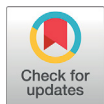


**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ /
INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.662-675>EDN: <https://elibrary.ru/zezgoy>

УДК / UDK 544.7-036.6:542.943

*Оригинальная статья / Original article***Повышение диспергируемости многостенных
углеродных нанотрубок и их равномерное
распределение в полимерной матрице
при мягкой кислотной обработке****С. М. Хантимеров¹✉, Р. Р. Гарипов¹, И. А. Емельянов²,
Н. М. Сулейманов¹**¹*КФТИ – обособленное структурное подразделение
ФИЦ КазНЦ РАН,**г. Казань, Российская Федерация, <https://ror.org/026c02f25>*²*Казанский (Приволжский) федеральный университет,**г. Казань, Российская Федерация, <https://ror.org/05256ym39>*✉ khantim@mail.ru*Аннотация*

Введение. Полимерные композиты, модифицированные углеродными нанотрубками, позволяют создавать материалы с улучшенными механическими, электрическими и теплопроводящими свойствами. Однако широкое применение таких материалов ограничено неравномерностью распределения нанотрубок в полимерной матрице и их склонностью к агрегации. Для решения данной проблемы может применяться химическая функционализация углеродных нанотрубок, в частности, кислотная обработка. Оценка ее влияния на распределение нанотрубок в полимерной матрице позволит при масштабировании технологии снизить затраты на производство мастер-батчей и изделий на основе полимерных композиционных материалов.

Цель исследования. Разработка щадящего режима функционализации многостенных углеродных нанотрубок, обеспечивающего получение полимерных композиционных материалов с равномерным распределением наполнителя.

Материалы и методы. Объектом выступили многостенные углеродные нанотрубки марки LUCAN BT 1001M в исходном и обработанном (в смеси азотной и серной кислот) виде. Удельная площадь поверхности образцов определялась адсорбционными методами и анализировалась методом Брунауэра – Эммета – Теллера. Исследование распределения исходных и обработанных многостенных углеродных нанотрубок осуществлялось методом оптической микроскопии.

Результаты исследования. Удельная поверхность многостенных углеродных нанотрубок увеличивается после их функционализации. Их обработка в щадящем режиме позволяет получать устойчивые водные дисперсии и вводить их в полимерные среды, достигая равномерного распределения наполнителя.

© Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Емельянов И.А., Сулейманов Н.М., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Закключение. Для практического применения углеродных нанотрубок необходима их предварительная обработка для функционализации. Щадящая обработка показала свою эффективность при введении и распределении нанотрубок в полимерной матрице для получения композиционных материалов.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ), функционализация, полимеры, композиционные материалы, жидкофазное окисление, полимерная матрица, полиметилметакрилат

Финансирование: работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан № 88/2024-ПД, 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».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Емельянов И.А., Сулейманов Н.М. Повышение диспергируемости многостенных углеродных нанотрубок и их равномерное распределение в полимерной матрице при мягкой кислотной обработке. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):662–675. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.662-675>

Increasing the Dispersibility of Multi-walled Carbon Nanotubes and Their Uniform Distribution in the Polymer Matrix Using Soft Acid Treatment

S. M. Khantimerov^{a✉}, R. R. Garipov^a, I. A. Emelyanov^b,
N. M. Suleimanov^a

^aZPTI – Subdivision of FIC KazanSC of RAS,
Kazan, Russian Federation, <https://ror.org/026c02f25>

^bKazan (Volga region) Federal Univtrstiy,
Kazan, Russian Federation, <https://ror.org/05256ym39>

✉ khantim@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern polymer composites modified with carbon nanotubes open up new possibilities for creating materials with improved mechanical, electrical and thermal conductivity properties. The key problem limiting wide application of these materials is the uneven distribution of nanotubes in the polymer matrix and their tendency to aggregate. To solve this problem, there can be used chemical functionalization of carbon nanotubes, in particular acid treatment. When scaling up the technology, evaluating the effect of this treatment on the distribution of carbon nanotubes in a polymer matrix will allow reducing the cost of manufacturing masterbatches and products based on polymer composite materials.

