

## ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 66.017 + 675.04

DOI 10.55421/3034-4689\_2025\_28\_9\_116

В. А. Сысоев, А. Р. Гарифуллина, А. А. Гиёсхонов,  
Ж. В. Межевич

### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОКСИДА ГРАФЕНА

#### В ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ КОЖЕВОЙ ТКАНИ МЕХОВОЙ ОВЧИНЫ

*Ключевые слова: оксид графена, дисперсность, неизоцианатные уретаны, термодинамические параметры, структурирование коллагена, хромсберегающие технологии дубления.*

*Методы превращения высокомолекулярных соединений позволяют придавать материалам на их основе уникальные свойства. Прежде всего это относится к реакциям структурирования, обеспечивающим повышение термоустойчивости, изолирующих и физико-механических характеристик. Указанный тип превращения, как правило, происходит под действием структурирующих агентов, которые в зависимости от отрасли применения называют отвердителями, вулканизаторами, дубителями. Оксид графена представляется перспективным для использования в этом качестве, благодаря наличию разнообразных функциональных групп. Его, как и коллаген, волокна которого образуют дерму животных, можно рассматривать бертоллидом с нестехиометрической структурой, зависящей от способа получения или условий формирования. В работе представлены результаты исследований применения композиции оксида графена и гидроксиуретана в качестве перспективного компонента хромсберегающих технологий мехового производства. Для получения характеристик объектов исследования применяли ИК-спектроскопию с Фурье-преобразованием; ультразвуковой генератор «И10-840» с рабочей частотой 25 КГц; контроль размера частиц осуществляли на анализаторе дзета-потенциала повышенной чувствительности «ZetaPALS». Подтверждено наличие кислородсодержащих групп, способных структурировать коллагеновые волокна кожевой ткани. Размер частиц ОГ после диспергирования при частоте 25 КГц составил 23 нм при времени обработки 25 минут. Визуализация геометрии молекул уретаноспирта проводилась с помощью пакета Chemcraft. Показана вероятность получения двух конфигурационных изомеров неизоцианатного мономерного карбамата, различающихся положением гидроксильной группы. Термодинамические характеристики продуктов аммонолиза пропиленкарбоната рассчитаны с применением программного пакета Gaussian. Показано, что благодаря наличию реакционноспособных кислородсодержащих групп, основу которых составляют гидроксо- и карбоксильные группы, оксид графена способен взаимодействовать с коллагеновой матрицей, обеспечивая её термоустойчивость. Комбинированное использованию оксида графена с уретаноспиртом (1-метил-2-гидроксиэтилуретаном), приводит к ускорению диффузационной составляющей дубления и повышает термоустойчивость кожи до 69 °C.*

В. А. Сысоев, А. Р. Гарифуллина, А. А. Гиёсхонов,  
Ж. В. Межевич

#### PROSPECTS FOR GRAPHENE OXIDE APPLICATION IN STRUCTURAL FORMATION PROCESSES OF FUR SHEEPSKIN LEATHER TISSUE

*Keywords: graphene oxide, dispersity, non-isocyanate urethanes, thermodynamic parameters, collagen structuring, chrome-saving tanning technologies.*

*The transformation methods of high-molecular compounds enable the development of unique properties in materials based on them. Primarily, this refers to structuring reactions that enhance thermal stability, insulating properties, and physico-mechanical characteristics. Such transformations typically occur under the influence of structuring agents, which are referred to as hardeners, vulcanizing agents, or tanning agents, depending on the industry. Graphene oxide appears promising for this purpose due to its diverse functional groups. Like collagen, whose fibers form animal dermis, graphene oxide can be considered a non-stoichiometric berthollide with a structure dependent on the synthesis method or formation conditions. This study presents the results of applying a graphene oxide and hydroxyurethane composite as a prospective component of chrome-saving technologies in fur production. The following methods were used to characterize the research objects: Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, Ultrasonic generator "И10-840" (operating frequency: 25 kHz), High-sensitivity zeta potential analyzer "ZetaPALS" for particle size control. The presence of oxygen-containing groups capable of structuring collagen fibers in leather tissue was confirmed. After dispersion at 25 kHz for 25 minutes, the graphene oxide particle size measured 23 nm. Molecular geometry visualization of urethane alcohol was performed using the Chemcraft software package. The study demonstrated the possibility of obtaining two configurational isomers of non-isocyanate monomeric carbamate, differing in hydroxyl group positioning. Thermodynamic parameters of propylene carbonate ammonolysis products were calculated using the Gaussian software package. The results indicate that graphene oxide, due to its reactive oxygen-containing groups (primarily hydroxyl and carboxyl groups), can interact with the collagen matrix, enhancing its thermal stability. The combined use of graphene oxide with urethane alcohol (1-methyl-2-hydroxyethyl urethane) accelerates the diffusion component of tanning and increases leather thermal stability up to 69°C.*

