



МРНТИ 31.25.19, 31.17.29

Т.О.Хамитова¹, М.Ж.Буркеев², D.Navlicek³

¹Казахский агротехнический университет имени Сакена Сейфуллина», Астана, Казахстан

²Карагандинский университет имени академика Е.А.Букетова, Караганда, Казахстан

³Карлов университет, Прага, Чехия

(E-mail: ²m_burkeev@mail.ru, ³havlicek@natur.cuni.cz)

Автор для корреспонденции: ¹khamitova.t@inbox.ru

Синтез и исследование свойства полимер иммобилизованных наночастиц серебра и никеля

Аннотация. В статье приведены итоги синтеза и исследования структуры металл-полимерных комплексов на основе полиэтилен(пропилен)гликольмалеинатов с акриловой кислотой и металлами *n*-ЭГМ:АК/Ag, *n*-ЭГМ:АК/Ni, *n*-ЭГМ:АК/Ag-Ni, *n*-ПГМ:АК/Ag, *n*-ПГМ:АК/Ni, *n*-ПГМ:АК/Ag-Ni с применением методов микроскопии, спектроскопии и термогравиметрии. Полученные нанокомпозиты содержат изолированные наночастицы Ag⁰ диаметром 60±10 нм преимущественно сферической формы и металлического Ni⁰, размером 70±10 нм, кубической формы равномерно распределенные в полимерной матрице, агломераты на поверхности полимерной матрицы в пределах 150-200 нм. Синтезированные нанокомпозиты обладают термической стабильностью до ~900 °С. Исследована антимикробная активность металл-полимерного комплекса *n*-ПГМ/АК-Ag, который показал высокую эффективность в отношении стандартных штаммов *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*.

Ключевые слова: полиэтиленгликольмалеинат, полипропиленгликольмалеинат, металл-полимерный нанокомпозит, антимикробная активность, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2022-141-4-7-18>

Введение

В последние годы созданы различные типы наномасштабных структур, включающих в состав строительных блоков наночастицы металлов в комбинации с функциональными полимерами. Такие частицы, обладая значительной реакционной способностью и повышенной склонностью к ионному обмену, при иммобилизации в полимерные матрицы придают новые свойства полученным нанокомпозитам. Стабильность наночастиц в полимерных матрицах сохраняется в течение длительного времени. Широкомасштабное проведение фундаментально-прикладных исследований с целью разработки инновационных материалов и технологий, в особенности нанокомпозитов, является актуальной задачей и представляет большой научно-практический интерес [1, 2].

Используя иммобилизованные в полимеры наночастицы металлов с бактерицидными свойствами можно получить материалы медицинского назначения широкого спектра действия: импланты, системы доставки лекарств, антибактериальные покрытия для биомедицинских приборов и противомикробные упаковки.

Ранее путем иммобилизации частиц металлов в подложки сополимеров п-ЭГМ(ПГМ):АК синтезированы новые моно- и биметаллические полимерные комплексы п-ЭГМ:АК/Ag, п-ЭГМ:АК/Ni, п-ЭГМ:АК/Ag-Ni, п-ПГМ:АК/Ag, п-ПГМ:АК/Ni, п-ПГМ:АК/Ag-Ni. Показана возможность использования сополимеров поли-(этилен)-пропиленгликольмалеинатов (п-ЭГМ и п-ПГМ) с акриловой кислотой (АК) в качестве матрицы для получения эффективных металл-полимерных комплексов для гидрирования органических соединений. Доказано, что при использовании синтезированных катализаторов реакция может быть проведена в мягких условиях, с высоким выходом. Повторное использование композитов приводит лишь к небольшой потере активности. Методами микроскопии определен средний размер наночастиц, составивший 112 нм, имеющих сферическую форму и равномерное распределение вдоль поперечного сечения полимера. Содержание никеля и кобальта в комплексах составляет 0,52 и 0,48 мас.% соответственно в сополимере п-ЭГМ/АК, 0,49 и 0,51 мас.% в сополимере п-ПГМ/АК. На основе сополимеров п-ЭГМ (ПГМ):АК могут быть получены селективные катализаторы [3, 4], а также матрицы для включения лекарственных соединений для обеспечения доставки и пролонгированного действия [3, 4].

В данной работе с целью контролирования размера частиц металлов изменены условия синтеза: 1. Подобрана полимерная матрица с молекулярной массой ~2600 у.е., со степенью набухания ~1800-2000%. 2. Изменены условия синтеза МПК: концентрация солей металлов 0,5 Н и концентрация восстановителя 0,5 Н.

Основной целью настоящей работы является исследование физико-химических свойств и антибактериальной активности нанокompозитов на основе «Smart» полимерной матрицы п-ЭГМ (п-ПГМ)/АК с металлами (Ag, Ni).

Методы эксперимента

Оптимизация синтеза МПК. Синтез п-ЭГМ:АК/Ag, п-ЭГМ:АК/Ni, п-ЭГМ:АК/Ag-Ni, п-ПГМ:АК/Ag, п-ПГМ:АК/Ni, п-ЭГМ:АК/Ag-Ni, п-ПГМ:АК/Ag-Ni. Иммобилизацию частиц металлов в подложки сополимеров п-ЭГМ:АК, состава 14.8:85.2 мас.% и п-ПГМ:АК 15.1:84. 9 мас.% осуществляли методом восстановления Ni^{+2} , Ag^{+1} до Ni^0 , Ag^0 гипофосфитом натрия (0,5 Н) в 0.5 Н растворе их нитратов, в присутствии катализатора - аммиачного раствора хлорида серебра. Восстановление Ni^{+2} , Ag^{+1} в объеме полимерной матрицы п-ЭГМ:АК, п-ПГМ:АК осуществляется в несколько стадий: внедрение в полимерную матрицу ионов Ni^{+2} , Ag^{+1} ; диффузия реагентов внутри полимерной матрицы; реакция между нитратами никеля, серебра и гипофосфитом натрия, протекающая с образованием наноразмерных частиц металлов (НРЧ).

