

А. Р. Гатауллин, В. А. Абрамов, С. А. Богданова

ВЫСВОБОЖДЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ ИЗ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ГЕЛЕЙ

Ключевые слова: фуллерен C_{60} , неионогенные поверхностно-активные вещества, полимерные гели, вязкость, электропроводность, высвобождение, антиоксидантная активность.

Гелевые композиции широко применяются в медицине и косметике как эффективные платформы для трансдермального переноса лекарственных препаратов и биологически активных веществ (БАВ) в организм человека. Электропроводность и реологические характеристики гелей могут быть существенно улучшены за счет введения фуллерена C_{60} и его равномерного распределения в объеме гелевой матрицы. В связи с этим целью работы является модификация вязкости и электропроводности гелей на основе редкосшитой полиакриловой кислоты введением дисперсий фуллерена C_{60} для высвобождения растительных экстрактов методом электрофореза. Введение фуллерена C_{60} в состав гелевых систем осуществлялось в форме водных дисперсий. Дисперсии фуллерена получены методом ультразвуковой обработки исходного углеродного наноматериала в воде и в водных растворах неионогенных поверхностно-активных веществ (НПАВ): оксиэтилированных высших жирных спиртов, Полоксамера-184 и Tween-80. Реологические свойства полученных гелей изучали методом ротационной вискозиметрии. Показано, что добавление дисперсий C_{60} с НПАВ в гелевую матрицу снижает вязкость композиций. Электропроводность оценивали кондуктометрически; установлено, что введение фуллерена повышает данный параметр в 2,2-2,8 раза. Установлено, что при электрофорезе экстракта жимолости из гелей с фуллереном C_{60} и НПАВ выход возрастает в 1,6-3,6 раза по сравнению с базовым гелем. В ходе работы было показано, что гелевые системы на основе карбомера 141G, модифицированные дисперсиями фуллерена C_{60} , могут рассматриваться как перспективные трансдермальные носители для доставки лекарственных средств и биологически активных веществ. Результатом работы стала разработка электропроводящего косметического геля с фуллереном C_{60} и антиоксидантными свойствами.

А. Р. Gataullin, V. A. Abramov, S. A. Bogdanova

RELEASE OF PLANT EXTRACTS FROM NANOMODIFIED POLYMERIC GELS

Keywords: fullerene C_{60} , nonionic surfactants, polymer gels, viscosity, electrical conductivity, release, antioxidant activity.

Gel-based compositions are widely used in medicine and cosmeceutics as effective platforms for the transdermal delivery of pharmaceuticals and biologically active substances (BAS) into the human body. The electrical conductivity and rheological properties of gels can be significantly improved by introducing fullerene C_{60} and ensuring its uniform distribution within the gel matrix. In this regard, the aim of this work is to modify the rheological and conductive characteristics of gels based on lightly cross-linked polyacrylic acid by incorporating dispersions of fullerene C_{60} for the electrophoretic release of plant extracts. Aqueous C_{60} dispersions were prepared by ultrasonic treatment of the carbon nanomaterial in water as well as in aqueous solutions of ethoxylated higher fatty alcohols, Poloxamer-184, and Tween-80. The rheological properties of the resulting gels were studied using rotational viscometry. It was demonstrated that the incorporation of fullerene C_{60} dispersions with nonionic surfactants into the gel composition leads to a decrease in system viscosity. The electrical conductivity of the gels was evaluated by conductometric measurements; it was found that the introduction of fullerene into the gel composition increases the conductivity by a factor of 2,2-2,8. Moreover, the release of honeysuckle extract from gels containing fullerene C_{60} and nonionic surfactants under electrophoresis was 1,6-3,6 times higher compared to the base gel. These findings suggest that Carbomer 141G-based gels enriched with C_{60} dispersions represent promising transdermal carriers for therapeutic and biologically active substances. As a result, an electrically conductive cosmetic gel containing fullerene C_{60} with antioxidant properties was developed.

Введение

Гелевые матрицы на основе редкосшитой полиакриловой кислоты (карбомеры) широко используются в фармацевтической и медицинской практике как носители для трансдермальной доставки лекарственных веществ и биологически активных соединений (БАВ) [1, 2]. Тем не менее их применение в трансдермальных технологиях ограничено сложностью управления скоростью высвобождения активных компонентов. Одним из подходов к решению этой проблемы является электрофоретический перенос молекул препарата из объема геля, интенсивность которого регулируется величиной приложенного электрического напряжения. Существенным препятствием остается низкая собственная электропроводность гелей. Повысить ее возможно за счет введения

в систему химически инертных углеродных наночастиц [3, 4].

