

НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ТОНКОПЛЕЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИСАХАРИДОВ И НАНОЧАСТИЦ ИОДИДА СЕРЕБРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ

© М. В. Базунова, Р. Б. Салихов*, Т. Б. Терегулов, И. Н. Муллагалиев,
Т. Р. Салихов, И. Н. Сафаргалин, А. Д. Остальцова

Уфимский университет науки и технологий,
450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32
* E-mail: salikhovrb@yandex.ru

Поступила в Редакцию 20 мая 2024 г.
После доработки 27 сентября 2024 г.
Принята к публикации 27 сентября 2024 г.

В работе получены гибридные нанокompозитные пленочные материалы на основе хитозана и натриевых солей карбоксиметилцеллюлозы и N-сукцинилхитозана и коллоидных частиц AgI и оценена возможность применения полученных материалов в сенсорных устройствах для контроля содержания аммиака. При сравнении топографических образов микрорельефа поверхности пленок, полученных из индивидуальных полисахаридов или нанокompозитов на основе полисахаридов и частиц AgI, показано, что изменение концентрации полимера в исходном формовочном растворе и наличие наночастиц AgI существенно сказывается на структуре пленки. При повышении концентрации полисахарида в растворе возрастает степень ассоциации, и в пленке формируются более крупные зернистые надмолекулярные образования длиной в несколько микрометров. Присутствие наночастиц AgI оказывает влияние на морфологию элементов структуры и топографию поверхности пленок, причем более значительное влияние наблюдается в случае менее концентрированных исходных растворов полисахаридов. На частицах AgI происходит адсорбция макромолекул полимера, следовательно, наночастицы служат дополнительными узлами сетки зацеплений макромолекул, что приводит к изменению морфологии системы. Максимально выраженным рельефом поверхности характеризуются пленочные образцы, полученные из полимер-коллоидных дисперсий на основе карбоксиметилцеллюлозы и хитозана. Установлено, что электропроводность пленочных образцов на основе полисахаридов, наполненных наночастицами AgI, меняется при изменении концентрации аммиака вследствие образования аммиачных комплексов. Полученные композитные пленки не уступают по прочности при растяжении пленкам индивидуальных полисахаридов. Введение пластифицирующей добавки (глицерина) позволяет увеличить относительное удлинение при растяжении.

Ключевые слова: сенсорные устройства; мониторинг аммиака; гибридные нанокompозиты; полисахариды; коллоидные частицы; иодид серебра

DOI: 10.31857/S0044461824040091; EDN: XYOZVO

Полимерные наноэлектронные устройства в виде электронных химических сенсоров могут использоваться при контроле загрязнения окружающей среды и постоянном мониторинге состояния здоровья человека (в датчиках давления, пульса, температуры и состава выдыхаемого воздуха). Преимуществом электронных органических сенсоров, особенно перед неорганическими сенсорами, является их пластичность и энергоэффективность. Примером подобного сенсо-

ра может служить полимерный композит, используемый в качестве детектора наличия аммиака [1, 2].

Полимеры природного происхождения — полисахариды, в частности хитозан, целлюлоза и их производные, целесообразно применять в качестве основы ряда функциональных нанокompозитов, в том числе тонкопленочных структур для сенсорных устройств [3, 4], из-за их пленкообразующих свойств [5, 6], доступности и простоты получения ма-

териалов на их основе. При создании тонкопленочных полимерных материалов для сенсорных устройств введение наполнителей (легирующих добавок) наноразмерного вида необходимо для регулирования электропроводности, селективности и стабильности [7]. Так, например, электропроводность полисахаридов можно регулировать допированием — введением в структуру электронодонорных или электроноакцепторных добавок [8]. В данной работе при создании тонкопленочных структур для сенсорных устройств предложено использование натрийкарбоксиметилцеллюлозы, хитозана и его производного — натриевой соли N-сукцинилхитозана — и коллоидных частиц иодида серебра. Выбор иодида серебра обусловлен наличием у него полупроводниковой электропроводности. Галогенидам серебра свойственна катионная (Ag^+) и анионная (Hal^-) составляющие проводимости [9]. Технология введения наночастиц иодида серебра в полисахаридную матрицу отличается простотой [10]. При разработке тонкопленочных структур для детекторов наличия аммиака немаловажным является тот факт, что галогениды серебра, в том числе и иодид, достаточно легко образуют аммиачные комплексы.*

Цель работы — получение гибридных наноконструктивных пленочных материалов на основе натрийкарбоксиметилцеллюлозы, хитозана и натриевой соли N-сукцинилхитозана и коллоидных частиц иодида серебра и оценка возможности их использования в сенсорных устройствах для контроля содержания аммиака.

