

На правах рукописи

АБРАМОВ ВЛАДИСЛАВ

**КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ГЕЛЕЙ НА
ОСНОВЕ ПОЛИАКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПАВ И
УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ**

1.4.10. Коллоидная химия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Научный
руководитель:** кандидат химических наук, доцент,
Богданова Светлана Алексеевна

**Официальные
оппоненты:** **Зуева Ольга Стефановна,**
доктор химических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», кафедра физики, профессор;

Морозова Юлия Эрнестовна,
кандидат химических наук, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», лаборатория химии каликсаренов, старший научный сотрудник

**Ведущая
организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Защита состоится «12» декабря 2024 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета – каб. 330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=521299.

Автореферат диссертации разослан «___» октября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.312.06, кандидат технических наук



Елена Анатольевна Емельянычева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Полимерные гели на основе редкосшитой полиакриловой кислоты (карбомеры) представляют собой перспективные коллоидные системы для применения в качестве матриц для введения биологически активных веществ (БАВ). Их способность поглощать и удерживать большое количество жидкой фазы открывает широкие возможности для создания инновационных лекарственных форм и косметических продуктов, разработки эффективных систем доставки и контролируемого высвобождения лекарственных средств и БАВ.

Несмотря на преимущества полимерных гелей, существует потребность в улучшении их функциональных характеристик. Одним из перспективных подходов к решению этой проблемы является использование электрофореза для управления высвобождением БАВ из объема геля. Однако эффективность электрофореза ограничивается низкой электропроводностью гелей. В этом контексте особый интерес представляют углеродные наноструктуры (УНС), такие как углеродные нанотрубки (УНТ), фуллерен C_{60} и графен. Их уникальные электрические и физико-химические свойства открывают новые возможности для модификации гелевых систем. Вместе с тем проблема равномерного распределения УНС в полимерной матрице остается одним из основных препятствий для их эффективного использования. Решением проблемы является диспергирование агломератов УНС в растворах поверхностно-активных веществ, которые также оказывают влияние на процессы доставки БАВ.

Перспективным направлением модификации полимерных гелеобразующих материалов является использование ионизирующего излучения. Гамма-облучение, широко применяемое для стерилизации медицинских продуктов, воздействует на структуру и свойства полимерных гелей, открывая новые возможности для управления их характеристиками.

Систематическое изучение влияния добавок дисперсий УНС, ПАВ и ионизирующего излучения на коллоидно-химические свойства карбомерных гелей способствует разработке новых материалов с улучшенными характеристиками для применения в медицине и косметологии. Это определяет актуальность исследования в области разработки инновационных подходов к модификации полимерных гелей.

Степень разработанности темы исследования. Несмотря на значительный прогресс в области разработки гелевых систем для медицинских и косметических применений, ряд важных аспектов остается недостаточно изученным. В частности, влияние дисперсий различных УНС на структурно-механические свойства, электрофорез карбомерных гелей, процессы высвобождения лекарственных препаратов требуют дальнейшего систематического исследования. В научной литературе представлены отдельные работы, посвященные модификации полимерных гелей углеродными нанотрубками, однако исследования, охватывающие широкий спектр свойств и характеристик наномодифицированных гелей на основе редкосшитой полиакриловой кислоты, практически отсутствуют. Радиационное воздействие на структуру и свойства полимерных гелей, особенно в контексте систем доставки лекарственных средств, изучено недостаточно.

Необходимо комплексное изучение влияния дисперсий УНС, полученных в растворах ПАВ при оптимальных условиях, а также ионизирующего излучения на коллоидно-химические свойства гелей и процессы высвобождения активных компонентов из модифицированных гелевых систем.

Цель работы: выявление закономерностей влияния дисперсий углеродных наноструктур, поверхностно-активных веществ и ионизирующего излучения на коллоидно-химические свойства модифицированных гелевых композиций.

Задачи научного исследования:

- получение стабильных дисперсий УНС в растворах дерматологически мягких неионогенных ПАВ и исследование их коллоидно-химических свойств;
- изучение влияния ПАВ и дисперсий УНС на реологические и электропроводящие свойства гелей на основе карбомеров;
- сравнительный анализ влияния УНС на процессы высвобождения диклофенака натрия и растительных экстрактов из гелей;
- модификация гелеобразователей гамма-излучением и оценка влияния дозы облучения на комплекс свойств гелей;
- токсикологическая оценка гелей с дисперсиями УНС.
- изучение антиоксидантной активности гелей с дисперсиями фуллерена C₆₀.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые разработаны и исследованы полимерные гелевые композиции на основе редкосшитой полиакриловой кислоты, модифицированные дисперсиями углеродных наноструктур в растворах дерматологически мягких поверхностно-активных веществ. Изучено совокупное влияние неионогенных ПАВ и УНС (углеродных нанотрубок, фуллерена C₆₀ и графена) на структурно-механические и электрофизические свойства гелей, а также на высвобождение диклофенака натрия и натуральных экстрактов из гелей. Выявлен характер влияния дозы и условий радиационного воздействия на процессы набухания и структуру карбомера, гелеобразование и свойства наномодифицированных гелевых систем.

Теоретическая и практическая значимость работы. Установлена взаимосвязь коллоидно-химических свойств дисперсий УНС, полученных в мицеллярных растворах ПАВ, реологических параметров наномодифицированных карбомерных гелей, условий проведения электрофореза и кинетических закономерностей максимального высвобождения лекарственного средства из гелей. Полученные результаты позволили глубже понять механизмы взаимодействия углеродных наноструктур с полимерной матрицей, неионогенными ПАВ и биологически активными компонентами. На основании определения антиоксидантной активности гелей с дисперсией фуллерена C₆₀ показана возможность создания лечебно-косметических композиций. Найдены условия получения гелей медицинского назначения с использованием ионизирующего излучения. Разработанная технология получения полимерных гелевых нанокомпозитных материалов, обладающих высокими электропроводящими и антиоксидантными свойствами, а также способностью к контролируемому высвобождению БАВ под действием электрического поля, имеет важное значение для фармацевтической и косметической промышленности.

Методология и методы исследования. В рамках настоящей работы исследовалось влияние различных факторов на коллоидно-химические свойства гелей на основе редкосшитой полиакриловой кислоты. Основные результаты получены с использованием гелеобразователя TEGO Carbomer 141G. Дисперсии углеродных наноструктур (многостенных углеродных нанотрубок, фуллерена C₆₀, многослойного графена) получены методом ультразвуковой обработки в водных растворах ПАВ, охарактеризованы методом динамического и электрофоретического рассеяния света на приборе Malvern Zetasizer Nano ZS и затем использовались как водная фаза для получения

гелей. В качестве ПАВ применялись Твин-80, оксиэтилированный высший жирный спирт (ОЭ ВЖС) со степенью оксиэтилирования $n=10$ и Полоксамер-184. Для анализа гелей применен комплекс методов, включающий реологические исследования, инфракрасную спектроскопию, кондуктометрию, микроскопические методы, фосфомолибденовый метод для оценки антиоксидантной активности.

