

Д. А. Грачев, И. Н. Мусин, Е. С. Ямалеева

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОРБЕНТА ДЛЯ РАНЕВОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ЛЬНЯНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

*Ключевые слова:* льняная целлюлоза, хлопчатниковая целлюлоза, сорбент, сорбционно-апликационная терапия.

*Перспективность использования в качестве раневого покрытия льняной целлюлозы (Целоформ-нео) по сравнению с хлопчатниковой (Целоформ) обусловлена не только высокими сорбционными свойствами, но и ее антисептическим составом, наличием гладких волокон, оказываемым криоэффектом и увеличением прочностных характеристик при намокании раны. Седиментационный анализ показал, что частицы льна значительно дольше удерживаются в объеме жидкости, что свидетельствует об их более высокой дисперсности и развитой удельной поверхности по сравнению с хлопковым Целоформом. Интегральные кривые распределения подтверждают, что в отличие от хлопкового аналога, льняной сорбент обладает развитой мелкодисперсной фракцией с радиусом частиц меньше 10 мкм и на 50% меньшим медианным радиусом частиц, что обуславливает более высокую суммарную площадь активной поверхности льна, обеспечивая его превосходящую способность к поглощению и удержанию раневого экссудата. Данный факт подтверждается результатами гранулометрического состава - средний радиус частиц для льняного субстрата составил  $R_{cp} = 46$  мкм, в то время как для хлопкового сорбента данные показатели составили  $R_{cp} = 70$  мкм. Анализ дисперсии методом динамического рассеяния света показал в случае обоих сорбентов (Целоформа и Целоформ-нео) наличие наноразмерных фракций. Однако для сорбента на основе льняной целлюлозы характерно мультимодальное распределение, что может свидетельствовать о более высокой адсорбционной емкости. Методом электронного парамагнитного резонанса установлено, что при переработке растительного сырья в льняной сорбент образуется большее количество свободных радикалов, что подтверждает возможность подавления роста микроорганизмов путем свободнорадикального окисления.*

D. A. Grachev, I. N. Musin, E. S. Yamaleeva

## PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF A FLANNEL CELLULOSE-BASED WOUND DRESSING SORBENT

*Keywords:* flax cellulose, cotton cellulose, sorbent, sorption-application therapy.

*The prospects of using flax cellulose (Celoform-neo) as a wound dressing compared to cotton cellulose (Celoform) are due not only to its high sorption properties, but also to its antiseptic composition, the presence of smooth fibers, the effect of cryo-effect and the increase in strength characteristics when the wound is wet. Sedimentation analysis showed that flax particles are significantly longer retained in the volume of liquid, which indicates their higher dispersion and developed specific surface area compared to cotton Celoform. The integral distribution curves confirm that, unlike its cotton counterpart, the linen sorbent has a well-developed fine-grained fraction with a particle radius of less than 10 μm and a 50% lower median particle radius, which results in a higher total active surface area of linen, providing it with superior ability to absorb and retain wound exudate. This fact is confirmed by the granulometric composition data, which show that the average particle radius for the flax substrate was  $R_{avg} = 46$  μm, while for the cotton sorbent, it was  $R_{avg} = 70$  μm. The dispersion analysis using dynamic light scattering revealed the presence of nano-sized fractions in both sorbents (Celoform and Celoform-neo). However, the flax-based sorbent exhibited a multimodal distribution, which may indicate a higher adsorption capacity. Using electron paramagnetic resonance, it was found that a greater number of free radicals are produced during the processing of plant raw materials into a linen sorbent, which confirms the possibility of suppressing the growth of microorganisms through free radical oxidation.*

### Введение

Частота обращения пациентов в отделение челюстно-лицевой хирургии с неотложными одонтогенными гнойно-воспалительными патологиями (ООГВП) области головы и шеи, вопреки внедрению инновационных методик и препаратов для лечения инфицированных ран, не уменьшается, а даже возрастает.

Несмотря на совершенствование различных методов лечения ООГВП, до настоящего времени ведущая роль отводится использованию лекарственных средств для наружного применения, так как они широко доступны, просты в применении, их использование не требует наличия особых навыков и специального оборудования. Работы по созданию новых или модификации существующих перевязочных средств направлены на получение материала, кото-

рый действует с учетом особенностей генеза раны и специфики ее заживления, а также обеспечивает оптимизацию условий ее заживления [1].