Главными недостатками этого способа являются свободная миграция наночастиц в объеме геля и их вымывание в окружающую среду из за больших размеров пор сетки. При использовании в качестве гидрогелевой матрицы рН- и термочувствительных гидрогелей п-ЭГМ (ПГМ):АК, способных изменять свои объемно-фазовые свойства в зависимости от внешних стимулирующих факторов, удастся тонко регулировать морфологию и размеры пор пространственной сетки, что в конечном итоге приводит к целенаправленному управлению поведением наночастиц металлов.

На рисунке 1 приведены основные структурные фрагменты п-ЭГМ:АК/Ag.

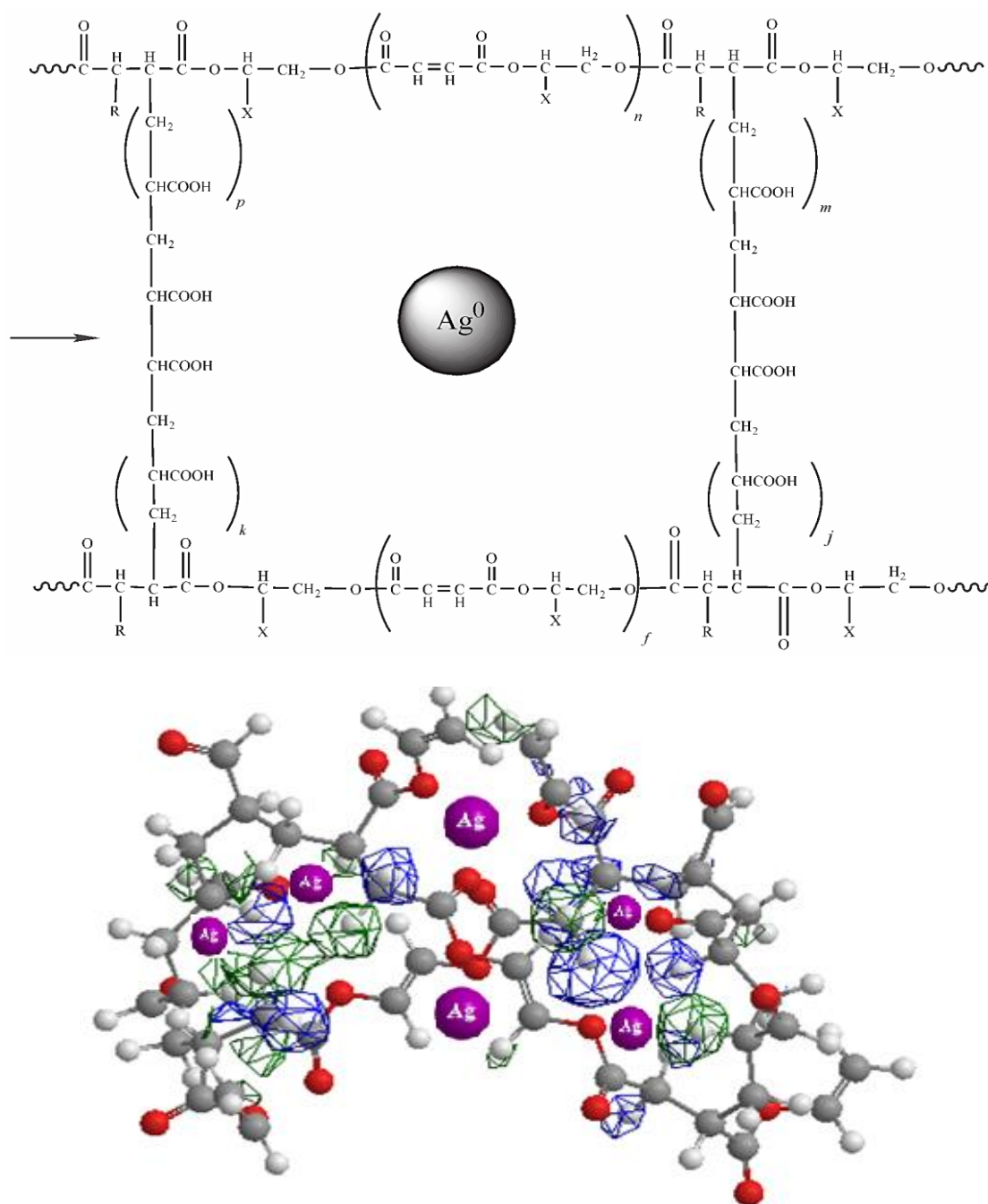


Рисунок 1 - Структурные фрагменты монометаллического полимерного комплекса п-ЭГМ:АК/Аg

Изучение структуры полимера и наноккомпозитов

Получение изображения ультратонкого образца осуществляли на универсальном термополеовом трансмиссионном электронном микроскопе (ТЭМ) JEOL JEM-2100 200 кВ (Япония), исследования вели на базе кафедры аналитической и неорганической химии университета Карлов (Чешская Республика).

Разрешение при оптимальной рабочей дистанции - 0,8 нм при 2 кВ, в точке схождения - 1,2 нм при 1 кВ (рис.2).

Анализ молекулярно-массовых характеристик полимеров осуществляли методом гель-проникающей хроматографии в диоксане на хроматографе GPC-120 фирмы PolymerLabs с двумя колонками PLgel. Молекулярную массу (ММ) рассчитывали по калибровке по стандартам.

