

Оригинальная статья / Original article

УДК 53.06

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-2-132-142>

О возможности создания полимерных композитных материалов на основе поливинилового спирта и поливинилпирролидона, допированных углеродными нанотрубками

Л.С. Элбакян¹✉

¹ Волгоградский государственный университет
пр-т Университетский, д. 100, г. Волгоград 400062, Российская Федерация

✉ lusniak-e@yandex.ru

Резюме

Цель – обобщение современных методов получения нанокompозиционных материалов на основе поливинилового спирта и поливинилпирролидона) путем допирования углеродными нанотрубками, а также теоретическое изучение механизмов взаимодействия этих полимеров с однослойными и двухслойными углеродными нанотрубками для создания композитных систем нового поколения с улучшенными свойствами.

Методы. Проведен анализ и систематизация данных научной литературы по технологиям получения нанокompозитов; оригинальные квантово-химические расчеты в рамках теории функционала плотности, выполненные автором для исследования электронной структуры и механизмов взаимодействия компонентов с углеродными нанотрубками (ПВС / УНТ, ПВП / УНТ).

Результаты. Обзор научных работ подтвердил, что добавление сверхмалых количеств углеродными нанотрубками в полимерную матрицу позволяет кардинально изменять свойства полимеров без существенного увеличения себестоимости конечного материала; вычислительные эксперименты с использованием DFT позволили выявить механизмы взаимодействия поливинилового спирта и поливинилпирролидона с углеродными нанотрубками, установить характер сорбции (физическая или химическая), энергетические параметры связывания и степень перераспределения электронной плотности в комплексах, создать новую композитную полимерную систему; многомасштабное моделирование признано ключевым фактором технологического прогресса в органической электронике, позволяющим минимизировать затраты на разработку и прогнозировать стабильность материалов.

Заключение. Проведенное исследование привело к формированию целостных научных представлений о технологиях получения нанокompозитов, а сочетание экспериментальных исследований и квантово-химического моделирования открывает перспективы для развития науки и техники – от базовых химических концепций до практических разработок в области проводящих полимеров и органической электроники.

Ключевые слова: поливиниловый спирт; поливинилпирролидон; углеродные нанотрубки; метод теории функционала плотности; адсорбционное взаимодействие; проводящие свойства.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Элбакян Л.С. О возможности создания полимерных композитных материалов на основе поливинилового спирта и поливинилпирролидона, допированных углеродными нанотрубками // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2026. Т. 16, № 2. С. 132-142. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-2-132-142>.

Поступила в редакцию 09.04.2025

Подписана в печать 25.05.2026

Опубликована 30.06.2026

The possibility of creating polymer composite materials based on polyvinyl alcohol and polyvinylpyrrolidone doped with Carbon nanotubes

Lusine S. Elbakyan¹ ✉

¹ Volgograd State University
100 Universitetskii Ave., Volgograd 400062, Russian Federation

✉ lusniak-e@yandex.ru

Abstract

Purpose – generalization of modern methods for the production of nanocomposite materials based on polyvinyl alcohol and polyvinylpyrrolidone, as well as a theoretical study of the mechanisms of interaction of these polymers with single-layer and double-layer Carbon nanotubes to create a new generation of composite systems with improved properties.

Methods. The analysis and systematization of scientific literature data on nanocomposite production technologies has been carried out; original quantum chemical calculations within the framework of density functional theory performed by the author to study the electronic structure and interaction mechanisms of composite components (PVS, PVP, carbon nanotubes).

Results. A review of scientific papers confirmed that the addition of ultra-small amounts of CNTs to the polymer matrix makes it possible to radically change the properties of polymers without significantly increasing the cost of the final material; computational experiments using DFT have made it possible to identify the mechanisms of interaction of polyvinyl alcohol and polyvinylpyrrolidone with Carbon nanotubes, to establish the nature of sorption (physical or chemical), energy binding parameters and the degree of redistribution of electron density in complexes, to create a new composite polymer system; Multiscale modeling is recognized as a key factor in technological progress in organic electronics, allowing to minimize development costs and predict the stability of materials.

Conclusion. The conducted research has led to the formation of holistic scientific ideas about nanocomposite production technologies, and the combination of experimental research and quantum chemical modeling opens up prospects for the development of science and technology, from basic chemical concepts to practical developments in the field of conductive polymers and organic electronics.

Keywords: polyvinyl alcohol; polyvinylpyrrolidone; Carbon nanotubes; density functional theory method; adsorption interaction; conductive properties.