В медицинской практике насчитывается более 300 видов раневых покрытий и перевязочных средств - мазей, паст, пленок, губок, гелей, сухих дисперсных форм, не считая более традиционных перевязочных средств, созданных на основе природных и синтетических нитей по тканевым и нетканым технологиям, а также их различных комбинаций и сочетаний [2-5].

Особенный интерес представляют раневые покрытия на основе биополимеров, содержащие интерлейкины-1, эктоин, гиалуроновую кислоту, бифидит и Тизоль.

Ключевую роль среди веществ регенерирующего действия представляет семейство интерлейкинов-1, насчитывающие 11 гомологичных полипептидов.

Их репаративное действие осуществляется за счет активации пролиферации фибробластов и метаболизма соединительной ткани. Местное применение интерлейкина-1 $\beta$  в результате клинических испытаний рекомендовано для терапии поражений кожи и слизистых при ожогах различного происхождения, пролежнях, трофических язвах, хирургических вялотекущих инфицированных ранах, рожистом воспалении, герпетических поражениях слизистых оболочек и кожи [2].

Известно, что комбинированное применение «Поликатана» (очищенный раствор бишофита) и «Гизоля» (аквакомплекс титана глицеросольвата) купирует симптомы воспаления в полости рта. Установлено, что ранняя терапия гиалуроновым гелем корректирует процесс регенерации, т.к. ограничивает ангиогенез и пролиферацию. При этом за счет акцента на выработку основного вещества вместо коллагеновых волокон удается избежать патологического разрастания грануляций и рубцевания [1].

Параллельно с восстановлением тканей важно обеспечивать их защиту, что реализуется за счет включения в терапию эктоина (1,4,5,6-тетрагидро-2-метил-4-пиримидинкарбоновая кислота), сочетающего в себе свойства осмопротектора, антиоксиданта и противовоспалительного агента с УФ-защитной активностью. Терапевтический эффект при воспалении обусловлен его способностью нормализовать апоптоз нейтрофилов, что способствует физиологичному завершению воспалительной реакции.

В международной медицинской практике все шире применяются различные сорбенты для местного лечения ран, что объясняется их комплексным воздействием на процесс заживления и обилием положительных свойств. Внедрение методов сорбционно-апликационной терапии направлено на ускоренную очистку ран от микробов и некротических тканей, представляя несомненные преимущества.

В качестве таких сорбентов широкое применение нашли разные виды целлюлозы, полученные из растительных материалов. В качестве примера можно привести, такие как хлопковая целлюлоза, целлюлоза хвойных и лиственных пород, рисовая солома и пшеничная солома, стебли кукурузы и конопля, рисовая шелуха и многие другие источники целлюлозы [6-9].

Особое внимание уделяется различным способам получения микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) [10 -14], заключающимся в разрушении гликозидных связей и как следствие, потери ее аморфной фазы. Основным способом получения МКЦ является жидкофазный суспензионный способ гидролиза целлюлозы с использованием разбавленных кислот. Полученная данным способом МКЦ обладает высокими сорбционными свойствами и может быть использована не только в составе апликационной терапии (мази, гели), но и как энтеросорбент.

В данной статье нами исследовано новое сорбционное средство на основе льняной целлюлозы – Целоформ-нео. Льняная целлюлоза превосходит в терапии хлопчатниковую благодаря природным антисептикам в ее составе (лигнин, фенолы) и гладким

волокнам, которые не прирастают к ране. Она эффективнее отводит тепло, облегчая боль, и увеличивает свою прочность при намокании. Это гарантирует чистоту раневой полости, так как материал удаляется целиком, не оставляя ворсинок [15].

## Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования использовали порошок целлюлозы формализованной, которая изготавливается механическим размельчением упругодеформационным способом из льняного волокна (ТУ 13.10.29-002-97891572-2020) и представляет собой мелкодисперсное порошкообразное средство (Целоформ-нео).

В качестве образца сравнения использовали аналогичное средство из хлопчатниковой целлюлозы «Целоформ».

Апликационные сорбенты перед проведением испытаний высушивались в термощкафу при температуре  $T=100\pm 5$  °C в течение 5-6 часов до постоянной массы.

Определение размеров частиц и кривых распределения по размерам частиц суспензии исследуемых образцов проводили на седиментометре СВ-1.