Экспериментальная часть

В работе использованы хитозан со степенью деацетилирования 82% с молекулярной массой 80 кДа (ЗАО «Биопрогресс»), натриевая соль N-сукцинилхитозана с молекулярной массой 200 кДа со степенью замещения по аминок группам 75% (ЗАО «Биопрогресс») и натрийкарбоксиметилцеллюлоза марки Blanose CMC 7HOF PH со степенью замещения 80–95% и молекулярной массой 260 кДа (Ashland).

Дисперсии наночастиц золя иодида серебра получены смешением равноконцентрированных ($0.01 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$) растворов AgNO_3 (х.ч., ООО «Петронит») и KI (х.ч., ООО «Полихим») в объемном соотношении 7:10. Размер коллоидных частиц золя определяли с помощью атомно-силового микроско-

па Agilent 5500 в полуконтактном режиме. Образцы для исследования готовили на подложках Mica d/9.5 (ООО «НТ-МДТ»), представляющих собой диски толщиной 0.15 мм и диаметром 9.5 мм, нанесением и сушкой водной дисперсии иодида серебра при комнатной температуре на воздухе.

Растворы полисахаридов различной концентрации (0.5–2.0%) были приготовлены путем растворения предварительно высушенной навески полимера в очищенной воде, полученной методом дистилляции** с помощью аквадистиллятора ДЭ-4М (завод «Электромедоборудование») [или в случае хитозана — в 1%-ном водном растворе уксусной кислоты (х.ч., ООО «Дмитриевский Химический Завод»)], в течение 24 ч при непрерывном перемешивании. Для получения полимер-коллоидных дисперсий полисахаридов с мицеллами золя AgI смешивали растворы полисахаридов натрийкарбоксиметилцеллюлозы (концентрацией 0.5–2%), хитозана (концентрацией 0.5–1%) или натриевой соли N-сукцинилхитозана (концентрацией 0.5–1%) [в том числе в присутствии глицерина (х.ч., ПКФ «Химавангард») концентрацией 0.7%] с предварительно приготовленным золем в объемном соотношении 1:1.

Пленки на основе индивидуальных хитозана, натриевой соли N-сукцинилхитозана и натрийкарбоксиметилцеллюлозы и полимер-коллоидных дисперсий на их основе получали методом полива раствора на обезжиренную поверхность чашек Петри. Значение толщины пленок фиксировали с помощью толщиномеров ThicknessGAUGE (ООО «Сенсорика-М») с точностью до 10 мкм. Пленки сушили в два этапа: 1 этап — сушка на открытом воздухе, 2 этап — сушка в вакуумном шкафу до постоянной массы. Толщина полученных пленочных материалов составляла $150 \pm 10 \text{ мкм}$.

Для определения морфологии и топографии поверхности пленочных материалов методом атомно-силовой микроскопии использовали сканирующую зондовую установку Интегра-Спектра (NT-MDT) на воздухе в полуконтактной моде с применением кантилевера NSG-01c жесткостью $2.5\text{--}10 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$, резонансной частотой 115–195 кГц и радиусом 10 нм. Перед исследованием образцы высушивали до постоянной массы. Профили поверхности образцов представляли в виде топографических образов с разрешением $50 \times 50 \text{ мкм}$, исходя из которых были рассчитаны среднеквадратичные шероховатости (нм) с помощью программного обеспечения Gwyddion.

* Скопенко В. В. Координационная химия: учеб. пособие. М.: Академкнига, 2007. С. 259–271.

** ГОСТ Р 58144–2018. Вода дистиллированная. Технические условия.

Физико-механические свойства пленок изучали на универсальной разрывной машине AGS-10 kNG Trapezium-X (Shimadzu), оснащенной программой PlasticTensileTest (длина базы образца — 20 мм, ширина — 20 мм, толщина — 0.1 мм, скорость растяжения — $1 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$). Разрывное напряжение (σ , МПа) определяли с учетом площади поперечного сечения образца. Относительное удлинение при разрыве (ϵ , %) рассчитывали по отношению к первоначальной длине пленочного образца. Значения относительного удлинения при разрыве и разрывного напряжения являлись средними арифметическими из трех параллельных измерений.