Conflict of interest: The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Elbakyan L.S. The possibility of creating polymer composite materials based on polyvinyl alcohol and polyvinylpyrrolidone doped with Carbon nanotubes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2026;16(2):132-142 (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-2-132-142>.

Received 09.04.2026

Accepted 25.05.2026

Published 30.06.2026

Введение

В последние десятилетия зафиксирован неуклонный рост интереса к наноструктурам из проводящих полимеров со стороны фундаментальной науки и прикладных отраслей. Наиболее интенсивное

развитие данной области пришлось на последние десять лет, что обусловлено открытием уникальных свойств у наноразмерных форм этих материалов и существенным повышением эффективности устройств на их основе [1].

В центре внимания современных исследований находится создание полимерных композиционных материалов, армированных наноразмерными наполнителями, включая углеродные нанотрубки (УНТ) [2].

Согласно обширным литературным данным, УНТ занимают ключевое место в композитах благодаря уникальному сочетанию термических, механических, электрических и оптических свойств [3]. Интерес к их введению в полимерные матрицы стимулирует разработку полимерных нанокомпозитов и гибридных систем полимер / волокно с исключительными характеристиками. Достижения в этой области считаются одним из важнейших успехов нанонауки для биомедицины, аэрокосмической отрасли, строительства и других отраслей [4].

Наряду с экспериментами по улучшению стабильности и технологичности проводящих полимеров, принципиальное значение приобретает создание теоретических и вычислительных основ, описывающих их поведение в реальных условиях.

Целью данной работы является комплексное экспериментально-теоретическое исследование процессов получения и свойств полимерных нанокомпозитов на основе поливинилового спирта (ПВС) и поливинилпирролидона (ПВП), армированных углеродными нанотрубками. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: систематизация литературных данных по технологическим режимам формирования нанокомпозитов (ультразвуковая обработка, литьё под давлением, выбор растворителя и диспергатора и т. д.); экспериментальное определение проводящих, прочностных и оптических характеристик полученных материалов, а также квантово-химическое моделирование (DFT) электронной структуры и механизмов межфазного взаимодействия в системах ПВС / УНТ и ПВП / УНТ для обоснования наблюдаемых физико-химических закономерностей.

Материалы и методы

Поливиниловый спирт считается одним из крупнотоннажных синтетических полимеров, чье промышленное производство непрерывно осуществляется в мировом масштабе на протяжении почти столетия. Важным преимуществом ПВС является легкость смешивания с наполнителями, что особенно актуально в связи с растущим интересом к полимерным композиционным материалам. ПВС и его производные активно исследуются в качестве эффективных армирующих компонентов для нанокомпозитов, где ценятся высокая прочность, управляемая анизотропия и совместимость с различными матрицами. Несмотря на несомненные достоинства чистый ПВС имеет ряд ограничений, сужающих сферы его применения, особенно в высокотехнологичных областях. Для преодоления этих недостатков и расширения функциональных возможностей ПВС современная наука и технология полимеров предлагают несколько эффективных стратегий модификации.

Одной из основных стратегий является смешивание с другими полимерами (создание полимерных смесей или интерпенерирующих сеток). Добавление таких полимеров, как поливинилпирролидон, желатин, альгинат, хитозан или полиэтиленгликоль, позволяет улучшить гидрофильность, эластичность, биоактивность и снизить склонность к кальцификации. Особенно эффективным признано сочетание ПВС с ПВП: эти полимеры образуют прочные водородные связи между гидроксильными группами ПВС-ПВА и карбоксильными группами ПВП, что приводит к формированию гомогенных композитов с улучшенными механическими и набухающими свойствами.

Еще одна стратегия – введение нанодобавок (углеродных нанотрубок, наночастиц оксида цинка, серебра, графена и др.). Нанодобавки придают композиту дополнительные функциональные свойства: электропроводность, антибактериальную

активность, повышенную прочность. Так, композиты ПВС с УНТ исследуются в качестве чувствительных элементов датчиков и проводящих покрытий, а добавление наночастиц серебра делает гидрогели ПВС эффективными антибактериальными раневыми повязками.

Часто применяют комбинацию этих подходов. Таким образом, благодаря широким возможностям модификации, полувекковой промышленный опыт и возобновившийся в последние десятилетия интерес со стороны биомедицины и нанотехнологий обеспечивают ПВС статус одного из самых востребованных и перспективных синтетических полимеров современности [5].

