

Получение и свойства антибактериальных полимерных композитов на основе поливинилового спирта и наночастиц серебра

А.Л. Толстов¹, О.Н. Маланчук², И.Н. Бей¹, Д.А. Климчук³

¹Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины
48, Харьковское шоссе, Киев, 02160, Украина

²Институт молекулярной биологии и генетики НАН Украины
150, ул. Академика Заболотного, Киев, 03680, Украина

³Институт ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины
2, ул. Терещенковская, Киев, 01601, Украина

*Получены полимерные композиционные материалы с антибактериальными свойствами на основе поливинилового спирта, содержащие дисперсные биосовместимые неорганические наполнители с наночастицами серебра. Разработан метод получения наночастиц серебра с формой тонких тригональных призм, стабилизированных полиакриламидом. Предложен метод повышения адсорбционной емкости наполнителей по отношению к наночастицам серебра. Исследования антибактериальной активности полученных материалов на модельной тест-культуре *Escherichia coli* показали их высокую эффективность при содержании наночастиц серебра более 0,018 %.*

Ключевые слова: полимерные композиты, поливиниловый спирт, наночастицы серебра, наполнители, антибактериальные свойства.

В последние годы с целью улучшения эпидемиологической ситуации и предотвращения распространения заболеваний, вызванных различными видами патогенных микроорганизмов, интенсивное развитие получило направление по созданию полимерных материалов с противомикробной активностью. В сравнении с другими противомикробными агентами (мышьяк-, галоген- и азотсодержащие вещества, гуанидины, фенолы и др.), серебро и его производные обладают рядом преимуществ:

- широким спектром противомикробного действия (зафиксирована активность к более 650 видам микроорганизмов, среди которых бактерии, вирусы, грибы);
- высокой активностью при минимальной концентрации (цитотоксический эффект к некоторым микроорганизмам отмечается при концентрации серебра 1–5 мкг/л);
- отсутствием достоверных данных о формировании резистентности микроорганизмов к серебру;
- возможностью использования в самых разнообразных технологических процессах как в виде соединений (соли, комплексные соединения), так и в металлической форме (нано- и микрочастицы).

До настоящего времени известно большое количество противомикробных полимерных материалов и композитов, содержащих серебро [1–12]. Основными

полимерами для получения таких композитов являются полиуретаны [1–3], полиакрилаты [4, 5], полиамиды [6, 7], полиэферы [3, 8], эпоксидные полимеры [9] и некоторые другие [11]. При этом в качестве противомикробных добавок использовали соли [6, 10–12], органические производные серебра [3], Ag⁺-содержащие неорганические наполнители (цеолиты, фосфат циркония) [2, 7], металлическое серебро [1, 8–11].

Использование гидрофильных (в том числе водорастворимых) полимеров способствует ускоренному проявлению антибактериальных свойств и быстрой доставке активного компонента в загрязненные (инфицированные) зоны. В качестве гидрофильных полимеров наиболее часто применяют акриловые полимеры [4, 5], поливиниловый спирт [10–12].

Например, в работе [10] предложен способ получения антимикробных материалов на основе поливинилового спирта (ПВС) путем введения AgNO₃ в количестве 0,78 – 14,17 % мас. (0,5–9,0 % мас. серебра) в водный раствор полимера с последующим прогревом полученной системы, что способствует частичному восстановлению Ag⁺ до наночастиц металла. Проверка эффективности полученных композитов показала, что зона лизиса тест-культур бактерий (*Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*) варьируется от 4,5 до 9,0 мм в зависимости от концентрации Ag⁺. В работе [11] волок-

на композита ПВС/AgNO₃ (содержание AgNO₃ равно 1 %), полученные методом электропрядения, подвергли температурной и УФ обработке для восстановления Ag⁺ и получения соответствующего нанокompозита. Авторы доказали эффективность полученного материала против штаммов *S. aureus* и *Klebsiella pneumoniae*. Использование нановолокон состава хитозан/ПВС/AgNO₃/TiO₂, полученных электропрядением из смеси растворов хитозана в HCOOH, ПВС, AgNO₃ и дисперсии TiO₂ в воде, в качестве противомикробных материалов показало их эффективность против *E. coli* и *S. aureus* [12]. Эффективность антибактериального эффекта обеспечивается влиянием как Ag⁺ (концентрация варьируется от 0,01 до 0,04 % мас.), так и эффективного противомикробного агента – хитозана (концентрация 3–15 % мас.).