Газовый сенсор работает следующим образом: газочувствительный слой включают в мостовую измерительную цепь (мост) в качестве одного из ее плеч с помощью подстроечного резистора. Взаимодействие газа с газочувствительным слоем приводит к изменению его электропроводности в ходе происходящих на поверхности химических превращений. Так как газочувствительный слой включают в мостовую измерительную цепь, то с изменением концентрации газа происходит ее разбаланс.

Значения электрического сопротивления пленок при разных концентрациях паров аммиака (х.ч., ОАО «Азот») измеряли при помощи датчика измерения концентраций паров аммиака в воздухе MQ-135 Gas Sensor (ООО «Тройка-модуль») в специальной камере. В камеру помещали чашку Петри с насыщенным раствором аммиака, который испарялся в замкнутом пространстве камеры, и концентрация паров аммиака увеличивалась с течением времени. Подача паров аммиака в камеру с образцом производилась в течение 7 с, после чего производилось удаление паров аммиака. Значения выходного сигнала фиксировали мультиметром DT9208A («ТЕК Техник унд Энтвинклунг») при концентрациях аммиака $5\text{--}1450 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Измерения проводили при комнатной температуре 25°C и напряжении на образцах 30 В.

Обсуждение результатов

Гибридные нанокompозитные тонкопленочные структуры были получены методом полива и последующего высушивания полимер-коллоидных дисперсий полисахаридов с золем AgI. Золь AgI получали смешением исходных растворов KI и AgNO_3 концентрацией $0.01 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$ при объемном соотношении, равном 7:10, так как именно такие концентрация исходных растворов и соотношение приводят к образованию коллоидных частиц размером 40–60 нм, как

установлено в работе [10]. Нанокompозиты с такими размерами частиц дисперсного наполнителя характеризуются максимально возможной поверхностью раздела фаз.

Поскольку процесс детектирования в сенсорных устройствах начинается с адсорбции анализируемого газа на поверхности сенсора, на чувствительность работы устройства будут влиять факторы, способствующие увеличению адсорбции, например, увеличение площади поверхности тонкопленочной структуры за счет более выраженного рельефа поверхности. В случае полимерных пленочных образцов топография и морфология поверхности связаны с различиями в надмолекулярной структуре, обусловленными условиями получения пленок, такими как концентрация полимера в формовочном растворе и наличие структурообразующих добавок [11]. Действительно, изменение концентрации полимера в исходном растворе и наличие наночастиц AgI существенно сказываются на морфологии пленки (рис. 1). Пленки, полученные из растворов натриевой соли N-сукцинилхитозана концентрацией 1% и менее, характеризуются структурой, состоящей из мелких зерен надмолекулярных образований с размером порядка нескольких нанометров. При повышении концентрации натриевой соли N-сукцинилхитозана в растворе до 2% формируются продолговатые зернистые элементы структуры длиной в несколько микрометров. Присутствие наночастиц AgI оказывает влияние на морфологию элементов структуры и топографию поверхности пленок, причем самое значительное влияние наблюдается в случае менее концентрированных 1%-ных исходных растворов натриевой соли N-сукцинилхитозана. Данный факт можно связать с тем, что на частицах AgI происходит адсорбция макромолекул полимера, следовательно, наночастицы служат дополнительными узлами сетки зацеплений макромолекул, что приводит к изменению степени структурированности системы. В случае больших концентраций полимера число межмолекулярных контактов растет, и вклад наночастиц иодида серебра в структурообразование растворов не столь значителен. Максимально выраженным рельефом поверхности характеризуются пленочные образцы на основе полимер-коллоидных дисперсий натрийкарбоксиметилцеллюлоза–AgI и хитозан–AgI (табл. 1).

