



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 678.8

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.027

 EDN: UKHDXT

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ОБОЛОЧКИ ПОЛИЛАКТИДА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (I) МЕТОДОМ ТИТРОВАНИЯ

Максим Петрович Данилаев ¹, Елена Андреевна Бобина ²,
Сергей Викторович Дробышев ³, Сергей Алексеевич Карандашов ⁴,
Владимир Александрович Куклин ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

⁵ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

¹ danilaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7733-9200>

² lemurik1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0196-1693>

³ warlordik_009@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1655-4492>

⁴ seregak2005@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7608-6531>

⁵ iamkvova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-5837>

Аннотация. Изменение некоторых механических характеристик дисперсно-армированных полимерных композиционных материалов с биоцидным эффектом возможно обеспечить путем контроля толщины полимерной оболочки на поверхностях дисперсных частиц наполнителя. В работе предложен косвенный контроль толщины оболочки полилактида на поверхностях дисперсных частиц оксида меди (I) с использованием метода титрования. Для калибровки полученных результатов титрования в работе определяли смещение максимума гистограммы распределения частиц (капсулированных относительно исходных частиц) по размерам по анализу микрофотографий. Предложена аппроксимация временной зависимости концентрации ионов меди в таком растворе экспоненциальной функцией вида. Нелинейность измерительной характеристики, связывающей постоянную времени аппроксимирующей экспоненциальной функции с толщиной оболочки, связана с различным значением плотности оболочки полилактида разной толщины.

Ключевые слова: капсулирование, толщина оболочки, полилактид, титрование, дисперсные частицы наполнителя полимера.

Благодарности: научные исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №23-29-00160.

Для цитирования: Контроль толщины оболочки полилактида на поверхностях дисперсных частиц оксида меди (I) методом титрования / М. П. Данилаев [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 215–222. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.027. EDN: <https://elibrary.ru/UKHDXT>.

Original article

CONTROL OF POLYLACTIDE SHELL THICKNESS ON THE SURFACES OF DISPERSED COPPER (I) OXIDE PARTICLES BY TITRATION METHOD

Maxim P. Danilaev ¹, Elena A. Bobina ²,
Sergej V. Drobyshev ³, Sergej A. Karandashov ⁴,
Vladimir A. Kuklin ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

⁵ Kazan Federal University, Kazan, Russia

¹ danilaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7733-9200>

² lemurik1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0196-1693>

³ warlordik_009@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1655-4492>

⁴ seregak2005@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7608-6531>

⁵ iamkvova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-5837>

Abstract. *It is possible to change some mechanical characteristics of dispersed reinforced polymer composites with biocide effect by controlling the thickness of the polymer shell on the surfaces of dispersed filler particles. In this work an indirect control of polylactide shell thickness on the surfaces of disperse particles of copper oxide (I) using the titration method was proposed. To calibrate the obtained titration results we determined the shift of maximum histogram of particles (encapsulated relative to the original particles) size distribution by the analysis of microphotographs. Approximation of the time dependence of copper ions concentration in such a solution by an exponential function of the form is proposed. The nonlinearity of the measuring characteristic which connects the time constant of the approximating exponential function with the shell thickness is connected with different values of the polylactide shell density of different thickness.*

Keywords: *encapsulation, shell thickness, polylactide, titration, dispersed polymer filler particles.*

Acknowledgements: *this work was supported by Russian Science Foundation Grant No 23-29-00160.*

For citation: Danilaev, M.P., Bobina, E.A., Drobyshev, S.V., Karandashov, S.A. & Kuklin, V.A. (2023). Control of polylactide shell thickness on the surfaces of dispersed copper (I) oxide particles by titration method. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 215-222. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.027. EDN: <https://elibrary.ru/UKHDXT>.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), в особенности в условиях тропического климата, требует повышения стойкости ПКМ к биодеструкции с одновременным обеспечением заданных механических характеристик [1–4]. Один из перспективных подходов к решению данной задачи основан на использовании дисперсных частиц наполнителя полимера, в качестве которых выбирают частицы, проявляющие токсичность к микроорганизмам, – биодеструкторам [5, 6]. Варьировать механическими характеристиками таких ПКМ возможно, в том числе путем формирования на