Облучение полимеров γ -лучами ^{60}Co проведено на установке «Гамматок-100» в ФИЦ ПХФ и МХ РАН (г. Черноголовка). Там же проведена токсикологическая оценка гелей с дисперсиями УНС. Процесс высвобождения диклофенака натрия и растительных экстрактов из гелей исследовали с использованием метода равновесного диализа Кривчинского в отсутствие и с присутствием электрического воздействия.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты получения и коллоидно-химические характеристики стабильных дисперсий углеродных наноструктур в растворах ПАВ для модификации гелевых композиций;
- сравнительный анализ влияния дисперсий углеродных наноструктур на реологические и электропроводящие свойства гелей;
- кинетические закономерности высвобождения БАВ из наномодифицированных гелевых композиций;
- экспериментальные данные о воздействии гамма-облучения на комплекс физико-химических и токсикологических свойств карбомеров и гелей на их основе.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методик и современного оборудования, обеспечивающего высокий уровень точности измерений. Обработка результатов экспериментов проведена с помощью современных информационных средств и программ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на ежегодных итоговых научных конференциях КНИТУ (Казань) с 2021 по 2024 годы, Девятой Всероссийской Каргинской конференции «Полимеры – 2024» (Москва, 2024 г.), X Юбилейном Всероссийском форуме молодых исследователей «ХимБиоSeasons 2024» (Калининград, 2024 г.), III Всероссийской научной конференции (с международным участием) преподавателей и студентов ВУЗов «Актуальные проблемы науки о полимерах» (Казань, 2023 г.), VI Международной конференции по коллоидной химии и физико-химической механике (Казань, 2023 г.), Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023» (Севастополь, 2023 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Достижения современной науки: биотехнология, химия и фармацевтика (БТХФ-2023)» (Симферополь, 2023 г.), Всероссийской конференции «Поверхностные явления в дисперсных системах», посвященной 125-летию со дня рождения выдающегося советского ученого, академика АН СССР Петра Александровича Ребиндера (Москва, 2023 г.), XIV Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «КоМУ-2022» (Ижевск, 2022 г.), Международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов «Молодежь и наука» (Нижний Тагил 2022 г.), VII Всероссийской молодежной конференции «Достижения молодых ученых: химические науки» (Уфа, 2022 г.), XIII Школе-конференции молодых ученых «КоМУ-2021» (Ижевск, 2021 г.), XV Международной конференции молодых ученых, студентов и аспирантов – «Кирпичниковские чтения «Синтез и исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений» (Казань, 2021 г.).

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии на всех этапах диссертационной работы, включая критический анализ литературных данных,

постановку целей и задач исследования, планирование и выполнение экспериментальной работы, обсуждение и интерпретацию полученных результатов, формулировку основных положений и выводов. Автор принимал участие в подготовке публикаций по теме диссертации.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 6 статьях, опубликованных в российских журналах, рекомендованных ВАК, также в тезисах 16 докладов на конференциях различного уровня.

Объем и структура работы. Работа изложена на 198 страницах, содержит 30 таблиц, 62 рисунка и 278 библиографических ссылок. Работа состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, 4 глав, заключения и списка литературы.

Работа выполнена на кафедре технологии косметических средств федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Автор выражает искреннюю благодарность профессору кафедры технологии косметических средств С.А. Богдановой, под руководством которой выполнялась данная работа, а также заведующему кафедрой физической и коллоидной химии – профессору Ю.Г. Галяметдинову, заведующему кафедрой технологии косметических средств – профессору А.А. Князеву, ведущему научному сотруднику «Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской Академии Наук» – профессору С.Р. Аллаярову, заведующему кафедрой технологии нефти, газа и углеродных материалов «Казанского федерального университета» – профессору А.Ф. Кемалову, руководителю лаборатории биофизической химии «Казанского института биохимии и биофизики Казанского научного центра Российской академии наук» – профессору Ю.Ф. Зуеву, профессору кафедры физической и коллоидной химии – В.Е. Проскуриной, доценту кафедры технологии косметических средств – А.Р. Гатауллину, оказавшим практическую помощь и давшим ценные советы в ходе выполнения данной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе представлен обзор литературных данных, касающихся свойств и применения полимерных гелей на основе карбомеров, методов модификации гелей поверхностно-активными веществами и углеродными наноструктурами, а также их влияния на свойства гелевых систем.

Во второй главе описаны объекты исследования, методики получения дисперсий углеродных наноструктур и гелевых композиций, их модификации гамма-облучением. Приведены методы исследования коллоидно-химических, реологических, электрофизических, антиоксидантных свойств и процессов высвобождения биологически активных компонентов из разработанных гелевых систем.

В третьей главе представлены результаты получения и исследования коллоидно-химических свойств дисперсий углеродных нанотрубок, фуллерена C₆₀ и графена, полученных в водных мицеллярных растворах неионогенных ПАВ.

Получение и исследование дисперсий углеродных наноструктур. Дисперсии углеродных наноструктур были получены с помощью ультразвуковой обработки и охарактеризованы методами абсорбционной спектроскопии. Установлено, что

ультразвуковое диспергирование агломератов углеродных наноструктур приводит к значительному увеличению числа наночастиц в системе и получению устойчивых дисперсий в растворах неионогенных ПАВ. Для УНТ наибольшую оптическую плотность продемонстрировала дисперсия с Твином-80, однако наилучшую стабильность во времени обеспечил Полоксамер-184. В случае фуллерена C_{60} оптимальные результаты по оптической плотности и стабильности показал ОЭ ВЖС. Дисперсии графена с Твином-80 обладали наибольшей оптической плотностью, но ОЭ ВЖС обеспечил лучшую стабильность. Были определены оптимальные концентрации ПАВ, обеспечивающие наилучшее дезагрегирующее и стабилизирующее действия. (рисунок 1).

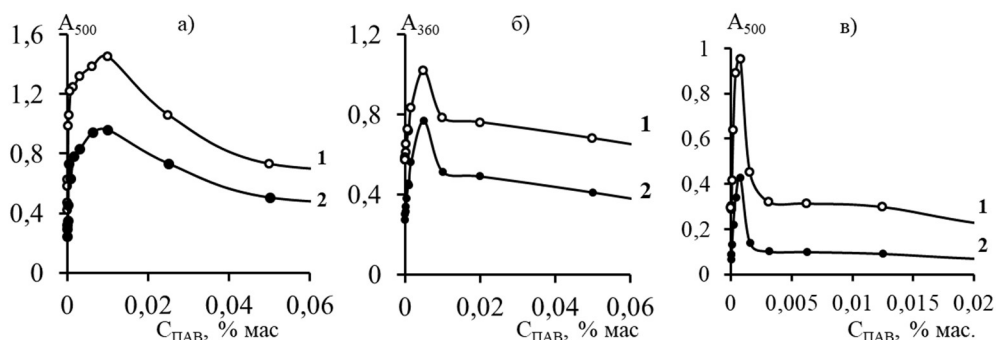


Рисунок 1 – Оптическая плотность дисперсий УНТ (а), фуллерена C_{60} (б), многослойного графена (в) с Твином-80: 1 – через сутки и 2 – через 7 суток после УЗ обработки