Исходя из известных, на сегодня, результатов исследований, в данной работе был предложен метод получения полимерных композитов на основе ПВС и стабилизированных наночастиц серебра (НС), диспергированных непосредственно в полимерной матрице или нанесенных на поверхность дисперсного неорганического носителя (наполнителя), который в дальнейшем вводится в полимер. Предложен способ увеличения адсорбционной емкости наполнителя по отношению к НС, исследовано влияние наночастиц металла на характеристики полученных систем, оценены противомикробные свойства полученных материалов.

Экспериментальная часть.

В работе использованы поливиниловый спирт марки Celvol 103 (ПВС, M_v = (1,3–2,3)·10⁴), полиакриламид (ПААМ, M_v = 10⁴), высокодисперсный SiO₂ марки Аэросил А-300, Ca(CH₃COO)₂·xH₂O, H₃PO₄ и γ-аминопропилтриэтоксисилан (АПТС) (квалификации «ч.д.а.» и «х.ч.») разных производителей.

Стабилизированные наночастицы серебра (НС) получали методом термически индуцированного восстановления Ag⁺ в 10 %-ном водном растворе ПААМ при температуре 80 °С согласно механизму, описанному в работе [13]. Соотношение ПААМ/AgNO₃ для синтеза составляло 90/10 % мас. Остаточную концентрацию Ag⁺ при предложенном методе синтеза НС (не превышает 2 % от общего содержания серебра в системе) определяли титриметрически после отделения НС центрифугированием при 14000 об./мин¹ и температуре 4 °С. Редиспергированные в воде очищенные и стабилизированные НС использовали в дальнейшем для получения полимерных композитов.

В качестве полимерных наполнителей и носителей наносеребра были использованы высокодисперсный SiO₂ и гидроксипатит (ГАП), полученный из Ca(CH₃COO)₂·xH₂O и H₃PO₄ по методике, описанной в работе [14]. С целью повышения адсорбционной емкости наполнителей по отношению к НС поверхность наполнителей модифицировали путем прививки слоя АПТС [15]. В отличие от описанного в литературе

метода, прививку АПТС проводили в водной среде при температуре 70–80 °С. Результаты количественного анализа свидетельствуют о том, что содержание NH₂ групп в образцах SiO₂ и ГАП составляет 4,3·10⁻⁴ и 1,8·10⁻⁴ моль/г соответственно (теор. 9·10⁻⁴ моль/г для обоих образцов). Данный метод модификации наполнителей позволяет достигнуть максимальной величины емкости наполнителя 0,041 г НС на 1 г наполнителя. Для проведения исследований была выбрана концентрация НС в модифицированном наполнителе, равная 2 %.

Полимерные композиты получали путем диспергирования НС или наполнителя с НС в 15 %-ном водном растворе ПВС с последующим многократным окунанием субстрата в дисперсию, фиксированной скоростью подъема субстрата (80 мм/мин) и одновременной сушкой слоя композита. В качестве субстрата использовали стекла с линейными размерами 17×17×0,17 мм. Толщина конечной пленки композита составляла 0,05±0,01 мм. Содержание серебра в пленках композита составляло 0,0061; 0,018 и 0,076 % (НС⁶¹, НС¹⁸⁰ и НС⁷⁶⁰ соответственно). Концентрация наполнителя варьировалась в зависимости от содержания серебра в композитах.

ИК-спектры образцов записывали на спектрометре Bruker Tensor® 37 в диапазоне волновых чисел 4000–400 см⁻¹ с разрешением 0,5 см⁻¹. Морфологические исследования нанокompозитов методом СЭМ проводили на комплексе JEOL JSM 6060 LA с ускоряющим напряжением 30 кВ. ТЭМ анализ проводили с использованием трансмиссионного электронного микроскопа JEOL JEM-1230. Термические свойства исследовали методом ТГА на дериватографе Q-1500D в температурном диапазоне 20–500 °С при скорости нагрева 20 °С/мин. Противомикробную активность пленок оценивали с использованием в качестве тест-культуры штамма *Escherichia coli* DH5б (Invitrogen, USA) на агаризованной среде Лурия-Бертани (LB-агар). Бактериальные клетки *E. coli* DH5б равномерно втирали стеклянным шпателем в LB-агар, затем вносили пленки образцов и инкубировали в аэробных условиях при температуре 37 °С на протяжении 12–16 ч. Сравнительную противомикробную активность образцов проверяли путём измерения размера образовавшихся зон лизиса вокруг тестируемых пленок.

Результаты исследования и их обсуждение.