Поливинилпирролидон представляет собой синтетический водорастворимый полимер, синтезируемый полимеризацией винилпирролидона. Благодаря комплексу уникальных свойств данный полимер находит широкое применение в различных областях. Вместе с тем сферы его применения ограничиваются низкими механическими и диэлектрическими характеристиками, а также высокой гидрофильностью [6]. Решение указанной проблемы видится в модификации полимерной матрицы путем введения подходящего проводящего армирующего наполнителя, причем электропроводность формируемых композитов определяется проводимостью используемых наночастиц, степенью их диспергирования и характером взаимодействия с полимером.

В работе проведен углубленный анализ и систематизация данных современной научной литературы, посвященных технологическим подходам к получению нанокомпозиционных материалов на основе полимерных матриц. Особое внимание уделено методам, обеспечивающим равномерное распределение нанонаполнителя и стабильность свойств, включая: ультразвуковую обработку суспензий и растворов при заранее подобранных режимах (частота, интенсивность, длительность, тип жидкой среды), позволяющую дезагре-

гировать наночастицы и инициировать физико-химические процессы на межфазной границе; литье под давлением как метод формирования готовых изделий с контролируемой ориентацией наполнителя и воспроизводимой структурой и т. д.

Помимо практических экспериментов, направленных на повышение стабильности и улучшение технологических свойств проводящих полимеров, критически важной задачей становится формирование прочного теоретического и вычислительного фундамента. Такой фундамент необходим для адекватного описания физико-химического поведения этих материалов не в идеализированных, а в реальных условиях эксплуатации.

Перспективный метод оценки эффективности нанонаполнителей основан на количественном определении взаимодействия между нанонаполнителем и полимерной матрицей через анализ электронно-энергетических параметров процесса. Это не только повышает эффективность, но и сводит к минимуму необходимость в натурных испытаниях. Качество адсорбционного взаимодействия определяет стабильность формируемого комплекса «Полимер – УНТ». Расчёты в рамках теории функционала плотности для твёрдотельных систем дают результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными, что делает этот метод пригодным для изучения взаимодействия между различными типами нанонаполнителей и полимерами.

Автором самостоятельно выполнены оригинальные квантово-химические расчёты в рамках теории функционала плотности (DFT), позволившие исследовать электронное строение и механизмы межмолекулярного взаимодействия на атомарном уровне. Выбран оптимальный функционал и базисный набор в рамках метода DFT, который определялся совокупностью факторов: целями исследования, размером и сложностью системы, типом изучаемых взаимодействий, доступными вычислительными ресурсами и др.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальное исследование композитных материалов на основе поливинилового спирта, поливинилпирролидона, армированных нанонаполнителями

В последние годы значительное внимание уделяется композитам на основе ПВС, модифицированным углеродными нанотрубками. Ключевым фактором получения композитов с улучшенными свойствами является выбор метода диспергирования наночастиц в полимерной матрице. Так, в работе [7] предложен метод диспергирования УНТ в сильной кислоте с ультразвуковой обработкой. Это позволило получить высококонцентрированные и равномерные дисперсии. Для нанокompозитных пленок ПВС с 9,1 мас. % МУНТ достигнуто увеличение модуля Юнга в 4,5 раза, прочности на разрыв – в 2,7 раза, ударной вязкости – в 4,1 раза по сравнению с чистым ПВС.

В [8] исследованы механические свойства композитов ПВС / УНТ. Равномерное диспергирование нанотрубок в полимерной матрице обеспечило повышение прочности и жесткости при сохранении высокой деформации до разрушения (до 23,3%) и ударной вязкости (до 125 Дж·г⁻¹).

Также комплекс ПВС / УНТ был использован в качестве гибридного модификатора для цементного раствора [9]. Сравнивались эталонный образец, цемент с добавлением УНТ и цемент с комплексом ПВС / УНТ. Введение только УНТ повысило прочность на сжатие / изгиб на 33–42%. Однако наилучшие результаты достигнуты при совместном использовании 0,5% УНТ и 1% ПВС: прирост прочности составил 53–101% по сравнению с эталоном. Авторы объясняют это тем, что молекулы ПВС препятствуют агломерации УНТ: во-первых, гель ПВС создает пространственный барьер, ослабляя силы Ван-дер-Ваальса между наночастицами; во-вторых, он стабилизирует дисперсию нанотрубок при смешивании с цементом.

Поливиниловый спирт благодаря высокой диэлектрической прочности и способности накапливать заряд привлекает все большее внимание в электронной промышленности. Введение углеродных нанотрубок в матрицу ПВС позволяет получать проводящие полимерные нанокомпозиты с уникальными свойствами, перспективные в качестве многофункциональных материалов.