Таблица 1 – Значения гидродинамического диаметра и ζ -потенциала дисперсий углеродных наноструктур

Система	УНТ		Фуллерен C_{60}		Графен	
	d_H , нм	ζ , мВ	d_H , нм	ζ , мВ	d_H , нм	ζ , мВ
без ПАВ	265,3	-25,5	277,7	-30,1	1331	-25,7
+Твин-80	178,4	-19,2	258,2	-25,8	773,2	-32,2
+Полоксамер-184	166,9	-21,6	265,2	-26,7	798,3	-25,9
+ОЭ ВЖС	244,8	-24,9	261,7	-22	606,7	-29,3

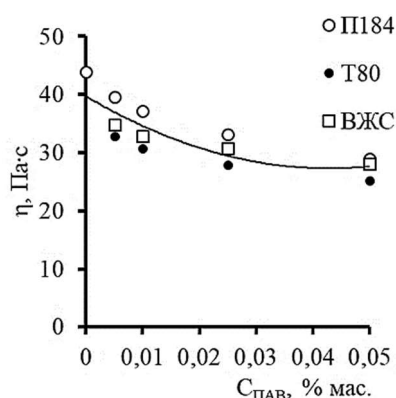


Рисунок 2 – Зависимость вязкости гелей от концентрации ПАВ

Методом динамического рассеяния света установлено, что введение ПАВ уменьшает размеры частиц УНТ и графена в 1,6-2,2 раза, тогда как для фуллерена C_{60} эффект менее выражен. Введение неионогенных ПАВ в случаях углеродных нанотрубок и фуллерена C_{60} приводит к снижению величины ζ -потенциала частиц (таблица 1).

Базовый гель включает в себя полимер редкосшитой полиакриловой кислоты (карбомер 141G) (0,4 % мас.), глицерин (5 % мас.), нейтрализующий агент триэтаноламин (0,3 % мас.) и воду до 100 % мас. Полученные ранее дисперсии наноструктур были использованы в качестве водной фазы для создания гелевых композиций. Оптимизация структурно-

механических характеристик гелей, тесно связанных с их активными свойствами, является ключевым аспектом при разработке подобных систем. В ходе исследования

были оценены реологические свойства гелей в присутствии как отдельно ПАВ, так и дисперсий углеродных наноструктур.

Влияние ПАВ и дисперсий углеродных наноструктур на реологические свойства гелей. Реологические исследования показали, что введение ПАВ приводит к снижению вязкости (рисунок 2) и предела текучести, рассчитанного по уравнению Гершеля-Балкли (1), который определяет прочность структуры геля (таблица 2).

$$\tau = \tau_0 + K * \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

где τ_0 – предел текучести, Па; K – коэффициент консистенции, пропорциональный эффективной вязкости при скорости сдвига, равном единице, Па·с; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹; n – индекс течения системы.

С увеличением концентрации ПАВ тенденции сохраняются, причем Твин-80 снижает вязкость в наибольшей степени, а Полосамер-184 – в наименьшей. Такое воздействие ПАВ очевидно связано с экранированием заряженных групп карбомера, что уменьшает их электростатическое отталкивание. С ростом концентрации ПАВ сами мицеллы могут дополнительно препятствовать формированию геля.

Таблица 2 – Структурно-механические параметры гелей с ПАВ

ПАВ	Полосамер-184					Твин-80					ОЭ ВЖС				
С _{пав} , % мас	0	0,01	0,025	0,05	0,1	0	0,01	0,025	0,05	0,1	0	0,01	0,025	0,05	0,1
τ_0 , Па	5,5	4,1	3,7	3,4	3,1	5,5	3,5	3,2	3,0	2,9	5,5	4,0	3,4	3,1	3,1
K , Па·с	22,4	22,9	22,7	20,0	16,5	22,4	13,2	12,1	11,3	10,2	22,4	14,7	13,1	11,8	10,7
n	0,39	0,36	0,36	0,35	0,37	0,39	0,43	0,43	0,43	0,43	0,39	0,42	0,42	0,42	0,42

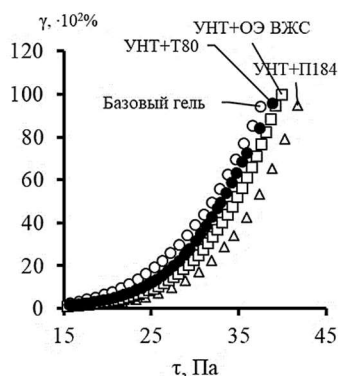


Рисунок 3 – Зависимость деформации от напряжения сдвига для гелей с дисперсиями УНТ

к деформации, что свидетельствует об усилении их структуры (рисунок 3). В противоположность УНТ, введение дисперсий фуллерена С₆₀ способствует снижению вязкости и предела текучести гелей (рисунок 4). Наиболее выраженный эффект наблюдался при использовании дисперсий фуллерена С₆₀ с Твином-80, где предел текучести уменьшился в 1,7 по сравнению с базовым гелем.

Реологические исследования гелевых композиций с добавлением дисперсий углеродных наноструктур выявили существенные различия в их влиянии на структурно-механические свойства гелей. Введение дисперсий УНТ приводит к значительному увеличению вязкости гелей и повышению их структурно-механических параметров, с наибольшим эффектом при использовании дисперсии УНТ с Полосамером-184, где вязкость увеличилась в 1,8 раза по сравнению с базовым гелем. Анализ зависимости деформации от напряжения сдвига показал, что гели с УНТ демонстрируют повышенную устойчивость

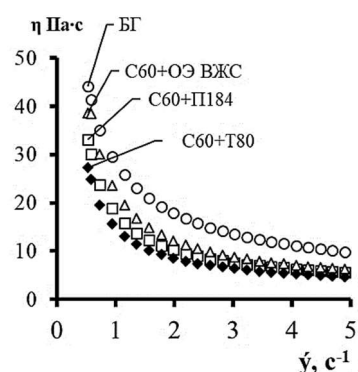


Рисунок 4 – Кривые вязкости для гелей с дисперсиями фуллерена С₆₀

Добавка дисперсии графена оказывает неоднозначное влияние на реологические характеристики гелей. При использовании дисперсии графена с Полоксамером-184 наблюдалось небольшое увеличение вязкости в 1,2 раза по сравнению с базовым гелем, тогда как при введении дисперсий графена с другими ПАВ отмечалось некоторое снижение реологических параметров, особенно выраженное для композиций с Твином-80. Структурно-механические характеристики гелей с дисперсиями наноструктур представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Структурно-механические параметры гелей с дисперсиями углеродных наноструктур

Гель	УНТ			Фуллерен C ₆₀			Графен		
	τ_0 , Па	K, Па·с	n	τ_0 , Па	K, Па·с	n	τ_0 , Па	K, Па·с	n
БГ	5,5	24,3	0,38	5,5	24,3	0,38	5,5	24,3	0,38
+П184	11,2	35,3	0,39	3,8	16,6	0,42	4,2	20,8	0,40
+ОЭ ВЖС	10,5	32,8	0,37	3,3	15,6	0,42	4,9	20,9	0,40
+T80	9,9	31,1	0,39	4,8	16,9	0,41	2,6	13,8	0,42