поверхностях дисперсных частиц полимерной оболочки определенной толщины. Так, в статье [7] показано, что при толщине оболочки полистирола ~10 нм на поверхностях субмикронных частиц оксида алюминия значение модуля упругости их композиции с АБС (акрилонитрилбутадиен стирол) пластиком оказывается максимальной. При этом массовая концентрация капсулированных частиц в матричном полимере не превышала 1 %. В работе [8] предложено использовать дисперсные частицы оксида меди, капсулированные полилактидом (ПЛА), для одновременного повышения стойкости ПКМ к биодеструкции и достижения повышенных механических характеристик. Кроме этого, оболочка

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2023

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ОБОЛОЧКИ ПОЛИЛАКТИДА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (I) МЕТОДОМ ТИТРОВАНИЯ

из полилактида удерживает дисперсные частицы в полимерной матрице, тем самым защищая окружающую среду от вредного воздействия токсинов. В процессе биодеструкции такой полимерной композиции микроорганизмы разрушат полилактид. Следует отметить, что полилактид быстрее растворяется в органических кислотах, выделяемых микроорганизмами [9], что делает его более привлекательным для биодеструкторов, чем полимерная матрица. В результате разрушения полимерной оболочки происходит контакт биодеструкторов с токсическими для них производными меди [10–12]. При этом толщина оболочки полилактида оказывает существенное влияние на механические характеристики композита [13]. Таким образом, следует контролировать толщину полимерной оболочки на поверхностях дисперсных частиц в процессе ее формирования для обеспечения заданных механических характеристик таких ПКМ.

В общем случае возможно выделить две группы методов контроля толщины полимерной оболочки на поверхностях дисперсных частиц: прямые и косвенные методы. Прямые методы контроля предполагают определение среднего значения толщины полимерной оболочки путем проведения микроскопических (визуальных) измерений. Например, в работах [13, 14] толщину полимерной оболочки определяют по смещению максимума в гистограмме распределения числа капсулированных частиц по размерам относительно исходных (не капсулированных) частиц. Гистограмма распределения строится по результатам анализа фотографий частиц, полученных с помощью электронной сканирующей микроскопии. Существенными ограничениями этой группы методов являются длительное время измерений и сложность получения образцов дисперсных частиц для проведения измерений, в особенности при капсулировании в суспензиях. Вторая группа методов предполагает оценку толщины полимерной оболочки по косвенным признакам. Например, по различию масс капсулированных и исходных частиц (методы седиментации [14]), по разнице показателей их преломления (методы светорассеяния [15]), по скорости растворения оболочки [16] и др. Эта группа методов направлена на устранение приведенных недостатков микроскопии, но требует калибровки [17, 18].

Целью данной работы является разработка косвенного контроля толщины оболочки полилактида на поверхностях дисперсных частиц оксида меди (I) с использованием методов титрования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Получение оболочки.

Формирование оболочки полилактида осуществляли путем инициирования процесса коацервации полилактида (производства Natural Works LLC марки PLA 4043D) из раствора ПЛА в бензоле (ГОСТ 5955-75 с квалификацией чистоты «хч») на поверхности дисперсных частиц оксида меди (I) (ТУ 6-09-765-76 с квалификацией «ЧДА») [8].

Для чего в круглодонной колбе объемом 200 мл растворили 0.75 ± 0.05 г гранул полилактида в 50 ± 1 г бензола перемешиванием на магнитной мешалке с подогревом (производства фирмы Экрос, модель ES-6120) в течение 6 часов (± 30 минут) при температуре 40 ± 2 °С. После растворения полилактида в бензоле образуется вязкий прозрачный раствор. Суспензию этого раствора с частицами оксида меди (I) готовили следующим образом. В ультразвуковой ванне (Daihan WUC-A01H, мощность 50 Вт) диспергировали 1 ± 0.1 г частиц оксида меди в 25 ± 2 г бензола, в течение 1 ± 0.1 минут. После гомогенизации в суспензию при постоянном перемешивании при температуре (40 ± 2) °С добавили 50 ± 1 г раствора бензола с полилактидом. Процесс коацервации инициировали добавлением вытесняющего растворителя гексана (ТУ 2631-158-44493179-13 с квалификацией чистоты «хч»), массой 10 ± 1 г, при постоянном перемешивании суспензии на магнитной мешалке. Для того чтобы получить разную толщину оболочки ПЛА, на поверхностях частиц изменяли скорость добавления гексана: $(3 \div 30) \pm 2$ капель в минуту [8]. Средний объем одной капли в экспериментах составлял $\sim 0.05 \pm 0.01$ мл. Капсулированные ПЛА частицы оксида меди (I) отфильтровывали из суспензии с использованием микрофильтровальной бумаги.