Средний размер частиц дисперсной фазы (технология M3-PALS) определяли на анализаторе размера частиц серии Zetasizer Nano-ZS (Malvern Instruments Ltd), оснащенный гелий-неоновым лазером (633 нм, 4 мВт). Результаты измерений анализировали с помощью программного обеспечения DTS Application Software компании Malvern Instruments. Погрешность измерения размера составила  $\pm 2\%$ .

Для построения интегральной кривой распределения по размерам частиц порошка необходимо рассчитать массовую долю  $i$ -ой фракции ( $w_i$ ).  $X_i$  – это интегральная массовая доля всех фракций с размерами частиц  $R \leq R_i$ .

$$w_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^k m_i} = \frac{m_i}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}$$

Скорость оседания частиц порошка в момент времени  $t_i$  рассчитывают по уравнению:

$$u_i = \frac{H}{t_i}$$

где  $t_i$  – время осаждения  $i$ -фракции,  $H$  (0,169 м) – глубина погружения чашечки в суспензию

Радиус частиц каждой фракции рассчитывают по уравнению:

$$R = \left[ \frac{9}{2} \cdot \frac{\eta \cdot u}{g \cdot (\rho_{д.ф.} - \rho_0)} \right]^{0,5}$$

где  $R$  – радиус частиц, м;  $u_i$  – скорость оседания частиц порошка, м/с;  $\eta$  – вязкость воды, равная 0,001 Па·с;  $\rho_0$  – плотность воды, равная  $1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность частиц целоформа-нео ( $\rho_{д.ф.} = 1,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), целоформа ( $\rho_{д.ф.} = 1,05 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

С использованием спектрометра Bruker ESP300 (Германия) изучали, интегральную интенсивность линии электронного парамагнитного резонанса

(ЭПР) и массовую концентрацию парамагнитных центров в образцах целлюлозы различного происхождения.

Насыпная плотность и влажность определялись в соответствии с ГОСТ 16190-70 и ГОСТ 25133-82. рН водной суспензии льна при 23°C измеряли с помощью комбинированного измерителя SevenMulti в соответствии с ГОСТ 21119.3-91.

Исследования были проведены с использованием приборной базы кафедры Физической и коллоидной химии ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

### Обсуждение результатов

На первом этапе исследований был проведен седиментационный анализ суспензии двух анализируемых порошков. Сравнение кривых седиментации для льняной целлюлозы – Целоформ-нео (рис.1 а) и хлопчатниковой - Целоформ (рис.1. б) выявляет принципиальные различия в их физико-химических свойствах. Целоформ демонстрирует значительно более высокие показатели массы осадка, на 700-й секунде она достигает 0,34 г. При этом для льняной целлюлозы (а), на аналогичном временном отрезке, масса осадка составляет всего 0,043 г. Таким образом, при одинаковой навеске частицы льна значительно дольше удерживаются в объеме жидкости, что свидетельствует об их меньшем размере (высокой дисперсности) и развитой удельной поверхности по сравнению с хлопковым Целоформом.

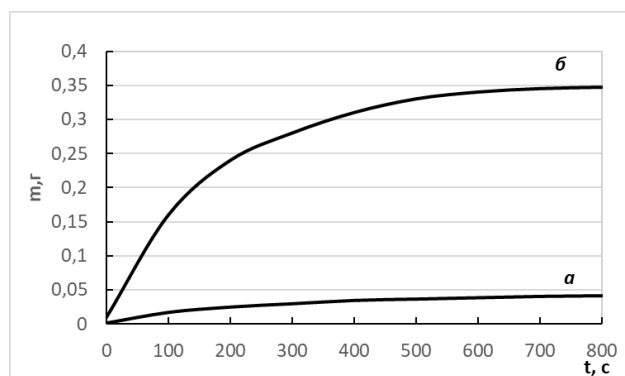


Рис. 1 – Кривые седиментации суспензии порошка целлюлозы льна (а), хлопка (б) Сд.ф = 0,8 вес. %

Fig. 1 – Sedimentation curves of suspensions of flax cellulose powder (a) and cotton cellulose powder (b); Dispersed phase concentration = 0.8 wt. %

Сравнительный анализ интегральных кривых распределения (рис.2 а, б) подтверждает более высокую эффективность льняной целлюлозы как сорбционного материала. В отличие от хлопкового аналога, льняной порошок обладает развитой мелкодисперсной фракцией ( $R < 10$  мкм) и существенно меньшим медианным радиусом частиц (46-48 мкм против 68 мкм). Это обуславливает более высокую суммарную площадь активной поверхности

льна, обеспечивая его превосходящую способность к поглощению и удержанию раневого экссудата.