ИК-спектры ПААМ и НС, стабилизированных ПААМ, представлены на рис. 1. Для доказательства взаимодействия НС и ПААМ при стабилизации НС был выбран ряд полос поглощения функциональных групп (связей), которые способны образовывать различные типы связей с ионами/частицами серебра. Идентификация основных полос поглощения на ИК-спектрах представлена в табл. 1. Согласно литературным данным, к взаимодействию с ионами и наночастицами серебра способны электронодонорные кислород- и азотсодержащие функциональные группы полимеров [16].

Таблица 1. ИК спектральные характеристики ПААМ и НС, стабилизированных ПААМ

Волновое число ν , см^{-1}		$\Delta \nu$, см^{-1}	Идентификация
ПААМ	ПААМ-НС		
-	3406	-	$\nu_{\text{a}}\text{N-H}$
3355	3351	4	$\nu_{\text{a}}\text{N-H}$
3188	3196	8	$\nu_{\text{s}}\text{N-H}$
1670	1655	15	$\nu\text{C=O}$
1613	1612	1	$\nu\text{C-C}$
1418	1413	5	$\nu\text{C-N}$
1350	1346	4	$\nu\text{N-H}$
1321	1319	2	$\nu\text{N-H}$

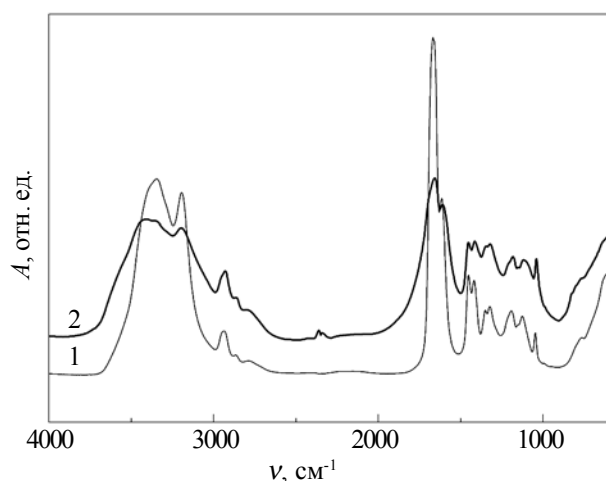


Рис. 1. ИК-спектры поглощения ПААМ (1) и НС, стабилизированных ПААМ (2)

Полоса $\nu\text{C-C}$ была выбрана в качестве стандарта.

Из представленных данных видно, что максимальная величина $\Delta \nu$ характерна для C=O акриламидного фрагмента, что полностью согласуется с литературными данными о взаимодействии полимеров в процессе стабилизации НС посредством кислорода C=O групп [16]. Результатом такого взаимодействия также является сдвиг полос $\nu_{\text{a}}\text{N-H}$, $\nu_{\text{s}}\text{N-H}$, $\nu\text{C-N}$ и $\gamma\text{N-H}$ на 4–8 см^{-1} и появление полосы «свободных» NH_2 групп ($\nu_{\text{a}}\text{N-H}$) вследствие перераспределения внутри- и межмолекулярных водородных связей типа $\text{N-H}\cdots\text{O=C}$ и участия части C=O во взаимодействиях с поверхностью НС.

Микрофотографии ТЭМ стабилизированных НС представлены на рис. 2. Как видно, НС, стабилизированные ПААМ, представляют собой усеченные тонкие призмы с линейным размером 20–30 нм и толщиной до 10 нм. Данная форма нанокристаллов, основная поверхность которых представляет собой грань (111), является наиболее активной с точки зрения бактерицидного воздействия [17].

ИК-спектры ГАП и его модифицированных аналогов представлены на рис. 3. Согласно [18], спектр поглощения ГАП характеризуется наличием полос валентных колебаний «свободных» OH -групп при 3571 см^{-1} и широкой полосы «связанных» H -связями OH -групп в

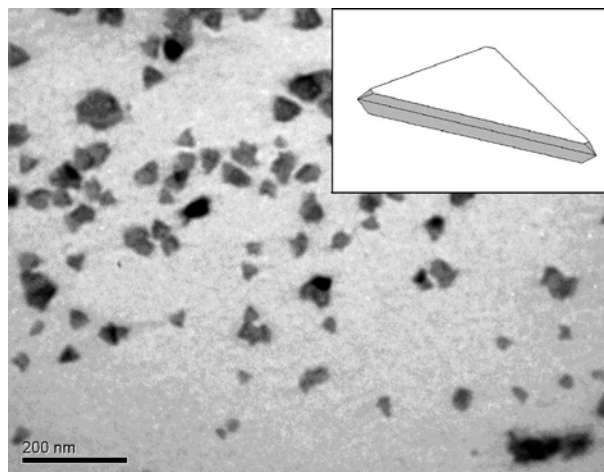


Рис. 2. ТЭМ микрофотографии НС, стабилизированных ПААМ (на вставке – схематическое изображение формы НС)