Перспективным для этих целей является фуллерен C_{60} , проявляющий выраженные антиоксидантные, противовоспалительные и антисептические свойства, что делает его полезным компонентом ранозаживляющих и косметических средств [5].

В работе [6] было показано, что гидрогели на основе редкосшитой полиакриловой кислоты с добавлением фуллерена C_{60} сокращают сроки заживления ран примерно на 20% и эффективно подавляют рост бактерий стафилококка. Согласно данным исследования [7], введение гидроксилированного C_{60} в гелевую матрицу позволило увеличить степень высвобождения индометацина и дексаметазона при электрофорезе на 20% по сравнению с базовым гелем на основе агарозы.

Применение фуллерена C_{60} в медицине и косметологии предполагает необходимость токсикологических исследований, позволяющих объективно оценить возможные риски его воздействия на организм человека. Несмотря на значительное число работ, посвященных изучению биосовместимости фуллерена C_{60} и его производных, данные о его влиянии на кожные покровы остаются неоднозначными [8]. Согласно результатам ряда исследований [9-13], C_{60} не проявляет мутагенного, цитотоксического и фототоксического действия, не вызывает раздражения кожи и не проникает через роговой слой эпидермиса. Находясь в составе гелевых композиций, фуллерен равномерно распределен в объеме матрицы и не контактирует непосредственно с поверхностью кожи. Возможности его применения в дерматологии и косметике подробно проанализированы в обзоре [5].

Наиболее рациональной формой введения фуллерена в гель является водная дисперсия, однако склонность частиц C_{60} к агрегации затрудняет получение равномерных и устойчивых коллоидных систем как в водных, так и в органических средах. Одним из эффективных способов стабилизации является использование неионогенных поверхностно-активных веществ (НПАВ) в сочетании с ультразвуковой (УЗ) обработкой углеродного наноматериала в водных растворах [14]. В исследовании [15] показано, что при инкапсуляции C_{60} в мицеллы Triton X-100 его антиоксидантная активность в реакциях свободнорадикального окисления липидов сохраняется на уровне, сопоставимом с активностью водной дисперсии.

При создании гелевых композиций допустимо применение только тех неионогенных ПАВ, которые характеризуются высокой дерматологической безопасностью и входят в состав лечебно-косметических средств. Известно, что такие НПАВ не только обеспечивают стабильность дисперсий, но и способствуют усилению трансдермальной доставки, повышая биодоступность активных компонентов [16].

В нашей предыдущей работе [17] были получены положительные результаты по использованию оксиэтилированных жирных спиртов для стабилизации дисперсий углеродных нанотрубок.

Создание гелевых систем, содержащих фуллерен C_{60} и неионогенные поверхностно-активные вещества, обладающих заданными реологическими характеристиками и электропроводностью, открывает возможности для управляемой трансдермальной доставки лекарственных средств и биологически активных соединений с применением кратковременной электростимуляции. Такие композиции могут быть полезны для применения в процедурах лекарственного электрофореза в медицине, косметологии и дерматологии. Особый интерес представляет использование растительных экстрактов в качестве источников биологически активных веществ. Они широко применяются как многофункциональные ингредиенты в составе косметических и фармацевтических препаратов, включая гелевые композиции.

В связи с этим целью работы является модификация реологических и электропроводящих характеристик гелей на основе редкосшитой полиакриловой кислоты введением дисперсий фуллерена C_{60} для

электрофоретического высвобождения растительных экстрактов.

Экспериментальная часть

В исследовании применялся фуллерен C_{60} (99,98 % мас.), полученный электродуговым способом и предоставленный ООО «НеоТекПродакт» (Санкт-Петербург).

В качестве НПАВ использовались оксиэтилированный высший жирный спирт (ОЭ ВЖС) со средней степенью оксиэтилирования $n=10$, синтезированный и очищенный в ЦЛО ПАО «Казаньоргсинтез», а также Твин-80 (Feraf, Германия) и Полоксамер-184 (Fisher Scientific, США).

