



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.777

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/10992

### Серебросодержащий нанокompозит на основе водной дисперсии сетчатого поли-N-винилкапролактама

Ольга Валентиновна Слепцова<sup>1✉</sup>, Петр Олегович Кущев<sup>1</sup>,  
Владимир Федорович Селеменев<sup>1</sup>, Александр Алексеевич Синельников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, slepts@gmail.com<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Металлсодержащие полимерные нанокompозиты обладают специфическими функциональными свойствами, которые определяются природой полимерного носителя и металла. В настоящей работе изучены условия иммобилизации в водной коллоидной дисперсии сетчатого поли-N-винилкапролактама, стабилизированного гидрофобно модифицированным полиакриламидом, биологически активных наночастиц серебра.

Синтез агрегативно устойчивой водной дисперсии сетчатого поли-N-винилкапролактама осуществляли посредством осадительной гетерофазной радикальной полимеризации. Методами просвечивающей электронной микроскопии и динамического рассеяния света подтверждены сферическая форма и наноразмер синтезированных частиц. С помощью ИК-спектроскопии охарактеризовано взаимодействие гидрофобно модифицированного полиакриламида и сетчатого поли-N-винилкапролактама, стабилизированного данным полимерным ПАВ. Обнаружено появление амидных группировок и карбоксильных групп, предположено образование надмолекулярных структур.

Синтез серебросодержащего нанокompозита на основе полимерной дисперсии осуществляли путем химического восстановления адсорбированных на частицах полимера ионов серебра с использованием различных восстановителей. Обнаружено, что введение ионов серебра в полимерную дисперсию не вызывает ее коагуляцию. Наряду с ионно-электростатическим фактором устойчивости, обеспечиваемым частично гидролизованными до карбоксильных групп аминогруппами в поверхностно-активном полиакриламиде, действуют факторы, имеющие неэлектрическую природу.

С привлечением УФ-спектроскопии выявлено взаимодействие ионов серебра с полимерным носителем. Методами динамического рассеяния света и просвечивающей электронной микроскопии установлено, что связывание ионов серебра с полимерной матрицей приводит к уменьшению размера полимерных частиц при сохранении их формы, а также увеличению доли частиц нанометрового размера. Проведенные исследования позволили утверждать, что ионы серебра удерживаются на поверхности полимерных частиц за счет ионообменной и специфической адсорбции, а следующий этап – восстановление ионов  $Ag^+$  до металлического состояния  $Ag^0$  протекает именно в полимерной матрице.

В качестве химических восстановителей ионов серебра в работе использовали борогидрид натрия, гидразин, глюкозу, тартрат калия, натрия. При использовании сильных восстановителей (борогидрида натрия и гидразина) образование наночастиц серебра подтверждено появлением на оптических спектрах полосы плазмонного поглощения с длиной волны 412-419 нм.

Методом доплеровского микроэлектрофореза были измерены электрокинетические потенциалы полимерной дисперсии и нанокompозитов. Благодаря наличию карбоксильных групп в полимерном ПАВ на поверхности частиц  $\zeta$ -потенциал имеет небольшое отрицательное значение. Оказалось, что в процессе синтеза положительно заряженные ионы серебра при высокой их концентрации могут адсорбироваться на поверхности полимерных частиц в сверхэквивалентном количестве, вызывая перезарядку дисперсии. При этом ионы серебра не восстанавливаются полностью такими слабыми восстановителями, как глюкоза и тартрат калия, натрия.

**Ключевые слова:** серебросодержащий нанокompозит, поли-N-винилкапролактама, наночастицы серебра, химические восстановители



**Благодарности:** результаты исследований частично получены на оборудовании Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета. URL: <http://ckp.vsu.ru>

**Для цитирования:** Слепцова О.В., Кушчев П.О., Семенов В.Ф., Синельников А.А. Серебросодержащий нанокompозит на основе водной дисперсии сетчатого поли-N-винилкапролактама // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 1. С. 41-55. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/10992>

Original article

## Silver-containing Nanocomposite based on aqueous dispersion of reticulated poly-N-vinylcaprolactam

Olga V. Sleptsova<sup>1</sup>✉, Petr O. Kushchev<sup>1</sup>,  
Vladimir F. Selemenev<sup>1</sup>, Alexander A. Sinelnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University, Voronezh, Russia, [slepts@gmail.com](mailto:slepts@gmail.com)✉

**Abstract.** Metal-containing polymer nanocomposites have specific functional properties, determined by the nature of the polymer carrier and metal. In this study we investigated the conditions of the immobilization of a reticulated poly-N-vinylcaprolactam stabilized by a hydrophobically modified polyacrylamide of biologically active silver nanoparticles in an aqueous colloidal dispersion.

Synthesis of an aggregative stable aqueous dispersion of a reticulated poly-N-vinyl caprolactam was carried out by precipitation heterophase radical polymerization. The spherical shape and nanosize of the synthesized particles were confirmed by transmission electron microscopy and dynamic light scattering. The interaction of hydrophobically modified polyacrylamide and reticulated poly-N-vinylcaprolactam stabilized by this polymeric surfactant was characterized by IR spectroscopy. The appearance of amide groups and carboxyl groups was found, and the formation of supramolecular structures was suggested.

The synthesis of a silver-containing nanocomposite based on a polymer dispersion was carried out by chemical reduction of silver ions adsorbed on polymer particles using various reducing agents. It was found that the introduction of silver ions into the polymer dispersion does not cause its coagulation. Factors of a non-electrical nature act along with the ionic-electrostatic stability factor provided by amino groups partially hydrolyzed to carboxyl groups in surface-active polyacrylamide.

The interaction of silver ions with a polymer carrier was revealed using the UV spectroscopy. Using dynamic light scattering and transmission electron microscopy, it was found that the binding of silver ions to a polymer matrix leads to a decrease in the size of polymer particles while their shape was maintained, as well as an increase in the fraction of nanometer-sized particles. The conducted studies allowed to conclude that silver ions are retained on the surface of polymer particles due to ion-exchange and specific adsorption, and the next stage is the reduction of  $Ag^+$  ions into the metallic  $Ag^0$  takes place in the polymer matrix.

Sodium borohydride, hydrazine, glucose, potassium tartrate, and sodium were used as chemical reducing agents for silver ions. With the use of strong reducing agents (sodium borohydride and hydrazine), the formation of silver nanoparticles was confirmed by the appearance of a plasmon absorption band with a wavelength of 412-419 nm in the optical spectra.

Doppler microelectrophoresis was used to measure the electrokinetic potentials of the polymer dispersion and nanocomposites. Due to the presence of carboxyl groups in the polymeric surfactant on the surface of the particles, the  $\zeta$  potential had a small negative value. It turned out that during the synthesis, at a high concentration positively charged silver ions can be adsorbed on the surface of polymer particles in a superequivalent amount, causing dispersion recharging. At the same time, silver ions were not completely reduced by such weak reducing agents as glucose and potassium and sodium tartrate.

**Keywords:** silver-containing nanocomposite, poly-N-vinylcaprolactam, silver nanoparticles, chemical reducing agents.

**Acknowledgments:** The research results were partially obtained using the equipment of the Centre for Collective Use of Scientific Equipment of Voronezh State University. URL: <http://ckp.vsu.ru>

**For citation:** Sleptsova O.V., Kushchev P.O., Selemenev V.F., Sinelnikov A.A. Silver-containing Nanocomposite based on aqueous dispersion of reticulated poly-N-vinylcaprolactam. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(1): 41-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/10992>

## Введение

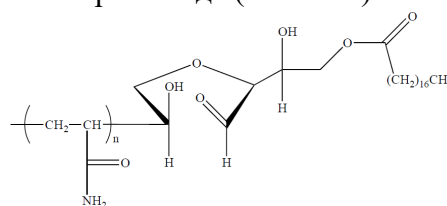
Металлсодержащие полимерные материалы вызывают большой интерес в различных областях науки. Особенно привлекательны полимерные композиты, содержащие наноразмерный металл, так как для металла в таком состоянии характерны уникальные свойства (каталитические, электрические, биологические, оптические). Переход к наноразмерам приводит к появлению качественных изменений в физико-химических и медико-биологических свойствах, связанных со значительной величиной их поверхности и другими размерными эффектами [1-7].