Методы исследования

Изображения частиц как капсулированных, так и некапсулированных (исходных) (рис. 1), получали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе Carl Zeiss AURIGA Cross Beam с ЭДВ Inca X-Max 80 мм². Анализ размеров частиц проводился по выборке из 800–1200 частиц. Следует отметить, что увеличение числа частиц в выборке свыше 500 не влияло на результаты статистической обработки [13].

Для достижения поставленной цели воспользовались хорошей растворимостью как полилактида, так и оксида меди в растворе серной кислоты в присутствии перекиси водорода [19]:

1. $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CuO} + \text{H}_2\text{O}$;
2. $\text{CuO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Cu}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$.

Частицы Cu_2O растворяются с образованием ионов меди, концентрацию которых возможно определить, например, методом титрования [20, 21]. Следует ожидать, что изменение концентрации таких ионов во времени определяется толщиной оболочки полилактида. Чем толще оболочка полилактида, тем дольше она растворяется, и, соответственно, позже появляются ионы меди в растворе. Причем, по всей видимости, характер временной зависимости образования ионов меди в растворе определяется как сплошностью оболочки ПЛА, так и разбросом значения толщины оболочки на частицах.

Пробы для титрования объемом 10 ± 0.1 мл отбирали через равные промежутки времени $\sim 10 \pm 0.5$ минут. Навеска капсулированных частиц в растворах составляла 0.5 ± 0.05 г. Титрование отобранных проб проводили трилоном Б (ТУ 20.59-046-79640352-2018) в присутствии индикатора мурексида (ГОСТ 4919.1-2016) при температуре 20 ± 1 °С. Навеску дисперсных частиц помещали в раствор 94 % серной кислоты в дистиллированной воде (на 0.525 г воды 0.9 г серной кислоты) с добавлением (2.7 г) 3 % раствора перекиси водорода. Получившуюся суспензию перемешивали на магнитной мешалке со скоростью 600 оборотов в минуту. На время отбора пробы мешалку отключали. Расчет концентрации (С) ионов меди в анализируемом растворе определяли по формуле (ГОСТ 32221-2013):

$$C = \frac{C_{\text{трБ}} \cdot V}{m_{\text{Cu}}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{трБ}}$ – массовая концентрация раствора трилона Б по меди (г/см³); V – объем (см³) раствора трилона Б при титровании пробы; m_{Cu} – масса меди в навеске (г).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типовые фотографии исходных и капсулированных частиц оксида меди (I) представлены на рисунке 1. Капсулированные частицы оксида меди (I) (рис. 1) были получены при следующих условиях: $m_{\text{Cu}_2\text{O}} = 1 \pm 0.1$ г, концентрация ПЛА на 100 мл бензола $(4.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$ г, скорость добавления гексана 15 ± 1 капель/мин. Судя по фотографическим изображениям, оболочка на поверхностях капсулированных частиц неоднородна по толщине. Это должно повлиять на скорость образования ионов меди при титровании.