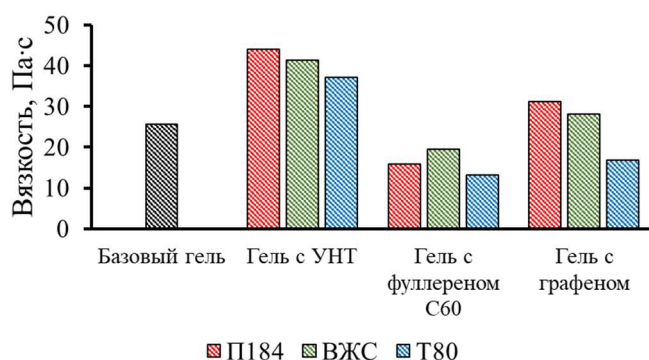


Рисунок 5 – Вязкость гелей с углеродными наноструктурами

Сравнивая влияние различных углеродных наноструктур на реологические свойства гелей, можно отметить существенные различия в их воздействии (рисунок 5). УНТ в целом усиливают вязкоупругие характеристики гелей, что может быть объяснено их волокнистой структурой, способствующей армированию полимерной матрицы. Наблюдается корреляция между концентрацией и размерами частиц УНТ в исходных дисперсиях и их влиянием на

реологические свойства гелей. Дисперсии с наименьшими размерами частиц и наибольшей оптической плотностью, в частности, стабилизированные Полоксамером-184, обеспечивают максимальное усиление вязкоупругих характеристик гелей. Фуллерен C₆₀, напротив, приводит к снижению вязкости и прочности гелей, вероятно, из-за нарушения межмолекулярных связей в структуре геля.

Интересно отметить, что влияние различных ПАВ на размеры частиц и оптическую плотность дисперсий фуллерена C₆₀ отличалось незначительно. Это указывает на то, что изменение реологических характеристик гелей с дисперсиями фуллерена C₆₀ в большей степени зависело от конкретного ПАВ, а не от степени диспергирования фуллерена C₆₀. В случае графена наблюдается частичная корреляция между оптической плотностью исходных дисперсий графена и их влиянием на реологические свойства гелей. Дисперсия

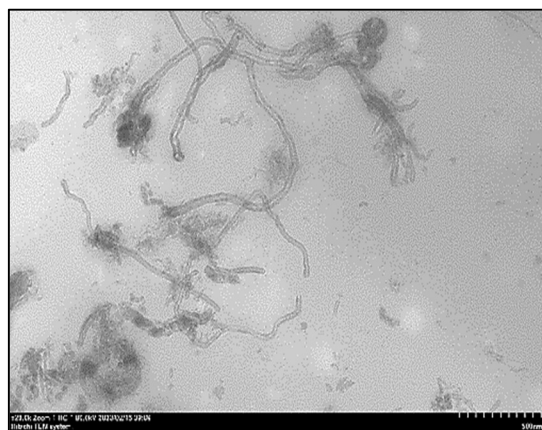


Рисунок 6 – Микрофотографии гелей с УНТ и ОЭ ВЖС

графена с Твином-80, имеющая наибольшую оптическую плотность, приводит к большому снижению вязкоупругих характеристик геля. Влияние размеров частиц графена на реологические свойства гелей менее выражено, что может быть связано с анизотропной природой графеновых пластинок и сложностью их поведения в полимерной матрице.

Для дальнейшего исследования модифицированных гелевых систем были привлечены методы: просвечивающей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии и кондуктометрии. В гелях с УНТ обнаружены индивидуальные нанотрубки диаметром 20-40 нм, равномерно распределенные в объеме геля (рисунок 6). Наблюдаемые элементы сетчатой структуры, образованной нанотрубками, играют ключевую роль в повышении электрической проводимости материала. В гелях с фуллереном C_{60} выявлены коллоидные частицы, распределенные в объеме геля в виде отдельных включений (рисунок 7).

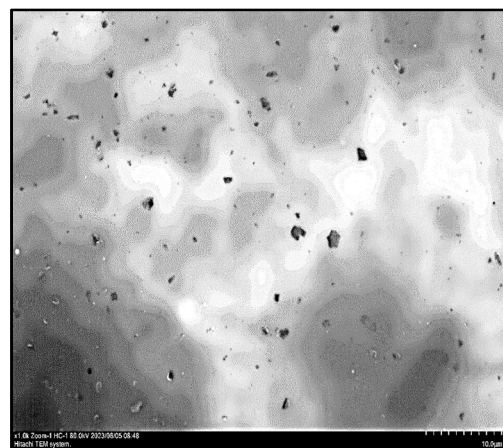


Рисунок 7 – Микрофотографии гелей с фуллереном C_{60} и Твином-80

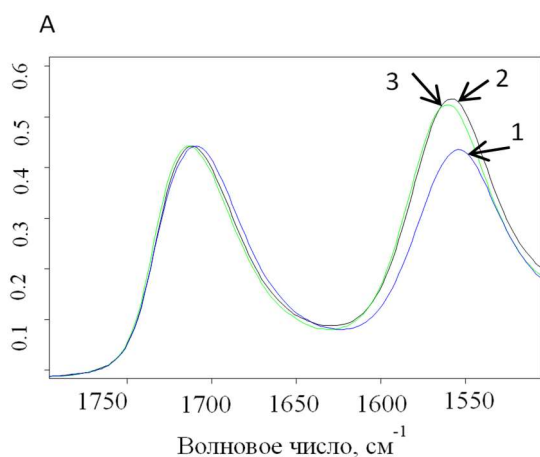


Рисунок 8 – ИК спектры высушенных пленок: 1 – базовый гель, 2 – гель с УНТ 0,01%+ОЭ ВЖС, 3 – гель с УНТ 0,1%+ОЭ ВЖС

Введение углеродных наноструктур приводит к изменениям в конформационном состоянии карбомера, что проявляется в смещении максимумов полос карбонильной группы ($C=O$) и карбоксилат-аниона (COO^-). С увеличением концентрации УНТ наблюдается сдвиг максимума полосы $C=O$ колебаний в сторону более высоких частот, указывающий на увеличение доли карбонильных групп, не участвующих в образовании водородных связей (рисунок 8). Варьирование отношения интенсивностей полос $C=O$ и COO^- при добавлении дисперсий УНТ и фуллерена C_{60} свидетельствует об изменениях в степени ионизации карбоксильных групп карбомера, что может объяснять наблюдаемые реологические эффекты.

Введение дисперсий УНТ, фуллерена C_{60} и графена приводит к увеличению удельной электропроводности в 1,7-2,5 раза по сравнению с базовым гелем. Результаты представлены в таблице 4. Наибольший эффект наблюдался для гелей с дисперсиями фуллерена C_{60} , где электропроводность возросла в 2,2-2,5 раза. Отмечалась корреляция между размерами частиц наноструктур и электропроводностью гелей: системы с меньшими размерами частиц демонстрировали более высокую электропроводность. Особенно высокая электропроводность гелей с фуллереном C_{60} вероятно может объясняться низкой вязкостью этих гелей, что способствует улучшенной подвижности переносчиков зарядов. Влияние различных ПАВ на электропроводность возможно связано с их воздействием как на размер частиц УНС, так и на вязкость геля, что в совокупности определяет эффективность формирования проводящей сети в системе.