Стабилизировать металлические частицы в наноразмерном состоянии сложно, поэтому использование для этих целей растворов полимеров в качестве стабилизаторов является одним из интенсивно развивающихся направлений получения наноструктурированных металлсодержащих систем [8-12]. Полимерный носитель определяет не только уникальные физико-химические свойства металлсодержащего нанокompозита, но и его практическое применение. Одним из таких полимеров, использование которого в качестве стабилизирующей матрицы для наноразмерного серебра представляется весьма актуальным, является биосовместимый стимулчувствительный поли-N-винилкапролактam – карбоцепной полимер с амидной группой в боковом заместителе. Сочетание бактерицидной, антивирусной и антигрибковой активности наносеребра и биосовместимости поли-N-винилкапролактamа предопределяет перспективное использование нанокompозита в медико-биологических целях.

Цель настоящей работы заключалась в изучении условий синтеза серебросодержащего нанокompозита на основе водной дисперсии сетчатого поли-N-винилкапролактamа.

## Экспериментальная часть

Синтез сетчатого поли-N-винилкапролактamа (ПВК) проводили методом осадительной гетерофазной радикальной полимеризации N-винилкапролактamа (ВК) в водной среде по методике, изложенной в [13-15]. N-винилкапролактam растворяли в толуоле вместе со сшивающим агентом N,N'-метилден-бис-акриламидом (МБАА) и затем диспергировали в водной среде в присутствии поверхностно-активного гидрофобно модифицированного полиакриламидом (ГМПАА):



Реакционную смесь нагревали при интенсивном перемешивании до 70°C и вводили инициатор – водорастворимый персульфат калия K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. Полимеризацию проводили в течение 5 часов.

Полученную водную дисперсию ПВК (микродель) очищали от побочных продуктов полимеризации диализом, применяя полуволоконный диализатор серии Rhexeed-LX.

Дисперсию сетчатого ПВК использовали в качестве матрицы для синтеза серебросодержащего нанокompозита. Основные стадии синтеза серебросодержащего нанокompозита включали насыщение полимерной дисперсии ионами серебра (AgNO<sub>3</sub>) и восстановление ионов серебра до металлического состояния химическим восстановителем [16-17]. В качестве восстановителей использовали глюкозу (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), тартрат К, Na (KNaC<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub>·4H<sub>2</sub>O); борогидрид Na (NaBH<sub>4</sub>), гидразин (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O). Полимерная матрица является стабилизатором наночастиц серебра, препятствует их агрегации и коагуляции.

Размеры полимерных и полимер-металлических наночастиц определяли на модульном спектрометре динамического и статического рассеяния света Photocor-

Complex с He-Ne лазером (длина волны  $\lambda=632.799988$  нм, угол  $90^\circ$ ).

ИК-спектры получали с помощью ИК-Фурье спектрометра Bruker Vertex 70, нанося исследуемые растворы на пластинки из  $\text{CaF}_2$ . УФ-спектры регистрировали на спектрометре UNICO-2800 в кварцевых кюветах. Измерения  $\zeta$ -потенциала частиц полимера проводили на анализаторе размера частиц Zetasizer Nano ZSP методом электрофоретического рассеяния света.

### Обсуждение результатов

Свойства частиц сетчатого ПВК, стабилизированных ГМПАА. Методом динамического рассеяния света (ДРС) было определено, что диализованная водная дисперсия ПВК представлена частицами нанометрового и микрометрового размера примерно в соотношении 1:1, то есть является полидисперсной (рис. 1). Гидродинамический радиус  $R_h$  нанодисперсной фракции составляет порядка 100-150 нм и остается постоянным длительное время.

Изображение полимерных частиц, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в вакууме, подтверждают некоторую полидисперсность системы, а также сферическую

форму и наноразмер синтезированных частиц (рис. 2).

Согласно ПЭМ, диаметр полимерных частиц составляет порядка 100 нм, что меньше удвоенного гидродинамического радиуса частиц  $R_h$ , определенного методом ДРС. Расхождение связано с тем, что в водной среде ГМПАА, находящийся на поверхности частиц, имеет менее компактную конформацию, чем в вакууме. Немаловажен также тот факт, что гидродинамический радиус частиц, определяемый методом ДРС, учитывает толщину гидратных оболочек, которые могут быть значительны вследствие некоторой гидрофильности ГМПАА.

Благодаря наличию полимерного поверхностно-активного гидрофобно модифицированного полиакриламида (ГМПАА) на полимерных частицах дисперсия обладала агрегативной устойчивостью в течение длительного времени.

Для оценки характера взаимодействия ГМПАА с ПВК обратились к ИК-спектроскопии. На рис. 3 представлен ИК-спектр ГМПАА, в котором четко проявляются полосы поглощения  $1659$ ;  $920$ ;  $710$   $\text{cm}^{-1}$ , свидетельствующие о наличии  $\text{C}=\text{O}$  в амидах (Амид I);  $\Delta\text{CONH}$  в амидах (Амид VI); Амид V ( $\gamma$ -модификация), соответственно. Наряду с этим, в спектре

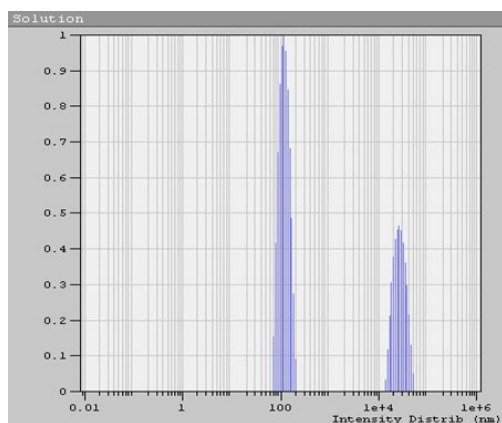


Рис. 1. Гистограмма распределения частиц полимерной дисперсии на основе ПВК по размерам

Fig. 1. Distribution histogram of polymer dispersion particles based on PVC by size