Анализ гранулометрических характеристик исследуемых образцов показал, что льняной сорбент («Целоформ-нео») характеризуется более высокой степенью дисперсности по сравнению с хлопковым («Целоформ»). Средний радиус частиц для льняного субстрата составил  $R_{cp} = 46$  мкм, при вариативности размеров в диапазоне от  $R_{min} = 1,3$  мкм и  $R_{max} = 135$  мкм, в то время как для хлопкового сорбента данные показатели составили –  $R_{cp} = 70$  мкм,  $R_{min} = 49$  мкм;  $R_{max} = 320$  мкм

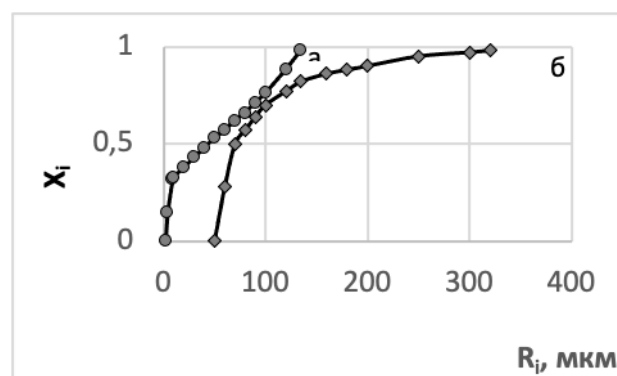


Рис. 2 – Интегральная кривая распределения по размерам частиц дисперсной фазы Целоформ-нео (а), Целоформа (б). Дисперсионная среда (дистиллированная  $H_2O$ ). Сд.ф = 0,8 вес. %

Fig. 2 – Integral particle size distribution curve for the dispersed phase of Celoform-neo (a) and Celoform (b). Dispersion medium (double-distilled  $H_2O$ ). Dispersed phase concentration = 0.8 wt. %

С целью более детального определения распределения по размерам частиц анализируемых порошков был проведен анализ дисперсии методом динамического рассеяния света (рис.3).

Анализ функции распределения частиц по размерам (рис. 3) выявил существенные различия в дисперсности исследуемых сорбентов.

Гранулометрический профиль льняного сорбента характеризуется тримодальным распределением с четко выраженными максимумами при  $d_1 = 200$  нм,  $d_2 = 350$  нм,  $d_3 = 1300$  нм, что соответствует наличию фракций с радиусами частиц  $R_1 = 100$  нм,  $R_2 = 170$  нм,  $R_3 = 650$  нм, соответственно.

В свою очередь, для препарата «Целоформ» (хлопок) установлено бимодальное распределение пики при  $d_1 = 100$  нм,  $d_2 = 635$  нм, что соответствует радиусам частиц  $R_1 = 50$  нм,  $R_2 = 317,5$  нм.

Полученные данные подтверждают наличие мелкодисперсной фазы в обоих образцах, при этом льняной сорбент отличается более сложным фракционным составом с преобладанием наноразмерных компонентов, что может свидетельствовать о более высокой адсорбционной емкости и кинетической активности «Целоформ-нео» по сравнению с «Целоформом».

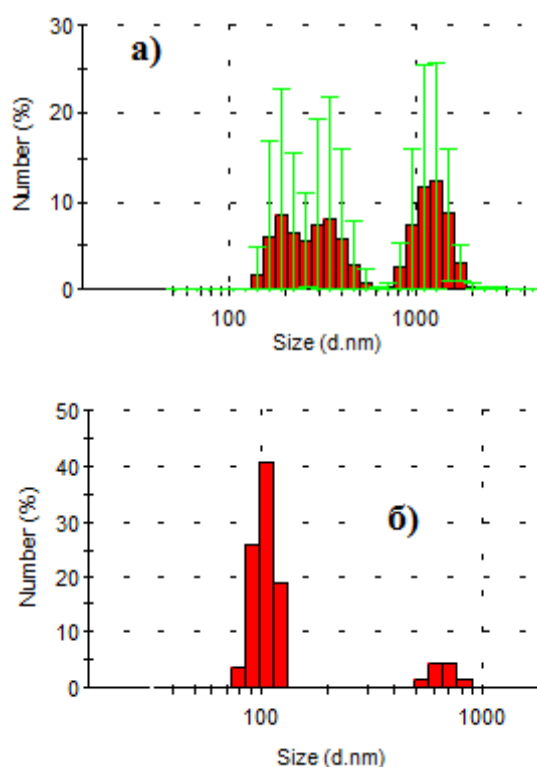


Рис. 3 – Распределение по размерам частиц сорбента Целоформ-нео (а), Целоформа (б)

Fig. 3 – Particle size distribution of Celofom-neo (a) and Celofom (b) sorbents

Физико-химически показатели «Целоформ» и «Целоформ-нео» соответствуют нормам, определенным для аппликационных сорбентов: влажность – не более 8%, насыпная плотность 250-300 г/дм<sup>3</sup>, рН водной вытяжки – 6-8.