Aim of the Study. The study is aimed at developing a gentle carbon nanotubes functionalization regime that ensures the production of polymer composite materials with a uniform filler distribution.

Materials and Methods. The object of the study was multi-walled carbon nanotubes LUCAN BT 1001M in their original and treated (with a mixture of nitric and sulfuric acids) forms. The specific surface area of the samples was determined by the adsorption

methods and analyzed with the use of the Brunauer–Emmett–Teller method. The distribution of the original and treated multi-walled carbon nanotubes was investigated by the optical microscopy method.

Results. It has been found that the specific surface area of multi-walled carbon nanotubes increases after functionalization. It has shown that the treatment of carbon nanotubes in a gentle mode makes it possible to obtain stable aqueous dispersions and distribute them uniformly in a polymer matrix.

Conclusion. The results obtained indicate the need for a functionalization procedure of carbon nanotubes for their practical application and indicate the effectiveness of a gentle nanotube treatment regime for obtaining composite materials with uniformly distributed filler.

Keywords: carbon nanotubes, functionalization, polymers, composite materials, liquid-phase oxidation, polymer matrix, polymethylmethacrylate

Finding: The work was supported by a grant from the Academy of Sciences № 88/2024-PD of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan “Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan”.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Khantimerov S. M., Garipov R.R., Emelyanov I.A., Suleimanov N.M. Increasing the Dispersibility of Multi-walled Carbon Nanotubes and Their Uniform Distribution in the Polymer Matrix Using Soft Acid Treatment. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):662–675. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.662-675>

ВВЕДЕНИЕ

Углеродные нанотрубки (УНТ) демонстрируют исключительный потенциал для создания нового поколения композитных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками [1; 2]. Благодаря своим уникальным свойствам УНТ имеют перспективы применения в области медицины [3; 4], материаловедения [5], энергетики [6], экологии [7], машино- и приборостроения [8]. Большой интерес представляет их применение в строительной индустрии [9], где они могут значительно повысить прочность, долговечность и функциональные свойства строительных материалов. В полимерных композитах УНТ выступают в качестве многофункционального наполнителя, способного одновременно улучшать механическую прочность, теплопроводность и электропроводность материала. Полимерные электропроводящие композиционные материалы в зависимости от концентрации нанотрубок в полимерной матрице позволяют создавать антистатические, проводящие и экранирующие покрытия, а также конструкции, востребованные в авиационной и автомобильной промышленности, химическом производстве, приборостроении и др. [10–12].

Практическое применение композиционных материалов на основе полимеров и УНТ затрудняется тем, что углеродные нанотрубки в исходном виде представляют собой крупные агломераты в виде жгутов и клубков, состоящих из большого числа скрученных нанотрубок (за исключением специальных методик синтеза, которые позволяют синтезировать индивидуальные и выровненные УНТ [13]).

Разрушение таких агломератов может быть достигнуто путем ультразвуковой обработки, однако со временем нанотрубки могут вновь агломерировать из-за высокой поверхностной энергии [14]. Одним из широко используемых подходов, применяемых для решения проблемы агломерирования УНТ, является химическая модификация поверхности нанотрубок с использованием кислот или щелочей для формирования кислородсодержащих функциональных групп на их поверхности [15–17]. Благодаря такой обработке УНТ могут более равномерно распределяться в полимерной матрице за счет увеличения энергии их взаимодействия и снижения энергии взаимодействия УНТ друг с другом. Кроме того, в исходном виде углеродные нанотрубки содержат примеси в виде разупорядоченного углерода и остаточных частиц металлического катализатора, которые могут быть удалены в процессе химической обработки. Эта процедура обычно представляет собой длительный процесс кипячения УНТ в реакционной смеси [18–19]. Однако химическая обработка в сильных окислителях в течение длительного времени может приводить к изменению (ухудшению) электрофизических и физико-механических свойств углеродных нанотрубок из-за появления структурных дефектов [20–21].

Поэтому целью исследования является разработка методики щадящей термохимической обработки многостенных углеродных нанотрубок LUCAN BT 1001M компании LG Chem, которая позволит получать функционализированные углеродные нанотрубки и полимерные композиционные материалы на основе полиметилметакрилата с равномерным распределением наполнителя.