Авторами статьи [10] композиты ПВС / УНТ получены методом вакуумной инфльтрации с последующим горячим прессованием. Формирование плотных сетей из многослойных УНТ обеспечило улучшение тепловых, электрических и электромагнитных экранирующих свойств. По сравнению с чистым ПВС теплопроводность возросла с 1,394 до 2,473 Вт/(м·К), электропроводность – с 463,5 до 714,3 См/м, а эффективность экранирования электромагнитных помех достигла 27,08 дБ. Установлено, что одно- и двуслойные УНТ превосходят МУНТ по тепло- и электропроводности. Предложенный метод получения тонких листов ПВС / УНТ рассматривается как экономически эффективный подход к созданию гибких многофункциональных материалов.

В [11] было исследовано влияние молекулярной массы ПВП (с использованием четырех различных молекулярных масс) на способность наматывать различные структуры из нанотрубок (трех различных структур) и его влияние на диспергируемость нанотрубок в полимерной матрице. Было замечено, что нанотрубки различной структуры демонстрируют стабильные дисперсии в полимерной матрице, несмотря на функционализацию ПВП различной молекулярной массы, но ключевым моментом является достижение эффективной дисперсии нанотрубок при низких концентрациях ПВП. Зафиксировано повышение теплопроводности в композитах на основе МУНТ и ОУНТ, получаемых дуговым разрядом с низкомолекулярным РVP на 147% и 53% соответственно, и для композитов на основе ОУНТ, полученных каталитическим химическим осаждением с высокомолекулярным РVP – на 25% по сравнению с композитами без ПВП.

В ряде работ рассматривается возможность получения сополимеров на основе ПВП и ПВС. Так, в [12] подчеркивают биосовместимость и стабильность гидрогелей, изготовленных из отдельных полимеров – ПВС, ПВП и хитозана, подтверждая их потенциал для биомедицинского применения. Авторы заявляют, что потенциальными областями применения подобных материалов являются различные фармацевтические и биомедицинские цели, такие как микроиглы, вставки, имплантаты и устройства на основе гидрогелей ПВС, ПВП и хитозана.

Также поливиниловые спиртовые гидрогели считаются высокогидратированными трёхмерными полимерными сетками, имитирующими внеклеточный матрикс живых тканей. Это обуславливает их потенциал в адресной доставке лекарств, хрящевой регенерации и тканевой инженерии. Однако высокая степень гидратации усложняет создание гидрогелей, особенно изотропных, с комплексом оптимальных механических характеристик. В [13] представлен новый подход к созданию мультимасштабного ПВС-гидрогеля, упрочнённого за счёт химического сшивания с ПВП и самособирающимися нановолокнами ароматического полиамида. Созданные гидрогели будут сочетать высокое содержание воды ($\approx 80\%$) с рекордными для ПВС-материалов показателями: предел прочности на растяжение $\sim 9,7$ МПа, удлинение при разрыве $\sim 585\%$, вязкость $\sim 31,84$ МДж/м³ и прочность на сжатие $\sim 10,6$ МПа, что сопоставимо с анизотропными аналогами. Авторы заявляют о перспективности использования полученного гидрогеля для замещения биологических тканей, гибкой носимой электроники и имплантируемых сенсоров.

В [14] с ростом содержания УНТ до 1,5 мас. % жесткость композитов ПВС-ПВП возрастает, а относительное удлинение снижается из-за связывания полимерной матрицы с нанотрубками, что ограничивает гибкость. Перенос носителей за-

ряда через барьеры между локализованными состояниями существенно зависит от режима подачи образца. Увеличение доли многослойных УНТ повышает электропроводность на переменном токе вследствие формирования дополнительных локализованных состояний или уменьшения потенциальных барьеров. Авторами установлено, что проводимость и диэлектрические характеристики образцов сополимера сильно зависят от частоты и концентрации добавленных многостенных углеродных нанотрубок

В [15] разработаны и проанализированы гибкие диэлектрические конденсаторы на основе полимерных нанокомпозитов, где матрицей служит смесь ПВС-ПВП, а наполнителями – многослойные углеродные нанотрубки и наночастицы золота. Пленки ПВС/ПВП с добавками МУНТ и наночастицами золота получены методом литья. Проведен детальный анализ их электрических и диэлектрических свойств. Рентгеноструктурный анализ показал снижение кристалличности с 55% (чистая смесь) до 37% (композит с 1,6 мас. % наполнителя), что свидетельствует о росте аморфной фазы и улучшении подвижности ионов. Прямая и непрямая оптическая запрещенная зона уменьшилась с 5,68 эВ и 4,84 эВ (чистая смесь) до 4,26 и 5,35 эВ соответственно (1,6 мас. %).