## Введение

Современное производство дубителей для кожи и меха демонстрирует устойчивый ежегодный рост, определяемый развитием автомобильной, мебельной и швейной отраслей промышленности [1]. Основную часть дубителей составляют соединения Cr(III), способные обеспечивать высокую термоустойчивость и стабильность свойств получаемой кожи [2]. В то же время использование хромовых дубителей сталкивается с комплексом экологических и технологических вызовов, связанных с их доказанной токсичностью, способностью к биоаккумуляции и сложностью утилизации отходов [3]. Поэтому в условиях ужесточающихся экологических нормативов и новых требований REACH, поиск эффективных альтернатив становится стратегической задачей отрасли [4].

В настоящее время разрабатываются несколько перспективных направлений по замене хромового дубления. Предлагаются: растительные танины, обладающие хорошей биоразлагаемостью, но демонстрирующие нестабильность характеристик [5]; комплексы на основе Al, Zr, Ti, менее токсичные хромовых, но требующие более строгого контроля параметров дубления и отличающиеся повышенной гидролизуемостью образуемых связей [6]; гидроксилсодержащие неизоцианатные уретаны, соответствующие всем экологическим нормативам, но из-за невысокой функциональности применяемые в основном в хромсберегающих технологиях комбинированного дубления [7-9].

Научный и практический интерес для решения обсуждаемой проблемы могут представлять также наноструктурированные материалы с повышенной функциональностью. В литературе имеются отрывочные сведения о повышении термоустойчивости кожевой ткани при помощи оксида графена (ОГ) [10], представляющего собой продукт модификации графита. Обработка графита сильными окислителями приводит к получению ОГ, которые представляют собой соединения углерода, водорода и кислорода в различных соотношениях. Таким образом, ОГ является бертолидом с нестехиометрической аморфной структурой, зависящей от способа получения. На краях или внутри углеродной сетки монолистов ОГ могут находиться кислородсодержащие функциональные группы (карбонильные, гидроксильные, карбоксильные, эпоксидные). Степень окисления ОГ и его состав может значительно варьироваться и содержать от 3% до 40% кислорода по массе. Лабильный химический состав усложняет задачу классификации и стандартизации ОГ (Рис. 1).

Учитывая широкий спектр возможных взаимодействий ОГ с коллагеном, стехиометрия которого также не постоянна, исследования по совместному структурированию указанных природных полимеров представляются актуальными. Результативное использование ОГ в процессах дубления позволит не только снизить экологическую нагрузку, что особенно важно для выполнения экологических норм и требований к производству, повысить качество кожи, но и улучшить функциональные характеристики кожевенных и меховых изделий.

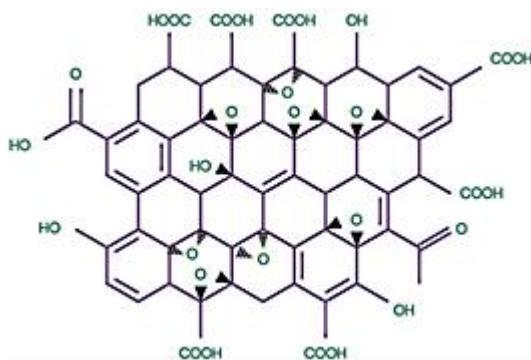


Рис. 1 – Структурная схема оксида графена торговой марки Graphenol

Fig. 1 – Structural diagram of graphene oxide under the Graphenol trademark

## Экспериментальная часть

Химическая структура ОГ была исследована при помощи инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием. Проанализировано наличие кислородсодержащих функциональных в диапазоне волновых чисел 400-4000  $\text{cm}^{-1}$ , при разрешении в 4  $\text{cm}^{-1}$ .



Рис. 2 – ИК-спектр оксида графена (ОГ), полученный методом инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием (FT-IR).

Fig. 2 – IR spectrum of graphene oxide (GO) obtained by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR).