Дисперсии фуллерена C_{60} были получены методом ультразвукового диспергирования исходного углеродного материала (0,06 % мас.) в водных растворах НПАВ с использованием установки МЭЛФИЗ М93.Т (частота 22 кГц, мощность 50 Вт, 40 мин). На предварительном этапе были определены оптимальные концентрации НПАВ, при которых получены дисперсии фуллерена с наибольшей оптической плотностью. Концентрацию C_{60} в коллоидных системах оценивали спектрофотометрически по оптической плотности при $\lambda = 360$ нм с использованием прибора ПЭ-5400УФ. Полученные дисперсии служили водной фазой при создании гелевых композиций. Состав дисперсий C_{60} , полученных ультразвуковой обработкой в растворах НПАВ, приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Состав дисперсий фуллерена C_{60}

Table 1 – Composition of fullerene C_{60} dispersions

№ п/п	Дисперсная система	$C_{\text{ПАВ}} \cdot 10^3$, % мас.	C_{Φ} , мг/л
1	Вода + C_{60}	0	273
2	Вода + C_{60} + Полоксамер-184	5	480
3	Вода + C_{60} + ОЭ ВЖС $n=10$	40	590
4	Вода + C_{60} + Твин-80	5	485

В качестве гелеобразующей основы использовалась редкосшитая полиакриловая кислота «Carbomer 141G» («Evonic», Германия) в концентрации 0,4 мас %. Перемешивание гелевых композиций осуществляли на гомогенизаторе ПЭ-8100 при скорости 150 об/мин в течение 60 мин. Для снижения высыхания в состав гелей добавлен глицерин (чда, не менее 99.3 мас%) в количестве 5.0 мас%. Переход от золя к гелю осуществлялся путем добавления триэтаноламина в концентрации 0.3 мас%.

Вязкость гелей определили на ротационном вискозиметре «Rheotest RN 4.1» при скорости сдвига $\dot{\gamma}=7,5$ с^{-1} , рекомендованной при исследовании полимерных гелей [18]. Электропроводность гелевых систем измерена с помощью кондуктометра МАРК-603.

Для оценки высвобождения растительных экстрактов использованы: экстракты сливы (Prugna extract), агавы (Agave extract), арбуза (Pero extract) и жимолости (Caprifoglio extract), производства Phenbiox (Италия). Экстракты получены методом водной экстракции из плодов и стеблей растений без

применения химических растворителей и соответствуют стандарту COSMOS CERTIFIED. Ввод каждого экстракта в гелий составил 1% масс. Высвобождение растительных экстрактов из гелей исследовали методом равновесного диализа через полупроницаемую целлофановую мембрану (по методу Кручинского) при температуре 37°C [19]. Концентрацию экстрактов в диализате определяли спектрофотометрически по калибровочному графику при длине волны 230 нм. Электрофорез экстрактов проводили при напряжении постоянного тока 10 В [20].

Водородный показатель pH гелевых систем определяли по ГОСТ 29188.2 с помощью pH-метра pH-410.

Антиоксидантная активность (АОА) гелей установлена фосфомолибденовым методом по значению оптической плотности образцов с использованием калибровочной кривой, построенной на основе аскорбиновой кислоты (АК; АOA выражена в мг АК/г).

Обсуждение результатов

Высвобождение растительных экстрактов из гелевой системы

На рис. 1 представлены результаты высвобождения экстрактов агавы, сливы, арбуза и жимолости из гелевой системы. Из рисунка видно, что характер высвобождения экстракта жимолости является наиболее интенсивным. Его спектр имеет выраженную полосу поглощения при 230 нм, относящуюся к УФ-С-области. Благодаря сочетанию фотопротективного эффекта и высокой скорости выхода экстракт жимолости выбран модельным для изучения кинетики высвобождения из полимерного геля, модифицированного C₆₀ и НПАВ. Экстракт получают из листьев и

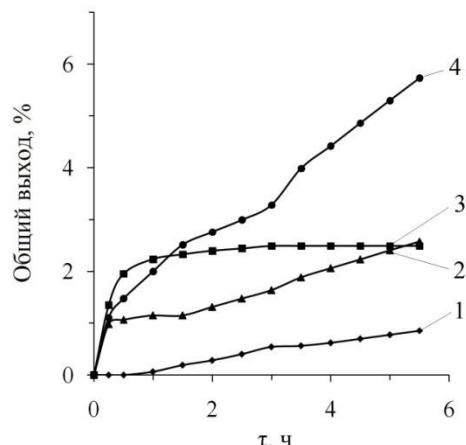


Рис. 1 – Динамика высвобождения экстрактов из базового геля: 1 – экстракт агавы; 2 – экстракт сливы; 3 – экстракт арбуза; 4 – экстракт жимолости

Fig. 1 – Release dynamics of extracts from the base gel: 1 – agave extract; 2 – plum extract; 3 – water-melon extract; 4 – honeysuckle extract

плодов японской жимолости; он характеризуется высокой антиоксидантной активностью, фотопротективными и антимикробными свойствами, устойчив к изменениям pH, совместим с ПАВ и не оказывает заметного влияния на поверхностное натяжение, что

делает его востребованным компонентом косметических рецептур [21].