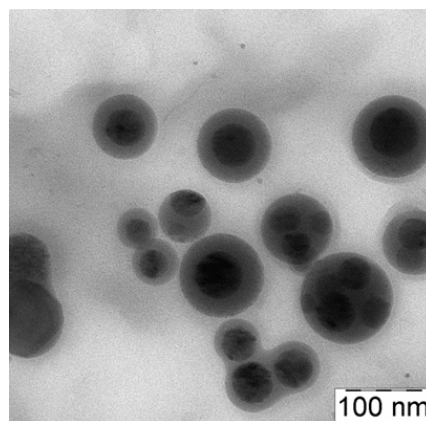


Рис. 2. ПЭМ-изображение полимерных частиц ПВК, стабилизированных ГМПАА

Fig. 2. TEM image of PVC polymer particles stabilized with HMPAA

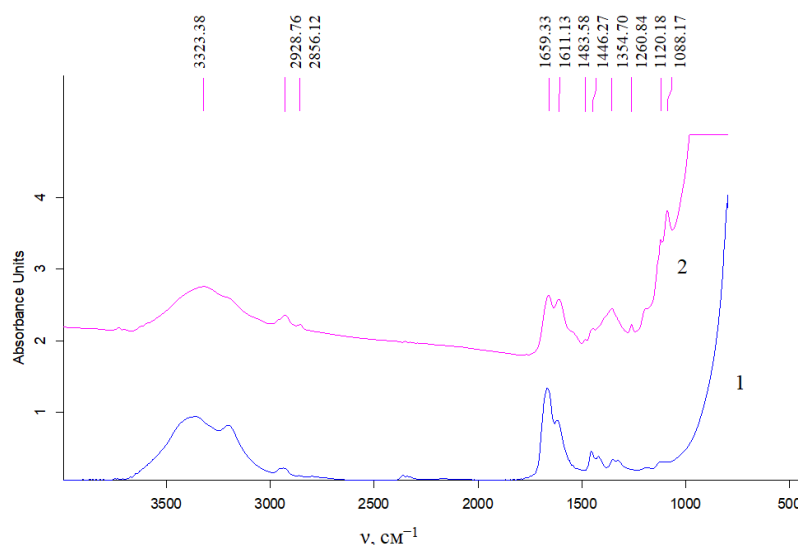


Рис. 3. ИК-спектры поглощения водного раствора ГМПАА (1) и водной дисперсии сетчатого ПВК, стабилизированного ГМПАА (2)

Fig. 3. IR-absorption spectra of an aqueous HMPAA solution (1) and water dispersion of reticulated PVC, stabilized with HMPAA (2)

ГМПАА в виде слабого порога наблюдаются полосы при  $1190\text{ см}^{-1}$  (Амид III).

В спектре ГМПАА также проявляются максимумы  $1611\text{ см}^{-1}$  и  $1484\text{ см}^{-1}$ , принадлежащие колебаниям  $\text{NH}_3^+$  в аминокислотных полосах I и II соответственно. Присутствие аминокислотных группировок подтверждается наличием в спектре полос поглощения  $1659\text{ см}^{-1}$  (совмещенная с  $\text{C}=\text{O}$ ) в амидах;  $1355\text{ см}^{-1}$  (совмещенная с вращательными колебаниями  $\text{CH}_2$ );  $1088\text{ см}^{-1}$  (совмещенная с валентными колебаниями  $\text{C}_\alpha\text{-N}$ ), которые принадлежат  $\text{C}=\text{O}$  в  $\text{COO}^-$ -группах и  $\text{C}-\text{O}$  в карбоновых кислотах [18-23]. На рис. 4а и 4б представлены возможные схемы образования  $\text{NH}_3^+$  и  $\text{COO}^-$ -групп в ГМПАА.

Взаимодействие ПВК с ГМПАА сопровождается появлением по сравнению с исходным ГМПАА новых полос поглощения при  $3690\text{ см}^{-1}$  ( $\nu$  колебания несвязанных молекул воды);  $3160\text{ см}^{-1}$  (совместные колебания  $\nu\text{ NH}$  в аминокислотных группировках и  $\text{H}_2\text{O}\cdots\text{H}_2\text{N}$ );  $1540\text{ см}^{-1}$  (совмещенные колебания  $\sigma\text{ NH}$ ;  $\text{C}-\text{N}$  в Амид II с колебаниями кольца), что свидетельствует о наличии (или усилении) новых амидных группировок (рис. 4с).

Данный эффект может быть связан с образованием клатратных структур с участием в них кольцевых группировок поли-N-винилкапролактама. Наряду с этим наблюдается увеличение интенсивности максимумов при  $1190\text{ см}^{-1}$  (полоса Амид III и валентные колебания  $\nu\text{ C}_\alpha\text{-N}$ );  $1120\text{ см}^{-1}$  (совмещенные колебания  $\text{O}=\text{C}-\text{O}-\text{R}$  в эфирах и  $(\text{C}-\text{C})$ -связей);  $1088\text{ см}^{-1}$  (совмещенные колебания  $\text{C}-\text{O}$  в карбоновых кислотах и  $\text{C}_\alpha\text{-N}$ -связей) (рис. 4с, табл. 1).

Таким образом, можно говорить о том, что взаимодействие ПВК с ГМПАА в процессе синтеза микрогеля ПВК сопровождается появлением амидных группировок и образованием карбоксильных групп.

Нельзя отрицать также возможности взаимодействия между молекулами ГМПАА, приводящего к образованию надмолекулярных структур. Обращает на себя внимание факт смещения полос поглощения  $2929\text{ см}^{-1}$  по сравнению с литературными данными  $2962\text{ см}^{-1}$  [23], характерных асимметричным колебаниям  $\text{CH}_2$ -групп, а также полосы  $2872\text{ см}^{-1}$  (симметричные валентные колебания

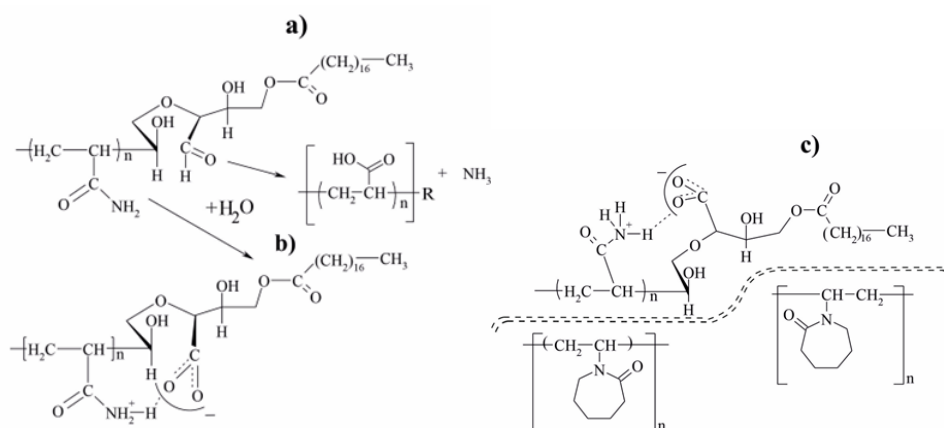


Рис. 4. Возможные варианты образования карбоксильных групп в ГМПAA (а, б) и взаимодействия ГМПAA с ПВХ (с). Штрихами обозначено образование клатрата за счет дисперсионных связей между ГМПAA и ПВХ

Fig. 4. Possible options for the formation of carboxyl groups in HMPAA (a, b) and the interaction of HMPAA with PVC (c). The dashes indicate the formation of a clathrate due to dispersion bonds between HMPAA and PVC

Таблица 1. Полосы поглощения в ИК-спектрах ПВХ, ГМПAA и кластере «ПВХ-ГМПAA» [18-23]

Table 1. Absorption bands in the IR spectra of PVC, HMPAA and the "PVC-HMPAA" cluster [18-23]