На Рис. 2 представлены результаты ИК спектрального анализа ОГ, которые можно классифицировать следующим образом:

- диапазон поглощения 1066  $\text{cm}^{-1}$  свидетельствует о наличии слабого сигнала группы  $\text{C}=\text{O}$ ;
- диапазон поглощения 1361  $\text{cm}^{-1}$  свидетельствует о наличии среднего сигнала группы  $\text{CH}$
- диапазон поглощения 1620  $\text{cm}^{-1}$  свидетельствует о наличии средних сигналов группы  $\text{C}=\text{C}$
- диапазон поглощения 1726  $\text{cm}^{-1}$  свидетельствует о наличии сильного сигнала группы  $\text{COOH}$
- диапазон поглощения 2339  $\text{cm}^{-1}$  свидетельствует о наличии слабого сигнала группы  $\text{C}=\text{S}$
- диапазон поглощения 3381  $\text{cm}^{-1}$  свидетельствует о наличии сильного сигнала группы  $\text{OH}$

Нам особенно важны несколько диапазонов поглощения, а именно 3381 и 1726  $\text{cm}^{-1}$ . Они свидетельствуют о наличии сильных сигналов групп  $\text{OH}$  и  $\text{COOH}$  соответственно. Указанные группы в условиях проведения процессов дубления, реагируя с активными группами коллагена, способны приводить к структурированию волокнистой структуры дермы.

Возможное применение ОГ как структурирующего и модифицирующего компонента в различных композиционных материалах во многом будет определяться степенью его дисперсности и условиями диспергирования. В водной среде он поглощает влагу и становится гидрофильным, в аprotонных средах – более гидрофобным, что открывает широкие возможности его применения.

Поскольку процессы наполнения и дубления в технологиях кожи и меха проводят в подавляющем большинстве в водной среде, процесс диспергирования ОГ проводили в воде на ультразвуковом генераторе «И10-840» с рабочей частотой 25 КГц. Контроль размера частиц ОГ осуществляли на анализаторе дзета-потенциала повышенной чувствительности «ZetaPALS» с временным интервалом 3, 8, 15, 25, 40 минут (Рис.3).

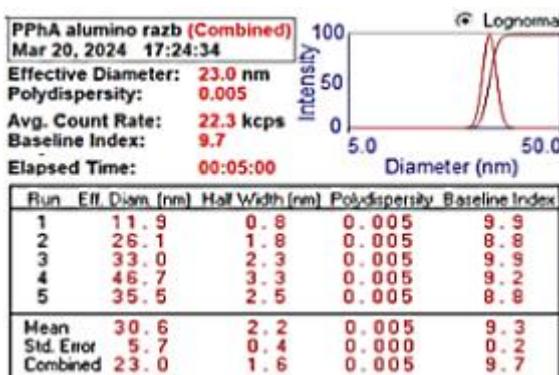


Рис. 3 – Размер частиц ОГ после 40 минутной УЗ обработки

Fig. 3 – OG particle size after 40 minutes of ultrasonic treatment

Результаты УЗ-обработки по времени и размеру частиц ОГ представлены в таблице 1. Размер частиц после обработки ультразвуком в течение 3 минут уменьшился с 333 нанометров до 153 нанометров. Дальнейшая обработка приводит к уменьшению размера частиц до 25 нанометров при 25 минутной обработки. Обработка в течении 40 минут не приводит к существенному снижению размера ОГ и составляет 23 нанометра. Следовательно, увеличение времени диспергирования более 25 минут не целесообразно, так как не приводит к существенному уменьшению размеров частиц.

Таблица 1 – Размер частиц оксида графена после обработки ультразвуком с частотой 25 КГц

Table 1 – Particle size of graphene oxide after ultrasonic treatment at 25 kHz

№ опыта	1	2	3	4	5	6
Время, мин	-	3	8	15	25	40
Размер, нм	333	153	54	32	25	23

Оптимальное время обработки составляет 25 минут, после чего размеры частиц практически не изменяются. Это говорит о том, что скорости процессов агломерации частиц и разрушения агломератов выравниваются.

В качестве исходного объекта исследования использовалась полутонкорунная меховая овчина мокросоленого способа консервирования. Выбор обусловлен тем, что меховая овчина является одним из основных видов меха и выпускается в стриженом виде натуральной и крашеной, имитируется под различные более дорогие виды меха.

