

Исследования дисперсных систем и разработка стандартных образцов дзета-потенциала частиц в жидкости

Дмитрий Ильич Беленький¹✉, Дмитрий Вадимович Аверкин², Дмитрий Викторович Вишневецкий³, Светлана Дмитриевна Хижняк⁴, Павел Михайлович Пахомов⁵

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

^{3, 4, 5} Тверской государственный университет, Тверь, Россия

¹belenky@vniiftri.ru ✉

²averkin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8653-3267>

Аннотация. Проведено комплексное исследование возможности разработки и создания стандартных образцов единицы дзета-потенциала частиц в жидкости в диапазоне измеряемых значений $-150...+150$ мВ. Исследованы существующие на сегодняшний день стандартные образцы дзета-потенциала в России и мире, приведён анализ применимости исходных веществ и компонентов для создания новых стандартных образцов. В качестве перспективных стандартных образцов дзета-потенциала частиц рассмотрены образцы модифицированных микросфер полистирольного латекса, сывороточного бычьего альбумина и супрамолекулярных систем на основе водных растворов L-цистеина, N-ацетилцистеина и ацетата серебра. Все исследования проведены на оборудовании из состава Государственного первичного эталона единиц дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов ГЭТ 163-2020 методом электрофоретического рассеяния света и измерения водородного показателя pH. Установлено, что микросферы полистирольного латекса не отвечают требованиям поставленной задачи в части разработки набора стандартных образцов, образцы на основе суспензий сывороточного бычьего альбумина не соответствуют требованиям ГОСТ ISO 13099-2-2016. В качестве стандартных образцов предложены супрамолекулярные системы на основе водных растворов L-цистеина, N-ацетилцистеина и ацетата серебра. Такие системы характеризуются возможностью модифицировать исходный потенциалопределяющий слой частиц без изменения их агрегативной устойчивости. Проведены исследования долговременной стабильности разработанных стандартных образцов единицы дзета-потенциала частиц в жидкости.

Ключевые слова: дзета-потенциал, двойной электрический слой, суспензия, стандартный образец, супрамолекулярные системы, коллоидная частица

Для цитирования: Беленький Д. И., Аверкин Д. В., Вишневецкий Д. В., Хижняк С. Д., Пахомов П. М. Исследования дисперсных систем и разработка стандартных образцов дзета-потенциала частиц в жидкости // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 58–62. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-4-58-62>

Development and creation of zeta potential reference material of the particles in a liquid medium

Dmitrii I. Belenkii¹✉, Dmitry V. Averkin², Dmitry V. Vishnevetski³, Svetlana D. Khizhnyak⁴, Pavel M. Pakhomov⁵

^{1, 2} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow Region, Russia

^{3, 4, 5} Tver State University, Tver, Russia

¹belenky@vniiftri.ru ✉

²averkin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8653-3267>

Abstract. A comprehensive study to develop and create standard samples of the zeta potential unit of particles in a liquid in accordance with the requirements of GOST ISO 13099-2-2016 in the range of measured values from minus 150 mV to plus 150 mV was carried out. The existing standard samples of zeta potential in Russia and the world have been investigated; the analysis of the applicability of the starting materials and components for the creation of new standard samples has done. Samples based on modified polystyrene latex microspheres, bovine serum albumin and supramolecular systems based on aqueous solutions of L-cysteine, N-acetylcysteine, and silver acetate were considered as promising standard samples of the zeta potential of particles. All studies were carried out on equipment from the State Primary Standard of Dispersed Parameters of Aerosols, Suspensions and Powder Materials GET 163-2020 using the method of electrophoretic light scattering and measuring the pH value. It was found that polystyrene latex microspheres do not correspond to the requirements of the work in terms of developing a set of standard samples. Samples based on suspensions of bovine serum albumin do not correspond to the requirements of GOST ISO 13099-2-2016. Supramolecular systems based on aqueous solutions of L-cysteine, N-acetylcysteine, and silver acetate were proposed as standard samples. Such systems are characterized by the ability to modify the initial potential-determining layer of particles without changing their aggregate stability. Studies of the long-term stability of the developed standard samples of the zeta-potential unit of particles in a liquid have been carried out.