$\nu, \text{cm}^{-1}$	Отнесение полос поглощения		
	ПВХ	ГМПAA	Кластер «ПВХ-ГМПAA»
3690			Свободная $\text{H}_2\text{O}$
3323	$\nu >\text{N}-$ кольца в растворе	$\nu \text{NH}_2$ в аминокисл. $\text{H}_2\text{O} \cdots \text{H}_2\text{N}$ или $\text{H}_2\text{N} \cdots \text{OH}_2$	$\nu \text{NH}_2$ в аминокисл. $\text{H}_2\text{O} \cdots \text{H}_3\text{N}^+$
3160			$\text{COO}^- \cdots \text{H}_3\text{N}^+$ ; $\text{COO}^- \cdots \text{H}_2\text{O}$
2929	$\nu_{\text{as}} \text{CH}_2$	$\nu_{\text{as}} \text{CH}_2$	$\nu_{\text{as}} \text{CH}_2$
2856	$\nu_{\text{s}} \text{CH}_2$	$\nu_{\text{s}} \text{CH}_2$	$\nu_{\text{s}} \text{CH}_2$
1659	$\text{C}=\text{O}$ в кетонах	$\text{C}=\text{O}$ в амидах Амид I; $\text{C}=\text{O}$ в $\text{COO}^-$	$\text{C}=\text{O}$ в амидах Амид I; $\text{C}=\text{O}$ в $\text{COO}^-$
1611		Аминокисл. полоса I - $\text{NH}_3^+$	Аминокисл. полоса I - $\text{NH}_3^+$
1540			Составн. колеб. $\sigma \text{NH} + \text{C}-\text{N}$ Амид II; колеб. кольца
1484		Аминокисл. полоса II - $\text{NH}_3^+$ ; N вициальн.; $\sigma \text{CH}_2$	Аминокисл. полоса II - $\text{NH}_3^+$ ; $\nu$ колеб. кольца*
1446	$\sigma \text{CH}_2$	$\sigma \text{CH}_2$	$\sigma \text{CH}_2$
1355		$\nu \text{COO}^-$ ; $\gamma_{\omega}$ веерн. $\text{CH}_2$	$\nu \text{COO}^-$ ; $\gamma_{\omega}$ веерн. $\text{CH}_2$
1190		Слабый порог	Амид III и $\nu \text{C}_\alpha-\text{N}$
1120	$\nu (\text{C}-\text{C})$	$\text{H}_2\text{C}-\text{OOR}$ эфиров; $\nu (\text{C}-\text{C})$	$\nu (\text{C}-\text{C})$ ; $\text{H}_2\text{C}-\text{OOR}$ в эфирах
1088	$\nu (\text{C}_\alpha-\text{N})$	$\nu (\text{C}_\alpha-\text{N})$ ; $\text{C}-\text{O}$ в карбон. кислотах	$\nu (\text{C}_\alpha-\text{N})$ ; $\text{C}-\text{O}$ в карбон. кислотах
920		Амид IV ( $\Delta \text{CONH}$ ) плоск. скелетн. колеб.	Амид IV ( $\Delta \text{CONH}$ ) плоск. скелетн. колеб.
710		Амид V**; $\sigma_{\text{o}}(\text{C}-\text{O})$ ; $\gamma$ -модифик.	Амид V**; $\gamma$ -модифик.; $\nu \text{CH}^*$ кольца; $\sigma_{\text{o}}(\text{C}-\text{O})$

\* колебания кольца N-винилкапролактама и CH в кольце; \*\* полоса Амид V обусловлена деформационными колебаниями NH-группы перпендикулярно к плоскости амидной группы

$\text{CH}_2$ -групп) к  $2856 \text{ cm}^{-1}$ , что свидетельствует о дисперсионных взаимодействиях между ГМПAA и ПВХ. Последнее

подтверждается смещением полос  $1427$  и  $1335 \text{ cm}^{-1}$  к  $1446$  и  $1355 \text{ cm}^{-1}$ , относящихся



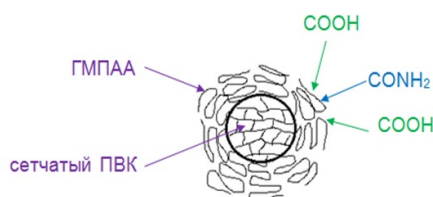
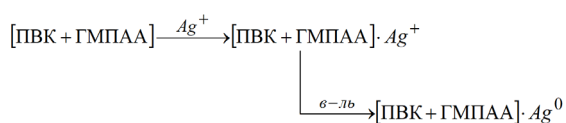


Рис. 5. Схематическое изображение частиц ПВХ, стабилизированных ГМПАА  
 Fig. 5. Schematic representation of PVC particles stabilized with HMPAA

к ножничным, верным и крутильным колебаниям  $\text{CH}_2$ -групп [18-23].

Согласно вышесказанному, частицы сетчатого ПВХ, стабилизированные ГМПАА, в первом приближении можно представить следующим образом (рис. 5). Причиной появления карбоксильных групп является понижение рН дисперсионной среды в результате использования в качестве инициатора радикальной полимеризации персульфата калия, приводящее к гидролизу амидных групп (рис. 4а), и внутримолекулярные превращения в ГМПАА (рис. 4б). Карбоксильные группы на поверхности полимерных частиц способны к ионообменным взаимодействиям.

Синтез серебросодержащего нанокompозита на основе водной дисперсии сетчатого ПВХ. Синтез серебросодержащего нанокompозита проводили путем химического восстановления серебра в дисперсии ПВХ в условиях, благоприятствующих формированию малых металлических частиц. В полимерную дисперсию вводили ионы серебра (первый этап) и через сутки проводили их восстановление до металлического состояния химическими восстановителями различной силы, слабыми – глюкозой ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ), тартратом К, Na ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), и сильными – борогидридом Na ( $\text{NaBH}_4$ ) или гидразином ( $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (второй этап).



Указанные восстановители широко применяются в процессе химического

осаждения серебра [24]. Обязательное требование к восстановителю – высокий окислительно-восстановительный потенциал, более отрицательный, чем потенциал восстановления серебра ( $E^0=0.8 \text{ V}$ ). Восстановитель вводили в дисперсию, насыщенную ионами серебра, в 10-кратном избытке по сравнению с ионами серебра для более полного их восстановления.

Процесс осаждения серебра в полимерной дисперсии контролировали методом динамического рассеяния света. При введении на первом этапе ионов серебра  $\text{Ag}^+$  в полимерную дисперсию наблюдалось увеличение доли нанометровой фракции во времени (рис. 6). Возрастание доли наноразмерной фракции сопровождалось уменьшением гидродинамического радиуса частиц примерно от 150 до 80 нм (табл. 2).

Таким образом, ионы серебра взаимодействуют с полимерной дисперсией, не вызывая агрегации полимерных частиц и коагуляции системы. Наоборот, размер полимерных частиц уменьшается практически вдвое, растет доля наноразмерных частиц, снижается полидисперсность системы.

Каков характер этого взаимодействия? Во-первых, ионы серебра могут адсорбироваться на поверхности полимерных частиц в результате специфической адсорбции. Ионы  $\text{Ag}^+$  имеют большой радиус, в результате чего обладают повышенной поляризуемостью и высокой адсорбционной способностью. Во-вторых, возможно протекание ионообменного взаимодействия ионов серебра с карбоксильными группами ГМПАА.

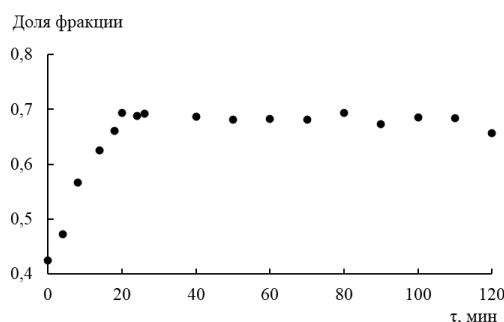


Рис. 6. Изменение доли нанометровой фракции системы ПВХ·Ag<sup>+</sup> во времени, C (Ag<sup>+</sup>) = 10<sup>-5</sup> М

Fig. 6. Change in the share of the nanometer fraction of the PVC·Ag<sup>+</sup> system over time, C(Ag<sup>+</sup>) = 10<sup>-5</sup> M

Таблица 2. Средний гидродинамический радиус полимерных (ПВК) и металл-полимерных частиц ПВХ·Ag<sup>0</sup> (восстановитель) нанометровой фракции (C (Ag<sup>+</sup>)=10<sup>-4</sup> М, C (восстановителя)=10<sup>-3</sup> М)

Table 2. Average hydrodynamic radius of polymeric (PVC) and metal-polymer particles PVC·Ag<sup>0</sup> (reducing agent) of nanometer fraction (C (Ag<sup>+</sup>)=10<sup>-4</sup> M, C (reducing agent)=10<sup>-3</sup> M)

Система	Гидродинамический радиус R <sub>h</sub> , нм	Доля наноразмерной фракции, %
ПВК	145±8.7	39.8
ПВК·Ag <sup>+</sup>	82±3.9	92.4
ПВК·Ag <sup>0</sup> (борогидрид Na)	76±4.5	83.2
ПВК·Ag <sup>0</sup> (гидразин)	93±4.8	78.9
ПВК·Ag <sup>0</sup> (глюкоза)	96±6.3	88.0
ПВК·Ag <sup>0</sup> (тарترات К, Na)	88±6.9	74.8

Обнаруженное методом ДРС взаимодействие ионов серебра с полимерной матрицей позволяет предположить, что следующий этап – восстановление ионов Ag<sup>+</sup> до металлического (нуль-валентного) состояния Ag<sup>0</sup> будет протекать именно в полимерной матрице.