Исследование структуры, морфологии, элементного состава синтезированных комплексов проводилось с помощью метода микроскопии на РЭМ MIRA 3TESCAN «Oxford Instruments» (2012) с высокоэффективным кремний-дрейфовым детектором X-Act для элементного анализа при ускоряющем напряжении 20 кВ (рис.3,4).

Термическую стабильность композитов исследовали термогравиметрически на синхронном ТГА/ДТА/ДСК анализаторе LabSYSEvo (2014) в интервале температур 30–1000 °С в тигле из окиси алюминия, при скорости нагрева 5°С/мин, на воздухе с расходом 30 мл/мин, путем разложения навески с массой 20 мг (рис.5).

Количество адсорбированного металла в комплексе определяли на атомно-эмиссионном спектрометре 4210 MP-AES («Agilent Technologies Bayan Lepas Free», Малайзия), основанном на определении элементного состава вещества по оптическим спектрам излучения атомов и ионов анализируемой пробы, возбуждаемых плазмой азота.

Исследование антибактериальной активности

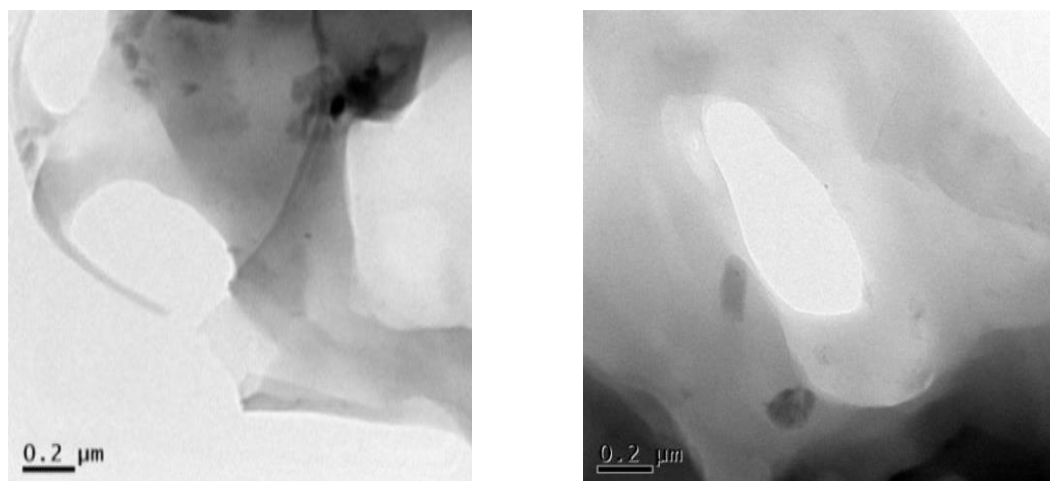
Антибактериальное действие исходных полимеров и синтезированных нанокомпозитов изучали на стандартных штаммах микроорганизмов - *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853), *Escherichia coli* (ATCC 25922), полученных из РГП «Национальная коллекция микроорганизмов» (г. Нурсултан). Исследования проводили на базе научно-исследовательского центра НАО «Медицинский университет Караганды». Использовали модифицированный метод диффузии диска Кирби-Бауэра в стандартных условиях, питательная среда Mueller-Hinton агаровая. Базовая концентрация полимерных растворов составила 10% м/м, которые в последующем разводились двукратными разведениями до концентрации в 0,001% м/м.

100 мдм³ тестовых бактерий выращивали в 10 см³ свежей среды, до тех пор пока концентрация не достигла 10⁵-10⁸ клеток/см³. Далее указанный объем микробной суспензии распределяли в чашке Петри с агаровой средой согласно расчетным концентрациям в объеме 100 мкл. Грамотрицательные бактерии инкубировали при 35-37°С в течение 48 ч. [5, 6].

Оценку результатов проводили по размеру и чистоте зоны подавления роста бактерий по 5-балльной системе, где «0» - это отсутствие ингибирования роста бактерий, а «5» - полное отсутствие роста на месте применения раствора с расширением зоны задержки роста за территорию нанесения образца.

Обсуждение результатов

Для синтеза полимерной матрицы в качестве исходного мономера использовали полиэтилен(пропилен)гликоломалеинат с ММ ~2600 у.е. ММ полимера влияет на степень набухания сополимера, что в свою очередь определяет размер пор полимерной матрицы. Степень набухания полимеров составила ~1800-2000%. Так как структура полимерной матрицы оказывает существенное влияние на кристаллическую структуру и морфологию образующихся НЧ металлов, приводим электронные микрофотографии сополимеров на рисунке 2.