Keywords: zeta potential, double electric layer, suspension, reference material, supramolecular system, colloidal particle

Введение. В настоящее время сформированы требования внутреннего рынка по обеспечению единства измерений электрокинетического потенциала (дзета-потенциала) частиц в жидких средах. Эти требования связаны, в первую очередь, с необходимостью повышения качества продукции, выпускаемой в различных отраслях промышленности [1]. Дзета-потенциал как физико-химический параметр дисперсных систем описывает явления на поверхности двойного электрического слоя (ДЭС) дисперсной фазы и является разностью потенциалов на границе «фаза – среда» [2, 3]. Дзета-потенциалом и ДЭС в коллоидных системах обусловлены наблюдаемые электроповерхностные (электрокинетические) явления, такие как процессы ионного обмена, электродные процессы, электрокапиллярные и электрокинетические явления, процессы массо- и энергообмена в пористых телах, явления электростатических взаимодействий коллоидных частиц, определяющих устойчивость дисперсных систем [4, 5, 6]. Чем больше заряд диффузионного слоя, тем сильнее будут развиты электрокинетические явления и тем больше будет дзета-потенциал поверхности скольжения, следовательно, дзета-потенциал также характеризует скорость протекания электрокинетических процессов [5].

На сегодняшний день наиболее распространённым и общим вариантом теории дзета-потенциала ζ является теория Смолуховского, выраженная уравнением

$$\zeta = \mu\eta / (\varepsilon\varepsilon_0), \quad (1)$$

где μ – электрофоретическая подвижность; η – динамическая вязкость; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – электрическая постоянная.

Уравнение (1) описывает связь электрофоретической подвижности частиц с дзета-потенциалом и используется в вычислительном аппарате современных методов измерения дзета-потенциала частиц, таких как методы электрофореза, фазового анализа рассеянного излучения и электрофоретического рассеяния света.

С начала 1990-х гг. исследование параметров дисперсных систем занимает одну из ведущих позиций в работе научных лабораторий. Остро стоял вопрос о системе метрологического обеспечения в данной области. В период 1998–2010 гг. во ВНИИФТРИ создан и усовершенствован Государственный первичный эталон единиц дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов, с помощью которого можно было решать задачи того времени в области измерений дисперсных параметров гетерогенных систем. В настоящее время стоит задача включения в состав ГЭТ 163-2020 стандартных образцов (СО) единицы дзета-потенциала частиц в области измерений $-150...+150$ мВ. На первом этапе решения поставленной задачи исследован рынок СО в России и мире. На территории России на данный момент нет ни одного производителя СО дзета-потенциала частиц в жидкости. Это связано с отсутствием до недавних пор единства измерений в данной области, а также со сложностью для производителя обеспечить прослеживаемость к зарубежным эталонам данной

единицы. За рубежом на сегодняшний день утверждён только один СО – SRM 1980 (National Institute of Standards and Technology. Certificate of Analysis. Material Details. SRM 1980 – Positive Electrophoretic Mobility ($+\mu\text{E}$) Standard, 07 March 1994), производимый в Национальном институте стандартов и технологий США. Данный образец обеспечивает воспроизведение электрофоретической подвижности частиц в точке $2,53 \text{ мкм}\cdot\text{см}/(\text{В}\cdot\text{с})$ (соответствует дзета-потенциалу порядка $+46$ мВ) с расширенной неопределённостью измерений (коэффициент охвата $k=2$) $0,12 \text{ мкм}\cdot\text{см}/(\text{В}\cdot\text{с})$. Образец SRM 1980 стабилен, однако обеспечивает воспроизведение только одного значения дзета-потенциала. Это вызвано, прежде всего, невозможностью изменения физико-химических свойств в широком диапазоне и условий существования образца в стабильном виде. Для создания SRM 1980 использован гётит ($\alpha\text{-FeOOH}$), суспензия которого показала стабильные значения электрофоретической подвижности и дзета-потенциала в растворе электролита с $\text{pH}=2,5$. Данный исходный материал и СО не удовлетворяют существующим требованиям $(-150...+150 \text{ мВ})$ промышленности в части измерения дзета-потенциала частиц в жидкости.

Цель исследования – рассмотреть возможность разработки и создания СО единицы дзета-потенциала частиц в жидкости в диапазоне измеряемых значений $-150...+150 \text{ мВ}$.

Для достижения основной цели работы отобраны и исследованы на соответствие требованиям ГОСТ ISO 13099-2-2016 «ГСИ. Методы определения дзета-потенциала. Часть 2. Оптические методы» следующие исходные материалы: меры размера и счётной концентрации частиц на основе полистирольных латексных сфер; частицы бычьего сывороточного альбумина, синтезируемого в НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Н. Ф. Гамалеи; супрамолекулярные системы, синтезируемые совместно с кафедрой физической химии ТвГУ.

