Thickness Wounds in Normal and Diabetic Rats / P. Basu // ACS omega. – 2018. – V. 3, Issue 10. – P. 12622–12632. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02015>. (In English).
30. Fabrication, characterization and drug loading efficiency of citric acid crosslinked NaCMC-HPMC hydrogel films for wound healing drug delivery applications / K. Dharmalingam et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2019. – V. 134. – P. 815-829. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.027>. (In English).
31. Quaternized chitosan/polyvinyl alcohol/sodium carboxymethylcellulose blend film for potential wound dressing application / D. Hu et al // Wound Medicine. – 2017. – V. 16. – P. 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.wndm.2016.12.003>. (In English).
32. Wound healing evaluation of sodium fucidate-loaded polyvinylalcohol/sodium carboxymethylcellulose-based wound dressing / J.H. Lee et al // Archives of pharmacal research. – 2010. – V. 33, Issue 7. – P. 1083–1089. <https://doi.org/10.1007/s12272-010-0715-2>. (In English).
33. Formulation of Novel Layered Sodium Carboxymethylcellulose Film Wound Dressings with Ibuprofen for Alleviating Wound Pain / L. Vinklárková et al // BioMed research international. – 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/892671>. (In English).
34. Nanomaterial strategies in wound healing: A comprehensive review of nanoparticles, nanofibres and nanosheets / M. Afshar et al // International Wound Journal. – 2024. – V. 21, Issue 7. <https://doi.org/10.1111/iwj.14953>. (In English).
35. Bioengineered Water-Responsive Carboxymethyl Cellulose/Poly(vinyl alcohol) Hydrogel Hybrids for Wound Dressing and Skin Tissue Engineering Applications / N.S.V. Capanema et al // Gels – 2023. – V. 9, Issue 2. – P. 166. <https://doi.org/10.3390/gels9020166>. (In English).
36. Collagen-Carboxymethylcellulose Biocomposite Wound-Dressings with Antimicrobial Activity / I.A. Neacsu et al // Materials. – 2021. – V. 14. – P. 1153. <https://doi.org/10.3390/ma14051153>. (In English).
37. Graphene Oxide Carboxymethylcellulose Nanocomposite for Dressing Materials / M.L. Saladino et al // Materials. – 2020. – V. 13. – P. 1980. <https://doi.org/10.3390/ma13081980>. (In English).
38. PVA–clay nanocomposite hydrogels for wound dressing / M. Kokabi et al // European Polymer Journal. – 2007. – V. 43, Issue 3. – P. 773-781. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2006.11.030>. (In English).

39. A review of carboxymethyl cellulose composite-based hydrogels in drug delivery applications. Y. Gupta et al // Results in Chemistry. – 2024. – V. 10. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101695>. (In English).
40. Biodegradable Cellulose-based Hydrogels: Design and Applications / A. Sannino et al // Materials. – 2009. – V. 2. – P. 353-373. <https://doi.org/10.3390/ma2020353>. (In English).
41. The Use of Some Clay Minerals as Natural Resources for Drug Carrier Applications / M. Massaro et al // Journal of Functional Biomaterials. – 2018. – V. 9, Issue 4. – P. 58. <https://doi.org/10.3390/jfb9040058>. (In English).
42. Vozmozhnosti ispol'zovaniya bentonitovykh glin v meditsine / N.T. Gylymkhan i dr. // Doklady Natsional'noi akademii Respubliki Kazakhstan. – 2016. – № 4. – S. 24-33. (In Russian).
43. Application of montmorillonite in bentonite as a pharmaceutical excipient in drug delivery systems / J. Park et al // Journal of Pharmaceutical Investigation. – 2016. – V. 46, Issue 4. – P. 363-375. <https://doi.org/10.1007/s40005-016-0258-8>. (In English).
44. Lechebnye svoystva bentonita / F.SH. Nazarova i dr. // Dostizheniya nauki i obrazovaniya. – 2020. – № 5. – S. 59. (In Russian).
45. Ctruktura i biologicheskaya aktivnost' kompozitov gidroksietiltellyulozy/bentonit / E.V. Garas'ko i dr. // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. – 2015. – № 11-1. – S. 20-25. (In Russian).
46. Preparation and characterization of chitosan-bentonite nanocomposite films for wound healing application / N. Devi et al // International Journal of Biological Macromolecules. – 2017. – V. 104. – 1897-1904. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.080>. (In English).
47. Glinistye kompozitsii natrievoi soli karboksietiltellyulozy v kachestve nositelya rikhlokaina / SH.N. Zhumagaliyeva // Izvestiya NAN RK. Seriya khimicheskaya. – 2008. – № 5. – S. 63-66. (In Russian).
48. Exploring the cellular uptake of hectorite clay mineral and its drug carrier capabilities / M. Notarbartolo // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2022. – V. 220. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112931>. (In English).
49. Functionalizing graphene with clay nanosheets as a protein carrier / Q. Wang et al // Colloid and Interface Science Communications. – 2022. – V. 48. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2022.100618>. (In English).
50. Clay/au nanoparticle composites as acetylcholinesterase carriers and modified-electrode materials: A comparative study / A. Phongphut et al // Applied Clay Science. – 2020. – V. 194. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105704>. (In English).
51. Clay/chitosan biocomposite systems as novel green carriers for covalent immobilization of food enzymes / I. Cacciotti et al // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – V. 8, Issue 4. – P. 3644-3652. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.002>. (In English).
52. Preparation and characterization of dicarboxylic acid modified starch-clay composites as carriers for pesticide delivery / Sh. Jain et al // Arabian Journal of Chemistry. – 2020. – V. 13, Issue 11. – P. 7990-8002. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.09.028>. (In English).
53. Evaluation of clay-ionene nanocomposite carriers for controlled drug delivery: Synthesis, in vitro drug release, and kinetics / H. El-Hamshary et al // Materials Chemistry and Physics. – 2019. – V. 225. – P. 122-132. <https://doi.org/10.3390/molecules28155895>. (In English).
54. Complex of chitosan pectin and clay as diclofenac carrier / D. Cheikh et al // Applied Clay Science. – 2019. – V. 172. – P. 155-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2019.03.004>. (In English).