Таблица 4 – Удельная электропроводность гелей с углеродными наноструктурами

Гель	χ , мкСм/см		
	УНТ	Фуллерен C ₆₀	Графен
Базовый гель	460,2		
Без ПАВ	769	1028	810
+Т80	955	1157	788
+П184	822,5	991,5	847
+ОЭ ВЖС	932	1080	866

Свойства гелевых композиций, модифицированных ионизирующим излучением. Одним из способов модификации карбомеров является применение ионизирующего излучения. Это способствует созданию антибактериальных гелевых форм, что является важным этапом создания систем доставки лекарственных средств. Облучение γ -лучами ⁶⁰Со проводили в федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии в г. Черноголовка на установке УНУ «Гамма-100» дозами 30, 70, 100, 300, 500, 700 кГр на воздухе и в вакууме. Влияние ионизирующего излучения на структуру гелеобразователя демонстрируют результаты изучения кинетики набухания гелей. Полученные данные были обработаны уравнением кинетики второго порядка (таблица 5). Используя значения максимальной степени набухания, была рассчитана средняя молекулярная масса между сшивками с помощью уравнения Флори-Ренера (2-4):

$$M_c = - \frac{\rho_x V_w \varphi_2^{\frac{1}{3}}}{\ln(1 - \varphi_2) + \varphi_2 + \chi \varphi_2^2}, \quad (2)$$

где ρ_x – плотность полимера; V_w – молярная масса воды; φ_2 – объемная доля полимера; χ – параметр взаимодействия полимер-вода. Значение χ определяется по следующему уравнению (3):

$$\chi = - \frac{\ln(1 - \varphi_2) + \varphi_2}{\varphi_2^2}. \quad (3)$$

Значение объемной доли полимера φ_2 рассчитывается по уравнению (4):

$$\varphi_2 = \frac{1}{1 + \frac{\rho_x}{\rho_w} Q_{max}}. \quad (4)$$

Таблица 5 – Характеристики гелеобразователя в зависимости от дозы гамма-облучения

Доза облучения, кГр	$K \cdot 10^3$, мин ⁻¹	Q_{max}	R^2	$M_c \cdot 10^{-3}$, г/моль
0	0,36	394,4	0,993	311,56
30	0,66	214,9	0,998	116,72
70	0,86	146,9	0,988	57,34
100	3,82	69,9	0,984	18,10
300	9,85	29,2	0,998	5,03
500	5,82	26,7	0,996	3,72
700	18,3	14,4	0,999	1,52
300 (вакуум)	12,1	38,1	0,999	6,18

Исследование влияния гамма-облучения на свойства карбомера 141G выявило сложные структурные изменения в полимерной сетке. С увеличением дозы облучения

наблюдалось уменьшение предельной степени набухания Q_{max} и увеличение константы скорости набухания K гелеобразователя (таблица 5). Эти эффекты объясняются одновременным протеканием двух конкурирующих процессов: сшивки и деструкции полимера. При облучении происходит модификация карбоксильных групп и накопление двойных связей $C=C$ в основной цепи полимера. Хотя расчеты по модели Флори-Ренера (2) показали увеличение плотности сшивки с ростом дозы облучения, реологические исследования выявили значительное снижение вязкости гелей: при дозе 30 кГр вязкость падает на 52%, а при 70-100 кГр - на 60-63% (рисунок 9).

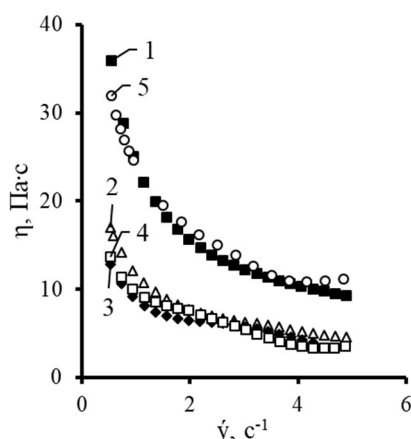


Рисунок 9 – Кривые вязкости гелевых композиций: 1 – базовый гель и гель на основе облученного карбомера дозой: 2 – 30 кГр, 3 – 70 кГр, 4 – 100 кГр, 5 – 300 кГр в вакууме

Это падение вязкости указывает на преобладание процессов деструкции над процессами сшивки. Снижение вязкости можно объяснить разрывом основной цепи полимера и деструкцией карбоксильных групп, которые играют ключевую роль в формировании физических сшивок и водородных связей. Несмотря на образование новых химических сшивок, общее ослабление структуры полимера приводит к снижению вязкости. Облучение карбомера в вакууме дозой 300 кГр привело к меньшему падению вязкости (всего на 2%) по сравнению с облучением на воздухе, что объясняется отсутствием окислительных процессов и, возможно, более сбалансированным соотношением между процессами сшивки и деструкции.

В четвертой главе представлены результаты изучения влияния ПАВ, УНС и гамма-облучения на процессы высвобождения БАВ из гелей. Увеличение проводимости гелей введением наноструктур является важной задачей при разработке контролируемых систем доставки лекарственных средств методом электрофореза.

Высвобождение диклофенака натрия из гелей с углеродными наноструктурами. Результаты высвобождения диклофенака натрия показали, что воздействие электрического напряжения, равного 10 В, на гели, содержащие дисперсии углеродных наноструктур, значительно увеличивает концентрацию высвободившегося препарата. При этом наибольший выход наблюдается у гелей с дисперсией УНТ с Твином-80 и фуллерена C_{60} с ОЭ ВЖС (рисунок 10).

При отсутствии электрического воздействия УНТ замедляли высвобождение препарата. Это, вероятно, связано с адсорбцией диклофенака натрия на поверхности

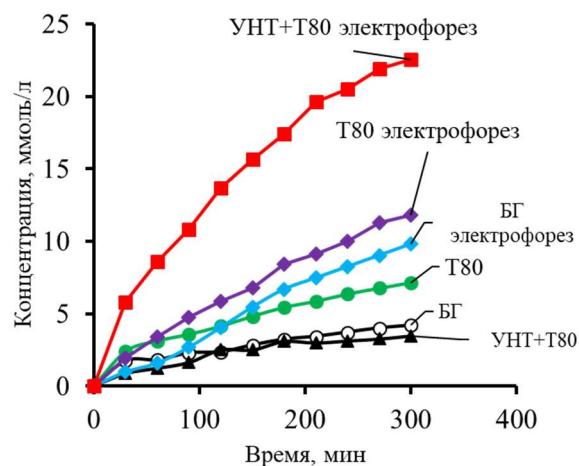


Рисунок 10 – Кинетика высвобождения диклофенака натрия из гелей с дисперсиями УНТ с Твином-80

наноструктур, что препятствует его быстрому высвобождению. Кроме того, сами нанотрубки могут служить барьером, препятствующим выходу лекарственного средства.