Водородный показатель гелевых систем с экстрактом жимолости, фуллереном C₆₀ и НПАВ

Гели с фуллереном C₆₀ и растительными экстрактами интересны как носители биологически активных веществ при целевой трансдермальной доставке, включая использование в микротоковой терапии [5]. Для таких систем важно контролировать pH – он определяет переносимость средств кожи. Существенное отклонение кислотности способно нарушать водно-липидный баланс и снижать эффективность проникновения БАВ.

Данные табл. 2 показывают, что дисперсии C₆₀ в растворах НПАВ несколько сдвигают pH геля в щелочную сторону, тогда как добавление экстракта жимолости снижает pH. Итоговое значение для гелей с жимолостью составляет 6,2-6,5, что близко к показателю pH кожи (pH 5,5).

Таблица 2 – Водородный показатель pH гелевых композиций

Table 2 – Hydrogen ion index pH of gel compositions

№ п/п	Гелевая система	pH
1	Базовый гель	6,9
2	Гель + C ₆₀ + Твин-80	7,1
3	Гель + C ₆₀ + Полоксамер-184	7,6
4	Гель + C ₆₀ + ОЭ ВЖС n=10	7,3
5	Гель + экстракт жимолости	6,4
6	Гель + C ₆₀ + экстракт жимолости	6,3
7	Гель + C ₆₀ + Твин-80 + экстракт жимолости	6,2
8	Гель + C ₆₀ + Полоксамер-184 + экстракт жимолости	6,3
9	Гель + C ₆₀ + ОЭ ВЖС n=10 + экстракт жимолости	6,5

Вязкость и электропроводность гелевых систем с экстрактом жимолости, фуллереном C₆₀ и НПАВ

Реологические свойства влияют и на процесс высвобождения БАВ, и на потребительские характеристики – удобство нанесения, распределение по коже, стабильность продукта. В табл. 3 представлены значения вязкости Η для исследованных композиций при скорости сдвига $\dot{\gamma}=7,5 \text{ с}^{-1}$. Анализ результатов показывает, что добавление дисперсий C₆₀ приводит к снижению вязкости гелей. Наиболее заметное уменьшение вязкости отмечено для гелевой системы, полученной с помощью дисперсии фуллерена в водном растворе Твин-80, что, вероятно, связано с особенностями взаимодействия ПАВ с полимерной матрицей иnanoструктурами фуллерена.

Электропроводность полимерных гелей представляет собой один из важных параметров, определяющих возможность их применения для различных областей, включая электрофоретическую трансдермальную доставку лекарственных веществ. Согласно данным табл. 3, введение C₆₀ в гелевую мат-

рицу обеспечивает рост удельной электропроводности примерно в 2,2-2,8 раза по сравнению с базовым гелем. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что электропроводность гелевых композиций с фуллереном зависит не только от вязкости и содержания углеродного наноматериала, но также в значительной степени определяется природой используемых НПАВ и характером их адсорбционного взаимодействия с углероднымиnanoструктурами. Наибольшее значение данного показателя отмечено у геля, содержащего дисперсию C_{60} , стабилизированную Твином-80. Увеличение электропроводности геля объясняется высокой способностью фуллерена принимать электроны, что способствует формированию множества комплексов с переносом заряда между фуллереном и электронодонорными группами карбомера. Такие комплексы значительно увеличивают концентрацию носителей заряда в системе [22].

Таблица 3 – Вязкость и удельная электропроводность гелевых систем

Table 3 – Viscosity and specific electrical conductivity of gel systems

№ п/п	Гелевая система	η , Па·с ($\gamma=7,5 \text{ c}^{-1}$)	χ , мкСм/см
1	Базовый гель	7,8	460
2	Гель + экстракт жимолости	7,5	481
3	Гель + C_{60} + экстракт жимолости	6,9	1028
4	Гель + C_{60} + Твин-80 + экстракт жимолости	4,4	1314
5	Гель + C_{60} + Полоксамер-184 + экстракт жимолости	4,7	1148
6	Гель + C_{60} + ОЭ ВЖС n=10 + экстракт жимолости	5,0	1216

Высвобождение экстракта жимолости из гелевых систем с фуллереном C_{60} и НПАВ

Динамика высвобождения экстракта жимолости из геля с дисперсией фуллерена C_{60} представлена на рис. 2.