При восстановлении ионов серебра до металлического состояния в полимерной дисперсии (второй этап) для всех использованных восстановителей стабилизация системы завершалась в течение часа (рис. 7, а-г).

Следует отметить, что гидродинамический радиус частиц при химическом восстановлении ионов серебра практически не изменился (табл. 2), что свидетельствует о механической устойчивости полимерной матрицы на основе ПВХ. Природа восстановителя ионов серебра на размер частиц серебрясодержащего нанокompозита на основе ПВХ влияния

практически не оказывает, определяющую роль играют ионы Ag<sup>+</sup>.

На ПЭМ-изображении видно, что после осаждения серебра сферическая форма частиц не изменилась (рис. 8). Уменьшение размера частиц композита в процессе его синтеза (рис. 2, 8) в целом коррелирует с данными ДРС (табл. 2).

Влияние химической природы восстановителя, не выявленное методом ДРС и ПЭМ, было обнаружено при измерении электрокинетического потенциала (ζ-потенциала) диализованных серебрясодержащих нанокompозитов, синтезированных на основе разбавленной дисперсии ПВХ с концентрацией <<1%. При высоком содержании ионов серебра по отношению к полимерной матрице оказалось, что природа восстановителя влияет не только на величину, но и знак ζ-потенциала (табл. 3).



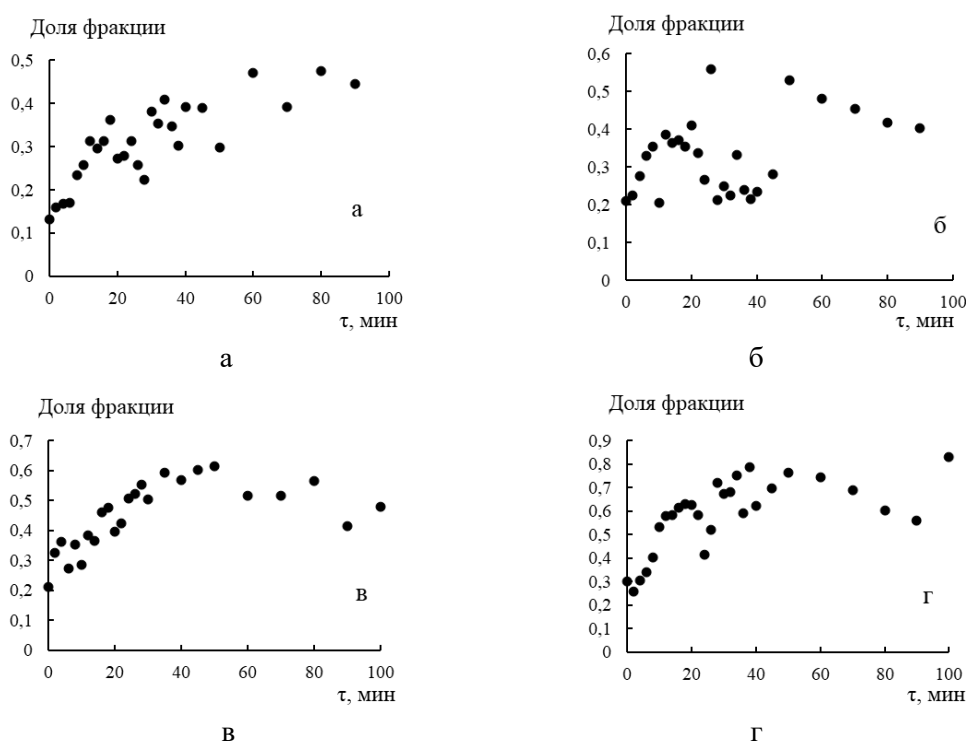


Рис. 7. Изменение доли нанометровой фракции системы ПВК·Ag<sup>0</sup> во времени (C(Ag<sup>+</sup>)=10<sup>-5</sup> М, C (восстановителя)=10<sup>-4</sup> М), восстановители: а – глюкоза; б – тартрат калия, натрия; в – борогидрид натрия; г – гидразин  
 Fig. 7. Change in the fraction of the nanometer fraction of the PVC·Ag<sup>0</sup> system over time (C(Ag<sup>+</sup>)=10<sup>-5</sup> M, C (reducing agent)=10<sup>-4</sup> M), reducing agents: а – glucose; б – potassium, sodium tartrate; в – sodium borohydride; г – hydrazine

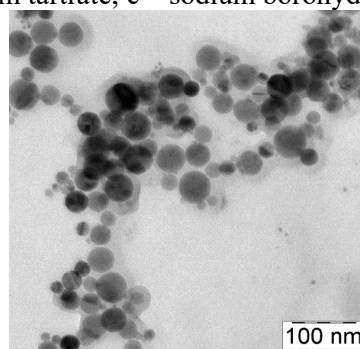


Рис. 8. ПЭМ-изображение частиц серебросодержащего нанокompозита ПВК·Ag<sup>0</sup> (восстановитель борогидрид Na)  
 Fig. 8. TEM image of particles of silver-containing nanocomposite PVC·Ag<sup>0</sup> (reducing agent is Na borohydride)

Электрокинетический потенциал водной дисперсии ПВК, измеренный методом доплеровского микроэлектрофореза, имеет небольшое отрицательное значение порядка -10 мВ благодаря наличию ионизированных карбоксильных групп. Очевидно, что в присутствии полимерного поверхностно-активного ГМПАА электростатический фактор агрегативной устойчивости полимерной дисперсии не

имеет решающего значения. Следовательно, даже при значительной концентрации ионов серебра в полимерной дисперсии по отношению к полимеру система не должна коагулировать благодаря неэлектростатическому (структурно-механическому) фактору стабилизации.