Экспериментальная часть. Дзета-потенциал агрегатов в образцах измеряли с использованием анализатора Zetasizer Nano ZS (Malvern) из состава Государственного первичного эталона единиц дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов ГЭТ 163-2020. Для измерений готовили необходимый исследуемый раствор, $0,8 \text{ мл}$ которого затем вносили в U -образную капиллярную кювету и помещали в кюветную камеру.

Для приготовления СО дзета-потенциала использовали прекурсоры на основе суспензий бычьего сывороточного альбумина, синтезируемого в Национальном исследовательском центре эпидемиологии и микробиологии им. Н. Ф. Гамалеи, с массовыми концентрациями $1; 10; 25 \text{ мг/мл}$. Далее в прекурсоры вводили органические буферы PIPES, MES и Tris с целью изменения значений pH . На основе MES было приготовлено три образца соответственно с pH среды $6,2; 6,9; 7,3$, на основе PIPES – три образца с $\text{pH}=5,5; 5,9; 6,2$ и на основе Tris – один образец с $\text{pH}=10,3$. Для приготовления СО дзета-потенциала частиц также использовали супрамолекулярные растворы на основе водных растворов L-цистеина, N-ацетилцистеина и CH_3COOAg (ацетата серебра) (ЦСРач и НАЦац) с концентрацией $0,01 \text{ М}$ и растворы электролитов с концентрацией $0,02 \text{ М}$.

Измерения pH и аддитивное титрование буферными растворами проводили на pH-метре Mettler Toledo Seven Multi. Во время эксперимента системы термостатировали при температуре $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Результаты и обсуждение. Существующие меры размера и счётной концентрации частиц в жидкости являются стабильными полимерными соединениями на основе стирола. В результате синтеза из «затравки» стирола образуются полистирольные частицы сферической формы с возможностью мо-

дификации поверхности [7]. В рамках исследования данных образцов с целью изменения значений электрофоретической подвижности и дзета-потенциала были проведены эксперименты в части изменения значений поверхностного заряда частиц полистирола в зависимости от функциональных групп. Самыми распространёнными модификаторами поверхности для полистирольных латексных сфер являются амидные, сульфатные и карбоксильные группы.

Таблица 1

Результаты измерений дзета-потенциала ζ частиц на основе бычьего сывороточного альбумина концентрацией 1 мг/мл в жидкости

Буфер	pH	ζ , мВ	S, %
MES	6,2	-20,9	3,81
MES	6,9	-18,5	4,15
MES	7,3	-11,7	4,09
PIPES	5,5	-24,4	5,27
PIPES	5,9	-11,5	5,63
PIPES	6,2	-14,2	5,01
Tris	10,3	-37,3	6,88

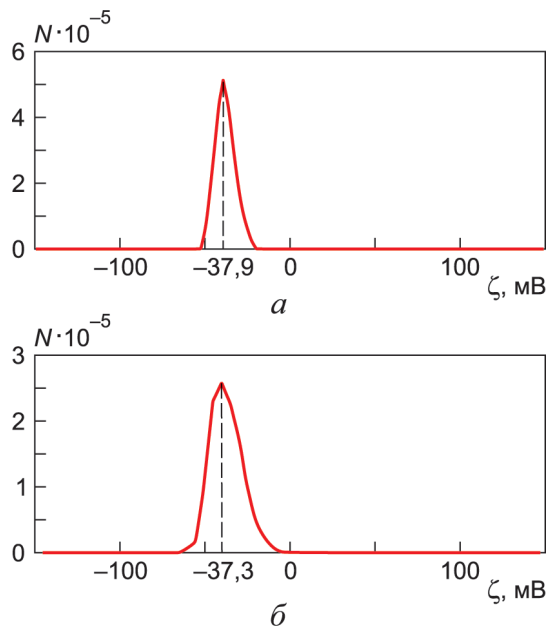


Рис. 1. Результаты измерений дзета-потенциала ζ частиц латекса с модифицированной гидроксильными группами поверхностью (а) и среднее значение дзета-потенциала частиц альбумина в буфере Tris (б); N – число фотонов