Технология дубления является сложным многофакторным процессом, результат которого зависит от: соотношения и свойств компонентов дубящей системы; характеристик пикелеванного сырья и условий проведения предшествующих обработок. Особенno следует отметить то обстоятельство, что поскольку коллаген и ОГ являются полиамфолитами, необходимо соблюдать различные значения pH системы на стадиях диффузии структурирующего агента в дерму и его дальнейшего там закрепления для формирования более термоустойчивой структуры. Исследование процесса структурирования с применением ОГ проводили аналогично технологии дубления с применением полифункциональных неорганических дубителей. Объект исследования помещали в водную суспензию ОГ с pH 4.5 (показатель при необходимости корректировался 10%-ным раствором муравьиной кислоты) и в указанных условиях при постоянном перемешивании проводили обработку в течение 2 часов. На следующем этапе для структурирования коллагеновых волокон с помощью функциональных групп ОГ в ванну постепенно в течении 2 часов раствором состава  $\text{NaHCO}_3:\text{CH}_3\text{COONa:H}_2\text{O}$  (1:1:10) доводили pH до 6,0. Эффективность применения оксида графена в качестве дубителя в процессах стабилизации наноструктуры коллагена оценивалась по температуре сваривания кожевой ткани. Результаты исследований зависимости состава и концентрации дубящих композиций на термоустойчивость кожевой ткани представлены на Рис. 4.



Рис. 4 – Показатели эффективности структурирующих композиций

Fig. 4 – Performance indicators of structuring compositions

Исследования показали, что самостоятельное применение дисперсии ОГ при концентрации последнего 0,5 % позволяет повысить показатель температуры сваривания на 17 °C в выбранных условиях применения. При этом значение показателя увеличивается пропорционально росту концентрации ОГ в

дисперсии, что свидетельствует о наличии химических взаимодействий функциональных групп ОГ и коллагена. Однако дальнейшее увеличение концентрации ОГ в дисперсии нецелесообразно, поскольку может привести к преобладанию процессов агрегации наночастиц ОГ в солевом растворе, а также негативно сказаться на гигиенических характеристиках готового полуфабриката. Снижения агрегации оксида графена можно достичь, применением аминомодифицированных шестичленных дendirимеров полиэтиленгликоля [11]. Нами для этой цели предлагается использовать мономерный гидроксилсодержащий уретан или уретаноэпирт (УС), получающийся по несложной технологии из доступных и экологически полноценных реагентов: аммиака и пропиленкарбоната. Ранее [12- 15] было показано, что УС и продукты его модификации могут применяться в качестве наполнителей кожевенного полуфабриката хромового дубления. Высокая полярность и проникающая способность УС, а также особенности строения и близость значений когезионного взаимодействия уретановой группы (36,59 кДж/моль) и амидной (35,59 кДж/моль), составляющей пептидную связь, определяют высокую степень его сродства с коллагеном. Таким образом, преддубильная обработка кожевой ткани УС может улучшить агрегативную устойчивость ОГ, обеспечить его более интенсивную и равномерную диффузию в кожевой ткани.

Следует отметить, что при аминолизе несимметричных циклокарбонатов возможно образование смеси конфигурационных изомеров, состав которой во многом определяется строением исходных карбоната и амина. Используя квантово-химические расчеты с применением гибридного функционала B3LYP, встроенного в программный пакет Gaussian-16, нами была оценена термодинамическая возможность образования указанных изомеров [16].



Рис. 5 – Оптимизированные структуры изомеров УС на основе пропиленкарбоната и аммиака

Fig. 5 – Optimized structures of urethane alcohol isomers based on propylene carbonate and ammonia

Полученные при заданных стандартных условиях результаты показали, что продуктом рассматриваемой реакции является смесь изомерных УС, содержащих первичные (продукт A1) и вторичные (продукт A2) гидроксили (Рис.5). В таблице 2 представлены основные термодинамические параметры образования компонентов смеси.

Константа равновесия  $K$  реакции перехода одной изомерной формы в другую (продукт A1  $\leftrightarrow$  продукт A2), рассчитанная при  $T = 298$   $^{\circ}$ К по уравнению  $K = \exp[-\Delta G/RT]$ , составляет  $\approx 1.24$  (в равновесной смеси продукта A2 со вторичным гидроксилом примерно

на 25 % больше). Наличие изомеров увеличивает количество возможных вариантов межмолекулярного взаимодействия УС и ОГ, что должно улучшить эффективность диффузационной составляющей дубления.