Анализ данных рис. 2 свидетельствует о том, что добавление дисперсий C_{60} заметно меняет характер высвобождения растительного экстракта из гелей. Для базового геля при использовании электрофореза скорость выхода экстракта возрастает примерно в 2,7 раза по сравнению с высвобождением без электрофореза. Наиболее выраженный эффект отмечен у геля, содержащего C_{60} с ОЭ ВЖС – количество высвободившегося вещества при электрофорезе выше в 3,6 раза по сравнению с базовым гелем. Композиции, где фуллерен стабилизирован Полоксамером-184 или Твином-80, также демонстрировали рост выхода активных компонентов в 2,6 и 1,6 раза, соответственно. Регулируемое снижение вязкости в совокупности с повышением электропроводности увеличивает и ускоряет высвобождение. Отмечено, что кислотность

среды также влияет на коллоидную устойчивость наночастиц C_{60} и соответственно на их способность усиливать высвобождение БАВ: минимальный эффект наблюдается у геля с Твином-80, где при добавлении растительного компонента pH уменьшается (табл. 2). В то же время гелевая композиция, модифицированная дисперсией C_{60} с ОЭ ВЖС, показала наибольшую эффективность по обеспечению высвобождения экстракта.

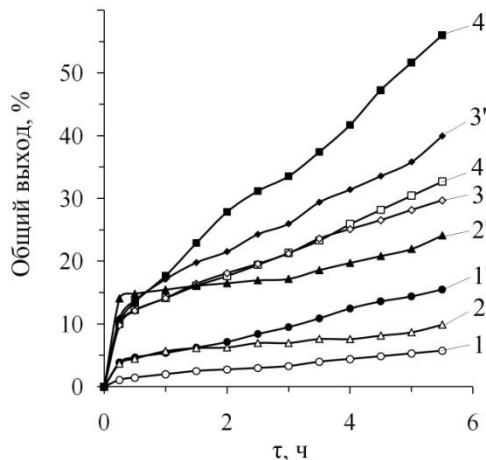


Рис. 2 – Динамика высвобождения экстракта жимолости из гелей, полученных с помощью дисперсий фуллерена C_{60} с НПАВ, без (1, 2, 3, 4) и с электрофорезом (1', 2', 3', 4'): 1, 1' – базовый гель; 2, 2' – гель + C_{60} + Твин-80; 3, 3' – гель + C_{60} + Полоксамер-184; 4, 4' – гель + C_{60} + ОЭ ВЖС

Fig. 2 – Release dynamics of honeysuckle extract from gels prepared using fullerene C_{60} dispersions with nonionic surfactants, without (1, 2, 3, 4) and with electrophoresis (1', 2', 3', 4'): 1, 1' – base gel; 2, 2' – gel + C_{60} + Tween-80; 3, 3' – gel + C_{60} + Poloxamer-184; 4, 4' – gel + C_{60} + EO HFA

Разработка антиоксидантного косметического геля с фуллереном C_{60}

Фуллерен C_{60} обладает выраженными антиоксидантными свойствами и часто рассматривается в литературе как «губка» для свободных радикалов [23]. Его включение в состав косметических продуктов может позволить получать препараты с повышенной антиоксидантной активностью [5]. В данной работе в качестве объекта исследования был выбран гель, модифицированный дисперсией C_{60} с ОЭ ВЖС. Такой выбор обусловлен сочетанием высокой электропроводности и способности эффективно высвобождать растительный экстракт. Для исходного геля АОА составила 1628 мг АК/г; введение дисперсии C_{60} повысило показатель до 2105 мг АК/г. Разработанная рецептура антиоксидантного косметического геля (табл. 4) включает также экстракти жимолости и агавы – компоненты с фотопротективными свойствами. Итоговая АОА готового средства достигает 2603 мкг АК/г, что позволяет отнести его к препаратам, эффективно противодействующим оксидативному стрессу. Водородный показатель готового геля pH 6,45. Продукт соответствует ГОСТ 31695-2012 «Гели косметические. Общие технические условия»

и может быть рекомендован к практическому применению.