При использовании сильных восстановителей, таких как борогидрид натрия и

Таблица 3. Электрокинетические потенциалы нанокompозитов, полученных при использовании различных восстановителей ( $C(Ag^+) = 10^{-4}$  М,  $C$  (восстановителя) =  $10^{-3}$  М)  
 Table 3. The electrokinetic potentials of nanocomposites obtained using various reducing agents ( $C(Ag^+) = 10^{-4}$  М,  $C$  (reducing agent) =  $10^{-3}$  М)

Система	$\zeta$ -потенциал, мВ
ПВК	-10.5
ПВК·Ag <sup>0</sup> (глюкоза)	6.9
ПВК·Ag <sup>0</sup> (тарترات К, Na)	16.7
ПВК·Ag <sup>0</sup> (гидразин)	-9.5
ПВК·Ag <sup>0</sup> (борогидрид Na)	-11.8

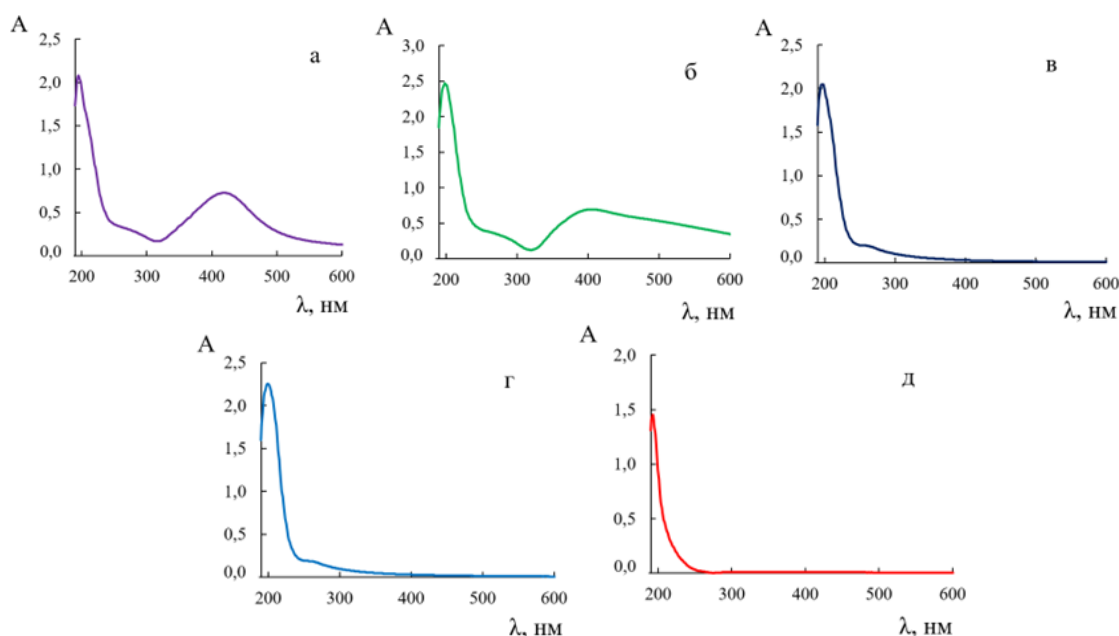


Рис. 9. Спектры поглощения серебряносодержащих нанокompозитов ПВК·Ag<sup>0</sup> (а-г) и дисперсии ПВК (д) в УФ и видимой области ( $C(Ag^+) = 2 \cdot 10^{-4}$  М,  $C$  (восстановителя) =  $2 \cdot 10^{-3}$  М), восстановители: а – борогидрид Na, б – гидразин, в – глюкоза, г – тарترات К, Na  
 Fig. 9. Absorption spectra of silver-containing PVC·Ag<sup>0</sup> nanocomposites (a-d) and PVC dispersion (e) in the UV and visible region ( $C(Ag^+) = 2 \cdot 10^{-4}$  М,  $C$  (reducing agent) =  $2 \cdot 10^{-3}$  М), reducing agents: а – Na borohydride, б – hydrazine, в – glucose, д – К, Na tartrate

гидразин, знак и величина  $\zeta$ -потенциала серебряносодержащего нанокompозита по сравнению с дисперсией ПВК принципиально не изменяется. В случае слабых восстановителей, таких как глюкоза и тарترات калия, натрия, знак  $\zeta$ -потенциала меняется на положительный (табл. 3). Логичное объяснение этому факту заключается в следующем. При невысоком содержании полимера в дисперсии происходит сверхэквивалентная адсорбция положительно заряженных ионов серебра, обладающих высокой способностью к специфической адсорбции вследствие боль-

шого размера иона. Это приводит к перезарядке, в результате знак  $\zeta$ -потенциала сменяется с «-» на «+». Далее при использовании слабых восстановителей глюкозы и тартрата происходит неполное восстановление ионов серебра даже при 10-кратном избытке восстановителя, и  $\zeta$ -потенциал остается положительным.

Отсюда следует вывод, что природа восстановителя играет важную роль в процессе синтеза нанокompозита. Слабые восстановители, такие как глюкоза и тарترات калия, натрия, не способны восстанавливать все ионы серебра в полимерной матрице в исследуемых условиях.

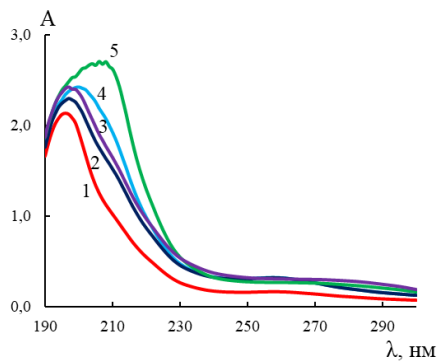


Рис. 10. УФ-спектры систем ПВК·Ag<sup>0</sup> (восстановитель) (C(Ag<sup>+</sup>)=10<sup>-4</sup> М, C (восстановителя)=10<sup>-3</sup> М): 1 – ПВК, 2 – ПВК·Ag<sup>0</sup> (глюкоза), 3 – ПВК·Ag<sup>0</sup> (борогидрид Na), 4 – ПВК·Ag<sup>0</sup> (тарترات К, Na), 5 – ПВК·Ag<sup>0</sup> (гидразин)

Fig. 10. UV spectra of PVC·Ag<sup>0</sup> systems (reducing agent) (C(Ag<sup>+</sup>) = 10<sup>-4</sup> M, C(reducing agent) = 10<sup>-3</sup> M): 1 – PVC, 2 – PVC·Ag<sup>0</sup> (glucose), 3 – PVC·Ag<sup>0</sup> (Na borohydride), 4 – PVC·Ag<sup>0</sup> (K, Na tartrate), 5 – PVC·Ag<sup>0</sup> (hydrazine)

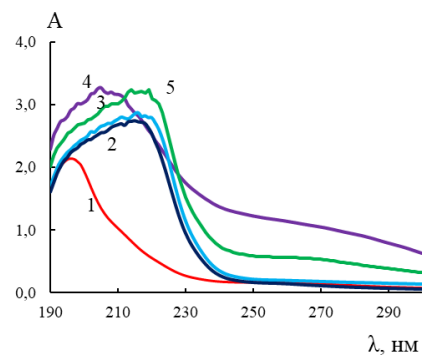


Рис. 11. УФ-спектры систем ПВК·Ag<sup>0</sup> (восстановитель) (C(Ag<sup>+</sup>)=10<sup>-3</sup> М, C (восстановителя)=10<sup>-4</sup> М): 1 – ПВК, 2 – ПВК·Ag<sup>0</sup> (глюкоза), 3 – ПВК·Ag<sup>0</sup> (борогидрид Na), 4 – ПВК·Ag<sup>0</sup> (тарترات К, Na), 5 – ПВК·Ag<sup>0</sup> (гидразин)

Fig. 11. UV spectra of PVC·Ag<sup>0</sup> systems (reducing agent) (C(Ag<sup>+</sup>)=10<sup>-3</sup> M, C(reducing agent)=10<sup>-4</sup> M): 1 – PVC, 2 – PVC·Ag<sup>0</sup> (glucose), 3 – PVC·Ag<sup>0</sup> (Na borohydride), 4 – PVC·Ag<sup>0</sup> (K, Na tartrate), 5 – PVC·Ag<sup>0</sup> (hydrazine)

Таблица 4. Длина волны и оптическая плотность пиков спектров системы ПВК·Ag<sup>0</sup>

Table 4. Wavelength and optical density of the peaks of the spectra of the PVC·Ag<sup>0</sup> system

Система	Оптическая плотность A <sub>1</sub>	Длина волны λ <sub>1</sub> , нм	Оптическая плотность A <sub>2</sub>	Длина волны λ <sub>2</sub> , нм
ПВК	1.451817	192	–	–
ПВК·Ag <sup>0</sup> (борогидрид Na)	2.077157	195	0.726881	419
ПВК·Ag <sup>0</sup> (гидразин)	2.468985	198	0.689814	412
ПВК·Ag <sup>0</sup> (глюкоза)	2.048243	197	–	–
ПВК·Ag <sup>0</sup> (тар- рат К, Na)	2.254125	200	–	–

С другой стороны, положительные значения ζ-потенциала доказывают, что в процессе синтеза нанокompозита ионы серебра адсорбируются и взаимодействуют с полимерными частицами, что было ранее обнаружено и методом динамического рассеяния света.