Fig. 1. The results of measurements of the zeta potential ζ of latex particles with a surface modified by hydroxyl groups (a) and the average value of the zeta potential of albumin particles in Tris buffer (b); N is the number of photons

В процессе практического решения задачи исследования с использованием указанных модификаторов при $\text{pH}=2\ldots 5$ регистрировалось эффективное значение дзета-потенциала в границах $-50\ldots -30$ мВ. Дальнейшее уменьшение значений дзета-потенциала частиц возможно за счёт уменьшения агрегативной стабильности образцов [8]. Однако $\text{pH}<3$ является экстремальным для большинства электрофоретических ячеек современных анализаторов, поэтому применение данных СО нецелесообразно. Пример результата измерений дзета-потенциала частиц латексных сфер представлен на рис. 1, а.

В результате исследования синтезированных СО частиц дзета-потенциала на основе бычьего сывороточного альбумина наиболее стабильными оказались образцы с концентрацией бычьего сывороточного альбумина 1 мг/мл. Результаты измерений (средние значения по результатам 10 измерений) и средние квадратические отклонения (СКО) S исследуемых образцов представлены в табл. 1 и на рис. 1, б.

Анализируя экспериментальные данные, можно сделать вывод, что частицы бычьего сывороточного альбумина обладают стабильными значениями дзета-потенциала. Установлено, что частицы прекурсора на основе бычьего сывороточного альбумина недостаточно реагируют на изменение среды (смена органических буферов и pH) и значения дзета-потенциала частиц находятся в диапазоне $0\ldots -30$ мВ (см. табл. 1), что считается областью нестабильных соединений, склонных к самопроизвольной седиментации и/или агрегации [9]. Единственный образец, дзета-потенциал которого по модулю больше 30, – образец на основе буфера Tris и $\text{pH}=10,3$ (см. табл. 1, рис. 1, б). Однако единичного образца недостаточно для принятия этих систем в качестве СО.

Возможность модифицирования исходного потенциалоопределяющего слоя, состоящего преимущественно из аминокислоты и аминокислотных остатков, с сохранением исходного строения частиц в растворе-прекурсор [10, 11] делает супрамолекулярные системы наиболее перспективными материалами для создания СО дзета-потенциала частиц в жидкости.

В процессе исследований супрамолекулярных систем были отобраны образцы ЦСРac [12] и НАЦac с низким массовым содержанием активных компонентов в растворе (0,01–0,05 %). Значения pH исследуемых образцов составляют 3,5–4, динамическая вязкость образцов не превышает 3 мПа·с, что соответствует существующим требованиям (ГОСТ ISO 13099-2-2016). Обозначенные условия являются оптимальными, так как степень агрегации и индекс полидисперсности таких супрамолекулярных растворов позволяют достаточно точно регистрировать электрофоретическую подвижность агрегатов в сечении капилляра измерительной кюветы.

Установлено, что при уменьшении содержания активных веществ в супрамолекулярных растворах НАЦac, абсолютное значение дзета-потенциала увеличивается (табл. 2, где W – массовое содержание компонентов). Для образцов ЦСРac способом регуляции дзета-потенциала

Таблица 2

Результаты измерений (средние значения по результатам 10 измерений) дзета-потенциала в супрамолекулярных системах

Система	W, %	pH	ζ , мВ	S, %
НАЦац	0,01	3,5	-52,6	7,8
НАЦац	0,03	3,3	-31,4	7,8
ЦСРац + сульфат натрия	0,02+0,004	3,8	+41,5	7,7
ЦСРац	0,02	4,1	+64,5	7,8

Таблица 3

Метрологические характеристики применяемого оборудования

Величина	Диапазон воспроизведения	S, %	Θ , %
Электрофоретическая подвижность частиц	$-2 \cdot 10^{-7} \dots +2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	1,4–1,6	1,6–1,8
Дзета-потенциал частиц	-150...+150 мВ	2,0–2,2	2,2–2,4

частиц является введение электролитов. На данном этапе работы получены стабильные системы с абсолютным значением дзета-потенциала частиц в диапазоне 30–70 мВ (рис. 2) со средним значением СКО результатов 7,8 %.

Согласно регистрируемым экспериментальным данным супрамолекулярные системы ЦСРац и НАЦац удовлетворяют требованиям в части диапазона дзета-потенциала и воспроизводимости результатов измерений. Работа проводилась с февраля 2018 г. по декабрь 2019 г., измерения проводились не реже, чем раз в месяц (по 10 измерений для каждого образца). Для измерений использовали оборудование из состава ГЭТ 163-2020. Метрологические характеристики применяемого оборудования приведены в табл. 3.