Для достижения поставленной цели необходимо оценить: существующие методики химической обработки углеродных нанотрубок; эффективность методики обработки таких нанотрубок при снижении количества времени и температуры обработки; возможность применения разработанной методики для получения полимерных композиционных материалов с равномерно распределенным наполнителем на примере полиметилметакрилата.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В основном для очистки и функционализации УНТ применяются смеси на основе азотной [22; 23] и серной кислот или их смеси [24–26]. Кроме этого встречаются методики, основанные на применении щелочей [27].

Исследователи из Ирана предложили осуществлять очистку и функционализацию одностенных углеродных нанотрубок путем обработки в NaOH в течение 6 часов и последующей обработке в HNO_3 в течение 1 часа при температуре $100\text{ }^\circ\text{C}$ [22]. Полученные результаты демонстрируют эффективность такой обработки с точки зрения удаления примесей. Однако не была рассмотрена дисперсность углеродных нанотрубок и возможность их распределения в различных средах.

В свою очередь, N. Sezer и M. Koç изучили эффективность обработки многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в различных составах на основе азотной кислоты (10 M HNO_3 , 15 M HNO_3 , $10\text{ M HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$, $15\text{ M HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$) [23]. Соотношение МУНТ к окислителю составляло 1 мг на 1 мл раствора. Обработка проводилась в течение 5 часов при температуре $120\text{ }^\circ\text{C}$. Проверка устойчивости водных дисперсий, обработанных МУНТ, показала, что исходные образцы

и образцы, обработанные в 10 М HNO_3 , выпали в осадок, а образцы, обработанные в 15 М HNO_3 и 10 М $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$, сохранили свою устойчивость даже после 3 месяцев.

Отечественные ученые для обработки УНТ типа Таунит также использовали азотную кислоту и смесь серной и азотной кислот [24]. Однако длительность кипячения составила лишь 10 минут, и соотношение УНТ к кислотам отличалось. Так, в случае азотной кислоты для обработки 20–100 мг УНТ было использовано 10 мл кислоты, а в случае со смесью кислот на 20 мг УНТ – 10 мл окислителя. Кроме того, было исследовано влияние термического окисления МУНТ на воздухе при температуре 230 °С. Степень функционализации оценивалась методом дифференциально-термического анализа. Был сделан вывод о том, что обработка УНТ в азотной кислоте позволяет формировать на поверхности нанотрубок большее количество функциональных групп по сравнению с двумя другими подходами. Также было установлено, что такая обработка позволяет повысить термическую устойчивость нанотрубок на 100 °С. Продемонстрирована возможность применения обработанных УНТ для создания мембранно-электродных блоков для электрохимических преобразователей энергии, однако не показана их диспергируемость [25; 26].

Наряду с преимуществами (одновременная очистка и функционализация углеродных нанотрубок) химическая функционализация имеет и недостатки, связанные с появлением дефектов в углеродных нанотрубках и ухудшением их свойств. Так, например, учеными из физико-технического института им. А. Ф. Иоффе была исследована электропроводность образцов углеродных нанотрубок, допированных азотом после кипячения в 30 % (масс.) HCl и функционализации путем кипячения в 68 % (масс.) HNO_3 в течение 0,5–12 ч [27]. Они показали, что с ростом времени обработки увеличивается сопротивление УНТ. Также было исследовано влияние смеси концентрированных азотной и серной кислот на растворение аморфного углерода и МУНТ [28]. Варьировались такие параметры, как время обработки, соотношение кислот, объем используемой смеси кислот. Масса растворенного углерода увеличивалась с увеличением времени, температуры и объема используемой смеси кислот.

Таким образом, подход, основанный на сокращении времени и температуры обработки углеродных нанотрубок, вызывает интерес с точки зрения эффективности функционализации и диспергирования УНТ, а также снижения воздействия на их структуру и электронные свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В качестве объекта исследования были взяты исходные (необработанные) и обработанные в смеси азотной и серной кислот многостенные углеродные нанотрубки LUCAN BT 1001M компании LG Chem со следующими техническими характеристиками: насыпная плотность – 0,110 г/см³, средний диаметр – 10 нм, средняя длина – 16 мкм, площадь поверхности – 250 м²/г, содержание углеродных нанотрубок 96 мас. %.