На оптических спектрах водной дисперсии ПВК и нанокompозитов для всех образцов наблюдается максимум поглощения в УФ области (λ<sub>1</sub> порядка 200 нм), отвечающий поглощению ПВК. Для образцов нанокompозита, синтезированных с использованием борогидрида натрия и

гидразина, также проявляется полоса плазмонного поглощения наночастиц серебра в области λ<sub>2</sub>≈400 нм (рис. 9, а-г).

На положение и величину коротковолнового максимума поглощения в области 200 нм (λ<sub>1</sub>) влияет концентрация ионов серебра, вводимых в процессе синтеза, а также природа восстановителя (рис. 10-11, табл. 4). Изменение оптической плотности и длины волны пика λ<sub>1</sub> подтверждает активное взаимодействие полимерной матрицы на основе ПВК с серебром.

При использовании борогидрида натрия и гидразина коротковолновые полосы поглощения имели наибольшую оптическую плотность  $A_1$ , наблюдалось окрашивание дисперсий в золотистый и темно-коричневый цвета соответственно. Появление окрашивания свидетельствует о нанодисперсном состоянии металлического серебра.

Образование нанодисперсного серебра подтвердилось наличием полосы плазмонного поглощения при  $\lambda_2$  412 и 419 нм (видимая часть спектра поглощения) в нанокompозитах, синтезированных с участием гидразина и борогидрида натрия, соответственно (рис. 9, а-б, табл. 4). Судя по наличию и положению максимума около 400 нм в оптических спектрах поглощения, полученные наночастицы серебра имеют форму, близкую к сферической [25].

### Заключение

На основе коллоидной дисперсии сетчатого поли-N-винилкапролактама, стабилизированной полимерным поверхностно-активным гидрофобно модифицированным полиакриламидом, осуществлен синтез серебрясодержащего нанокompозита в виде агрегативно устойчивой водной дисперсии полимер-металлических частиц сферической формы нанометрового размера.

Осаждение нанодисперсного серебра в полимерную матрицу осуществляли путем химического восстановления ионов серебра восстановителями различной природы. Образование наночастиц серебра, иммобилизованных дисперсным полимерным носителем, подтверждено

### Список литературы

1. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М. Химия. 2000. 672 с.
2. Помогайло А.Д. Металлополимерные нанокompозиты с контролируемой

наличием на оптических спектрах полосы плазмонного поглощения в районе длин волн порядка 400 нм.

В процессе синтеза серебрясодержащего нанокompозита методами динамического рассеяния света и просвечивающей электронной микроскопии установлено взаимодействие ионов серебра с полимерной матрицей, приводящее к уменьшению размера полимерных частиц при сохранении их формы, а также увеличению доли частиц нанометрового размера. Выяснено, что природа восстановителя на изменение размера полимерных частиц в процессе синтеза нанокompозита существенного влияния не имеет, определяющее влияние оказывают ионы серебра.

Измерения электрокинетического потенциала нанокompозитов, полученных с помощью восстановителей различной природы, показали, что в процессе синтеза положительно заряженные ионы серебра могут адсорбироваться на поверхности полимерных частиц в сверхэквивалентном количестве, вызывая перезарядку дисперсии, и не восстанавливаются полностью слабыми восстановителями, такими как глюкоза и тартрат калия, натрия.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

молекулярной архитектурой // *Российский химический журнал*. 2002. Т. 46, № 5. С. 64-73.

3. Нанокompозиты: исследование, производство и применение / Под ред. А.А. Берлина. М. Торус Пресс. 2004. 224 с.

4. Nicolais L., Carotenuto G. Metal-Polymer Nanocomposites. Hoboken. Wiley. 2005. 319 p.



5. Sivasankaran S. Nanocomposites: Recent Evolutions. London. Intech Open. 2019. 230 p.
6. Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В. Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы // *Успехи химии*. 2008. Т. 77, №3. С. 242-269.
7. Dzhardimalieva G.I., Uflyand I.E. Preparation of metal-polymer nanocomposites by chemical reduction of metal ions: functions of polymer matrices // *Journal of Polymer Research*. 2018. Vol. 25, no. 12. P. 2-55.
8. Kumar S., Kumar P., Shakher Pathak C. Silver Micro-Nanoparticles – Properties, Synthesis, Characterization, and Applications. Rijeka, IntechOpen, 2021, 266 p.
9. Ponnaiyan P., Nammalvar G. Enhanced performance of PSF/PVP polymer membrane by silver incorporation // *Polymer Bulletin*. 2020. Vol. 77. P. 197-212.
10. Reddy P., Rao K., Rao K.S., Shchipunov Y. et al. Synthesis of alginate based silver nanocomposite hydrogels for biomedical applications // *Macromolecular Research*. 2014. Vol. 22. P. 832-842.
11. Viswanathan P., Ramaraj R. Preparation of polyelectrolyte-stabilized silver nanoparticles for catalytic applications // *Polymer International*. 2017. Vol. 66, no 3. P. 342-348.
12. Xia Y., Xiong Y., Lim B., Skrabalak S.E. Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanocrystals: Simple Chemistry Meets Complex Physics? // *Angewandte Chemie*. 2009. Vol. 48, no 1. P. 60-103.
13. Кущев П.О., Кузнецов В.А., Шаталов Г.В., Вережников В.Н. и др. Свойства водных дисперсий сетчатых полимеров на основе N-винилкапролактама // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2015. Т. 15, № 1. С.60-66.
14. Kuznetsov V.A., Kushchev P.O., Blagodatskikh I.V., Ostankova I.V. et al. Aqueous dispersions of cross-linked poly-N-vinylcaprolactam stabilized with hydrophobically modified polyacrylamide: synthesis, colloidal stability, and thermosensitive properties // *Colloid and Polymer Science*. 2016. Vol. 294, no 5. P. 889-899.
15. Кущев П.О. Дисперсии «умных» полимеров // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2020. Т. 20, № 4. С. 493-515.
16. Кущев П.О., Слепцова О.В., Кузнецов В.А. Синтез серебросодержащего нанокompозита на основе поли-N-винилкапролактама // «Полимеры-2017», сборник тезисов 7-й Всероссийской Каргинской конференции, 13-17 июня 2017 г., Москва, 2017, С. 141.
17. Слепцова О.В. Кущев П.О. Влияние природы химического восстановителя на формирование наночастиц серебра в полимерном гидрозоле на основе поли-N-винилкапролактама // «Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах ФАГРАН-2021», материалы IX Всероссийской конференции с международным участием, 4-7 октября 2021 г., Воронеж, 2021, С. 534-536.
18. Бёккер Ю. Спектроскопия. М. Техносфера. 2009. 528 с.
19. Дехант И., Данц Е., Киммер Б., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров. М. Мир. 1964. 462 с.
20. Белами Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул. М. Мир. 1971. 318 с.
21. Купцов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. М. Техносфера. 2013. 696 с.
22. Угрянская В.А., Чикин Г.А., Селеменов В.Ф., Завьялова Т.А. Инфракрасная спектроскопия ионообменных материалов. Воронеж. Изд-во ВГУ. 1989. 208 с.
23. Казицына Л.А., Куплетская Н.Б. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектрологии в органической химии. М. Изд-во Моск. Ун-та. 1979. 240 с.
24. Свиридов В.В., Воробьева Т.Н., Гаевская Т.В., Степанова Л.И. Химическое осаждение металлов из водных растворов. Минск. Университетское. 1987. 271 с.