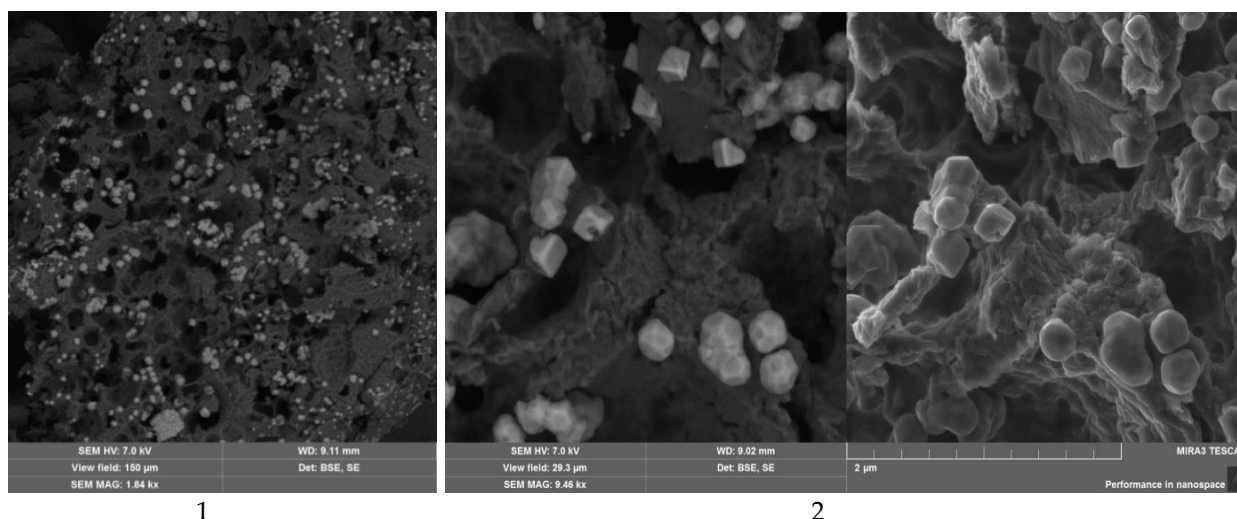
1

2

Рисунок 2 - Микрофотографии полимерных матриц: 1-п-ЭГМ/АК, 2-п-ПГМ/АК на ТЭМ

Размер пор сетчатых сополимеров по результатам ТЭМ для п-ЭГМ/АК с составными данными 14.8:85.2 масс.% (рис. 2.1) от 0.4 мкм до 1 мкм, а для п-ПГМ/АК (15.1:84.9 масс.%) (рис. 2.2) составил от 0.5 мкм до 1.2 мкм. Равномерные поры полимерной матрицы способствуют образованию и росту отдельных частиц в объеме полимера, припятствуя их агрегации.

Полученные наноконпозиты содержат изолированные НЧ Ag^0 диаметром 60 ± 10 нм преимущественно сферической формы и НЧ металлического Ni^0 , размером 70 ± 10 нм, кубической формы (рис. 3.1), равномерно распределенные в полимерной матрице. В ряде случаев они образуют агломераты на поверхности полимерной матрицы размеров в пределах 150-200 нм (рис. 3.2).



1

2

Рисунок 3 - Электронно-микроскопические снимки наноконпозита п-ЭГМ:АК/Ni

Основную часть НЧ (около 80%) от общей массы составляют частицы с размерами от 20 до 70 нм. Меньшая часть приходится на более крупные образования размером 80-100 нм. Агрегаты с размерами более 200 нм (около 10%) образованы в результате слипания мелких частиц, которые отмечены на поверхности полимера.

Сополимеры п-ЭГМ(ПГМ)/АК позволяют достичь высокой равномерности распределения частиц металлов в объеме полимерной матрицы, что демонстрируют результаты РЭМ с ЭДС на рисунке 4. По результатам энергодисперсионной спектроскопии среднее количество частиц металлов на 10 мкм составляет $\sim 1300 \pm 100$ ед. частиц для Ag^0 и $\sim 1000 \pm 100$ ед. для Ni. Соотношение металлов Ag:Ni 63:37% в сополимере п-ЭГМ:АК и 61:39% в сополимере п-ПГМ:АК (рис. 5). Таким образом, удается синтезировать НЧ металлов с меньшим размером. Содержание металлов Ag:Ni в композитах п-ЭГМ (ПГМ): АК/ Ag^0 -Ni 0 составляет ~ 20 масс.% от общей массы.