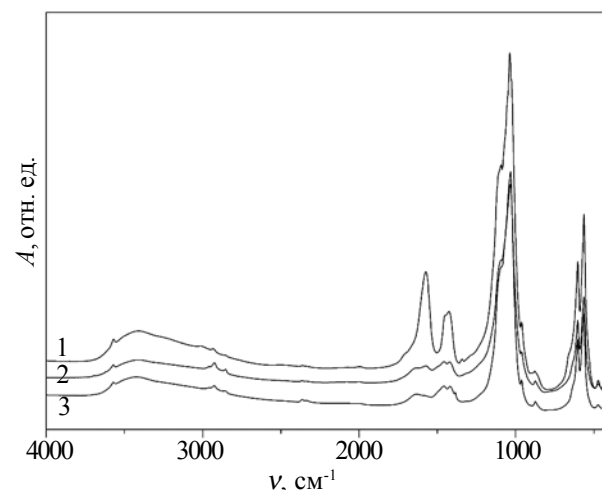


Рис. 3. ИК-спектры ГАП (1); ГАП-АПТС (2) и ГАП-АПТС-НС (3)

диапазоне 3500–3100 см^{-1} , в также полосами поглощения PO_4^{3-} с максимумами при 1095, 1038, 959, 602 и 564 см^{-1} . Присутствие на спектре интенсивных полос при 1576 и 1425 см^{-1} (ν_{as} и $\nu_{\text{s}}\text{COO}^-$ соответственно) связано с наличием избытка ионов CH_3COO^- , адсорбированных ГАП. При модификации поверхности ГАП АПТС происходит уменьшение интенсивности полос OH^- вследствие уменьшения их концентрации при взаимодействии с АПТС, а также увеличение интенсивности полос C-H в области 3000–2800 см^{-1} . Наличие аминогрупп на поверхности наполнителя трудно идентифицировать вследствие перекрытия полос $\nu\text{N-H}$ и $\gamma\text{N-H}$ полосами валентных колебаний OH и PO_4^{3-} . Адсорбция НС на поверхности ГАП не оказывает существенного влияния на ИК-спектральные характеристики системы вследствие незначительного количества НС (и ПААМ соответственно) на поверхности ГАП. Уменьшение интенсивности полос поглощения CH_3COO^- при модификации и адсорбции НС (оба процесса проводятся в

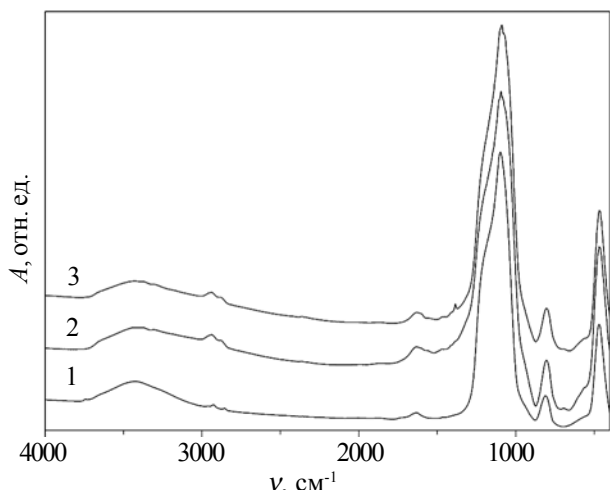


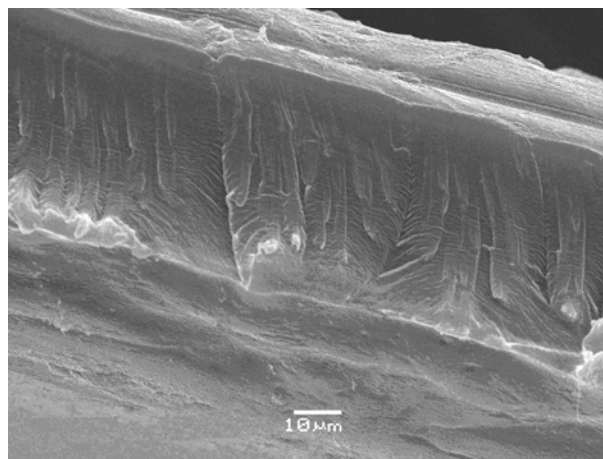
Рис. 4. ИК-спектры SiO_2 (1); SiO_2 -АПТС (2) и SiO_2 -АПТС-НС (3)

водной среде) связано с десорбцией избытка CH_3COO^- в реакционную среду.