218

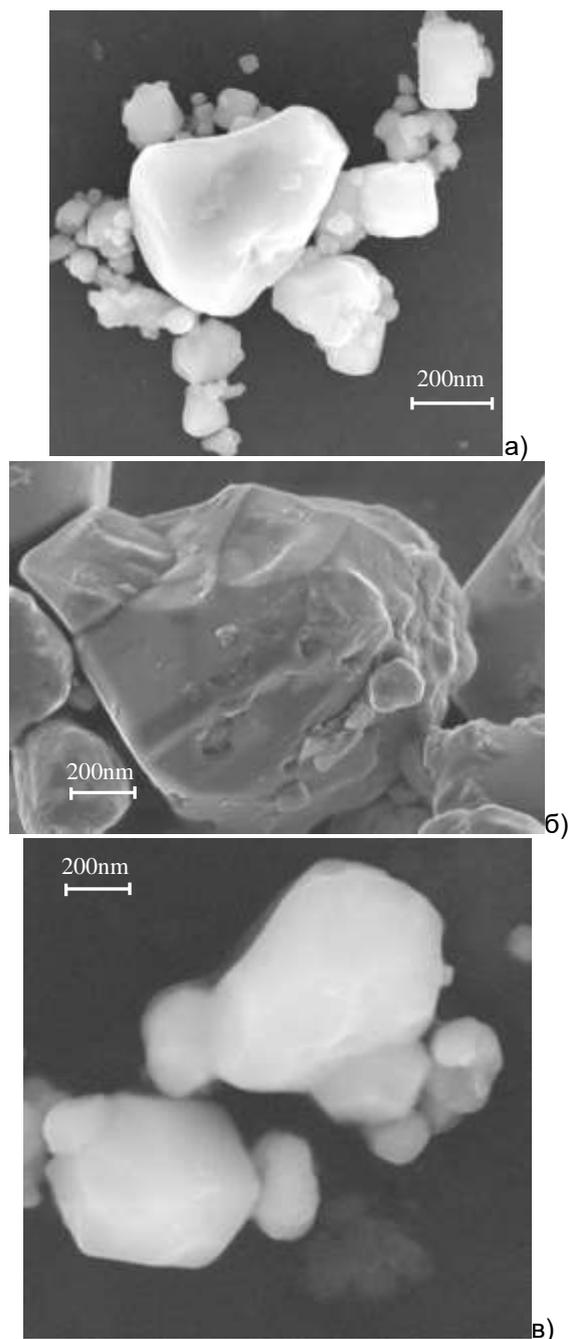


Рисунок 1 – Фотографии частиц оксида меди (I): а – исходные частицы; б, в – капсулированные частицы

Figure 1 - Photographs of copper (I) oxide particles: a - original particles; b, c - encapsulated particles

Оценка размеров частиц оксида меди осуществлялась путем статистической обработки полученных микрофотографий в программной среде ImageJ для калибровки косвенного метода. По результатам анализа микрофотографий строились гистограммы рас-

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ОБОЛОЧКИ ПОЛИЛАКТИДА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (I) МЕТОДОМ ТИТРОВАНИЯ

пределения дисперсных частиц по размерам. Пример таких гистограмм приведен на рисунке 2 для исходных (рис. 1, а) и капсулированных (рис. 1, б, в) частиц. Для исходных и капсулированных частиц N_0 составило $\sim 500 \pm 20$.

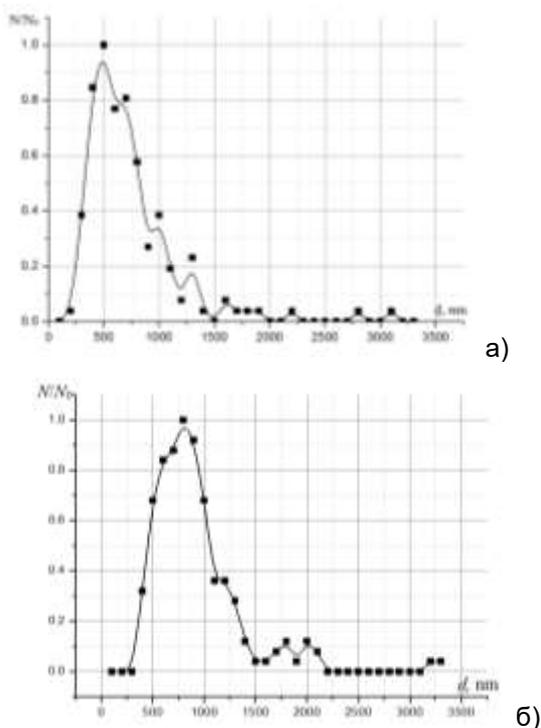


Рисунок 2 – Распределение числа частиц по размерам: а – исходные частицы; б – капсулированные частицы оксида меди (I); N – число частиц с определенным размером, N_0 – число частиц, соответствующее максимуму в распределении

Figure 2 - Particle number size distribution: a - initial particles, b - encapsulated copper oxide particles, N - number of particles of a certain size, N_0 - number of particles corresponding to the maximum in the distribution

По смещению максимумов гистограмм, полученных для капсулированных частиц, относительно максимума гистограммы, полученной для исходных частиц, определяли толщину оболочки ПЛА. Зависимость на рисунке 3 получена по результатам анализа микрофотографий пяти образцов капсулированных частиц с различной толщиной оболочки ПЛА.