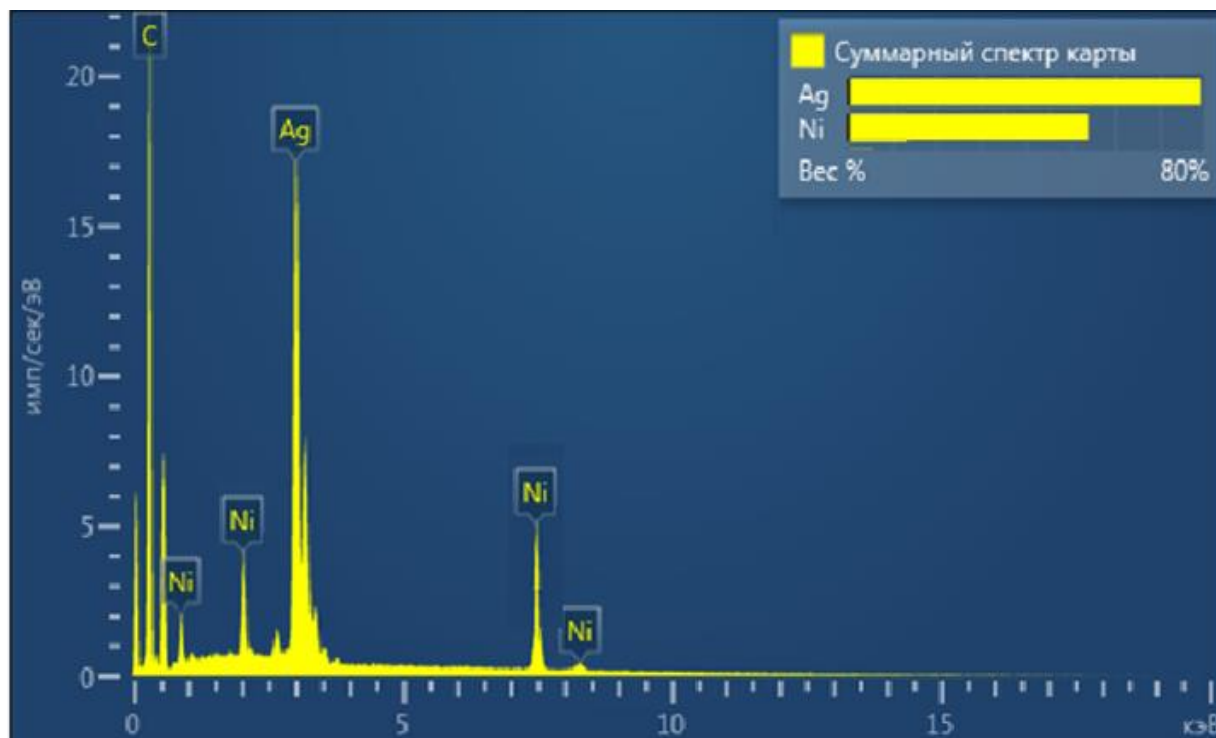


Рисунок 4 - Микроснимки: распределение отдельных элементов в объеме матрицы

Для оценки температуры разложения металл-полимерных комплексов был проведен термический анализ образцов данных полимерных комплексов (п-ЭГМ/АК-Ni-Co (а) и п-ПГМ/АК-Ni-Co). На рисунке 5 приведены термограммы сополимеров п-ЭГМ(ПГМ)/АК с постоянной скоростью нагрева 10 град/мин в интервале температур 30-1500°C в атмосфере воздуха.

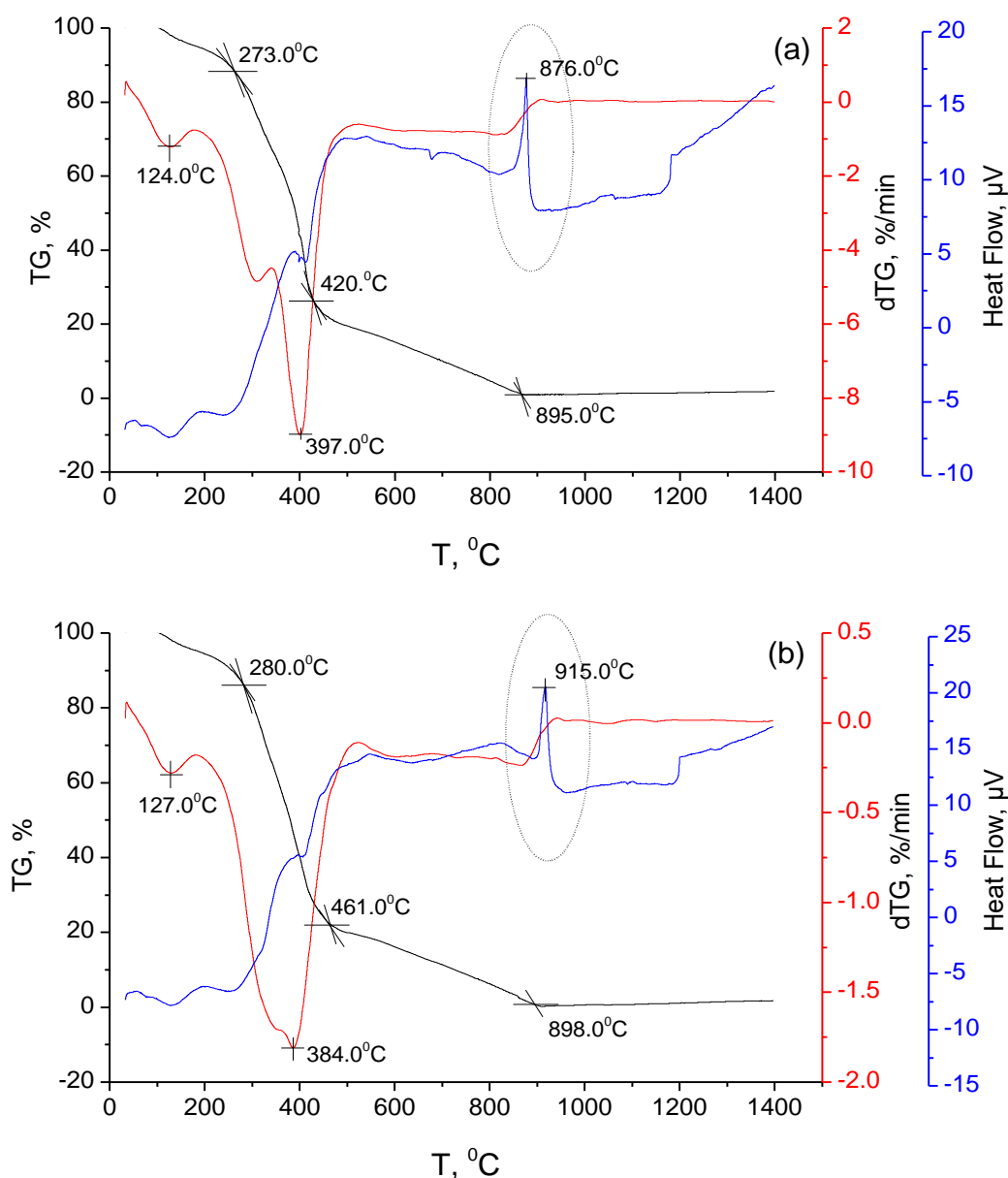


Рисунок 5 - Температурные зависимости изменения массы (кривая TG), скорости изменения массы (кривая dTG) и тепловой поток (Heat Flow) для металл-полимерных комплексов: п-ЭГМ/АК-Ni-Co (a) и п-ПГМ/АК-Ni-Co (b)

На рис. 5. приведены термограммы металл-полимерных комплексов составов: п-ЭГМ/АК-Ni-Co и п-ПГМ/АК-Ni-Co. На рисунке 1, (a) видно, что металл-полимерный комплекс п-ЭГМ/АК-Ni-Co устойчив до 900.0°C, 10.0%-ная потеря массы при 124.0°C, с максимумом эндотермического эффекта на кривой dTG при 397.0°C. Металл-полимерный комплекс п-ПГМ/АК-Ni-Co (рис. 1, b) устойчив до 1000.0°C, 52%-ная потеря массы при 384.0°C. Остаточная масса 48%. Как видно из рисунка 5 процесс термического разложения металл-полимерных комплексов (п-ЭГМ/АК-Ni-Co и п-ПГМ/АК-Ni-Co) является одностадийным и для большинства исследованных соединений включает одну стадию термической деструкции, о чем говорит перегиб на кривых потери массы.