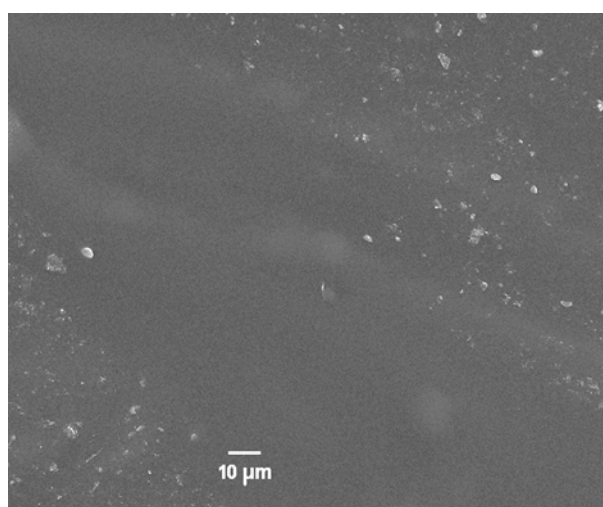
На ИК-спектре высокодисперсного SiO_2 (рис. 4) отмечается наличие широкой полосы валентных колебаний ОН-групп на поверхности SiO_2 в области $3700\text{--}3200\text{ см}^{-1}$, полосы ОН-групп молекул H_2O с максимумом при 1630 см^{-1} , комплексной полосы Si–O–Si в области $1300\text{--}950\text{ см}^{-1}$ с максимумами при ~ 1200 и $\sim 1097\text{ см}^{-1}$ и полосы поглощения O–Si–O при 810 см^{-1} . Модификация поверхности наполнителя АПТС приводит к некоторым изменениям в спектрах поглощения образца. В частности, наблюдается уменьшение интенсивности полосы поверхностных ОН-групп, появление полос поглощения $\nu\text{C–H}$ в диапазоне $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ и малоинтенсивной $\gamma\text{C–N}$ при 1414 см^{-1} . Полосы $\nu\text{N–H}$ и $\gamma\text{N–H}$ идентифицировать не удается вследствие перекрывания полосами ОН и Si–O–Si соответственно. Адсорбция НС на поверхность SiO_2 не вызывает видимых изменений спектральных характеристик модифицированного наполнителя из-за невысокой (2 %) концентрации НС.

Анализ морфологических особенностей наполненных систем проводили с использованием метода СЭМ (рис. 5). Было установлено, что образец ПБС- SiO_2 -НС¹⁸⁰ характеризуется равномерным распределением наполнителя в полимерной матрице и отсутствием крупных частиц (агрегатов) SiO_2 размером $\geq 1\text{ мкм}$, что связано с особенностями самого наполнителя, представляющего собой нанодисперсный SiO_2 , его минимальной агрегацией в процессе модификации, а также эффективным диспергированием в матрице ПБС. Композит состава ПБС-ГАП-НС¹⁸⁰ обладает четко выраженной гетерофазной структурой, поскольку выбранный для этой системы наполнитель (ГАП) состоит из частиц микронового размера (1–8 мкм).

Из литературы известно, что введение в ПБС неорганического наполнителя, например, высокодисперс-



а



б

Рис. 5. СЭМ микрофотографии композитов состава ПБС- SiO_2 -НС¹⁸⁰ (а) и ПБС-ГАП-НС¹⁸⁰ (б)

ного SiO_2 [19] или ГАП [20], повышает термические свойства наполненных систем и способствует смещению температуры начала деструкции полимерной матрицы в высокотемпературную область. Поэтому, с це-

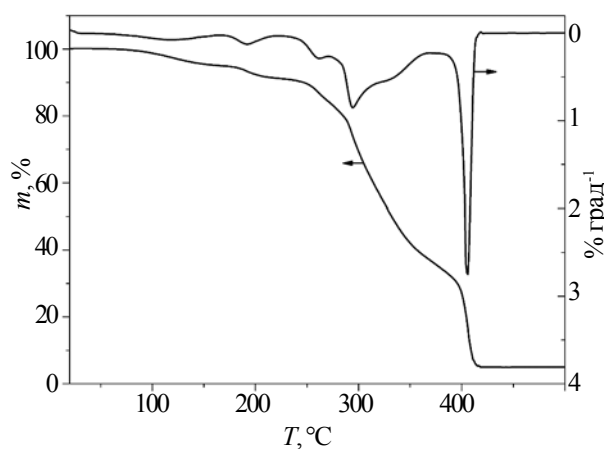


Рис. 6. Термогравиметрический анализ композита ПБС-НС⁶¹

Таблица 2. Результаты ТГА системы ПВС-НС

Стадия ТГА	ПВС				ПВС-НС ⁶¹			
	T, °C			Δm, %	T, °C			Δm, %
	T _{нач}	T _{макс}	T _{кон}		T _{нач}	T _{макс}	T _{кон}	
I	70	103	160	6	80	118	140	4
Ia	-	-	-	-	170	192	210	8
II	240	275	280	30	240	261	270	16
IIa	-	-	-	-	280	294	310	37
III	320	370	410	64	310	329	355	60
IV	420	440	480	96	380	405	415	95