График среднего значения толщины (h) оболочки ПЛА (рисунок 3) использовали для калибровки результатов косвенного метода определения h титрованием (рисунок 4). Среднеквадратическое отклонение при определении массы ионов меди в растворе составила не более 15 %.

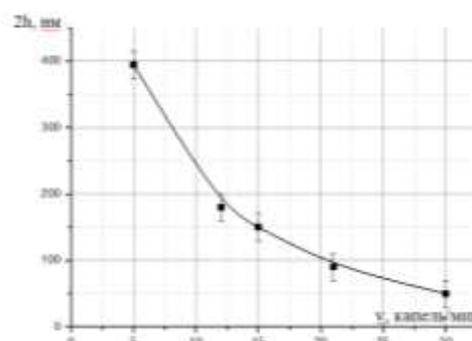


Рисунок 3 – Зависимость среднего значения толщины (h) оболочки полилактида от скорости добавления гексана

Figure 3 - Dependence of the average value of poly lactide shell thickness (h) on the rate of addition of hexane

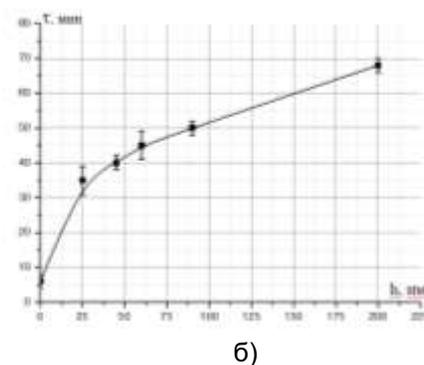
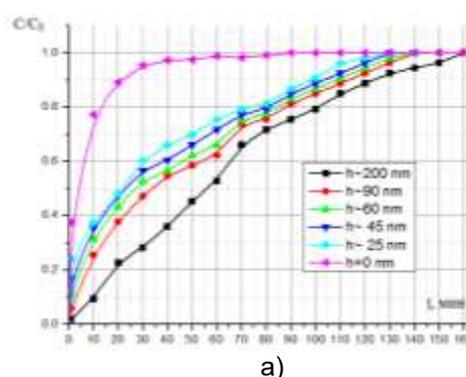


Рисунок 4 – Зависимости: а – изменения концентрации ионов меди в растворе от времени; б – постоянной времени растворения капсулированных частиц оксида меди (I) от толщины оболочки ПЛА

Figure 4 - Dependences of: a - change in concentration of copper ions in solution with time; b - dissolution time constant of encapsulated copper oxide (I) particles on PLA shell thickness

Экспериментальные зависимости на рисунке 4, а возможно аппроксимировать функцией вида:

$$C(t) = C_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right), \quad (2)$$

где τ – характерное время процесса образования ионов меди, соответствующее изменению концентрации ионов меди в растворе в e раз, C_0 – концентрация ионов меди в растворе после растворения всех частиц оксида меди (I), $C_0 = 0.85 \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right]$. Интегральное значение невязки (Δ) [22] на временном интервале [0, 160] минут при сравнении экспериментальных

(рис. 4, а) и аппроксимирующих их зависимостей (2) представлено в таблице 1.

Зависимость $\tau = \tau(h)$ существенно не линейна. Причина этого, возможно, связана с различным значением плотности оболочки полилактида разной толщины: с ростом толщины плотность полилактида в оболочке возрастает. Здесь следует отметить результаты работы [23], в которой показано нарастание плотности полимерной оболочки на поверхностях дисперсных частицах во времени при образовании, инициированном коацервацией.