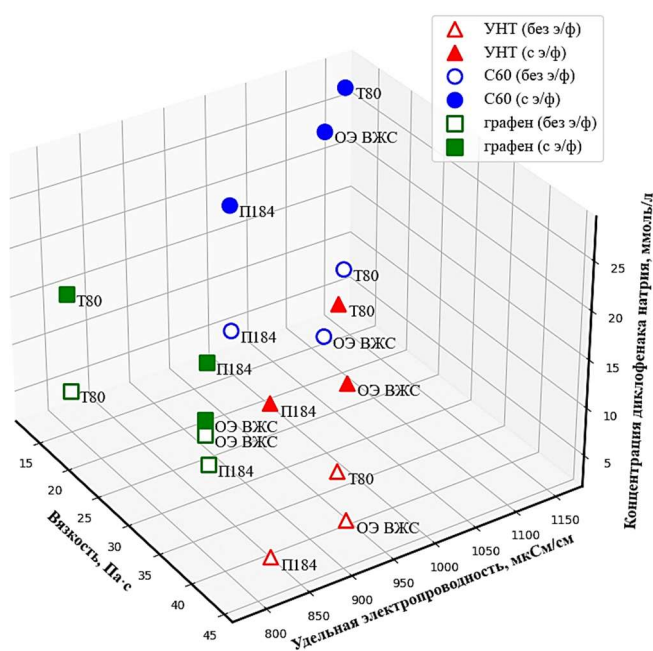


Рисунок 11 – Зависимость концентрации диклофенака натрия в диализате от вязкости и удельной электропроводности гелей с наноструктурами и ПАВ

большей подвижностью молекул препарата в менее вязких системах. Также прослеживается зависимость: чем выше электропроводность геля, тем больше высвобождение диклофенака натрия при применении электрофореза. Так гель с дисперсией фуллерена C_{60} с Твином-80 обладающий наибольшей электропроводностью и наименьшей вязкостью, наиболее эффективно способствовал высвобождению препарата (рисунок 11).

Для понимания механизма высвобождения из гелей с дисперсиями наноструктур, эти данные были обработаны четырьмя математическими моделями: нулевого и первого порядков, моделями Хигучи и Корсмейера-Пеппаса. Последняя модель наиболее точно описывает эти данные, что указывает на комплексный механизм высвобождения. Это означает, что высвобождение диклофенака натрия происходит как за счет диффузии лекарства, так и за счет релаксации полимерной матрицы.

Влияние гамма-облучения на процесс высвобождения диклофенака натрия. Исследование влияния гамма-облучения на свойства гелей показало, что оптимальная доза облучения гелеобразователя составляет 30 кГр,

В случае графена наибольший выход диклофенака натрия аналогично наблюдается у геля с дисперсией в сочетании с Твином-80, концентрация вышедшего препарата с электрофорезом увеличивается в 3 раза в сравнении с базовым гелем. Можно также отметить, что ПАВ, обладающие свойствами энхансеров, способны усиливать проникновение лекарственных веществ через полупроницаемую мембрану. Например, Твин-80 без наноструктур эффективнее других ПАВ интенсифицировал высвобождение диклофенака натрия. Установлена взаимосвязь между реологическими свойствами, электропроводностью гелей и степенью высвобождения лекарственного вещества. Наблюдается тенденция к увеличению высвобождения диклофенака натрия при уменьшении вязкости геля, что может быть объяснено

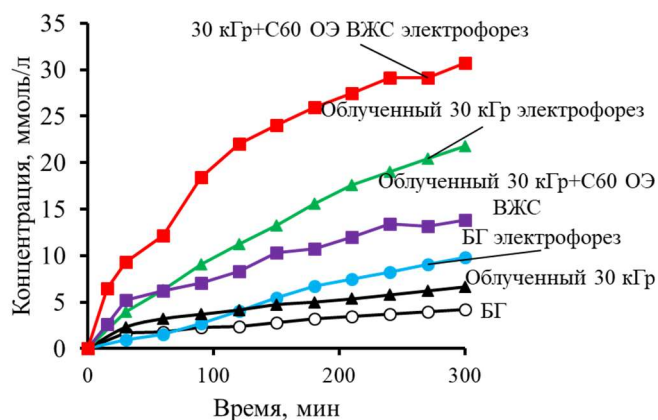


Рисунок 12 – Динамика высвобождения диклофенака натрия из геля на основе облученного гелеобразователя с дисперсией фуллерена C_{60} с ОЭ ВЖС

что соответствует дозе стерилизации медицинских продуктов. Облучение карбомера 141G привело к увеличению высвобождения диклофенака натрия в 1,6 раза без тока и в 2,2 раза при электрофорезе.

Комбинирование облученного карбомера с дисперсией фуллерена C_{60} и ОЭ ВЖС позволило увеличить высвобождение лекарства в 4,6 раза (рисунок 12). Эти результаты открывают перспективы использования гамма-облучения для создания модифицированных гелевых систем с улучшенными свойствами трансдермальной доставки лекарств и биологически активных веществ.

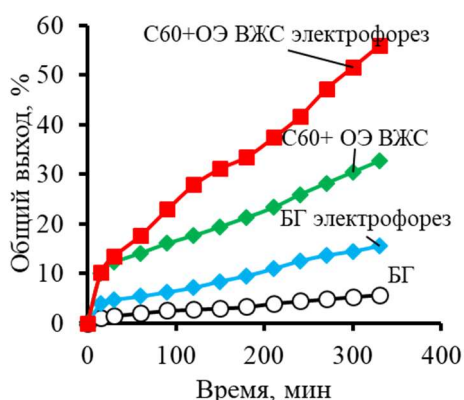


Рисунок 13 – Динамика высвобождения экстракта жимолости из гелей с дисперсией фуллерена C_{60} и ОЭ ВЖС

фуллерена C_{60} с ОЭ ВЖС увеличило концентрацию высвободившегося экстракта в 3,6 раза по сравнению с базовым гелем (рисунок 13). Антиоксидантная активность геля с дисперсией фуллерена C_{60} и ОЭ ВЖС, определенная фосфомолибденовым методом, оказалась в 1,6 раза выше, чем у базового геля, что эквивалентно 2603,4 мг аскорбиновой кислоты на грамм продукта. Это позволяет рекомендовать разработанный гель для производства как эффективное средство против оксидативного стресса.

Токсичность гелей с углеродными наноструктурами. Использование углеродных наноструктур в медицинских и косметических целях вызывает определенные опасения из-за их потенциальной токсичности. Вместе с тем встроенные в структуру гелей, дисперсии УНС не имеют прямого контакта с кожей и не выделяются при электрофорезе. Тем не менее для дальнейшего безопасного использования была проведена токсикологическая оценка гелей с дисперсиями УНС.