Исходя из полученных зависимостей (рис. 5), можно заключить, что наименее термически стабильным является п-ЭГМ/АК-Ni-Co, который устойчив до 900.0°C и разлагается в одну стадию с экзотермическим максимумом на кривой теплового потока при 876.0°C. Наиболее термически стабильными являются п-ПГМ/АК-Ni-Co – устойчив вплоть до 1000.0°C, с максимумом на кривой теплового потока при 915.0°C соответственно. Для всех изученных соединений на кривых потери массы наблюдаются весовые потери от 10.0% массы в интервале температур от 0.0°C до 150.0°C, это свидетельствует о том, что происходит отщепление кристаллизационной воды, которая присутствует во всех металл-полимерных комплексах. Как показал термический анализ (рис. 5) исследованных металл-полимерных комплексов п-ЭГМ/АК-Ni-Co и п-ПГМ/АК-Ni-Co, включающих элементы Ni и Co устойчивы до 1000.0°C и постепенно разлагаются в интервале от 0.0°C до 1000.0°C, при этом во всех случаях наблюдается экзотермический эффект $T_{нач.}=850.0\pm 0.1^\circ\text{C}$ (при 876.0°C) для п-ЭГМ/АК-Ni-Co и $T_{нач.}=890.0\pm 0.1^\circ\text{C}$ (при 915.0°C), которые отсутствуют у исходной полимерной матрицы, что свидетельствует о наличии элементов Ni и Co в сетке полимерного комплекса.

Таким образом, синтезированные наноконпозиты обладают термической стабильностью до ~900°C и являются перспективными для разработки биосовместимых материалов медицинского назначения.

Гель-иммобилизованные наночастицы серебра обладают ранозаживляющим эффектом за счет антибактериального нанокластерного серебра. Гидрогелевые мембраны, содержащие наночастицы серебра, применяются для лечения ожогов, трофических язв, ран и порезов. Слой гидрогеля имеет сквозные поры субмикронных размеров и обеспечивает газообмен и одновременно защиту раны от внешнего инфицирования [7].

В ходе определения антимикробной активности было установлено, что сам полимер в установленной концентрации не проявлял антимикробной активности. Минимальная подавляющая концентрация для МПК представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Антимикробная активность металл-полимерных наноконпозитов

Вещества	Концентрация веществ, %	Микроорганизмы		
		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Escherichia coli</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>
Исходная полимерная матрица п-ПГМ/АК	Более 10%	-	-	-
п-ПГМ/АК:Ag	0,00375%*	+	+	+
п-ПГМ/АК:Ni	0,25%*	+	+	+
п-ПГМ/АК:Ag-Ni	0,0075%*	+	+	+

* Базовая концентрация полимерных растворов составила 10% м/м, которые в последующем разводились двукратными разведениями до концентрации в 0,001% м/м.

Изучение металл-полимерного наноконпозита п-ПГМ/АК-Ag показало, что испытуемый образец обладает антибактериальной активностью в отношении *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* и *Pseudomonas aeruginosa* (рис. 6, табл. 2). Ростовые процессы у грамположительных бактерий - *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* и *Pseudomonas aeruginosa* зависят от диффузии и концентрации антимикробного агента (активность увеличивается с увеличением концентрации).