Таблица 4 – Рецептура антиоксидантного косметического геля с дисперсией фуллерена

Table 4 – Formulation of an antioxidant cosmetic gel with a fullerene dispersions

№ п/п	Компоненты рецептуры	% мас.
1	Карбомер 141G	0,4
2	Глицерин	5,0
3	Экстракт жимолости	1,0
4	Экстракт агавы	0,4
5	Триэтаноламин	0,3
6	Витамин С	0,1
7	Консервант, отдушка	0,5
8	Дисперсия C ₆₀ + ОЭ ВЖС	до 100

Выводы

1. Установлено, что введение дисперсий C₆₀ с НПАВ в гелевую матрицу приводит к уменьшению ее вязкости. Минимальное значение отмечено для системы, модифицированной дисперсией фуллерена с Твин-80.

2. Выявлено, что при добавлении фуллерена электропроводность гелей возрастает в 2,2-2,8 раза. Наибольший показатель отмечен для гелей, модифицированных дисперсией C₆₀ с Твин-80 ($\chi = 1314$ мкСм/см).

3. Показано, что электрофоретическое высвобождение экстракта жимолости из гелей, модифицированных фуллереном C₆₀ и НПАВ, в 1,6-3,6 раза выше, по сравнению с базовым гелем. Наиболее выраженное высвобождение отмечено для гелевой композиции, полученной с помощью дисперсии фуллерена C₆₀ в водном растворе ОЭ ВЖС.

4. Установлено, что введение фуллерена C₆₀ в состав геля приводит к существенному увеличению его антиоксидантной активности в 1,3 раза по сравнению с базовым гелем.

5. Разработан косметический гель с фуллереном C₆₀ и растительными экстрактами, обладающий антиоксидантной активностью.

Работа выполнена за счет Гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение №111/2024-ПД от 16.12.2024).