Таблица 6 – Масса тела опытных животных при накожном нанесении исследуемых гелей

Вид геля	Доза облучения	Масса тела животных после введения препарата на сутки:					
		0	1	2	3	7	14
Базовый	0 кГр	25,02±1,32	25,75±0,90	26,28±0,81	26,37±1,22	27,66±1,15	28,55±1,12
	300 кГр	23,75±0,67	25,07±0,76	24,94±0,56	25,42±0,43	26,00±0,37	26,87±0,45
+ УНТ	0 кГр	28,21±1,35	28,30±1,29	28,51±1,29	28,80±1,51	28,90±1,28	29,63±1,87
	300 кГр	28,12±1,22	28,63±1,99	28,55±1,24	28,78±1,30	28,97±1,33	29,68±1,14
+ фуллерен C_{60}	0 кГр	28,50±0,65	29,10±0,79	28,81±1,14	28,98±1,13	29,09±1,25	29,71±1,54
	300 кГр	28,11±1,93	28,69±1,63	28,52±1,54	28,61±1,53	28,90±1,60	29,51±1,42

Исследования проводили в ФИЦ ПХФ и МХ РАН (г. Черноголовка) при накожном нанесении и внутрижелудочном введении гелей с УНС лабораторным мышам линии Balb/c и C57BL. Опыты выполнялись в соответствии с Руководством по проведению доклинических исследований лекарственных средств и с соблюдением принципов гуманного обращения с животными в соответствии с национальными и международными стандартами. Показано, что все исследуемые гели, при накожном нанесении и внутрижелудочном введении в максимально возможной дозе не оказывали токсического действия на организм лабораторных животных и не вызывали их гибели. Результаты показали отсутствие местно-раздражающего действия у всех исследуемых гелей. Наблюдалось незначительное снижение массы тела животных, с тенденцией к восстановлению на 14 сутки (таблица 6). Морфологическое исследование внутренних органов не выявило отличий от контрольной группы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены устойчивые дисперсии углеродных нанотрубок, фуллерена C_{60} и многослойного графена в растворах неионогенных ПАВ (Твин-80, Полосамер-184, ОЭ ВЖС). Установлено, что размер частиц углеродных наноструктур дифференцированно зависит от природы ПАВ: для УНТ размер уменьшается в ряду ОЭ ВЖС > Твин-80 > Полосамер-184, для графена эффективен ОЭ ВЖС, а для фуллерена C_{60} влияние ПАВ минимально.
2. Выявлено влияние ПАВ и дисперсий УНС на реологические и электропроводящие свойства гелей на основе редкосшитой полиакриловой кислоты. Введение ПАВ снижает вязкость, модуль упругости и предел текучести гелей, тогда как введение УНС в целом приводит к структурированию системы. Показано, что добавление УНС повышает электропроводность гелей в 1,7-2,5 раза в ряду графен < УНТ < фуллерен C_{60} .
3. Установлено, что в присутствии ПАВ наблюдается интенсификация высвобождения диклофенака натрия из гелей, наибольший эффект отмечен для Твина-80. Применение электрофореза в присутствии дисперсий УНС значительно (в 2,2-7,4 раза) увеличивает концентрацию вышедшего препарата. Наибольшая эффективность наблюдается для гелей с дисперсией фуллерена C_{60} , что коррелирует с их повышенной электропроводностью.
4. Показано, что добавка дисперсии фуллерена C_{60} увеличивает высвобождение растительного экстракта из гелей и приводит к повышению их антиоксидантной активности.
5. Гамма-облучение гелеобразователя уменьшает степень набухания, плотность сшивки и вязкость гелей. Вместе с тем малые дозы облучения (30 кГр) увеличивают высвобождение диклофенака натрия, особенно в присутствии фуллерена C_{60} .
6. Токсикологические исследования не выявили негативного воздействия гелей с УНС при нанесении на кожу и в процессах внутрижелудочного введения лабораторным животным.

Дальнейшее развитие исследований видится в углубленном изучении механизма межмолекулярных и межчастичных взаимодействий ПАВ, углеродных наноструктур и полимерной сетки. Перспективным представляется анализ возможностей трансдермальной доставки с использованием электрофореза широкого спектра лекарственных веществ и косметических ингредиентов из модифицированных гелевых систем.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК для размещения материалов диссертаций:

1. Богданова, С.А. Эффективность использования вискозиметра Брукфильда для исследования реологических свойств косметических средств / С.А. Богданова, Ю.А. Шигабиева, **В. Абрамов** / Вестник технологического университета. – 2021. – Т.24. – №.6. – С. 78-81.
2. **Абрамов, В.** Влияние поверхностно-активных веществ на реологические свойства гелей на основе полиакриловой кислоты / **В. Абрамов**, С.А. Богданова, Ю.А. Шигабиева, С.И. Вольфсон / Вестник технологического университета. – 2022. – Т.25. – №.7. – С. 70-73.
3. **Абрамов, В.** Модифицирование реологических и электрических свойств гелей углеродными нанотрубками и неионогенными поверхностно-активными веществами / **В. Абрамов**, С.А. Богданова, А.Р. Гатауллин, Ю.Г. Галяметдинов / Вестник технологического университета. – 2023. – Т.26. – №.10. – С. 125-128.

Публикации, входящие в реферативную базу Scopus и WoS:

4. Gataullin, A.R. Preparation of carbon nanotube dispersions in solutions of ethoxylated fatty alcohols for modifying gel systems / A.R. Gataullin, **V. Abramov**, S.A. Bogdanova, V.V. Salnikov, Yu.F. Zuev, Yu.G. Galyametdinov / Colloid Journal – 2024. – V. 86. – №. 3. – P. 358–369.
5. **Абрамов, В.** Реологические свойства гелевых систем на основе гамма-облученной редкосшитой полиакриловой кислоты / В. Абрамов, А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, С.В. Демидов, Р.А. Кемалов, С.Р. Аллаяров / Химия высоких энергий. – 2023. – Т.57. – №.6. – С. 460-464.
(**Abramov, V.** Rheological properties of gel systems based on gamma-irradiated lightly crosslinked polyacrylic acid / V. Abramov, A.R. Gataullin, S.A. Bogdanova, S.V. Demidov, R.A. Kemalov, S.R. Allayarov / High Energy Chemistry. – 2023. – V. 57. – №. 6. – P. 494-497.)
6. Аллаярова, У.Ю. Влияние гамма-облучения на токсичность редкосшитой полиакриловой кислоты и геля на его основе / У.Ю. Аллаярова, Е.Н. Климанова, Т.Е. Сашенкова, **В. Абрамов**, А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, С.В. Демидов, Д.В. Мищенко, С.Р. Аллаяров // Химия высоких энергий. – 2024. – Т. 58. – №. 2. – С. 100–106.
(Allayarova, U.Y. Influence of Gamma Radiation on the Toxicity of Lightly Crosslinked Polyacrylic Acid and Gel Based on It / U.Y. Allayarova, E. N. Klimanova, T.E. Sashenkova, **V. Abramov**, A.R. Gataullin, S.A. Bogdanova, S.R. Allayarov // High Energy Chemistry. – 2024. – V. 58. – №. 1. – P. 127-133.)