лью оценки каталитического влияния НС на процессы термодеструкции полимерной матрицы был проведен термогравиметрический анализ (ТГА) композита ПВС-НС, не содержащего наполнитель. Результаты ТГА композита ПВС-НС представлены на рис. 6. Расшифровка ТГ параметров, а именно температуры начала, максимума и конца каждой стадии термодеструкции ($T_{нач}$, $T_{макс}$ и $T_{кон}$ соответственно), величина потери массы на каждой стадии (Δm) термодеструкции композита представлены в табл. 2.

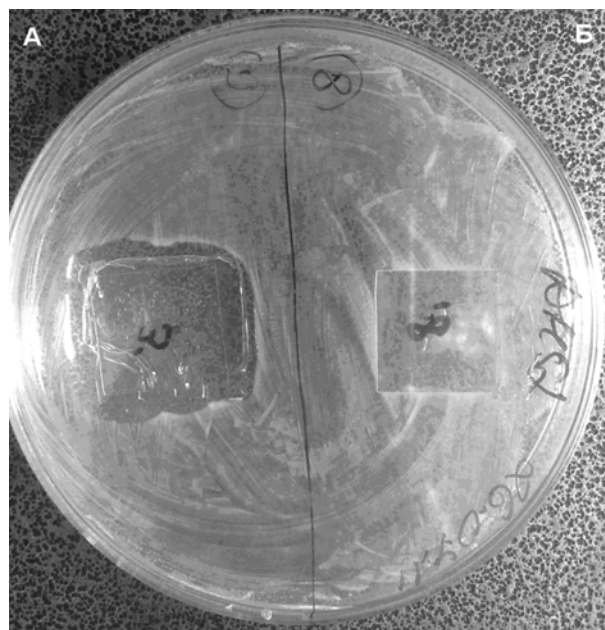
Согласно литературным данным [21], стандартный ПВС характеризуется четырьмя основными стадиями процесса термоокислительного разложения, при которых происходит: десорбция молекул воды (70–160 °C); дегидратация макроцепей ПВС с образованием полиеновых фрагментов (240–280 °C); конденсация полиеновых структур по механизму Дильса-Альдера с образованием алифатических, циклоалифатических и ароматических фрагментов в макроцепях полимера (320–410 °C) и образование углеродного остатка с высокой степенью ароматичности (420–480 °C). При введении НС в матрицу ПВС происходит сужение температурных интервалов основных стадий термоокислительной деструкции и сдвиг их начала в низкотемпературную область на 10–40 °C, а также появление новых стадий деструкции (табл. 2, стадии Ia и IIa), что, по-видимому, связано с каталитическим влиянием наночастиц металла на внутри- и межмолекулярные реакции, происходящие в полимерной матрице при высокой температуре (реакции, катализируемые НС, как окисление [22], восстановление [23], гидрирование [24] и циклоприсоединение [25] уже известны в литературе и применяются в органическом синтезе). При этом, исходя из вели-

чин потери массы в определенных интервалах температур, присутствие НС замедляет скорость потери массы образцом за счет уменьшения количества летучих продуктов термоокислительной деструкции.

Результаты исследования противомикробной активности полученных полимерных композитов представлены в табл. 3 и на рис. 7. Из полученных результатов видно, что исходный ПВС и ПВС, содержащий минимальное количество наночастиц серебра (0,0061 %) в отсутствие наполнителей практически не обладают антибактериальной активностью. Вместе с тем, заметная активность (зона лизиса тест-клеток достигает 0,7–1,0 мм) отмечается для образцов наполненных полимерных композитов, содержащих минимальную концентрацию НС (ПВС-ГАП-НС⁶¹ и ПВС-SiO₂-НС⁶¹). Вероятно, более высокая активность данных образцов, по сравнению с ненаполненным (ПВС-НС⁶¹), связана с дополнительным вкладом наполнителя (SiO₂ или ГАП) в ионизацию и диффузию противомикробного агента (Ag⁺/НС) во внешнюю среду, однако окончательные выводы можно будет сделать после дополнительных исследований.