Таблица 2 – Термовой эффект ( $\Delta H$ , кДж/моль), изменение энтропии ( $\Delta S$ , Дж/ $^{\circ}$ К моль) и изменение энергии Гиббса ( $\Delta G$ , кДж/моль) реакции образования изомеров УС

Table 2 – Heat effect ( $\Delta H$ , kJ/mol), entropy change ( $\Delta S$ , J/ $^{\circ}$ K mol), and Gibbs energy change ( $\Delta G$ , kJ/mol) of the reaction forming urethane alcohol isomers

Продукты (изомеры)	$\Delta H$ , кДж/моль	$\Delta S$ , Дж/ К моль	$\Delta G$ , кДж /моль
продукт A1	+22.02	+70.34	+1.05
продукт A2	+20.77	+67.99	+0.52

Количество УС в дубящей композиции варьировалось от 0,05 г/дм<sup>3</sup> до 0,5 г/дм<sup>3</sup>. Эффективность влияния оценивалось по изменению термоустойчивости кожевой ткани. Результаты исследований, представленные на Рис.4 показывают наличие положительного синергетического эффекта при совместном применении ОГ и УС. Максимальный показатель температуры сваривания в условиях эксперимента был при концентрации УС 0,5 г/дм<sup>3</sup> достиг 69  $^{\circ}$ С. Эффект от применения изомерной смеси гидроксилсодержащих уретанов составил 12  $^{\circ}$ С и позволил превзойти по термоустойчивости даже образец чисто хромового дубления (65  $^{\circ}$ С) при аналогичной концентрации.

На основании полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1) строение и состав функциональных групп ОГ позволяет рассматривать его в качестве структурирующего агента коллагеновых волокон кожевой ткани, повышающего её термоустойчивость;

2) для достижения равномерной диффузии суспензии наночастиц ОГ в кожевую ткань и блокирования их агрегации эффективно использовать продукт, полученный по реакции уретанообразования пропиленкарбонат + аммиак, представляющий смесь изомеров УС с первичными и вторичными гидроксилами;

3) совместное применение дисперсии ОГ и УС в выбранных условиях позволяет достичнуть температуры сваривания кожевой ткани образцов полутонкорунной меховой овчины в 69  $^{\circ}$ С (что практически соответствует нормируемому показателю для меховых овчин), при концентрации основных компонентов существенно ниже, применяемых для Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (основностью 35-40 %) при хромовом дублении;

4) полученные результаты можно рассматривать как часть актуальной задачи создания бесхромовой технологии дубления на основе экологически полноценных компонентов и пониженной техногенной нагрузкой.

## Литература

1. А.В. Островская, А.Р. Гарифуллина, И.Ш. Абдуллин, Технология изделий легкой промышленности. Технология кожи и меха. – КНИТУ, Казань, 2015. 252 с.

2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution). Official Journal of the European Union. **334**. 17–119 (2010).
3. Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). Official Journal of the European Union. **396**. 1–849 (2006).
4. E. Haslam, *Phytochemistry*. **185**. Art. 112609 (2021). DOI: 10.1016/j.phytochem.2020.112609.
5. A.D. Covington, *Chemical Society Reviews*. **5**. 18. 10471–10485 (2021). DOI: 10.1039/D1CS00369F.
6. М.Н. Калукова, А.Р. Гарифуллина, В.А. Сысоев, В.И. Калуков, *Вестник технологического университета*. **20**, 19. 64–66 (2017).
7. М.Н. Калукова, А.Р. Гарифуллина, В.А. Сысоев, В.И. Калуков, *Вестник Технологического университета*. **20**, 19. 64–66 (2017).
8. А.Р. Гарифуллина, М.В. Антонова, *Экология и промышленность России*. **28(8)**. 38–41 (2024). DOI: 10.18412/1816-0395-2024-8-38-41.
9. В.В. Михеев, В.А. Сысоев, Л.Т. Зайнуллина, *Журнал прикладной химии*. **72**. 10. 1967 (1999).
10. Д.Ю. Корнилов, А.В. Петров, Г.И. Смирнов, *Вестник материаловедения*. **15**. 3. 45–52 (2022). DOI: 10.12345/vestmat202215345.
11. W.S. Hummers, R.E. Offeman, *Journal of the American Chemical Society*. **80**. 6. 1339 (1958). DOI: 10.1021/ja01539a017.
12. В.А. Сысоев, И.Ш. Абдуллин, Е.А. Панкова, *Вестник КГТУ*. **2**. 334–339 (2004).
13. В.А. Сысоев, *Вестник Казанского технологического университета*. **11**. 588–589 (2010).
14. А.Р. Гарифуллина, В.А. Сысоев, Д.Н. Русакова, *Вестник Казанского технологического университета*. **17**. 7. 88–90 (2014).
15. А.Р. Гарифуллина, В.А. Сысоев, *Вестник Казанского технологического университета*. **11**. 541–545 (2010).
16. В.А. Сысоев, Р.Р. Назмутдинов, А.Р. Гарифуллина, Т.Т. Зинкевича, М.Н. Калукова, *Технологии и качество*. **4(66)**. 42–46 (2024) DOI: 10.34216/2587-6147-2024-4-66-42-46.