Таблица 1 – Значения невязки при сравнении экспериментальных и аппроксимирующих их зависимостей

Table 1 - Residual values after comparing the experimental and approximating dependences

h, нм	0	25	45	60	90	200
Δ	0.05	0.03	0.04	0.05	0.05	0.03

ВЫВОДЫ

Обобщая полученные результаты, можно заключить, что метод растворения капсулированных ПЛА частиц оксида меди (I) в растворе кислоты с добавлением перекиси водорода возможно использовать для определения средней толщины (h) оболочки полилактида. Аппроксимация временной зависимости концентрации ионов меди в таком растворе экспоненциальной функцией вида (2) имеет малые значения невязки. Это позволяет использовать измерительную характеристику, связывающую характерное время (τ) процесса образования ионов меди в растворе с значениями средней толщины полимерной оболочки. Плотность полилактида в оболочках на поверхностях частиц нарастает во времени в процессе коацервации, т.е. с ростом толщины оболочки. Следует отметить, что растворение полилактида приводит к образованию молочной кислоты, которая также может способствовать растворению частиц оксида меди с образованием комплексов, содержащих ионы меди. Однако линейная зависимость измерительной характеристики в области толщин $h > 50$ нм позволяет предположить, что это не оказывает существенного влияния на изменение скорости растворения этих частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биокоррозия синтетических пластмасс: механизмы деградации и способы защиты / В.К. Плакунов [и др.] // Микробиология. 2020. № 89(6). С. 631–645. <http://dx.doi.org/10.31857/S0026365620060142>.
2. Review on plastic wastes in marine environment Biodegradation and biotechnological solutions / A. Ganesh Kumar, K. Anjana, M. Hinduja, K. Sujitha & G. Dharani // Marine Pollution Bulletin. 2020. № 150. P. 110733. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110733>.
3. Plastic wastes biodegradation: mechanisms, challenges and future prospects / S.S. Ali, T. Elsamahy, R. Al-Tohamy, D. Zhu, Y.A.G. Mahmoud, E. Koutra & J. Sun // Science of the Total Environment. 2021. № 780. P. 146590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>.
4. Gautam R., Bassi A.S. & Yanful E.K. A review of biodegradation of synthetic plastic and foams // Applied biochemistry and biotechnology. 2007. № 141(1). P. 85–108. <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-007-9212-6>.
5. Palza H. Antimicrobial polymers with metal nanoparticles // International journal of molecular sciences. 2015. № 16(1). P. 2099–2116. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms16012099>.
6. Advantages of nanotechnology developments in active food packaging / J. Mahmud, E. Sarmast, S. Shankar & M. Lacroix // Food Research International. 2022. P. 111023. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111023>.
7. Influence of the thickness of a polymer shell applied to surfaces of submicron filler particles on the properties of polymer compositions / A.A. Akhmadeev, E.A. Bogoslov, M.P. Danilaev, M.A. Klabukov & V.A. Kuklin // Mechanics of Composite Materials. 2020. № 56(2). P. 241–248. <https://doi.org/10.1007/s11029-020-09876-4>.
8. Dispersed copper (I) oxide particles encapsulated by polylactide / M.P. Danilaev, S.V. Drobushov, S.A. Karandashov, M.A. Klabukov, V.A. Kuklin // Kondensirovannyyesredyimezhfaznyegranitsy = Condensed Matter **ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2023**

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ОБОЛОЧКИ ПОЛИЛАКТИДА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (I) МЕТОДОМ ТИТРОВАНИЯ

and Interphases. 2023. № 24(1): 000-000. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/0000>.

9. Биокоррозия синтетических пластмасс: механизмы деградации и способы защиты / В.К. Плакунов [и др.] // Микробиология. 2020. Т. 89. №. 6. С. 631–645. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44091219>.

10. Gadd G.M. & Griffiths A.J. Microorganisms and heavy metal toxicity // *Microbial ecology*. 1977. № 4(4). P. 303–317. <https://doi.org/10.1007/bf02013274>.

11. Fowler L., Engqvist H. & Öhman-Mägi C. Effect of copper ion concentration on bacteria and cells // *Materials*. 2019. № 12(22). P. 3798. <https://doi.org/10.3390/ma12223798>.

12. Бактерицидные и каталитические свойства стабильных металлических наночастиц в обратных мицеллах / Е.М. Егорова [и др.] // Вестник Московского университета. 2001. Серия 2. Химия. № 42(5). С. 332–338. <http://org321-9.chem.msu.ru/rus/vmgu/015/332.pdf>.