Образцы, характеризующиеся наиболее выраженным рельефом и соответственно площадью поверхности, обладают максимальной чувствительностью электрического сопротивления к изменению концентрации аммиака (рис. 2). Следует отметить, что пленки на основе индивидуальных полисахаридов

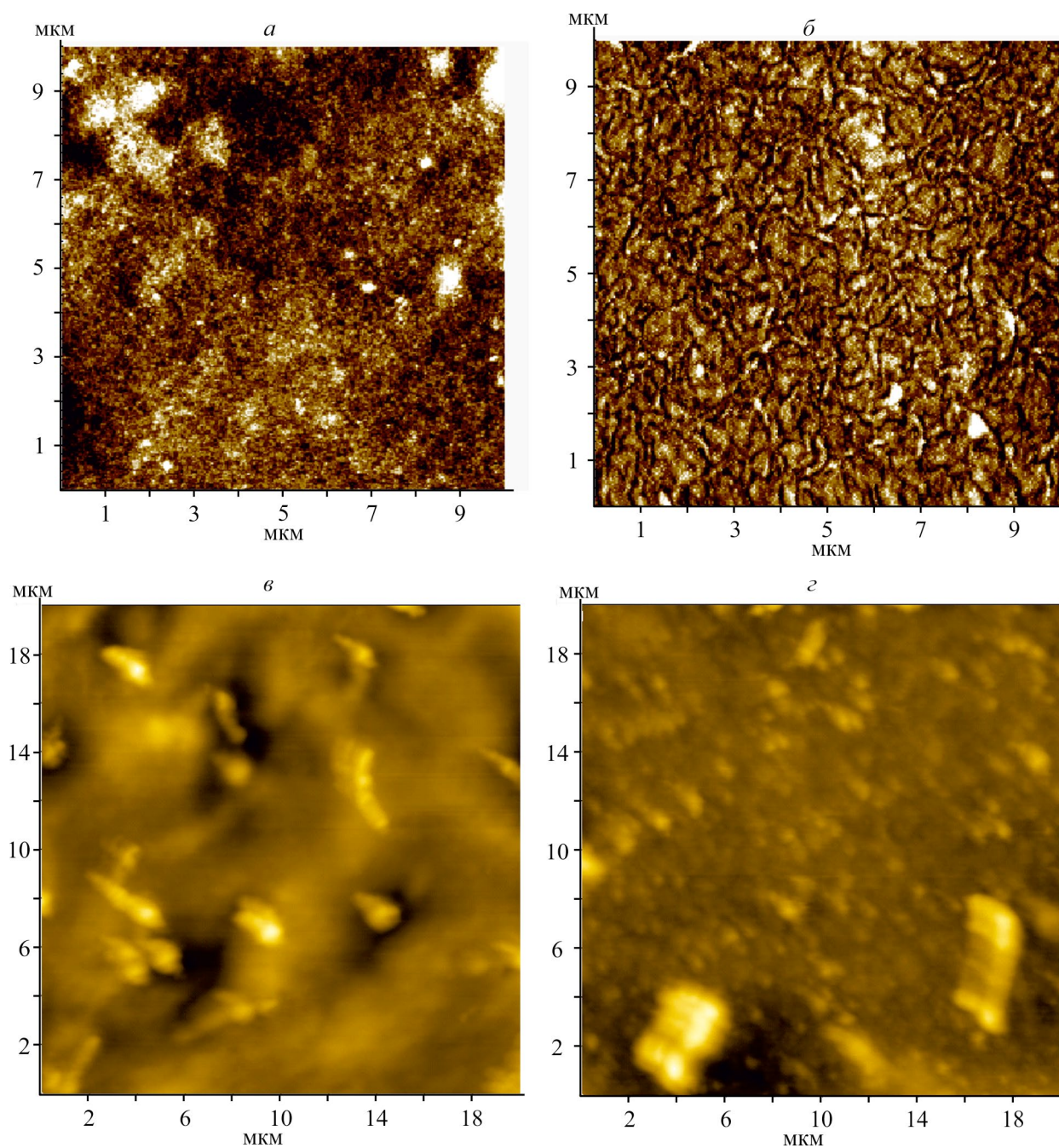


Рис. 1. Фазово-контрастные изображения поверхности пленок натриевой соли N-сукцинилхитозана толщиной 150 мкм, полученных из 1.0 (а, б) и 2%-ных (в, г) растворов натриевой соли N-сукцинилхитозана в отсутствие (а, в) и в присутствии (б, г) наночастиц AgI.

не проявляют сенсорных свойств по отношению к аммиаку. Следовательно, предположение о комплексообразовании аммиака при его взаимодействии с частицами AgI на поверхности и, возможно, в объеме пленки вполне обосновано.