Теоретическое моделирование композитной системы поливинилового спирта, поливинилпирролидона и углеродных нанотрубок

С целью выбора оптимального базисного набора для квантово-химического исследования адсорбционного взаимодействия и электронной структуры в системах на основе углеродных нанотрубок с фрагментами рассматриваемых полимеров была выполнена серия тестовых расчётов с различными базисами и проведён анализ их влияния на получаемые результаты. Теоретические расчёты показали, что функционал B3LYP является наибо-

лее предпочтительным для подобных систем, поскольку полученные с его помощью результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными и теоретическими расчётами других авторов [16].

В [17] нами проведены теоретические исследования взаимодействия структур-

ной единицы полимера поливинилового спирта, а также фрагментом полимера $[-CH_2CH(OH)-]_{15}$ с однослойными углеродными нанотрубками (рис. 1). Подобные исследования также проведены для двуслойных углеродных нанотрубок [18].

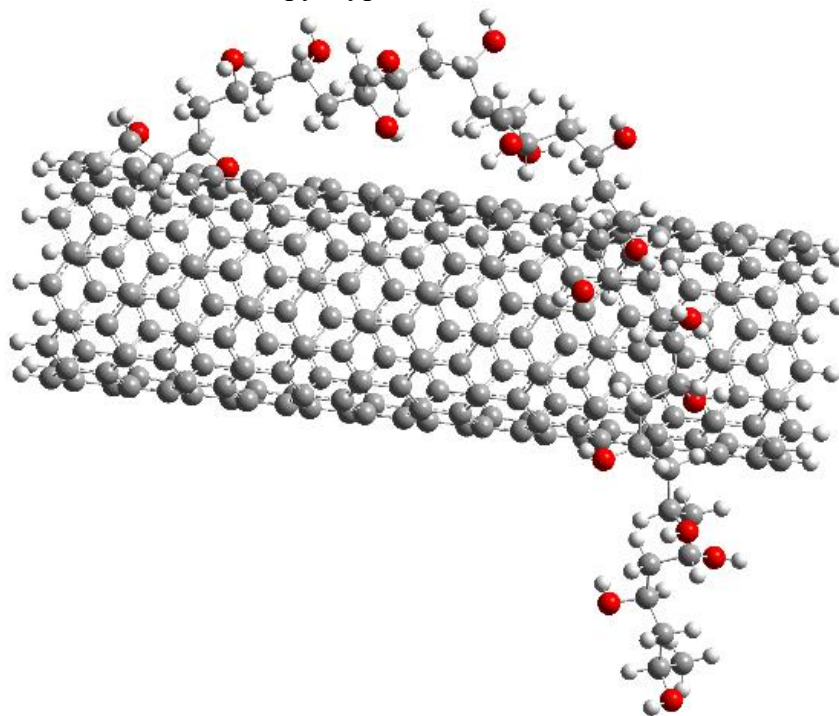


Рис. 1. Взаимодействие фрагмента полимера ПВС с УНТ на примере нанотрубки типа (10,5)

Fig. 1. Interaction of a fragment of a PVA polymer with a CNT using the example nanotube type of (10,5)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что выбранные углеродные нанотрубки могут образовывать комплексы с фрагментом ПВС, содержащим несколько структурных единиц, при этом образующиеся комплексы стабильны. Значения $E_{ад}$ и соответствующие расстояния свидетельствуют о факте физического взаимодействия (адсорбции) фрагмента полимера ПВС с кластером УНТ.

Итак, установленный факт взаимодействия фрагмента полимера ПВС с поверхностью одно- и двуслойных углеродных нанотрубок объясняет механизм создания композитного полимерного материала на основе поливинилового спирта, армированного нанотрубками, при физическом взаимодействии полимера с УНТ, приводящем к созданию стабильных комплексов. Причем взаимодействие с одно-

слойными УНТ оказалось энергетически более выгодным.

В [19] выполнен анализ электронно-энергетического строения комплексов, образованных одно- / двуслойными УНТ с фрагментом ПВС, который позволил классифицировать созданный нанокомпозит как полупроводник, отличающего его от исходного полимера с диэлектрической проводимостью. Эти теоретические результаты хорошо согласуются с результатами экспериментальных работ, связанных с изучением проводящих свойств композиционных материалов [10].