25. Сергеев Б.М., Кирюхин М.В., Прусов А.Н., Сергеев В.Г. Получение наночастиц серебра в водных растворах полиакриловой кислоты // *Вестник Московского университета*. 1999. Т. 40, № 2. С. 129-133.

### References

1. Pomogailo A.D., Rozenberg A.S., Uflyand I.E. Nanochastitsy metallov v polimerakh. M., Khimiya, 2000, 672 p. (In Russ.)

2. Pomogailo A.D., Metallopolimernye nanokompozity s kontroliruemoi molekulyarnoi arkhitekturoi, *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 2002; 46(5): 64-73. (In Russ.)

3. Nanokompozity: issledovanie, proizvodstvo i primeneniye / Pod red. A.A. Berlina. M., Torus Press, 2004, 224 p. (In Russ.)

4. Nicolais L., Carotenuto G. Metal-Polymer Nanocomposites. Hoboken, Wiley, 2005, 319 p.

5. Sivasankaran S. Nanocomposites: Recent Evolutions. London, Intech Open, 2019, 230 p.

6. Krutyakov Yu.A., Kudrinskii A.A., Olenin A.Yu., Lisichkin G.V., Sintez i svoystva nanochastits serebra: dostizheniya i perspektivy, *Uspekhi khimii*, 2008; 77(3): 242-269. (In Russ.)

7. Dzhardimalieva G.I., Uflyand I.E., Preparation of metal-polymer nanocomposites by chemical reduction of metal ions: functions of polymer matrices, *Journal of Polymer Research*, 2018; 25(12): 2-55. <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1646-8>

8. Kumar S., Kumar P., Pathak Ch. Sh. Silver Micro-Nanoparticle – Properties, Synthesis, Characterization, and Applications. Rijeka, IntechOpen, 2021, 266 p.

9. Ponnaiyan P., Nammalvar G., Enhanced performance of PSF/PVP polymer membrane by silver incorporation, *Polymer Bulletin*, 2020; 77: 197-212. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02735-w>

10. Reddy P., Rao K., Rao K.S., Shchipunov Y. et al, Synthesis of alginate based silver nanocomposite hydrogels for biomedical applications. *Macromolecular*

*Research*. 2014; 22: 832-842.

<https://doi.org/10.1007/s13233-014-2117-7>

11. Viswanathan P., Ramaraj R., Preparation of polyelectrolyte-stabilized silver nanoparticles for catalytic applications, *Polymer International*. 2017; 66 (3): 342-348. <https://doi.org/10.1002/pi.5178>

12. Xia Y., Xiong Y., Lim B., Skrabalak S.E., Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanocrystals: Simple Chemistry Meets Complex Physics, *Angewandte Chemie*. 2009; 48(1): 60-103. <https://doi.org/10.1002/anie.200802248>

13. Kushchev P.O., Kuznetsov V.A., Shatalov G.V., Verezhnikov V.N. i dr., Svoystva vodnykh dispersii setchatykh polimerov na osnove N-vinilkaprolaktama, *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2015; 15(1): 60-66. (In Russ.)

14. Kuznetsov V.A., Kushchev P.O., Blagodatskikh I.V., Ostankova I.V. et al., Aqueous dispersions of cross-linked poly-N-vinylcaprolactam stabilized with hydrophobically modified polyacrylamide: synthesis, colloidal stability, and thermosensitive properties, *Colloid and Polymer Science*. 2016; 294(5): 889-899. <https://doi.org/10.1007/s00396-016-3843-5>

15. Kushchev P.O., Dispersii «umnykh» polimerov, *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2020; 20(4): 493-515. (In Russ.)

16. Kushchev P.O., Sleptsova O.V., Kuznetsov V.A., Sintez serebrosoderzhashchego nanokompozita na osnove poli-N-vinilkaprolaktama, “Polimery-2017”, sbornik tezisov 7-i Vserossiiskoi Karginiskoi konferentsii, 13-17 iyunya, 2017, Moskva, 2017, pp. 141. (In Russ.)

17. Sleptsova O.V. Kushchev P.O., Vliyanie prirody khimicheskogo vosstanovitel'ya na formirovaniye nanochastits serebra v polimernom gidrozole na osnove poli-N-vinilkaprolaktama, “Fiziko-khimicheskie protsessy v kondensirovannykh sredakh i na mezhfaznykh granitsakh FAGRAN-2021”, materialy IX Vserossiiskoi konferentsii s





mezhdunarodnym uchastiem, 4–7 oktyabrya, 2021, Voronezh, 2021, pp. 534-536. (In Russ.)

18. Bekker Yu. Spektroskopiya. M., Tekhnosfera, 2009, 528 p. (In Russ.)

19. Dekhant I., Dants E., Kimmer B., Shmol'ke R. Infrazhelenaya spektroskopiya polimerov. M., Mir, 1964, 462 p. (In Russ.)

20. Belami L. Novye dannye po IR-spektram slozhnykh molekul. M., Mir, 1971, 318 p. (In Russ.)

21. Kuptsov A.Kh., Zhizhin G.N. Fur'e-KR i Fur'e-IR spektry polimerov. M., Tekhnosfera, 2013, 696 p. (In Russ.)

22. Uglyanskaya V.A., Chikin G.A., Sel'menev V.F., Zav'yalova T.A. Infrazhelenaya spektroskopiya ionoobmennyykh materialov,

Voronezh, Izd-vo VGU, 1989, 208 p. (In Russ.)

23. Kazitsyna L.A., Kupletskaya N.B. Primenenie UF-, IR-, YaMR- i mass-spektroskopii v organicheskoi khimii, M., Izd-vo Mosk. Un-ta, 1979, 240 p. (In Russ.)

24. Sviridov V.V., Vorob'eva T.N., Gaevskaya T.V., Stepanova L.I. Khimicheskoe osazhdenie metallov iz vodnykh rastvorov. Minsk, Izdatel'stvo «Universitetskoe», 1987, 271 p. (In Russ.)

25. Sergeev B.M., Kiryukhin M.V., Prusov A.N., Sergeev V.G., Poluchenie nanochastits serebra v vodnykh rastvorakh poliakrilovoi kisloty, *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 1999; 40(2): 129-133 (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

**О.В. Слепцова** – к.х.н., доцент кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидной химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**П.О. Кушев** – к.х.н., доцент кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидной химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**В.Ф. Селеменев** – д.х.н., проф. каф. аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**А.А. Синельников** – к.ф.-м.н., научный сотрудник, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**O.V. Sleptsova** – Ph.D. (chemistry), associate prof., department of polymer science and colloid chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: slepts@gmail.com

**P.O. Kushchev** – Ph.D. (chemistry), associate prof., department of polymer science and colloid chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia

**V.F. Sel'menev** – DSci in chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: [common@chem.vsu.ru](mailto:common@chem.vsu.ru)

**A.A. Sinelnikov** – Ph.D. (physics and mathematics), research associate, Voronezh State University, Voronezh, Russia

*Статья поступила в редакцию 26.01.2023; одобрена после рецензирования 8.02.2023; принята к публикации 15.02.2023.*

*The article was submitted 26.01.2023; approved after reviewing 8.02.2023; accepted for publication 15.02.2023.*