Материалы, оборудование и процедура исследования

Обработка МУНТ проводилась с использованием смеси химически чистых 65 мас. % HNO_3 производства Merk и 93,6 мас. % H_2SO_4 производства Сигма Тек в объемном соотношении $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4 = 1:3$. Обработка МУНТ осуществлялась в течение 1 часа с использованием ультразвуковой ванны ПСБ-9560-05 объемом 9,5 л, мощностью озвучивания 300 Вт и частотой 60 кГц. Объем дисперсии УНТ/смесь кислот составлял 400 мл. В процессе обработки смесь МУНТ/окислитель нагревалась до 43 °С (начальная температура 20 °С). Ультразвуковое воздействие позволило разбить агломераты, что способствовало улучшению процедуры функционализации.

После окончания процедуры обработки углеродные нанотрубки отфильтровывались методом вакуумной фильтрации и промывались дистиллированной водой. После достижения нейтрального pH МУНТ переносились в выпарительную чашу, и с помощью электрической плитки осуществлялось выпаривание жидкости при температуре 100 °С. После выпаривания МУНТ дополнительно сушились в вакуумной печи 2 часа при температуре 100 °С.

Удельная поверхность образцов многостенных углеродных нанотрубок определялась по методу Брунауэра – Эммета – Теллера на анализаторе газовой сорбции QUICK 200 при температуре жидкого азота.

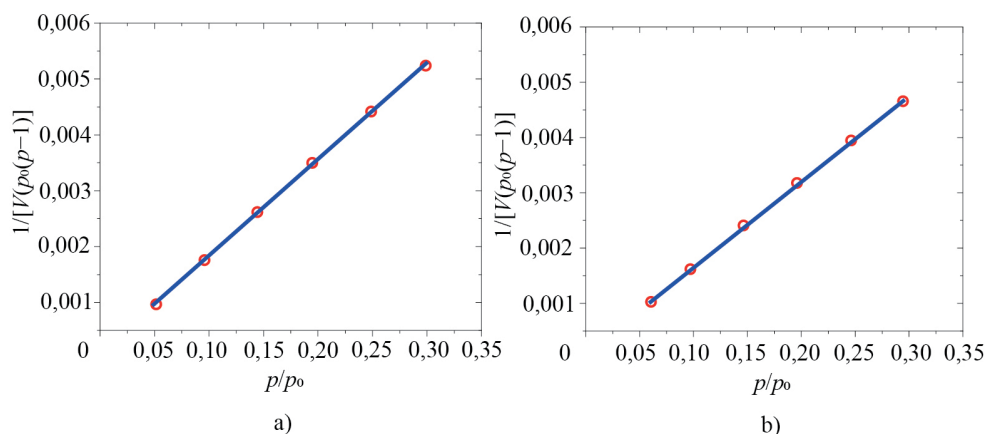
Для качественной оценки эффективности обработки углеродных нанотрубок были изготовлены дисперсии нанотрубок в воде, и проводился визуальный тест с фиксацией времени, которое прошло с момента изготовления образцов. Для получения дисперсий 10 мг нанотрубок диспергировались в 100 мл дистиллированной воды в течение получаса с использованием ультразвукового генератора И10-0,63. Устойчивость водных дисперсий оценивалась сразу после приготовления, через час и полгода.

Получение образцов композиционного материала на основе исходных и обработанных УНТ осуществлялось растворением полиметилметакрилата (ПММА) производства Acros Organics в химически чистом хлорбензоле производства Scharlab в концентрации 0,5 мас. % полимера и диспергированием в данном растворе УНТ в концентрации 0,1 мас. % к массе полимера. Диспергирование УНТ осуществлялось при помощи ультразвукового генератора И10-0,63 на частоте 22 кГц с мощностью озвучивания 300 Вт. Объем дисперсии ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}/\text{ПММА}/\text{УНТ}$) – 100 мл. Для исследования распределения МУНТ в полимерной матрице на стеклянной подложке методом спин-коутинга формировались тонкие пленки композиционного материала при скорости вращения подложки с образцом порядка 3 000 мин⁻¹.