В результате исследования долговременной стабильности установлено: в течение 12 месяцев нестабильность дзета-потенциала в выбранных системах не превышала 2 %, а в течение 22 месяцев – не превышала 4,5 %. С учётом вышесказанного, можно сделать вывод о соответствии созданных СО на основе супрамолекулярных систем НАЦац и ЦСРац требованиям промышленности.

В настоящее время ведётся работа над методами получения систем с абсолютным значением дзета-потенциала более 110 мВ.

Выводы. Созданы СО дзета-потенциала частиц в жидкости. Планируется аттестация образцов в качестве государственных СО. Результаты проведённой работы могут служить основой для дальнейших исследований в области измерений дзета-потенциала. Одним из возможных перспективных направлений является исследование дзета-потенциала твёрдых поверхностей. Это крайне важная задача при создании высококачественных адгезивных стекол, полиэлектролитных многослойных плёнок, особо чистых полупроводниковых пластин [13].

Другой не менее важный аспект – возможность создания методики измерения и измерительных комплексов для предприятий

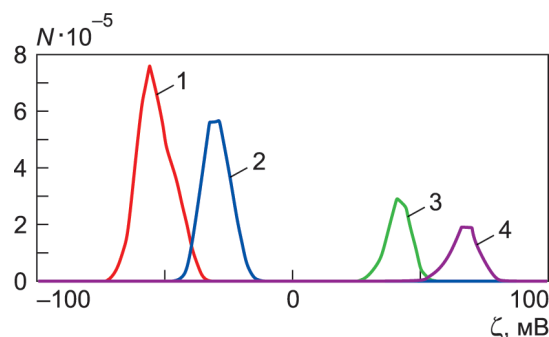


Рис.2. Результаты измерений (средние значения) дзета-потенциала ζ в супрамолекулярных системах (N – число фотонов):

1 – НАЦац 0,01 %, $\zeta = -31,4$ мВ; 2 – НАЦац 0,03 %, $\zeta = -52,6$ мВ; 3 – ЦСРац 0,02 % + сульфат натрия, $\zeta = +41,5$ мВ; 4 – ЦСРац 0,02 %, $\zeta = +64,5$ мВ

Fig. 2. The results of measurements (average values) of the zeta potential in supramolecular systems:

1 – NACac 0.01 %, $\zeta = -31.4$ mV; 2 – NACac 0.03 %, $\zeta = -52.6$ mV; 3 – CSSac 0.02 % + sodium sulfate, $\zeta = +41.5$ mV; 4 – CSSac 0.02 %, $\zeta = +64.5$ mV

пищевой промышленности и агропромышленного комплекса Российской Федерации, что обеспечит государственное регулирование и контроль качества продукции недорогим интегральным способом, заменой которому может служить только дорогостоящий метод хромато-масс-спектрометрии.

Список литературы

1. Беленький Д., Балаханов Д., Лесников Е. Определение дзета-потенциала. Краткий обзор основных методов // Аналитика. 2017. № 3. С. 82–87.
2. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. Л.: Химия, 1984. 68 с.
3. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1988. 464 с.
4. Irem B. Ustinol, Natalia I. Gonzalez-Pech and Vick H. Grassian, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, vol. 554, pp. 362–375. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.086>
5. Hunter R. J., *Zeta potential in colloid science*, Academic press, 1981, 373 p.
6. F. Ghilini, M. C. Rodríguez González, A. G. Miñán, D. Pissinis, A. H. Creus, R. C. Salvarezza, P. L. Schilardi, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 28, pp. 23657–23666. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b07529>
7. Brouwer W. M., *Journal of Applied Polymer Science*, 1989, vol. 38, no.7, pp. 1335–1346. <https://doi.org/10.1002/app.1989.070380712>
8. Bujanca I. C., Corobea M. C., Miculescu F., Dimonie M., *e-Polymers*, 2011, no. 033. <https://doi.org/10.1515/epoly.2011.11.1.371>
9. Ямсков И. А., Благодатских И. В., Краснов М. С. и др., Физико-химические свойства новой группы регуляторных белков, выделенных из различных тканей млекопитающих // Известия Академии наук. Серия химическая. 2009. № 3. С. 623–628.