Для доказательства возможности создания комплекса ПВП / УНТ нами смоделирована такая система и выполнены теоретические расчеты взаимодействия фрагмента ПВП и УНТ [18]. Установлено, что взаимодействие фрагмента полимера

ПВП с одно- или двуслойными УНТ с энергетической точки зрения не имеет предпочтений и оба взаимодействия реализуются на расстоянии $3,0 \text{ \AA}$, что соответствует случаю физической адсорбции. Таким образом, можно заключить, что для создания композита ПВП – УНТ неприципиально, сколько слоев содержит углеродная нанотрубка.

В [20] выполнен анализ электронно-энергетического строения комплексов, образованных одно- / двуслойными УНТ с фрагментом поливинилпирролидона $[\text{C}_6\text{H}_9\text{NO}]_{15}$. Анализ ширины запрещенной щели ΔE_g комплексов $[\text{C}_6\text{H}_9\text{NO}]_{15}$ – УНТ обнаружил, что системы по типу проводимости представляют собой полупроводники. Таким образом, введение УНТ в полимерную матрицу ПВП, являющихся по типу проводимости диэлектриками, приводит к появлению свойств полупроводника у полученных композитов.

Итак, полученные результаты позволяют прогнозировать возможность создания композитов на основе поливинилпирролидона, допированных углеродными нанотрубками, которые могут быть использованы в качестве материалов приборов микро- и нанoeлектроники, обладающих свойствами узкозонных полупроводников. Так, подобные биосовместимые полимеры

могут применяться для мониторинга состояния живых организмов с использованием неинвазивных методов электроэнцефалографии, электрокардиографии и сенсорики.

Вывод

1. Проведённый обзор современных исследований однозначно свидетельствует о перспективности создания полимерных композитов на основе смеси поливинилового спирта и поливинилпирролидона, модифицированных углеродными нанотрубками. Такие композиты сочетают биосовместимость, гидрофильность и хорошие плёнообразующие свойства исходной полимерной матрицы с уникальными электрофизическими и механическими характеристиками, вносимыми нанотрубками.

2. На основе разработанных и построенных моделей нанокompозитных комплексов полимер – УНТ установлено влияние УНТ на проводящие свойства исследуемых систем. Углеродные нанотрубки, вводимые в диэлектрическую полимерную матрицу, приводят к изменению электронно-энергетического строения создаваемых нанокompозитных комплексов и появлению полупроводящего состояния полимерного композитного материала.

Список литературы

1. Иноземцев С.С., Королёв Е.В. Техничко-экономическая эффективность применения наномодифицированного наполнителя для асфальтобетона // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13, № 4(115). С. 536-543.
2. Малая Е.В., Саввин А.И. Композиционные материалы в современной авиации // Актуальные исследования. 2022. № 49(128), ч. 1. С. 6-9.
3. Soni S.K., Thomas B., Kar V.R. A comprehensive review on CNTs and CNT-reinforced composites: syntheses, characteristics and applications // Materials Today Communications. 2020. Vol. 25, is. 80. P. 101546. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101546>.
4. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V. Polypropylene modified with carbon nanomaterials: structure, properties and application possibilities (a review) // Polymers. 2025. Vol. 17, no. 4. P. 517. <https://doi.org/10.3390/polym17040517>.
5. Исследование полимерных нитей с nanoостровковой топологией наногетероструктур алюминия / П.П. Мальцев, А.А. Ганжа, В.Ю. Павлов, А.О. Михалев, А.И. Козлитин, В.В. Сарайкин // Нано- и микросистемная техника. 2023. Т. 25, № 5. С. 203-209. <https://doi.org/10.17587/nmst.25.203-20>.