Таблица 3. Антибактериальные свойства полученных композитов

№	Состав	Содержание Ag, мкг/г	Зона лизиса, мм
1	ПВС	0	0
2	ПВС-НС ⁶¹	61	<0,2
3	ПВС-ГАП-НС ⁶¹	61	0,5–0,7
4	ПВС-SiO ₂ -НС ⁶¹	61	0,5–1,0
5	ПВС-ГАП-НС ¹⁸⁰	180	2,0–2,5
6	ПВС-SiO ₂ -НС ¹⁸⁰	180	2,5–2,8
7	ПВС-НС ⁷⁶⁰	760	3,0–4,0


 Рис. 7. Сравнительная противомикробная активность образца ПВС-SiO₂-НС¹⁸⁰ (А) и контрольного образца ПВС (Б)

Высокая антибактериальная активность (зона лизиса тест-культуры *E. coli* достигает 3 мм) отмечается для образцов наполненных композитов, содержащих 0,018 % НС. Видно, что образец ПВС-ГАП-НС¹⁸⁰, содержащий крупнодисперсный наполнитель, обладает несколько меньшей активностью, по сравнению с композитом ПВС-SiO₂-НС¹⁸⁰ с высокодисперсным SiO₂. Стоит также отметить линейную зависимость антибактериальной активности (размер зоны лизиса) от концентрации НС в образцах наполненных композитов.

В качестве дополнительного образца сравнения была выбрана ненаполненная система с высокой концентрацией НС (0,076 %). При существенном увеличении концентрации НС в ПВС-НС⁷⁶⁰ более чем в 4 раза (по сравнению с наполненными системами ПВС-ГАП-НС¹⁸⁰ и ПВС-SiO₂-НС¹⁸⁰) зона лизиса такого образца ненамного превышает зону лизиса вышеуказанных композитов (3,0–4,0 и 2,0–2,8 мм соответственно), содержащих значительно меньшее количество антибактериальной составляющей. То есть, дополнительным фактором (кроме непосредственно концентрации антибактериального агента), оказывающим влияние на противомикробную активность полимерных композитов,

содержащих НС, является тип наполнителя (его дисперсность).

На основании представленных результатов видно, что предложенный способ получения антибактериальных полимерных композитов на основе поливинилового спирта и наночастиц серебра является эффективным и позволяет получить материалы с высокой активностью при низком содержании антибактериального компонента. Установлено, что предложенный способ модификации наполнителей разного типа является эффективным для повышения их адсорбционной емкости по отношению к наночастицам серебра. Результаты исследования термических свойств показали, что наночастицы серебра обладают каталитическим влиянием на процессы термической деструкции полимерной матрицы, уменьшая температуру начала процесса термодеструкции и существенно замедляя скорость образования летучих продуктов разложения полимера. Сравнительный анализ антибактериальной активности полученных материалов показал, что наполненные композиты являются эффективными противомикробными материалами по сравнению с ненаполненной системой при меньшей концентрации наночастиц серебра.