Исследование распределения нанотрубок в полимерной матрице проводилось при помощи оптического микроскопа, который входит в состав лабораторного комплекса Solver BIO (ИТ-МДТ, Зеленоград, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения влияния обработки УНТ на их удельную поверхность методом Брунауэра – Эммета – Теллера исследованы исходные и обработанные МУНТ. На рисунке 1 представлены изотермы адсорбции образцов. Экспериментальные точки аппроксимированы прямой линией с коэффициентом корреляции > 0,999.



Р и с. 1. Изотермы адсорбции для образцов многостенных углеродных нанотрубок: а) исходных; б) обработанных

F i g. 1. Isotherm of adsorption of multi-walled carbon nanotubes: a) original; b) treated

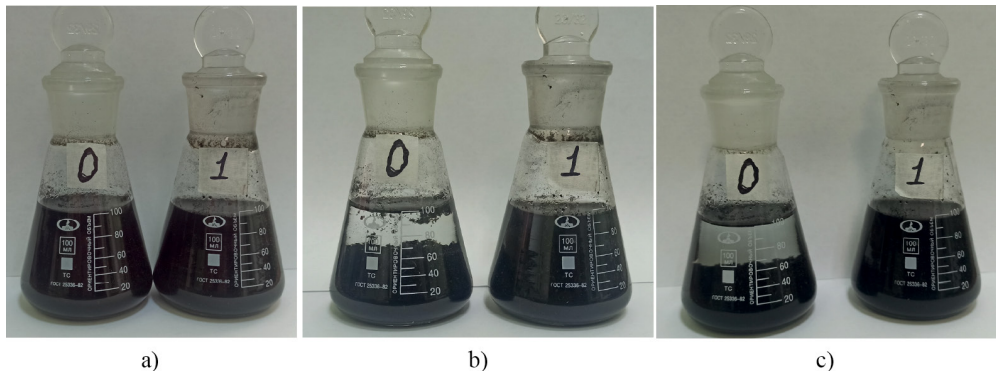
Источни́к: графики для рисунка 1 составлены авторами статьи в программе OriginPro, Version 2022.

Source: The graphs for figure 1 were compiled by the authors of the article in the program OriginPro, Version 2022.

Анализ экспериментальных результатов методом Брунауэра – Эммета – Теллера позволил установить, что удельная площадь поверхности для исходных МУНТ составила 250,3 и 277,8 м²/г для обработанных. После обработки углеродных нанотрубок их удельная поверхность увеличивается, что может быть связано с удалением более плотных примесей из образца и с «открытием» нанотрубок за счет окисления полуфуллереной головки. При этом после обработки нанотрубок в течение 1 часа наблюдалось увеличение удельной площади поверхности образца на ~11 %.

Результаты оценки устойчивости водных дисперсий изображены на рисунке 2. Благодаря ультразвуковому диспергированию исходные и обработанные МУНТ образуют однородные водные дисперсии, но со временем дисперсия на основе необработанных углеродных нанотрубок начинает расслаиваться. Из рисунка 2 б видно, что большая часть исходных углеродных нанотрубок уже образовала осадок. В случае дисперсии на основе функционализированных МУНТ дисперсия сохраняла свою устойчивость даже через 6 месяцев после изготовления.

Для исследования распределения МУНТ в полимерных средах были изготовлены образцы на основе ПММА и нанотрубок с концентрацией 0,1 мас. %. Образцы представляли собой стеклянную подложку с композитной пленкой на поверхности с толщиной 50 нм. На рисунке 3 представлены микрофотографии образцов композиционного материала на основе исходных и обработанных МУНТ.



a)

b)