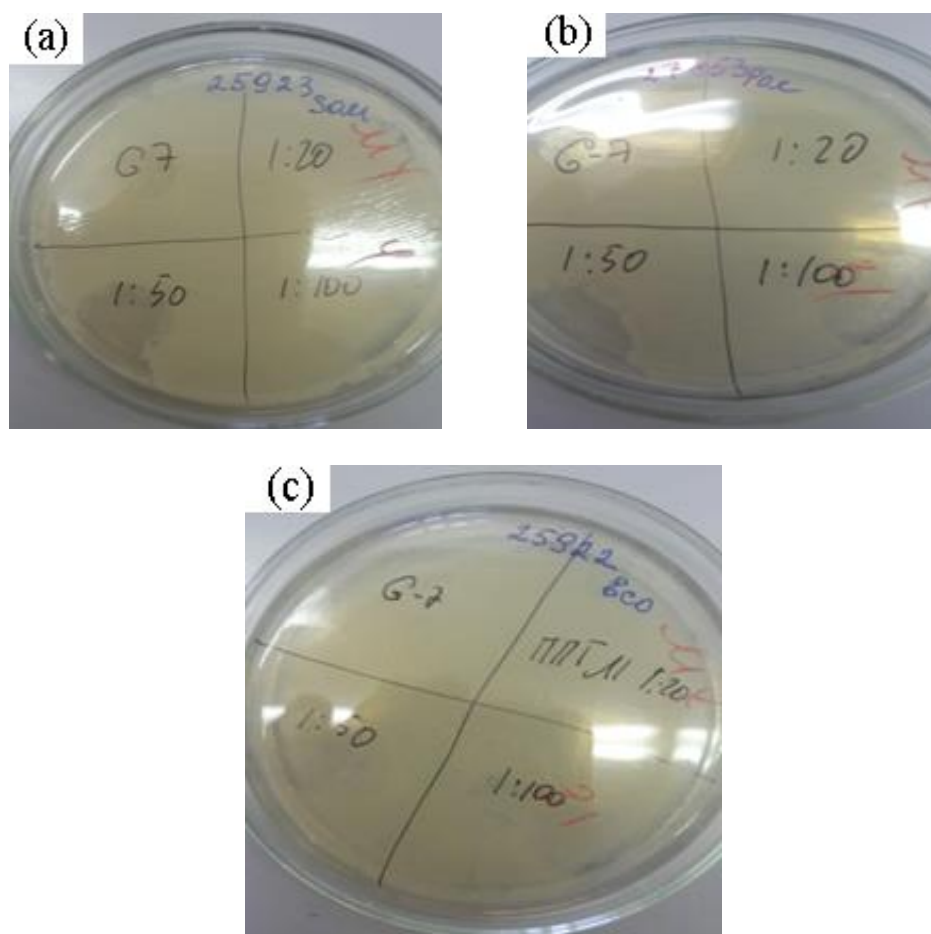


Рисунок 6 - Ингибирование *Staphylococcus aureus* (a); *Pseudomonas aeruginosa* (b) и *Escherichia coli* (c)

Таблица 2 - Антибактериальная активность тестируемого металл-полимерного наноконкомпозита п-ПГМ/АК-Аg

Микроорганизм	Концентрация металл-полимерного комплекса п-ПГМ/АК-Аg			
	1:100	1:50	1:20	1:1
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5	4	2	2
<i>Escherichia coli</i>	4	4	4	2
<i>Staphylococcus aureus</i>	4	3	2	2

Примечание: «0» – отсутствие роста; «5» – полное отсутствие роста

Установлено, что для всех штаммов стандартных микроорганизмов наблюдается схожая картина: наличие зоны подавления одинакового размера, но при этом внутри зоны наблюдаются рост редких колоний, а также увеличение эффекта подавления роста с концентрацией от 1:1 до 1:100.

Высокая активность данного металл-полимерного наноконкомпозита может быть обусловлена наличием в системе $[Ag^+]$, обладающего бактерицидным, антигрибковым и антисептическим действием [7].

Выводы

Полученные нанокомпозиты в новых условиях синтеза содержат изолированные НЧ Ag^0 диаметром 60 ± 10 нм преимущественно сферической формы и НЧ металлического Ni^0 , размером 70 ± 10 нм, кубической формы, равномерно распределенные в полимерной матрице. В ряде случаев они образуют агломераты на поверхности полимерной матрицы размеров в пределах 150-200 нм.

Синтезированные нанокомпозиты обладают термической стабильностью до 500°C и являются перспективными для разработки биосовместимых материалов медицинского назначения.

Таким образом, впервые была изучена биологическая активность исходного полимера и синтезированного металл-полимерного комплекса, включающего наночастицы серебра - п-ПГМ/АК-Аг. Установлено, что исходный полимер не обладает антибактериальной активностью в отношении стандартных штаммов, тогда как металл-полимерный комплекс с серебром п-ПГМ/АК-Аг показал высокую эффективность в отношении всех штаммов изученных бактерий в концентрации от 1:50 до 1:100.

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте химических проблем КарУ им. акад. Е.А.Букетова (Караганда, Казахстан), в лаборатории биотехнологии КарУ им. акад. Е.А.Букетова (Караганда, Казахстан) и на базе аналитической и неорганической кафедры университета Карлов (Чешская Республика).

Список литературы

1. Бектуров Е.А. и др. Полимеры в нанотехнологии/Е.А.Бектуров, С.Е. Кудайбергенов, Ж.Е. Ибраева, - Алматы: Типография «Центр оперативной полиграфии», 2019.- 388 с.
2. Нанотехнологии в биологии и медицине / Коллективная монография; под ред. чл.-корр. РАМН, проф. Е.В. Шляхто. 2009. – [Электронный ресурс]. URL: <http://prostonauka.com/nano/soderzhanie>. (дата обращения: 1.03.21)
3. Burkeev M.Zh., Khamitova T.O., et al. Synthesis and Catalytic Properties of Polymer-Immobilized Nanoparticles of Cobalt and Nickel// CATALYSIS IN INDUSTRY. -2018.-Vol. 10.-№4. – 270-278 pp.
4. Burkeev M.Zh., Khamitova T.O., Havlichek D., et al. Synthesis, Characterization, and Catalytic Properties of Metal-Polymer Complexes Based on Copolymers of Polyethylene(propylene) Glycol Maleates with Acrylic Acid// Russian Journal of Applied Chemistry. – 2019. -Vol. 92. -№.1. -1-8 pp.
5. CLSI. Methods for Dilution Antimicrobial Susceptibility Tests for Bacteria That Grow Aerobically; 11th ed. CLSI standard M07. Wayne, PA, USA, 2018.
6. CLSI. Performance Standards for Antimicrobial Disk Susceptibility Tests; 13th ed. CLSI standard M02. Wayne, PA, USA, 2018.
7. Radzig M.A., Nadtochenko V.A., Koksharova O.A., Kiwi J., Lipasova V.A., Khmel I.A. Antibacterial effects of silver nanoparticles on gram-negative bacteria: Influence on the growth and biofilms formation, mechanisms of action // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, V. 102, P. 300– 306.