6. Malka E., Margel S. Engineering of PVA/PVP hydrogels for agricultural applications // *Gels*. 2023. Vol. 9, is. 11. P. 895. <https://doi.org/10.3390/gels9110895>.
7. Enhanced mechanical properties and morphological characterizations of poly(vinyl alcohol)-carbon nanotube composite films / W. Chen, X. Tao, P. Xue, X. Cheng // *Applied Surface Science*. 2005. Vol. 252, is. 5. P. 1404-1409. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.138>.
8. Interfacially-grafted single-walled carbon nanotube/poly(vinyl alcohol) composite fibers / W.J. Lee, A.J. Clancy, J.C. Fernández-Toribio, X. Cheng // *Carbon*. 2019. Vol. 146. P. 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.01.075>.
9. Synergistic effect of carbon nanotubes and polyvinyl alcohol on the mechanical performance and microstructure of cement mortar / J. Fan, S. Deng, G. Li, J. Li, J. Zhang // *Nanotechnology Reviews*. 2024. Vol. 13. P. 202400028. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2024-0028>.
10. Multi-functional properties of MWCNT/PVA buckypapers fabricated by vacuum filtration combined with hot press: thermal, electrical and electromagnetic Shielding / L. Cao, Y. Liu, J. Wang, Y. Pan, Y. Zhang, N. Wang [et al.] // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, is. 12. P. 2503. <https://doi.org/10.3390/nano10122503>.
11. Namasivayam M., Andersson M.R., Shapter J.G. A comparative study on the role of polyvinylpyrrolidone molecular weight on the functionalization of various Carbon nanotubes and their composites // *Polymers*. 2021. Vol. 13, is. 15. P. 2447. <https://doi.org/10.3390/polym13152447>.
12. Formulation and evaluation of PVA-based composite hydrogels: physicochemical, leachables, and in vitro immunogenicity studies / A. Himawan, A. Korelidou, A.M. Pérez-Moreno, J.L. Paris, J. Dominguez-Robles, L.K. Vora [et al.] // *Journal of Materials Chemistry B*. 2025. Vol. 13. P. 2431-2445. <https://doi.org/10.1039/D4TB02181A>.
13. Mahmood H.S., Habubi N.F. Physical properties of PVA:PVP blend reinforced by MWCNT // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2322. P. 012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2322/1/012068>.
14. Strong, tough, and biocompatible poly(vinyl alcohol)-poly(vinylpyrrolidone) multiscale network hydrogels reinforced by aramid nanofibers / D. Ji, Z. Zhang, J. Sun, W. Cao, Z. Wang, X.I. Wang // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024. Vol. 16, is. 16. P. 20693-20704. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03236>.
15. Preparation and investigation of structural, optical, and dielectric properties of PVA/PVP blend films boosted by MWCNTs/AuNPs for dielectric capacitor applications / A. Saeed, A.M. Alghamdi, M.A. Alenizi, R. Alwafi, G.M. Asnag, E. Alzahrani [et al.] // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2024. Vol. 9, is. 4. P. 100802. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2024.100802>.
16. Dinadayalane T.C., Stone L.J. Wales defects with two different orientations in (5, 5) single-walled carbon nanotubes: a theoretical study // *Chemical Physics Letters*. 2007. Vol. 434. P. 86-91.
17. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V., Hayrapetyan D.B. Nanocomposite material based on polyvinyl alcohol modified with carbon nanotubes: mechanism of formation and electronic energy structure // *Journal of Composites Science*. 2024. Vol. 8, is. 2. P.54 <https://doi.org/10.3390/jcs8020054>.
18. Элбакян Л.С., Запороцкова И.В. Исследование проводящих свойств композитных полимерных материалов на основе поливинилпирролидона, допированных одно- и двухслойными нанотрубками // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика*. 2025. Т.25, вып. 4. С. 495-504. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-495-504>.

19. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V. Investigation of the conductive properties of composite polymer materials based on polyvinyl alcohol doped with single- and double-walled carbon nanotubes // *Modern Electronic materials*. 2025. Vol. 11, is. 3. P. 147-153. <https://doi.org/10.3897/j.moem.11.3.150265>.

20. Bond lengths and diameters of armchair single wall carbon nanotubes / M.F. Budyka, T.S. Zyubina, A.G. Ryabenko, S.H. Lin, A.M. Mebel // *Chemical Physics Letters*. 2005. Vol. 407, no. 4-6. P. 266-271. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2005.03.088>.

References

1. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Technical and economic efficiency of using nanomodified filler for asphalt concrete. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*. 2018;13(4):536-543. (In Russ.)

2. Malaya E.V., Savvin A.I. Composite materials in modern aviation. *Aktual'nye issledovaniya = Current Research*. 2022;(49):6-9. (In Russ.)

3. Soni S.K., Thomas B., Kar V.R. A comprehensive review on CNTs and CNT-reinforced composites: syntheses, characteristics and applications. *Materials Today Communications*. 2020;25(80):101546. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101546>.

4. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V. Polypropylene modified with carbon nanomaterials: structure, properties and application possibilities (a review). *Polymers*. 2025;17(4):517. <https://doi.org/10.3390/polym17040517>.