Публикации в сборниках трудов научных конференций:

7. Гатауллин, А.Р. Получение и свойства гелей с углеродными нанотрубками и поверхностно-активными веществами / А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, **В. Абрамов**, Ю.Г. Галяметдинов / «Кирпичниковские чтения» : сборник тезисов докладов, Казань, 29 марта – 02 2021 года. Том 2. – Казань: [б. и.], 2021. – С. 143-145.
8. **Абрамов, В.** Получение и реологические свойства наномодифицированных гелевых систем с неионогенными поверхностно-активными веществами / **В. Абрамов**, А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, Ю.Г. Галяметдинов // «КоМУ-2021» : Материалы XIII школы-конференции молодых ученых, Ижевск, 18–22 октября 2021 года. – Ижевск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр «Уральского отделения Российской академии наук», 2021. – С. 130-131.

9. Гатауллин, А.Р. Исследование реологических и электрических свойств гелевых систем с углеродными наночастицами / А.Р. Гатауллин, **В. Абрамов**, С.А. Богданова, Ю.Г. Галяметдинов / «КоМУ-2022» : Материалы XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием, Ижевск, 05–09 декабря 2022 года. – Ижевск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр «Уральского отделения Российской академии наук», 2022. – С. 82-83.
10. Гатауллин, А.Р. Исследование влияния гамма-облучения на реологические свойства полимерных гелей / А.Р. Гатауллин, **В. Абрамов**, С.А. Богданова, С.Р. Аллаяров / «КоМУ-2022» : Материалы XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием, Ижевск, 05–09 декабря 2022 года. – Ижевск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр «Уральского отделения Российской академии наук», 2022. – С. 80-81.
11. **Абрамов, В.** Получение устойчивых дисперсий углеродных наночастиц в растворах неионогенных поверхностно-активных веществ / **В. Абрамов**, А.А. Бергилевич, А.Р. Гатауллин, С. А. Богданова, Ю.Г. Галяметдинов / «КоМУ-2022» : Материалы XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием, Ижевск, 05–09 декабря 2022 года. – Ижевск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр «Уральского отделения Российской академии наук», 2022. – С. 14-15.
12. **Абрамов, В.** Влияние неионогенных ПАВ и дисперсий углеродных нанотрубок на структурно-механические свойства полимерных гелей / **В. Абрамов**, А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, Ю.Г. Галяметдинов / «Достижения молодых ученых: химические науки» : Тезисы докладов VII Всероссийской (заочной) молодежной конференции, Уфа, 19–20 мая 2022 года. – Уфа: «Башкирский государственный университет», 2022. – С. 276-278.
13. **Абрамов, В.** Получение и свойства полимерных гелей с фуллеренами и поверхностно-активными веществами / **В. Абрамов**, А.А. Бергилевич, С.А. Богданова // «Молодежь и наука» : Материалы международной научно-практической конференции старшекласников, студентов и аспирантов. В 2-х томах, Нижний Тагил, 27 мая 2022 года. – Нижний Тагил: «Нижнетагильский технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2022. – С. 279-282.
14. **Абрамов, В.** Изучение и оптимизация процессов высвобождения активных компонентов из полимерных гелей, модифицированных углеродными наночастицами / **В. Абрамов**, С.А. Богданова, А.Р. Гатауллин, Ю.Г. Галяметдинов / «Достижения современной науки: биотехнология, химия и фармация (БТХФ-2023)» : Сборник материалов I Всероссийской научно-практической конференции, Симферополь, 25–27 октября 2023 года. – Симферополь: [б. и.], 2023. – С. 109-110.
15. **Абрамов, В.** Полимерные гели, модифицированные углеродными наночастицами и неионогенными ПАВ / **В. Абрамов**, С.А. Богданова, А.Р. Гатауллин, Ю.Г. Галяметдинов / «Поверхностные явления в дисперсных системах» : Всероссийская конференция, посвященная 125-летию со дня рождения выдающегося советского ученого, академика АН СССР Петра Александровича Ребиндера, Москва, 02–06 октября 2023 года. – Москва: «Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук», 2023. – С. 148.

16. **Абрамов, В.** Полимерные гели, модифицированные углеродными наночастицами и неионогенными ПАВ / **В. Абрамов, С.А. Богданова, А.Р. Гатауллин, Ю.Г. Галяметдинов** / VI Международная конференция по коллоидной химии и физико-химической механике (IC CCRSM), Казань, 23–26 октября 2023 года. – Казань: «Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 2023. – С. 121.
17. Гатауллин, А.Р. Получение дисперсий углеродных наночастиц в водных растворах оксиэтилированных высших жирных спиртов для гелевых систем / А.Р. Гатауллин, **В. Абрамов, С.А. Богданова, Ю.Г. Галяметдинов** / «Актуальные проблемы науки о полимерах» : III Всероссийская научная конференция (с международным участием) преподавателей и студентов вузов, Казань, 10–12 апреля 2023 года. – Казань: «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 2023. – С. 223-224.
18. **Абрамов, В.** Получение и исследование полимерных гелей с фуллереном C₆₀ и поверхностно-активными веществами / **В. Абрамов, А.А. Бергилевич, А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, Ю.Г. Галяметдинов** / «Актуальные проблемы науки о полимерах» : III Всероссийская научная конференция (с международным участием) преподавателей и студентов вузов, Казань, 10–12 апреля 2023 года. – Казань: «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 2023. – С. 227-229.
19. **Абрамов, В.** Получение и исследование гелевых систем с фуллереном C₆₀ / **В. Абрамов, А.А. Бергилевич, А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова** / «Жить в XXI веке – 2023»: Сборник конкурсных работ на лучшую научно-исследовательскую работу студентов и аспирантов КНИТУ, посвященный году педагога и наставника. – Красноярск: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-инновационный центр», 2023. – С. 167-171.
20. **Абрамов, В.** Физико-химические, термодинамические и токсикологические свойства гамма-облученного гелеобразующего редко-сшитого акрилового полимера / **В. Абрамов, А.Р. Гатауллин, С.А. Богданова, С.В. Демидов, У.Ю. Аллаярова, Е.Н. Климанова, Т.Е. Сашенкова, Д.В. Мищенко, С.Р. Аллаяров** // «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023» : Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 18–21 сентября 2023 года. – Севастополь: «Севастопольский государственный университет», 2023. – С. 575-579.
21. **Абрамов, В.** Модификация полимерных гелевых систем углеродными наноструктурами / **В. Абрамов, С.А. Богданова, А.Р. Гатауллин, С.Р. Аллаяров, Ю.Г. Галяметдинов** // «Полимеры – 2024» : Сборник тезисов Девятой Всероссийской Каргинской конференции, Москва, 01–03 июля 2024 года. – Москва: «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», 2024. – С.437.
22. **Абрамов, В.** Интенсификация высвобождения лекарственных веществ из полимерных гелей / **В. Абрамов, С.А. Богданова, А.Р. Гатауллин, С.Р. Аллаяров, Ю.Г. Галяметдинов** // «ХимБиоSeasons 2024» : Сборник тезисов докладов X юбилейного всероссийского форума молодых исследователей, Калининград, 15–20 апреля 2024 года. – Калининград: «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», 2024. – С. 197.