13. Formation of a Polymer Shell of a Given Thickness on Surfaces of Submicronic Particles / M.P. Danilayev, S.V. Drobyshev, M.A. Klubukov, V.A. Kuklin & D.A. Mironova // *Nanobiotechnology Reports*. 2021. № 16(2). P. 162–166. <https://doi.org/10.1134/S263516762102004X>.

14. Roll G., Kaiser T. & Schweiger G. Optical trap sedimentation cell—a new technique for the sizing of microparticles // *Journal of aerosol science*. 1996. № 27(1). P. 105–117. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)00535-8](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00535-8).

15. Измерение характерного размера субмикронных частиц в технологических процессах методом светового рассеяния / М.П. Данилаев [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 19(7). С. 417–422. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29759579>.

16. Bewlay B.P. & Gigliotti M.F.X. Dissolution rate measurements of TiN in Ti-6242 // *Acta Materialia*. 1997. № 45(1). P. 357–370. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00098-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00098-5).

17. Бадретдинова Л.Х., Вахидов Р.М. & Базотов В.Я. Влияние размера частиц на период релаксации электрического заряда диэлектриков // Вестник Технологического университета. 2019. № 22(8). С. 26–28. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41240248>.

18. Дифференциальный анализатор гигроскопических свойств аэрозольных частиц, осажденных на фильтр / Е.Ф. Михайлов [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2011. № 47(6). С. 809–809.

19. Стась Н.Ф. Справочник по общей и неорганической химии, 2018.

20. Эшворт М.Р.Ф. Титриметрические методы анализа органических соединений. Москва: Химия, 1972.

21. Terayama H. Method of colloid titration (a new titration between polymer ions) // *Journal of Polymer Science*. 1952. № 8(2). P. 243–253. <https://doi.org/10.1002/pol.1952.120080209>.

22. Теслер Г.С. Адаптивные аппроксимации и итеративные процессы // Математические машины и системы. 2004. № 2. С. 22–41.

23. Ильюшенко Е.В. Инкапсулирование биологически активных веществ с использованием обратных микроэмульсий: дис. ..., М., 2012.

Информация об авторах

М. П. Данилаев – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронных и

квантовых средств передачи информации» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

Е. А. Бобина – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронных и квантовых средств передачи информации» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

С. В. Дробышев – инженер-исследователь центра «прикладных нанотехнологий» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

С. А. Карандашов – инженер-исследователь междисциплинарной межвузовской лаборатории Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

В. А. Куклин – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь междисциплинарной межвузовской лаборатории Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

REFERENCES

1. Plakunov, V.K., Gannesen, A.V., Mart'yanov, S.V. & ZHurina, M.V. (2020). Biocorrosion of synthetic plastics: degradation mechanisms and methods of protection. *Microbiology*, 89(6), 631-645. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0026365620060142>.

2. Anjana, K., Hinduja, M., Sujitha, K. & Dharani, G. (2020). Review on plastic wastes in marine environment Biodegradation and biotechnological solutions. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110733. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110733>.

3. Ali, S.S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y.A.G., Koutra, E. & Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: mechanisms, challenges and future prospects. *Science of the Total Environment*, 780, 146590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>.

4. Gautam, R., Bassi, A.S. & Yanful, E.K. (2007). A review of biodegradation of synthetic plastic and foams. *Applied biochemistry and biotechnology*, 141(1), 85-108. <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-007-9212-6>.

5. Palza, H. (2015). Antimicrobial polymers with metal nanoparticles. *International journal of molecular sciences*, 16(1), 2099-2116. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms16012099>.

6. Mahmud, J., Sarmast, E., Shankar, S. & Lacroix, M. (2022). Advantages of nanotechnology developments in active food packaging. *Food Research International*, 111023. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111023>.