Ряд образцов характеризуется резким падением сопротивления при небольших концентрациях аммиака ($5\text{--}50\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$) и отсутствием изменения со-

противления при более высоких его концентрациях, что может быть связано как с достижением фазового равновесия процесса адсорбции газа на поверхности пленки, так и с достижением химического равновесия процесса комплексообразования. Следует отметить, что максимальное падение электрического сопротивления происходит при концентрациях аммиака, близких к предельно-допустимой концентрации

Таблица 1

Некоторые характеристики топографии поверхности пленочных образцов на основе индивидуальных хитозана, натриевой соли N-сукцинилхитозана и натрийкарбоксиметилцеллюлозы и полимер-коллоидных дисперсий с AgI

Состав пленки	Концентрация полимера в исходном растворе, %	Среднеквадратичная шероховатость поверхности пленок, нм	Удельная площадь поверхности
Натриевая соль N-сукцинилхитозана–AgI	2	33	31
	1	40	48
Натрийкарбоксиметилцеллюлоза–AgI–глицерин 0.175%	0.5	61	37
Хитозан–AgI–глицерин 0.35%	1	60	55
Натрийкарбоксиметилцеллюлоза–AgI–глицерин 0.35%	2	63	61

аммиака в воздухе рабочей зоны.* Сопротивление пленочных образцов достигало первоначальных значений в течение не более 10–12 с (рис. 3) по мере уменьшения концентрации аммиака вплоть до нуля. Сопротивление пленочных образцов на основе индивидуальных полисахаридов (9–12 ГОм) в отсутствие наночастиц иодида серебра оставалось неизменным и не изменялось в присутствии аммиака в воздухе.

Тонкопленочные структуры для сенсорных устройств должны обладать определенным набором деформационно-прочностных свойств, обеспечивающим их целостность при хранении и транспортировке. Так как процесс формирования дополнительной сетки зацеплений макромолекул и одновременное изменение конформационного состояния полимеров в растворе в присутствии гидрофобных частиц золя AgI не может не сказаться на физико-механических свойствах формируемой системы, то еще одной предпосылкой для использования именно гибридных нанокompозитов на основе полимер-коллоидных дисперсий полисахарид–AgI является возможность упрочнения полимерных пленок в присутствии наночастиц. Взаимодействие компонентов системы полисахарид–золь AgI приводит к изменению физико-механических свойств полимера (табл. 2). Композитные пленки, полученные из полимер-коллоидных дисперсий состава натрийкарбоксиметилцеллюлоза 1%–AgI–глицерин 0.35%, имеют величину прочности при растяжении на 14% большую, чем в случае пленки, полученной из 1%-ного раствора индивидуальной натрийкарбоксиметилцеллюлозы. Более высокую (на

28%) прочность при растяжении по сравнению с этим показателем немодифицированной пленки имеет материал, полученный из полимер-коллоидной дисперсии натриевая соль N-сукцинилхитозана 0.5%–AgI. Введение пластифицирующей добавки (глицерина) позволяет увеличить относительное удлинение наполненных наночастицами AgI пленочных материалов на основе хитозана на 90%. Пластифицирующий эффект глицерина выражен и в случае пленок на основе натрийкарбоксиметилцеллюлозы. Таким об-

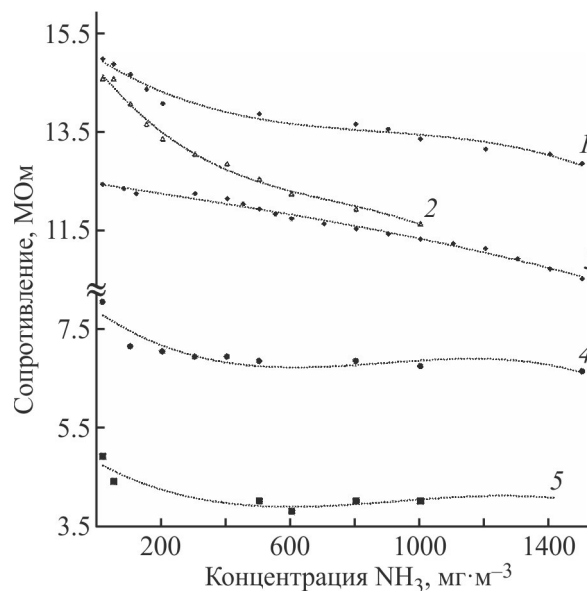


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления пленок от концентрации паров аммиака: хитозан 1%–AgI–глицерин 0.175% (1), натрийкарбоксиметилцеллюлоза 2%–AgI–глицерин 0.35% (2), натриевая соль N-сукцинилхитозана 1%–AgI (3), натрийкарбоксиметилцеллюлоза 0.5%–AgI–глицерин 0.175% (4), натриевая соль N-сукцинилхитозана 2%–AgI (5).