5. Maltsev P.P., Ganzha A.A., Pavlov V.Yu., Michalev A.O., Kozlitin A.I., Sarajkin V.V. A study of polymer threads with nanoisland topologies of aluminum nanoheterostructures. *nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2023;25(5):203-209. (In Russ.) <https://doi.org/10.17587/nmst.25.203-20>.

6. Malka E., Margel S. Engineering of PVA/PVP hydrogels for agricultural applications. *Gels*. 2023;9(11):895 <https://doi.org/10.3390/gels9110895>.

7. Chen W., Tao X., Xue P., Cheng X. Enhanced mechanical properties and morphological characterizations of poly(vinyl alcohol)-carbon nanotube composite films. *Applied Surface Science*. 2005;252(5):1404-1409. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.138>.

8. Lee W.J., Clancy A.J., Fernández-Toribio J.C., Cheng X. Interfacially-grafted single-walled Carbon nanotube/poly(vinyl alcohol) composite fibers. *Carbon*. 2019;146:162-171. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.01.075>.

9. Fan J., Deng S., Li G., Li J., Zhang J. Synergistic effect of carbon nanotubes and polyvinyl alcohol on the mechanical performance and microstructure of cement mortar. *Nanotechnology Reviews*. 2024;13:202400028. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2024-0028>.

10. Cao L., Liu Y., Wang J., Pan Y., Zhang Y., Wang N., et al. Multi-functional properties of mwcnt/pva buckypapers fabricated by vacuum filtration combined with hot press: thermal, electrical and electromagnetic shielding. *Nanomaterials*. 2020;10(12):2503. <https://doi.org/10.3390/nano10122503>.

11. Namasivayam M., Andersson M.R., Shapter J.G. A comparative study on the role of polyvinylpyrrolidone molecular weight on the functionalization of various carbon nanotubes and their composites. *Polymers*. 2021;13(15):2447. <https://doi.org/10.3390/polym13152447>.

12. Himawan A., Korelidou A., Pérez-Moreno A.M., Paris J.L., Dominguez-Robles J., Vora L.K., et al. Formulation and evaluation of PVA-based composite hydrogels: physicochemical, leachables, and in vitro immunogenicity studies. *Journal of Materials Chemistry B*. 2025;13:2431-2445. <https://doi.org/10.1039/D4TB02181A>.

13. Mahmood H.S., Habubi N.F. Physical properties of PVA:PVP blend reinforced by MWCNT. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2322:012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2322/1/012068>.

14. Ji D., Zhang Z., Sun J., Cao W., Wang Z., Wang X.I. Strong, tough, and biocompatible poly(vinyl alcohol)-poly(vinylpyrrolidone) multiscale network hydrogels reinforced by aramid nanofibers. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024;16(16):20693-20704. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03236>.
15. Saeed A., Alghamdi A.M., Alenizi M. A., Alwafi R., Asnag G.M., Alzahrani E., et al. Preparation and investigation of structural, optical, and dielectric properties of PVA/PVP blend films boosted by MWCNTs/AuNPs for dielectric capacitor applications. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2024;9(4):00802. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2024.100802>.
16. Dinadayalane T.C., Stone L.J. Wales defects with two different orientations in (5, 5) single-walled carbon nanotubes: a theoretical study. *Chemical Physics Letters*. 2007;434:86-91.
17. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V., Hayrapetyan D.B. Nanocomposite material based on polyvinyl alcohol modified with carbon nanotubes: mechanism of formation and electronic energy structure. *Journal of Composites Science*. 2024;8(2):54. <https://doi.org/10.3390/jcs8020054>.
18. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V. Investigation of the conductive properties of composite polymer materials based on polyvinylpyrrolidone doped with single and double-walled nanotubes. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya fizika = Izvestiya of Saratov university. Physics*. 2025;25(4):495-504. (In Russ.) <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-495-504>.
19. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V. Investigation of the conductive properties of composite polymer materials based on polyvinyl alcohol doped with single- and double-walled Carbon nanotubes. *Modern Electronic materials*. 2025;11(3):147-153. <https://doi.org/10.3897/j.moem.11.3.150265>.
20. Budyka M.F., Zyubina T.S., Ryabenko A.G., Lin S.H., Mebel A.M. Bond lengths and diameters of armchair single wall Carbon nanotubes. *Chemical Physics Letters*. 2005;407:266-271. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2005.03.088>.

Информация об авторе / Information about the Author

Элбакян Лусине Самвеловна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения, Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация, e-mail: lusniak-e@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-1014-240X

Lusine S. Elbakyan, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of Forensic Examination and Physical Materials Department, Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: lusniak-e@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-1014-240X