7. Akhmadeev, A.A., Bogoslov, E.A., Danilaev, M.P., Klabukov, M.A. & Kuklin, V.A. (2020). Influence of the thickness of a polymer shell applied to surfaces of submicron filler particles on the properties of polymer compositions. *Mechanics of Composite Materials*, 56(2), 241-248. <https://doi.org/10.1007/s11029-020-09876-4>.
8. Danilaev, M.P., Drobyshev, S.V., Karandashov, S.A., Klabukov, M.A. & Kuklin, V.A. (2023). Dispersed copper (I) oxide particles encapsulated by polylactide. *Kondensirovannye sredyimezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 24(1). <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/0000>.
9. Plakunov, V.K., Gannesen, A.V., Mart'yanov, S.V. & ZHurina, M.V. (2020). Biocorrosion of synthetic plastics: degradation mechanisms and methods of protection. *Microbiology*, 89(6), 631-645. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=44091219>.
10. Gadd, G.M. & Griffiths, A.J. (1977). Microorganisms and heavy metal toxicity. *Microbial ecology*, 4(4), 303-317. <https://doi.org/10.1007/bf02013274>.
11. Fowler, L., Engqvist, H. & Öhman-Mägi, C. (2019). Effect of copper ion concentration on bacteria and cells. *Materials*, 12(22), 3798. <https://doi.org/10.3390/ma12223798>.
12. Egorova, E.M., Revina, A.A., Rostovshchikova, T.N. & Kiseleva, O.I. (2001). Bactericidal and catalytic properties of stable metal nanoparticles in reverse micelles. *Bulletin of Moscow University*, 42(5), 332-338. (In Russ.). <http://org321-9.chem.msu.ru/rus/vmgu/015/332.pdf>.
13. Danilaev, M.P., Drobyshev, S.V., Klabukov, M.A., Kuklin, V.A. & Mironova, D.A. (2021). Formation of a Polymer Shell of a Given Thickness on Surfaces of Submicronic Particles. *Nanobiotechnology Reports*, 16(2), 162-166. <https://doi.org/10.1134/S263516762102004X>.
14. Roll, G., Kaiser, T. & Schweiger, G. (1996). Optical trap sedimentation cell—a new technique for the sizing of microparticles. *Journal of aerosol science*, 27(1), 105-117. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)00535-8](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00535-8).
15. Danilaev, M.P., Dorogov, N.V., Kuklin, V.A., Kurangyshev, A.V. & Shilov, N.S. (2017). Measurement of the characteristic size of submicron particles in technological processes by the method of light scattering. *Nano- and microsystems engineering*, 19(7), 417-422. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=29759579>.
16. Bewlay, B.P. & Gigliotti, M.F.X. (1997). Dissolution rate measurements of TiN in Ti-6242. *Acta materialia*, 45(1), 357-370. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00098-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00098-5).
17. Badretdinova, L.H., Vahidov, R.M. & Bazotov, V.YA. (2019). Influence of the particle size on the relaxation period of the dielectric electric charge. *Bulletin of University of Technology*, 22(8), 26-28. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=41240248>.
18. Mihajlov, E.F., Merkulov, V.V., Vlasenko, S.S., Ryshkevich, T.I. & Pushel', U.I. (2011). Differential analyzer of hygroscopic properties of aerosol particles deposited on a filter. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean*, 47(6), 809-809. (In Russ.).
19. Stas', N.F. (2018). Handbook of General and Inorganic Chemistry. (In Russ.).
20. Ashworth, M.R.F. (1972). Titrimetric methods of analysis of organic compounds. Moscow.: Chemistry. (In Russ.).
21. Terayama, H. (1952). Method of colloid titration (a new titration between polymer ions). *Journal of Polymer Science*, 8(2), 243-253. <https://doi.org/10.1002/pol.1952.120080209>.
22. Tesler, G.S. (2004). Adaptive approximations and iterative processes. *Mathematical Machines and Systems*, (2), 22-41. (In Russ.).
23. Ilyushenko, E.V. (2012). Encapsulation of biologically active substances using inverse microemulsions. Extended abstract of diss. Moscow. (In Russ.).

Information about the authors

M.P. Danilaev - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Electronic and Quantum Means of Information Transmission" of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

E.A. Bobina - candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of "Electronic and Quantum Means of Information Transmission" of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

S.V. Drobyshev - research engineer, Center of "Applied Nanotechnologies", Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

S.A. Karandashov - research engineer, interdisciplinary interuniversity laboratory, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

V.A. Kuklin - candidate of physical and mathematical sciences, research engineer, interdisciplinary interuniversity laboratory, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12.01.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was received by the editorial board on 12 Jan 2023; approved after editing on 13 Mar 2023; accepted for publication on 21 Mar 2023.