При исследовании свойств аппликационных сорбентов из Целоформ и Целоформ-нео с помощью метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) установлено (табл. 1), что при переработке исходного сырья (льняных волокон) в сорбент образуется большее количество свободных радикалов.

Таблица 1 - Масса образца, интегральная интенсивность линии ЭПР (I) и массовая концентрация парамагнитных центров в образцах целлюлозы различного происхождения

Table 1 - Sample mass, integral EPR line intensity (I), and mass concentration of paramagnetic centers in cellulose samples of various origins

Наименование образца	Масса, мг	I, отн.ед.	Концентрация моль/г
Целоформ-нео 1	7.6	2.38	0.051±0.003
Целоформ-нео 2	7.8	2.25	0.048±0.003
Целоформ 1	12.1	1.44	0.020±0.003
Целоформ 2	6.4	0.694	0.018±0.003

Так, по сравнению с образцами из хлопчатниковой целлюлозы массовая концентрация парамагнитных центров в образцах из льна выше почти в два раза, что дает рабочую гипотезу о возможности подавления роста микроорганизмов путем свободно-радикального окисления.

### Выводы

Сравнительный анализ льняной (Целоформ-нео) и хлопчатниковой (Целоформ) целлюлоз выявляет принципиальные различия в физико-химических свойствах этих аппликационных сорбентов.

Методом седиментационного анализа показано, что масса осадка Целоформа на 700-й секунде в 8 раз больше по сравнению с таковой Целоформ-нео. Анализ интегральных кривых распределения по размерам частиц дисперсной фазы хлопчатниковой и льняной целлюлоз показал, что при более развитой мелкодисперсной фракции медианный радиус частиц последней на 50% меньше. Методом динамического рассеяния света доказано, что льняной сорбент обладает более сложным, тримодальным распределением частиц.

Таким образом, льняной сорбент по сравнению с хлопчатниковым, обладая меньшим размером частиц, более высокой дисперсностью, большей суммарной площадью активной поверхности обеспечивает превосходящую способность к поглощению и удержанию раневого экссудата.

При этом, при переработке льняных волокон в сорбент, согласно данным ЭПР анализа, образуется большее количество свободных радикалов, что свидетельствует о возможности подавления роста микроорганизмов путем свободно-радикального окисления.

### Литература

1. А.В. Майорова, Б.Б. Сысуев, И.А. Ханалиева, И.В. Вихорова, *Фармация и фармакология*, **6**, 1, 4-32 (2018)
2. А.Ю. Григорьян, А.И. Бежин, Т.А. Панкрушева, Б.С. Суковатых, *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*, **11**, 42-48 (2022)
3. Р. Шаева, К. Шомуродов, *Журнал стоматологии и кра니офациальных исследований*, **2**, 2, 13-17, (2021)
4. О.В. Нестеров, *Вестник Чувашского университета*, **2**, 306 – 310, (2014)
5. М.Н. Хадыева, *Казанский медицинский журнал*, **93**, 2, 315-317, (2012).
6. Ю.К. Абаев, В.Г. Лугин, В.Е. Капуцкий, *Медицинский журнал: научно-практический рецензируемый журнал*, **2**, 19-21, (2008)
7. Е.С. Ямалева, М.Н. Мансуров, Б.Н. Жураев, С.С. Ксембаев, И.Н. Мусин, О.Е. Торгашова, *Здоровье человека в XXI веке. Качество жизни (сборник статей)*, 17-19, (2023)
8. К.А. Мишагин, Е.С. Ямалева, Е.М. Готлиб, А.И. Хацринов, *Вестник технологического университета*, **25**, 6, 73-81, (2022)
9. К.А. Мишагин, И.Д. Твердов, Е.М. Готлиб, Е.С. Ямалева, А.И. Хацринов, *Южно-Сибирский научный вестник*, **43**, 3, 67-73, (2022)
10. Т. П. Щербакова, Н. Е. Котельникова, Ю. В. Быковцева, *Химия растительного сырья*, **3**, 33-42, (2011)
11. Т. П. Щербакова, Н. Е. Котельникова, Ю. В. Быковцева *Надмолекулярная структура и химический состав порошковых образцов*, **2**, 5-14, (2012)