Литература

1. В.А. Абрамов, А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, С.В. Демидов, Р.А. Кемалов, С.Р. Аллаяров, *Химия высоких энергий*, **57**, 6, 460-464 (2023). DOI: 10.31857/S0023119323060013.
2. У.Ю. Аллаярова, Е.Н. Климанова, Т.Е. Сашенкова, В.А. Абрамов, А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, С.В. Демидов, Д.В. Мищенко, С.Р. Аллаяров, *Химия высоких энергий*, **58**, 2, 100-106 (2024). DOI: 10.31857/S0023119324020032.
3. Y. Shin, H.S. Lee, H. Jeong, D.-H. Kim, *Wearable Electronics*, **1**, 255-280 (2024). DOI: 10.1016/j.wees.2024.10.004.
4. G. Kougkolos, M. Golzio, L. Laudebat, Z. Valdez-Nava, E. Flahaut, *J. Mater. Chem. B*, **11**, Article 2036 (2023). DOI: 10.1039/d2tb02019j.
5. S.Z. Mousavi, S. Nafisi, H.I. Maibach, *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, **13**, 3, 1071-1087 (2017).
6. Т.О. Лагвила, Е.В. Зиновьев, Г.К. Ивахнюк, А.В. Гарабаджиу, Е.В. Сивова, *Известия СПбГТИ (ТУ)*, **44**, 18, 47-52 (2013). EDN: QUAUHV.
7. Y. Guo, Y. Wang, H. Chen, W. Jiang, C. Zhu, S. Toufouki, S. Yao, *Carbohydrate Polymers*, **296**, Article 119939 (2022). DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119939.
8. A. Dalla Colletta, M. Pelin, S. Sosa, L. Fusco, M. Prato, A. Tubaro, *Carbon*, **196**, 683-698 (2022). DOI: 10.1016/j.carbon.2022.05.036.
9. H. Aoshima, Y. Saitoh, S. Ito, S. Yamana, N. Miwa, *The Journal of Toxicological Sciences*, **34**, 5, 555-562 (2009). DOI: 10.2131/jts.34.555.
10. M. Ema, A. Matsuda, N. Kobayashi, M. Naya, J. Nakanishi, *Cutaneous and Ocular Toxicology*, **32**, 2, 128-134 (2013). DOI: 10.3109/15569527.2012.727937.
11. A. Huczko, H. Lange, E. Calko, *Fullerene Science Technology*, **7**, 5, 935-939 (1999). DOI: 10.1080/10641229909351390.
12. S. Kato, H. Aoshima, Y. Saitoh, N. Miwa, *Basic and Clinical Pharmacology and Toxicology*, **104**, 6, 483-487 (2009). DOI: 10.1111/j.1742-7843.2009.00396.x.
13. X.R. Xia, N.A. Monteiro-Riviere, J.E. Riviere, *Toxicology letters*, **197**, 2, 128-134 (2010). DOI: 10.1016/j.toxlet.2010.05.010.
14. А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, М.С. Алексеева, Ю.Г. Галяметдинов, *Вестник Технологического университета*, **21**, 12, 19-23 (2018). EDN: YVSYNF.
15. V.M. Torres, M. Posa, B. Srdjenovic, A.L. Simplicio, *Coll. and Surf. B: Biointerfaces*, **82**, 1, 46-53 (2011). DOI: 10.1016/j.colsurfb.2010.08.012.
16. Н.М. Задымова, *Кolloидный журнал*, **75**, 5, 543-556 (2013). DOI: 10.7868/S0023291213050194.
17. А.Р. Гатауллин, В.А. Абрамов, С.А. Богданова, В.В. Сальников, Ю.Ф. Зуев, Ю.Г. Галяметдинов, *Кolloidnyy zhurnal*, **86**, 4, 422-435 (2024). DOI: 10.31857/S0023291224040022. EDN: CARVXU.
18. M.T. Islam, N. Rodriguez-Hornendo, S. Ciotti, C. Ackermann, *Pharmaceutical Research*, **21**, 7, 1192-1199 (2004). DOI: 10.1023/B:PHAM.0000033006.11619.07.
19. О.А. Сушинская, Н.С. Голяк, В.М. Царенков, *Вестник фармации*, **86**, 4, 86-94 (2019). EDN: XHGKGO.
20. A. Servant, L. Methven, R.P. Williams, K. Kostarelos, *Adv. Healthc. Mater.*, **2**, 806-811 (2013). DOI: 10.1002/adhm.201200193.
21. Н.В. Макарова, Э.В. Мусифуллина, А.Н. Дмитриева, Г.И. Соболев, О.И. Азаров, *Пищевая промышленность*, **12**, 56-58 (2012). EDN: PMFWKZ.
22. E.R. Badamshina, M.P. Gafurova, *Polymer Science. Series B*, **50**, 7-8, 215-225 (2008). DOI: 10.1134/s1560090408070142.
23. V. Sergeeva, O. Kraevaya, E. Ershova, L. Kameneva, E. Malinovskaya, O. Dolgikh, M. Konkova, I. Voronov, A. Zhilenskoy, N. Veiko, P. Troshin, S. Kutsev, S. Kostyuk, *Oxidative medicine and cellular longevity*, **2019** (2019). DOI: 10.1155/2019/4398695.

References

1. V.A. Abramov, A.R. Gataullin, S.A. Bogdanova, S.V. Demidov, R.A. Kemalov, S.R. Allayarov, *High Energy Chemistry*, **57**, 6, 494-497 (2023). DOI: 10.1134/S0018143923060012.