* Согласно ГОСТ 12.1.005–88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны», предельно-допустимая концентрация аммиака в воздухе рабочей зоны составляет 20 мг·м⁻³.

Таблица 2

Физико-механические характеристики пленочных образцов на основе индивидуальных полисахаридов и на основе полимер-коллоидных дисперсий полисахаридов с AgI

Состав композиции	Модуль упругости, Па	Прочность при растяжении, Па	Относительное удлинение, %
Хитозан 0.5%	235	24.3	2.9
Натриевая соль N-сукцинилхитозана 0.5%	587	18.1	3.1
Натриевая соль N-сукцинилхитозана 1%	650	19.2	3.0
Натрийкарбоксиметилцеллюлоза 1%	609	27.4	3.4
Натрийкарбоксиметилцеллюлоза 0.5%	705	19.4	4.9
Натриевая соль N-сукцинилхитозана 1%–AgI	890	21.0	3.3
Хитозан 0.5%–AgI–глицерин 0.175%	350	20.8	30.2
Натриевая соль N-сукцинилхитозана 0.5%–AgI	807	25.0	3.3
Натрийкарбоксиметилцеллюлоза 0.5%–AgI–глицерин 0.175%	502	22.2	11.1
Натрийкарбоксиметилцеллюлоза 1%–AgI–глицерин 0.35%	481	32.0	13.6

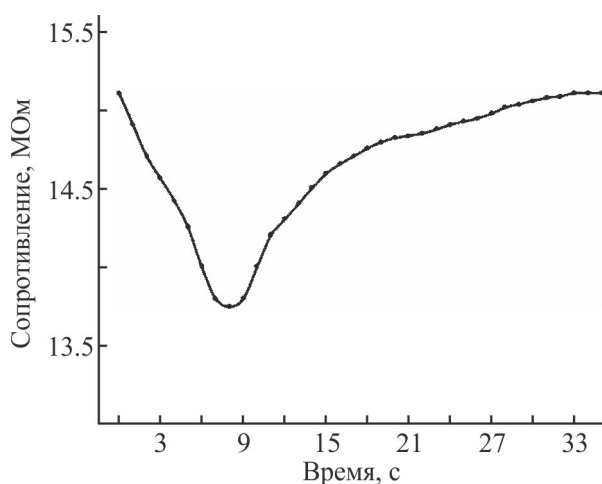


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления пленки хитозан 1%–AgI–глицерин 0.175% от времени при подаче и удалении аммиака.

разом, варьирование состава пленочных образцов на основе полисахаридов и наночастиц AgI позволяет управлять их сенсорными и физико-механическими свойствами.

Выводы

Получены гибридные нанокompозитные пленочные материалов на основе натрийкарбоксиметилцеллюлозы, хитозана и натриевой соли N-сукцинилхитозана и коллоидных частиц иодида серебра. Проведенная оценка возможности их использования в сенсорных устройствах для контроля содержания аммиака показала, что для большей части получен-

ных пленочных образцов максимальное падение электрического сопротивления происходит в интервале концентраций аммиака, в который входит предельно-допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны, составляющая $20 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Также полученные гибридные тонкопленочные структуры обладают оптимальным набором деформационно-прочностных свойств, обеспечивающим их целостность при хранении и транспортировке.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке государственного задания (научный шифр FZWU-2023-0002).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

М. В. Базунова и Р. Б. Салихов внесли существенный вклад в концепцию работы и утвердили окончательный вариант статьи для публикации, также участвовали в написании текста и критическом пересмотре его содержания; И. Н. Муллағалиев, И. Н. Сафарғалин, А. Д. Остальцова сняли зависимости электрических сопротивлений; Т. Б. Терегулов синтезировал упомянутые в статье материалы и интерпретировал результаты работы; Т. Р. Салихов изучил и решил вопросы, связанные с целостностью всех частей статьи.