12. С.А. Кузнецова, Б. Н. Кузнецов, *Химия в интересах устойчивого развития*, 13, 261-269, (2005)
13. Ю. А. Егошина, Л. А. Поцелуева, *Успехи современного естествознания*, 10, 30-33, (2009)
14. Д. А. Грачев, С.С. Ксембаев, *Многополярность стоматологии*, 7-12, (2025)
15. Д.А. Грачев, С.С. Ксембаев, И.Н. Мусин, Р.Д. Галеев и др., *Здоровье человека в XXI веке. Качество жизни (сборник статей)*, 26-31, (2024).

### References

1. A.V. Mayorova, B.B. Sysuev, I.A. Khanaliev, I.V. Vikhrova, *Pharmacy and Pharmacology*, 6, 1, 4-32 (2018)
2. A.Yu. Grigoryan, A.I. Bezhin, T.A. Pankrusheva, B.S. Sukovatykh, *Surgery. N.I. Pyrogov Journal*, 11, 42-48 (2022)
3. R. Shaeva, K. Shomurodov, *Journal of Dentistry and Craniofacial Research*, 2, 2, 13-17, (2021)
4. O.V. Nesterov, *Bulletin of the Chuvash University*, 2, 306-310, (2014)
5. M.N. Khadyeva, *Kazan Medical Journal*, 93, 2, 315-317, (2012).
6. Yu.K. Abaev, V.G. Lugin, V.E. Kaputsky, *Medical Journal: a scientific and practical peer-reviewed journal*, 2, 19-21, (2008)
7. E.S. Yamaleeva, M.N. Mansurov, B.N. Zhuraev, S.S. Ksembaev, I.N. Musin, O.E. Torgashova, *Human health in the 21st century. Quality of Life (Collection of Articles)*, 17-19, (2023)
8. K.A. Mishagin, E.S. Yama-leeva, E.M. Gotlib, A.I. Khatsrinov, *Herald of Technological University*, 25, 6, 73-81, (2022)
9. K.A. Mishagin, I.D. Tverdov, E.M. Gotlib, E.S. Yamaleeva, A.I. Khatsrinov, *South Siberian Scientific Bulletin*, 43, 3, 67-73, (2022)
10. T. P. Shcherbakova, N. E. Kotelnikova, Yu. V. Bykovtseva, *Chemistry of plant raw materials*, 3, 33-42, (2011)
11. T. P. Shcherbakova, N. E. Kotelnikova Yu.V. Bykovtseva *Supramolecular structure and chemical composition of powder samples*, 2, 5-14, (2012)
12. S.A. Kuznetsova, B. N. Kuznetsov, *Chemistry in the interests of sustainable development*, 13. 261-269, (2005)
13. Yu. A. Egoshina, L. A. Potseluyeva, *Successes of modernity natural science*, 10, 30-33, (2009)
14. D. A. Grachev, S.S. Ksembaev, *Multipolarity of dentistry*, 7-12, (2025)
15. D.A. Grachev, S.S. Ksembaev, I.N. Musin, R.D. Galeev et al., *Human health in the XXI century. Quality of Life (collection of articles)*, 26-31, (2024).

© **Д. А. Грачев** – аспирант кафедры Челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии, Казанский государственный медицинский университет, Казань, Россия, denisgrachev98@yandex.ru; **И. Н. Мусин** - кандидат технических наук, доцент, зав. кафедры Медицинской инженерии (МИ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), ildarmusin@mail.ru; **Е. С. Ямалеева** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры МИ, КНИТУ, curls888@yandex.ru.

© **D. A. Grachev** – PhD-student at the Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry at Kazan State Medical University, Kazan, Russia, denisgrachev98@yandex.ru; **I. N. Musin** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the Department of Medical Engineering (ME), Kazan National Research Technological University (KNRTU), ildarmusin@mail.ru; **E. S. Yamaleeva** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, of the ME department, KNRTU, curls888@yandex.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 01.03.26.

Дата принятия рукописи в печать – 22.04.26.