Литература

1. Ghosh S. // J. Macromol. Sci. A: Pure Appl. Chem. – 2005. – **42**. – P. 765-770.
2. Kam Isoglu K., Aksoy E.A., Akata B., Hasirci N., Bac N. // J. Appl. Polym. Sci. – 2008. – **110**. – P. 2854-2861.
3. Ip M., Lui S.L., Poon V.K.M., Lung I., Burd A. // J. Medical Microbiol. – 2006. – **55**. – P. 59-63.
4. Lee W.-F., Tsao K.-T. // J. Appl. Polym. Sci. – 2006. – **100**. – P. 3653-3661.
5. Murali Mohan Y., Lee K., Premkumar T., Geckeler K.E. // Polymer. – 2007. – **48**. – P. 158-164.
6. Damm C., Munstedt H., Rosch A. // J. Mater. Sci. – 2007. – **42**. – P. 6067-6073.
7. Duan Y., Jia J., Wang S., Yan W., Jin L., Wang Z. // J. Appl. Polym. Sci. – 2007. – **106**. – P. 1208-1214.
8. Benn T.M., Westerhoff P. // Environ. Sci. Technol. – 2008. – **42**. – P. 4133-4139.
9. Roy B., Bharali P., Konwar B.K., Karak N. // Bioresource Technol. – 2013. – **127**. – P. 175-180.
10. Galya T., Sedlar I. K. V., Kuritka I., Novotny R., Sedlar I. K. J., Saha P. // J. Appl. Polym. Sci. – 2008. – **110**. – P. 3178-3185.
11. Hong K.H., Park J.L., Sul I.H., Youk J.H., Kang T.J. // J. Polym. Sci. B: Polym. Phys. – 2006. – **44**. – P. 2468-2474.
12. Son B., Yeom B.-Y., Song S.H., Lee C.-S., Hwang T.S. // J. Appl. Polym. Sci. – 2009. – **111**. – P. 2892-2899.
13. Zhang Z., Han M. // J. Mater. Chem. – 2003. – **13**. – P. 641-643.
14. Liou S.-C., Chen S.-Y., Lee H.-Y., Bow J.-S. // Biomaterials. – 2004. – **25**. – P. 189-196.
15. Morrill A.R., Duong D.T., Lee S.J., Moskovits M. // Chem. Phys. Lett. – 2009. – **473**. – P. 116-119.
16. Tolstov A.L., Lebedev E.V. // Theor. Exper. Chem. – 2012. – **48**. – P. 213-226.
17. Pal S., Tak Y.K., Song J.M. // Appl. Environ. Microbiol. – 2007. – **73**. – P. 1712-1720.
18. Li Y., Ho J., Ooi C.P. // Mater. Sci. Engineering C. – 2010. – **30**. – P. 1137-1144.
19. Peng Z., Kong L.X. // Polym. Degr. Stab. – 2007. – **92**. – P. 1061-1071.
20. Xu F., Li Y., Wang X., Wei J., Yang A. // J. Mater. Sci. – 2004. – **39**. – P. 5669-5672.
21. Gilman J.W., Van der Hart, D.L. Kashiwagi T. // ACS Symp. Series. – 1994. – **599**. – P. 161-185.
22. Raji V., Chakraborty M., Parikh P.A. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2012. – **51**. – P. 5691-5698.
23. Shiju N.R., Gulians V.V. // Appl. Catal. A: General. – 2009. – **356**. – P. 1-17.
24. Lim K.H., Mohammad A.B., Yudanov I.V., Neyman K.M., Bron M., Claus P., Rosch N. // J. Phys. Chem. C. – 2009. – **113**. – P. 13231-13240.
25. Cong H., Becker C.F., Elliott S.J., Grinstaff M.W., Porco J.A. // J. Am. Chem. Soc. – 2010. – **132**. – P. 7514-7518.

Поступила в редакцию 18 января 2013 г.

Отримання і властивості антибактеріальних полімерних композитів на основі полівінілового спирту та наночастинок срібла

О.Л. Толстов¹, О.М. Маланчук², І.М. Бей¹, Д.О. Климчук³

¹Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна

²Інститут молекулярної біології і генетики НАН України
150, вул. Академіка Заболотного, Київ, 03680, Україна

³Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України
2, вул. Терещенківська, Київ, 01601, Україна

*Отримано полімерні композиційні матеріали з антибактеріальними властивостями на основі полівінілового спирту, які містять дисперсні біосумісні неорганічні наповнювачі із наночастинками срібла. Розроблено метод синтезу наночастинок срібла з формою тонких тригональних призм, що стабілізовані поліакриламідом. Запропоновано метод підвищення адсорбційної ємності наповнювачів щодо наночастинок срібла. Дослідження антибактеріальної активності отриманих матеріалів на модельній тест-культурі *Escherichia coli* показали їхню високу ефективність за вмісту наночастинок срібла $\geq 0,018$ %.*

Ключові слова: полімерні композити, полівініловий спирт, наночастинки срібла, наповнювачі, антибактеріальні властивості.

Preparation and characterization of antibacterial polymer composites based on poly(vinyl alcohol) and nanoparticulate silver

A.L. Tolstov¹, O.M. Malanchuk², I.M. Bey¹, D.A. Klimchuk³

¹Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine
48, Kharkivske shause, Kyiv, 02160, Ukraine

²Institute of Molecular Biology and Genetics NAS of Ukraine
150, Zabolotnogo str., Kyiv, 03680, Ukraine

³M.G. Kholodny Institute of Botany NAS of Ukraine
2, Tereshchenkivska str., Kyiv, 01601, Ukraine

*Polymer composite materials with antibacterial properties based on poly(vinyl alcohol), which contain fine biocompatible mineral fillers and silver nanoparticles have been obtained. The method of preparation of polyacrylamide stabilized silver nanoparticles with shape of thin truncated triangular prisms has been developed. An approach to enhance adsorption capacity of the fillers to nanoparticulate silver was proposed. Studying bactericidal activity of obtained materials on model microorganisms (*Escherichia coli*) shown the high activity of the composites containing silver nanoparticles at the concentration of $\geq 0,018$ %.*

Keywords: polymer composites, poly(vinyl alcohol), nanoparticulate silver, fillers, antibacterial properties.