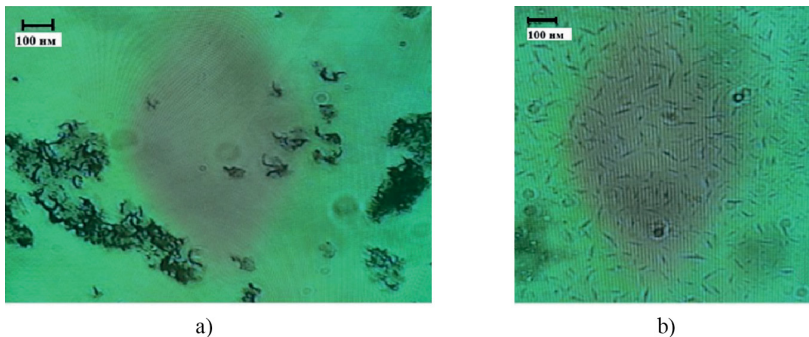
c)

Р и с. 2. Фотографии водных дисперсий образцов МУНТ:
0 – исходные; 1 – обработанные в течение 1 часа: а) сразу после диспергирования;
б) через 1 час; в) через 6 месяцев

Fig. 2. Photographs of aqueous dispersions samples of MWCNT: 0 – original; 1 – treated for 1-hour:
a) immediately after dispersion; b) 1 hour after dispersion; c) 6 months after dispersion

Источник: фотографии для рисунка 2 были сделаны Р. Р. Гариповым. Образцы хранились в шкафу для хранения реактивов, фотосъемка проводилась без перемещения образцов 17.10.2024 и 17.04.2025 г. соответственно.

Source: The photos for figure 2 were taken by the author R. R. Garipov. The samples were stored in a reagent cabinet, the photos were taken without moving the samples October 17, 2024, and April 17, 2025, respectively.



a)

b)

Р и с. 3. Микрофотографии образцов композиционного материала на основе МУНТ:
а) исходных; б) функционализированных

Fig. 3. Micrographs of composite material samples based:
a) original; b) treated multi-walled carbon nanotubes

Источник: фотографии для рисунка 3 были сделаны Р. Р. Гариповым с монитора оптического микроскопа, который входит в состав лабораторного комплекса Solver BIO (НТ-МДТ, Зеленоград, Россия) в КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН 21.04.2025 г.

Source: The photos for figure 3 were taken by the author R. R. Garipov from the monitor of an optical microscope that is part of the Solver BIO laboratory complex (NT-MDT, Zelenograd, Russia) at the Kazan Federal University on April 21, 2025.

Углеродные нанотрубки без обработки остаются в агломерированном состоянии даже после диспергирования ультразвуком (рис. 3 а). В то же время обработанные при щадящем режиме МУНТ не образуют агломераты и равномерно

распределяются в полимерной матрице (рис. 3 б). Со временем, как и в случае с водными дисперсиями (рис. 2), смесь C_6H_5Cl /ПММА/УНТ на основе необработанных МУНТ расслоилась, а на основе обработанных – сохранилась однородной.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что, в отличие от методик, предполагающих кипячение в кислых средах [23; 26; 27], химическая обработка многостенных углеродных нанотрубок без нагрева до кипения в течение непродолжительного времени может быть достаточно эффективной при удалении примесей и способствовать равномерному распределению МУНТ в полимерной матрице. Так, например, если сравнивать полученные результаты (рис. 2) с результатами исследований N. Sezer и M. Koç, которые обрабатывали МУНТ в течение 5 часов при температуре 120 °С, а потом оценивали устойчивость водных дисперсий [23], то можно отметить, что предлагаемая методика позволила достигнуть аналогичных результатов с меньшими энергетическими и временными затратами. Кроме того, обработанные по предложенной методике УНТ могут применяться для получения полимерных композитов на основе полиметилметакрилата с равномерным распределением наполнителя (рис. 3). Также, это актуально при работе с реактопластичными полимерами, однако существует ограничение по применению методики к термопластам, особенно устойчивым к различным растворителям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Равномерное распределение многостенных углеродных нанотрубок в полимерной матрице может быть достигнуто при использовании МУНТ, подвергнутых функционализации в щадящем режиме при малом времени их обработки и без кипячения в смеси кислот. При этом водные дисперсии на основе обработанных углеродных нанотрубок сохраняют устойчивость.