Финансирование: данное исследование финансируется Комитетом Науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP22684531, «Разработка гидрогелевых форм растительных экстрактов на основе ГПМЦ»).

А.А. Мыңбаева, А.Аманжолқызы*, Ш.Н. Жумағалиева, Ж.Ә. Әбілов

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Әл-Фараби даңғылы, 71

*e-mail: arai13_95@list.ru

ЦЕЛЛЮЛОЗА ТУЫНДЫЛАРЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛДАР: ТРОФИКАЛЫҚ ЖАРАЛАРДЫ ЕМДЕУДЕГІ МҮМКІНДІКТЕРІ

Созылмалы жаралар қазіргі медицинаның алдында тұрған күрделі мәселелердің бірі болып табылады. Әсіресе, қазіргі уақытта диабеттік табан жаралары бар пациенттердің санының артуы

үрдісі байқалады. Осыған байланысты мінсіз қасиеттерге ие таңғыш материалдарды әзірлеу – бүгінгі медицинаның басты міндеттерінің бірі. Целлюлоза өзінің биоүйлесімділігімен, қолжетімділігімен және экологиялық қауіпсіздігімен ерекшеленетін болашағы зор материал болып саналады. Бұл мақалада соңғы онжылдықтарда ғылыми әдебиетте жарияланған жараларды жабуға арналған целлюлоза туындылары мен оның композициялары негізіндегі гидрогельдер мен үлдірлер бойынша зерттеулерге шолу жасау мақсаты қойылды. Зерттеулерде ерекше назар бентонит қосылған материалдарға және оның таңғыш жабындардың механикалық, сорбциялық және биомедициналық қасиеттеріне әсеріне аударылды. Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) мен бентонит негізіндегі композиттік материалдарға арналған отандық және шетелдік зерттеулерге талдау жүргізілді. Бүгінгі күнге дейінгі зерттеулер көрсеткендей, бентонитті полимерлі матрицаларға енгізу жабындардың механикалық беріктігін, ылғал сіңіру қабілетін және құрылымдық тұрақтылығын арттырады. Сонымен қатар, саз бөлшектерін қосу дәрілік заттардың бөліну процесін реттеуге мүмкіндік беріп, терапиялық әсердің тиімділігін жоғарылатады. Қазақстандық ғалымдар жүргізген зерттеулер жергілікті бентонитті саздарды таңғыш материалдарды әзірлеуде пайдаланудың болашағы зор екенін растайды. Целлюлоза туындылары мен бентонит негізіндегі композиттік гидрогельдер мен үлдірлерді дамыту биосыйымды, тиімді жара жабыны материалдарын жасауға жаңа мүмкіндіктер ашады. Алдағы зерттеулер олардың құрамын және құрылымын оңтайландыруға бағытталуы тиіс, бұл өз кезегінде олардың функционалдық қасиеттері мен терапиялық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: карбоксиметилцеллюлоза, бентонит, композициялық материалдар, жара жабындары, гидрогелдер, үлдірлер, жараны емдеу.