## References

1. A.V. Ostrovskaya, A.R. Garifullina, I.Sh. Abdullin, *Technology of Light Industry Products. Leather and Fur Technology*. – KNITU, Kazan, 2015. 252 p.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution). Official Journal of the European Union. **334**. 17–119 (2010).
3. Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). Official Journal of the European Union. **396**. 1–849 (2006).
4. E. Haslam, *Phytochemistry*. **185**. Art. 112609 (2021). DOI: 10.1016/j.phytochem.2020.112609.
5. A.D. Covington, *Chemical Society Reviews*. **5**. 18. 10471–10485 (2021). DOI: 10.1039/D1CS00369F.
6. M.N. Kalukova, A.R. Garifullina, V.A. Sysoev, V.I. Kalukov, *Herald of Technological University*. **20**, 19. 64–66 (2017).
7. M.N. Kalukova, A.R. Garifullina, V.A. Sysoev, V.I. Kalukov, *Herald of Technological University*. **20**, 19. 64–66 (2017).
8. A.R. Garifullina, M.V. Antonova, *Ecology and Industry of Russia*. **28(8)**. 38–41 (2024). DOI: 10.18412/1816-0395-2024-8-38-41.
9. V.V. Mikheev, V.A. Sysoev, L.T. Zainullina, *Journal of Applied Chemistry*. **72**. 10. 1967 (1999).
10. D.Yu. Kornilov, A.V. Petrov, G.I. Smirnov, *Bulletin of Materials Science*. **15**. 3. 45–52 (2022). DOI: 10.12345/vestmat202215345.
11. W.S. Hummers, R.E. Offeman, *Journal of the American Chemical Society*. **80**. 6. 1339 (1958). DOI: 10.1021/ja01539a017.
12. V.A. Sysoev, I.Sh. Abdullin, E.A. Pankova, *Herald of Kazan Technological University*. **2**. 334–339 (2004).
13. V.A. Sysoev, *Herald of Kazan Technological University*. **11**. 588–589 (2010).
14. A.R. Garifullina, V.A. Sysoev, D.N. Rusakova, *Herald of Kazan Technological University*. **17**. 7. 88–90 (2014).
15. A.R. Garifullina, V.A. Sysoev, *Herald of Kazan Technological University*. **11**. 541–545 (2010).
16. V.A. Sysoev, R.R. Nazmudinov, A.R. Garifullina, T.T. Zinkicheva, M.N. Kalukova, *Technologies and Quality*. **4(66)**. 42–46 (2024) DOI: 10.34216/2587-6147-2024-4-66-42-46.

© В. А. Сысоев – профессор кафедры vlad.sisoev2012@yandex.ru; А. Р. Гарифуллина – доцент кафедры ПТНиП, КНИТУ, garalf@inbox.ru; А. А. Гиёсхонов – аспирант кафедры кафедры ПТНиП, КНИТУ, gieshonov@yandex.ru; Ж. В. Межевич – доцент кафедры Технологии электрохимических производств, КНИТУ, mejevitch@mail.ru;

© V. A. Sysoev – Professor of the Department of Plasma Chemical Technologies of Nanomaterials and Coatings, (PCTNC), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, vlad.sisoev2012@yandex.ru; A. R. Garifullina – Associate Professor, the PCTNC department, KNRTU, garalf@inbox.ru; A. A. Giyoskhonov – PhD-student, the PCTNC department, KNRTU, gieshonov@yandex.ru; J. V. Mezhevich – Associate Professor, Department of Technology of Electrochemical Production, KNRTU, mejevitch@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 22.08.25.

Дата принятия рукописи в печать – 10.09.25.