Информация об авторах

Базунова Марина Викторовна, к.х.н., доцент
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3160-3958>

Салихов Ренат Баязитович, д.ф.-м.н., проф.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0603-4183>

Муллағалиев Ильнур Наильевич
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7037-6201>

Терегулов Тагир Булатович
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7146-3171>

Салихов Тимур Ренатович, к.ф.-м.н.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2884-0042>

Сафарғалин Идрис Нарисович, к.ф.-м.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6202-6984>

Остальцова Анастасия Дмитриевна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6574-2789>

Список литературы

- [1] Пат. РФ 2133029 (опубл. 27.06.1995). Датчик концентрации аммиака.
- [2] Пат. РФ 1032389 (опубл. 30.07.1983). Датчик для определения аммиака в газе.
- [3] Müller K., Bugnicourt E., Latorre M., Jorda M., Sanz E., Lagaron J. M., Miesbauer O., Bianchin A. Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields // *Nanomaterials*. 2017. V. 7 (4). ID 74. <https://doi.org/10.3390/nano7040074>
- [4] Калмыкова Е. Н., Гарбузова А. В., Ермолаева Т. Н., Зубова Н. Ю. Применение сульфатированных полисахаридов для активации электродов пьезокварцевого иммуносенсора // *Вестн. ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация*. 2007. № 1. С. 43–48.
- [5] Критченков А. С., Ягафаров Н. З., Хрусталёв В. Н. Полимерные пленки и покрытия на основе хитозана М.: Рос. ун-т дружбы народов, 2021. С. 115–124.
- [6] Холтураев Б. Ж., Атаханов А. А., Сарымсаков А. А. Гемостатические пленки на основе карбоксиметилцеллюлозы // *Universum: химия и биология*. 2021. № 9 (87). С. 50–55. <https://doi.org/10.32743/UniChem.2021.87.9.12248>
- [7] Мусихин С. Ф., Александрова О. А., Лучинин В. В., Максимов А. И., Матюшкин Л. Б., Мошников В. А. Сенсоры на основе металлических и полупроводниковых коллоидных наночастиц для биомедицины и экологии // *Биотехносфера*. 2013. № 2 (26). С. 2–16. <https://www.elibrary.ru/rexroj>
- [8] Trani A., Petrucci R., Marrosu G., Zane D., Curulli A. Selective electrochemical determination of caffeine at a gold-chitosan nanocomposite sensor: May little change on nanocomposites synthesis affect selectivity? // *J. Electroanal. Chem.* 2017. V. 788. P. 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.01.049>
- [9] Горяев М. А., Смирнов А. П. Галогениды серебра как уникальные фотохимически чувствительные полупроводники // *Изв. ГПУ им. А. И. Герцена*. 2014. № 165. С. 52–60. <https://www.elibrary.ru/rwukov>
- [10] Базунова М. В., Валиев Д. Р., Замула Ю. С., Чернова В. В., Колесов С. В., Кулиш Е. И. О возможности получения устойчивых наноразмерных зольей иодида серебра в присутствии полимерного стабилизатора — хитозана // *Хим. физика*. 2017. Т. 36. № 6. С. 70–78. <https://doi.org/10.7868/S0207401X1706006.1>
[Bazunova M. V., Valiev D. R., Zamula Y. S., Chernova V. V., Kolesov S. V., Kulish E. I. On the possibility of preparing stable silver iodide nanosols in the presence of chitosan used as a polymer stabilizer // *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2017. V. 11. N 3. P. 513–520. <https://doi.org/10.1134/S1990793117030174>].
- [11] Шуришина А. С., Базунова М. В., Чернова В. В., Галина А. Р., Лаздин Р. Ю., Кулиш Е. И. Влияние надмолекулярной организации на некоторые характеристики пленок сукцинамида хитозана, полученных из водных растворов // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А*. 2020. Т. 62. № 4. 294–301. <https://doi.org/10.31857/S2308112020040100>
[Shurshina A. S., Bazunova M. V., Chernova V. V., Galina A. R., Lazdin R. Y., Kulish E. I. Influence of supramolecular organization on some characteristics of chitosan succinamide films produced from aqueous solutions // *Polym. Sci. Ser. A*. 2020. V. 62. N 4. P. 422–429. <https://doi.org/10.1134/S0965545X20040100>].