A.A. Myngbayeva, A. Amanzholkyzy*, Sh.N. Zhumagalieva, Zh.A. Abilov

Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi ave., 71
*e-mail: arai13_95@list.ru

COMPOSITE MATERIALS BASED ON CELLULOSE DERIVATIVES: PROSPECTS IN THE TREATMENT OF TROPHIC ULCERS

Chronic wounds pose a serious challenge to modern medicine. There is now a trend towards an increase in the number of patients with diabetic foot wounds. Therefore, the development of dressing materials with ideal characteristics is one of the key tasks in modern medicine. Cellulose is a promising material for the development of wound dressings due to its biocompatibility, availability and environmental friendliness. The aim of this article is to review the studies on hydrogels and films based on cellulose derivatives and its compositions for wound covering published in the scientific literature over the past decades. Particular attention is paid to materials containing bentonite and its influence on the mechanical, sorption and biomedical properties of dressings. An analysis of domestic and foreign studies devoted to composite materials based on carboxymethyl cellulose (CMC) and bentonite was conducted. Analysis of the research available to date shows that the introduction of bentonite into polymer matrices helps to increase the mechanical strength, moisture absorption capacity and structural stability of the coatings. The inclusion of clay particles allows for the regulation of the release of medicinal substances, thus increasing the effectiveness of the therapeutic effect. Studies conducted by Kazakhstan scientists confirm the potential of using local bentonite clays in the development of dressings. The development of composite hydrogels and films based on cellulose and bentonite derivatives opens new possibilities for creating effective biocompatible wound dressings. Further research should be aimed at optimizing their composition and structure to improve functional characteristics and therapeutic effectiveness.

Key words: carboxymethylcellulose, bentonite, composite materials, wound dressings, hydrogels, films, wound healing.

Сведения об авторах

Аружан Аманкелдыкызы Мынбаева – магистрант кафедры «Химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: aruzhan.mnbv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0394-0130>.

Арайлым Аманжолкызы* – магистр химии, научный сотрудник кафедры «Химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: arai13_95@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4052-1436>.

Шынар Нурлановна Жумагалиева – доктор химических наук, профессор кафедры «Химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: shynarnur@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-678X>.

Жарылкасын Абдурахитович Абилов – доктор химических наук, профессор кафедры «Химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: abilovs51@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2665-2539>.

Авторлар туралы мәліметтер

Аружан Аманкелдықызы Мыңбаева – «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының магистранты, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: aruzhan.mnbv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0394-0130>.

Арайлым Аманжолқызы* – химия магистрі, «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының ғылыми қызметкері, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: arai13_95@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4052-1436>.

Шынар Нурлановна Жумағалиева – химия ғылымдарының докторы, «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының профессоры, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: shynarnur@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-678X>.

Жарылкасын Әбдурахитұлы Әбілов – химия ғылымдарының докторы, «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының профессоры, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: abilovs51@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2665-2539>.

Information about the authors

Aruzhan Mynbayeva – master's student of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: aruzhan.mnbv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0394-0130>.

Arailym Amanzholkyzy* – master of Chemistry, research associate of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: arai13_95@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4052-1436>.

Shynar Zhumagalieva – doctor of chemical sciences, professor of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: shynarnur@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-678X>.

Jarylkasyn Abilov – doctor of chemical sciences, professor of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: abilovs51@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2665-2539>.

Поступила в редакцию 04.06.2025

Поступила после доработки 21.10.2025

Принята к публикации 22.10.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-69](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-69)

МРНТИ: 53.01.91



А.К. Кайракбаев*, М.Б. Алиев², Ж.Б. Тукашев³

¹Баишев университет,
030000, Республика Казахстан, г. Актобе, ул. Братьев Жубановых, д. 302а

²«Quanta Science» ИП,
030000, Республика Казахстан, г. Актобе, ул. М. Шокай, д. 338

³Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
030000, Республика Казахстан, г. Актобе, Проспект Алии Молдагуловой, строение 34

*e-mail: kairak@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ САМОРАСПАДАЮЩИХСЯ ШЛАКОВ ОТ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА

Аннотация: Производство низкоуглеродистого феррохрома неизбежно сопровождается образованием значительных объемов шлаков, ключевой особенностью которых является их способность к самопроизвольному распаду (дезинтеграции) при охлаждении и воздействии атмосферных факторов. Это явление обусловлено полиморфными превращениями β -