Т.О.Хамитова¹, М.Ж.Буркеев², D.Havlicek³¹«Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті» КЕАҚ, Нұр-Сұлтан, Қазақстан²«Академик Е.А.Бөкетов атындағы Қарағанды университеті» КЕАҚ, Қарағанды, Қазақстан³Карлов университеті, Прага, Чехия**Полимермен иммобилизацияланған күміс пен никель нанобөлшектерінің синтезі және қасиеттерін зерттеу**

Аннотация. Мақалада п-ЭГМ:АК/Аg, п-ЭГМ:АК/Ni, п-ЭГМ:АК/Аg-Ni, п-ПГМ:АК/Аg, п-ПГМ:АК/Ni, п-ПГМ:АК/Аg-Ni металл-полимер кешендерінің синтезі мен микроскопиялық, спектроскопиялық және термогравиметриялық әдістерді қолдана отырып құрылымын зерттеу нәтижелері берілген. Алынған нанокөміздердің құрамында пішіні негізінен сфералық, диаметрі 60 ± 10 нм оқшауланған Ag^0 металл нанобөлшектері және Ni^0 , өлшемі 70 ± 10 нм, пішіні текше, олар полимер матрицасында біркелкі таралған, полимер матрицасының бетінде 200 нм-лік агломераттар бар. Синтезделген нанокөміздер $\sim 900^\circ C$ дейін термиялық тұрақтылыққа ие. п-ПГМ/АК-Аg металл-полимер кешенінің микробқа қарсы белсенділігі зерттеліп, нәтижесінде *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* стандартты штамдарына қарсы жоғары тиімділікті көрсетті.

Түйін сөздер: полиэтиленгликольмалеинат, полипропиленгликольмалеинат, металл-полимерлі нанокөміз, микробқа қарсы белсенділік, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*.

Т.О.Khamitova¹, M.Zh.Burkeev², D.Havlicek³¹ S.Seifullin Kazakh Agro Technical University, Astana, Kazakhstan² Academician E.A.Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan³ Charles University, Prague, Czech Republic**Synthesis and study of the properties of polymer-immobilized silver and nickel nanoparticles**

Abstract. The article presents the results of the synthesis and study of the structure of metal-polymer complexes based on polyethylene (propylene) glycol maleinates with acrylic acid and metals p-EGM:AA/Ag, p-EGM:AA/Ni, p-EGM:AA/Ag-Ni, p-PGM:AA/Ag, p-PGM:AA/Ni, p-PGM:AA/Ag-Ni using microscopy, spectroscopy and thermogravimetry methods. The resulting nanocomposites contain isolated Ag^0 nanoparticles with a diameter of 60 ± 10 nm, predominantly spherical in shape and metallic Ni^0 , 70 ± 10 nm in size, cubic in shape, uniformly distributed in the polymer matrix, agglomerates on the surface of the polymer matrix in the range of 150–200 nm. The synthesized nanocomposites have thermal stability up to $\sim 900^\circ C$. The authors have studied the antimicrobial activity of the p-PGM/AA-Ag metal-polymer complex, which showed high efficiency against standard strains of *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, and *Staphylococcus aureus*.

Keywords: polyethylene glycol maleate, polypropylene glycol maleate, metal-polymer nanocomposite, antimicrobial activity, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*

References

1. Bekturov E.A. etc. Polimery` v nanotekhnologii [Polymers in nanotechnology] (Almaty, Czentr operativnoj poligrafii, 2019, 388 p.) [in Russian]
2. Nanotekhnologii v biologii i mediczine / Kollektivnaya monografiya; pod red. chl.-korr. RAMN, prof. E.V. Shlyakhto. 2009. – Available at: <http://prostonauka.com/nano/soderzhanie>. (accessed: 1.03.21)
3. Burkeev M.Zh., Khamitova T.O., et al. Synthesis and Catalytic Properties of Polymer-Immobilized Nanoparticles of Cobalt and Nickel// CATALYSIS IN INDUSTRY. -2018.-Vol. 10.-#4. – 270-278 rr.
4. Burkeev M.Zh., Khamitova T.O., Havlichek D., et al. Synthesis, Characterization, and Catalytic Properties of Metal–Polymer Complexes Based on Copolymers of Polyethylene(propylene) Glycol Maleates with Acrylic Acid// Russian Journal of Applied Chemistry. – 2019. -Vol. 92. -#1. -1-8 pp.
5. CLSI. Methods for Dilution Antimicrobial Susceptibility Tests for Bacteria That Grow Aerobically; 11thed. CLSI standard M07.Wayne, PA, USA, 2018.
6. CLSI. Performance Standards for Antimicrobial Disk Susceptibility Tests; 13th ed. CLSI standard M02. Wayne, PA, USA, 2018.
7. Radzig M.A., Nadtochenko V.A., Koksharova O.A., Kiwi J., Lipasova V.A., Khmel I.A. Antibacterial effects of silver nanoparticles on gram-negative bacteria: Influence on the growth and biofilms formation, mechanisms of action // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, V. 102, P. 300– 306.

Сведения об авторах:

Хамитова Т.О. – PhD, ст.преподаватель кафедры почвоведения и агрохимии Казахского агротехнического университета им. Сакена Сейфуллина, ул. Победа 2, Астана, Казахстан.

Буркеев М.Ж. – д.х.н., профессор, член-корр.НАН РК, Карагандинский университет им. академика Е.А.Букетова, ул. Университетская 28, Караганда, Казахстан.

Хавличек Д. – доцент, RNDr, CSc. Карлов университет, ул. Оплеталова 38, Прага, Чехия.

Khamitova Tolkyn Ondirisovna – Ph.D., Senior Lecturer, Department of Soil Science and Agrochemistry, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, 2, Pobeda str., Astana, Kazakhstan.

Burkeev Meiram Zhunusovich – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Academician E.A.Buketov Karaganda University, 28, Universitetskaya str., Karaganda, Kazakhstan.

David Havlicek – Associate Professor, RNDr, CSc. Charles University, 38, Opletalovo, Prague, Czech Republic.