10. Vishnevetskii D. V., Mekhtiev A. R., Perevozova T. V., Averkin D. V., Ivanova A. I., Khizhnyak S. D., Pakhomov P. M., *Soft Matter*, 2020, vol. 16, pp. 9669–9673.

<https://doi.org/10.1039/D0SM01431A>

11. Khizhnyak S. D., Komarov P. V., Ovchinnikov M. M., Zherenkova L. V., Pakhomov P. M., *Soft Matter*, 2017, vol. 13, pp. 5168–5184. <https://doi.org/10.1039/C7SM00772H>

12. Адамян А. Н., Аверкин Д. В., Хижняк С. Д., Пахомов П. М. Процесс гелеобразования в водном растворе L-цистеина и ацетата серебра под воздействием сульфатов и хлоридов металлов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: химия. 2018. Вып. 3, С. 52–65.

13. Суворов А. Л., Богданович Б. Ю., Залужный А. Г., Графутин В. И., Калугин В. В., Нестерович А. В., Прокопьев Е. П., Тимошенко С. П., Чаплыгин Ю. А. Технологии структур КНИ. М.: МИЭТ, 2004. 407 с.

References

1. Belenky D., Balakhanov D., Lesnikov E., Determination of the zeta potential. A brief overview of the main methods, *Analytics*, 2017, № 3, pp. 82–87. (In Russ.)

2. Friedrichsberg D. A., *Course of Colloid Chemistry*, Leningrad, Chemistry Publ., 1984, 68 p. (In Russ.)

3. Frolov Yu. G., *Course of Colloidal Chemistry. Surface phenomena and dispersed systems*, Moscow, Chemistry Publ., 1988, 464 p. (In Russ.)

4. Irem B. Ustinol, Natalia I. Gonzalez-Pech and Vick H. Grassian, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, vol. 554, pp. 362–375. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.086>

5. Hunter R. J., *Zeta potential in colloid science*, Academic press, 1981, 373 p.

6. F. Ghilini, M. C. Rodríguez González, A. G. Miñán, D. Pissinis, A. H. Creus, R. C. Salvarezza, P. L. Schilardi, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 28, pp. 23657–23666.

<https://doi.org/10.1021/acsami.8b07529>

7. Brouwer W. M., *Journal of Applied Polymer Science*, 1989, vol. 38, no.7, pp. 1335–1346.

<https://doi.org/10.1002/app.1989.070380712>

8. Bujanca I. C., Corobea M. C., Miculescu F., Dimonie M., *e-Polymers*, 2011, no. 033.

<https://doi.org/10.1515/epoly.2011.11.1.371>

9. Yamskov I. A., Blagodatskikh I. V., Krasnov M. S., Borisenko A. V., Margasyuk D. V., Vecherkin V. V., Skripnikova V. S., Nazarova P. A., Bitko S. A., Berezin B. B., Yaminskii I. V., Meshkov G. B., Grachev S. A., Serebryakova M. V., Rybakova E. Yu., Yamskova V. P., *Russian Chemical Bulletin*, 2009, vol. 58, pp. 640–645. <https://doi.org/10.1007/s11172-009-0069-4>

10. Vishnevetskii D. V., Mekhtiev A. R., Perevozova T. V., Averkin D. V., Ivanova A. I., Khizhnyak S. D., Pakhomov P. M., *Soft Matter*, 2020, vol. 16, pp. 9669–9673.

<https://doi.org/10.1039/D0SM01431A>

11. Khizhnyak S. D., Komarov P. V., Ovchinnikov M. M., Zherenkova L. V., Pakhomov P. M., *Soft Matter*, 2017, vol. 13, pp. 5168–5184.

<https://doi.org/10.1039/C7SM00772H>

12. Adamyan A. N., Averkin D. V., Khizhnyak S. D., Pakhomov P. M., Gelation in low concentration aqueous systems based on amino acid L-cysteine and silver acetate, *TVGU Bulletin: Chemistry series*, 2018, vol. 3, pp. 52–65.

13. Suvorov A. L., Bogdanovich B. Yu., Zaluzhnyj A. G., Grafutin V. I., Kalugin V. V., Nesterovich A. V., Prokopev E. P., Timoshenkov S. P., Chaplygin Yu. A., *Tehnologii struktur KNI*, Moscow, MIET Publ., 2004, 407 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 01.12.2020; принята к публикации 28.02.2021.