2. U.Yu. Allayarova, E.N. Klimanova, T.E. Sashenkova, V.A. Abramov, A.R. Gataullin, S.A. Bogdanova, S.V. Demidov, D.V. Mishchenko, S.R. Allayarov, *High Energy Chemistry*, **58**, 1, 127-133 (2024). DOI: 10.1134/S0018143924010016.
3. Y. Shin, H.S. Lee, H. Jeong, D.-H. Kim, *Wearable Electronics*, **1**, 255-280 (2024). DOI: 10.1016/j.wees.2024.10.004
4. G. Kougkolos, M. Golzio, L. Laudebat, Z. Valdez-Nava, E. Flahaut, *J. Mater. Chem. B*, **11**, Article 2036 (2023). DOI: 10.1039/d2tb02019j
5. S.Z. Mousavi, S. Nafisi, H.I. Maibach, *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, **13**, 3, 1071-1087 (2017)
6. T.O. Lagvilava, E.V. Zinov'ev, G.K. Ivahniuk, A.V. Garabagiu, E.V. Siviva, *News of the Saint Petersburg state technological institute (Technical university)*, **44**, 18, 47-52 (2013). EDN: QAUAHV
7. Y. Guo, Y. Wang, H. Chen, W. Jiang, C. Zhu, S. Toufouki, S. Yao, *Carbohydrate Polymers*, **296**, Article 119939 (2022). DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119939.
8. A. Dalla Colletta, M. Pelin, S. Sosa, L. Fusco, M. Prato, A. Tubaro, *Carbon*, **196**, 683-698 (2022). DOI: 10.1016/j.carbon.2022.05.036
9. H. Aoshima, Y. Saitoh, S. Ito, S. Yamana, N. Miwa, *The Journal of Toxicological Sciences*, **34**, 5, 555-562 (2009). DOI: 10.2131/jts.34.555.
10. M. Ema, A. Matsuda, N. Kobayashi, M. Naya, J. Nakanishi, *Cutaneous and Ocular Toxicology*, **32**, 2, 128-134 (2013). DOI: 10.3109/15569527.2012.727937.
11. A. Huczko, H. Lange, E. Calko, *Fullerene Science Technology*, **7**, 5, 935-939 (1999). DOI: 10.1080/10641229909351390.
12. S. Kato, H. Aoshima, Y. Saitoh, N. Miwa, *Basic and Clinical Pharmacology and Toxicology*, **104**, 6, 483-487 (2009). DOI: 10.1111/j.1742-7843.2009.00396.x
13. X.R. Xia, N.A. Monteiro-Riviere, J.E. Riviere, *Toxicology letters*, **197**, 2, 128-134 (2010). DOI: 10.1016/j.toxlet.2010.05.010.
14. A.R. Gataullin, S.A. Bogdanova, M.S. Alekseeva, Yu.G. Galyametdinov, *Herald of Technological University*, **21**, 12, 19-23 (2018). EDN: XREPJR.
15. V.M. Torres, M. Posa, B. Srdjenovic, A.L. Simplicio, *Coll. and Surf. B: Biointerfaces*, **82**, 1, 46-53 (2011). DOI: 10.1016/j.colsurfb.2010.08.012.
16. N.M. Zadymova, *Colloid Journal*, **75**, 5, 491-503 (2013). DOI: 10.1134/S1061933X1305018.
17. A.R. Gataullin, V.A. Abramov, S.A. Bogdanova, V.V. Salnikov, Yu.F. Zuev, Yu.G. Galyametdinov, *Colloid Journal*, **86**, 3, 358-369 (2024). DOI: 10.1134/S1061933X24600155.
18. M.T. Islam, N. Rodriguez-Hornendo, S. Ciotti, C. Ackermann, *Pharmaceutical Research*, **21**, 7, 1192-1199 (2004). DOI: 10.1023/B:PHAM.0000033006.11619.07.
19. O.A. Sushinskaya, N.S. Golyak, V.M. Tsarenkov, *Bulletin of Pharmacy*, **86**, 4, 86-94 (2019). EDN: XHGKGO
20. A. Servant, L. Methven, R.P. Williams, K. Kostarelos, *Adv. Healthc. Mater.*, **2**, 806-811 (2013). DOI: 10.1002/adhm.201200193.
21. N.V. Makarova, E.V. Musifullina, A.N. Dmitrieva, G.I. Sobolev, O.I. Azarov, *Food Industry*, **12**, 56-58 (2012). EDN: PMFWKZ
22. E.R. Badamshina, M.P. Gafurova, *Polymer Science. Series B*, **50**, 7-8, 215-225 (2008). DOI: 10.1134/s1560090408070142
23. V. Sergeeva, O. Kraevaya, E. Ershova, L. Kameneva, E. Malinovskaya, O. Dolgikh, M. Konkova, I. Voronov, A. Zhilenkov, N. Veiko, P. Troshin, S. Kutsev, S. Kostyuk, *Oxidative medicine and cellular longevity*, **2019** (2019). DOI: 10.1155/2019/4398695.

© А. Р. Гатауллин – к.х.н., доцент кафедры Технологии косметических средств (ТКС), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, zulfat.azari@yandex.ru; В. А. Абрамов – к.х.н., научный сотрудник лаборатории Биофизической химии наносистем, Казанский института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, abramovvv660@gmail.com; С. А. Богданова – к.х.н., доцент кафедры ТКС, КНИТУ, polyswet@mail.ru.

© А. Р. Гатауллин – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Department of Technology of Cosmetics (TC), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, zulfat.azari@yandex.ru; В. А. Абрамов – PhD (Chemical Sci.), Researcher at the Laboratory of Biophysical Chemistry of Nanosystems, Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Federal Research Center “Kazan Scientific Center”, Russian Academy of Sciences, abramovvv660@gmail.com; С. А. Богданова – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, the TC department, KNRTU, polyswet@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 23.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 30.10.25.