Разработанная методика позволяет получать полимерные композиты с однородным распределением наполнителя, что важно при разработке и создании материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками.

Дальнейший план исследований предполагает проведение расширенного анализа механических и электрофизических свойств композитов от УНТ, полученных по разработанной методике не только на основе ПММА, но и других полимеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ali Z., Yaqoob S., Yu J., D'Amore A. Critical Review on the Characterization, Preparation, and Enhanced Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Carbon Nanotubes and Their Hybrid Filler Polymer Composites for Various Applications. *Composites Part C: Open Access*. 2024;(13):100434. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100434>
2. Yadav R.S., Kuřitka I. Recent Developments on Nanocomposites Based on Spinel Ferrite and Carbon Nanotubes for Applications in Electromagnetic Interference Shielding and Microwave Absorption. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2024;49(3):371–407. <https://doi.org/10.1080/10408436.2023.2214577>

3. Ijaz H., Mahmood A., Abdel-Daim M.M., Sarfraz R.M., Zaman M., Zafar N., et al. Review on Carbon Nanotubes (CNTs) and their Chemical and Physical Characteristics, with Particular Emphasis on Potential Applications in Biomedicine. *Inorganic Chemistry Communications*. 2023;(155):111020. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111020>
4. Thakur C.K., Karthikeyan C., Abou-Dahech M.S., Altabakha M.M.A.M., Al Shahwan M.J.S., Ashby C.R., et al. Microwave-Assisted Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotubes for Biosensor and Drug Delivery Applications. *Pharmaceutics*. 2023;15(2):335. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020335>
5. Qu S., Yang D., Gao N., Xu P., Jiang X., Cheng K., et al. Polymer Binder-Free Aqueous Spinning of Biomimetic CNT based Hierarchical Hollow Fiber for Structural and Energy Storage Application. *Chemical Engineering Journal*. 2024;(486):150113. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150113>
6. Kanagamani K., Geethamani P., Muthukrishnan P. Applications of Carbon Nanotubes in Energy Storage Devices. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2023;(30):423–429. <https://doi.org/10.56042/ijct.v30i4.69419>
7. Pyrzynska K. Recent Applications of Carbon Nanotubes for Separation and Enrichment of Lead Ions. *Separations*. 2023;10(3):152. <https://doi.org/10.3390/separations10030152>
8. Teng Y., Li J., Yao J., Kang L., Li Q. Filled Carbon-Nanotube Heterostructures: from Synthesis to Application. *Microstructures*. 2023;(3):2023019. <https://doi.org/10.20517/microstructures.2023.07>
9. Yang S. Properties, Applications, and Prospects of Carbon Nanotubes in the Construction Industry. *Architecture, Structures and Construction*. 2023(3):289–298. <https://doi.org/10.1007/s44150-023-00090-z>
10. Cai X., Wang S., Peng L.-M. Recent Progress of Photodetector Based on Carbon Nanotube Film and Application in Optoelectronic Integration. *Nano Research Energy*. 2023;2(2):e9120058. <https://doi.org/10.26599/NRE.2023.9120058>
11. Łukawski D., Hochmańska-Kaniewska P., Janiszewska-Latterini D., Lekawa-Raus A. Functional Materials Based on Wood, Carbon Nanotubes, and Graphene: Manufacturing, Applications, and Green Perspectives. *Wood Science and Technology*. 2023;(57):989–1037. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01484-4>
12. Alosime E.M. A Review on Surface Functionalization of Carbon Nanotubes: Methods and Applications. *Discover Nano*. 2023;(18):12. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03789-6>
13. Iakoubovskii K. Techniques of Aligning Carbon Nanotubes. *Central European Journal of Physics*. 2009;7(4):645–653. <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0072-2>
14. Li H., Wang G., Wu Y., Jiang N., Niu K. Functionalization of Carbon Nanotubes in Polystyrene and Properties of their Composites: A Review. *Polymers*. 2024;16(6):770. <https://doi.org/10.3390/polym16060770>
15. Datsyuk V., Kalyva M., Papagelis K., Parthenios J., Tasis D., Siokou A., et al. Chemical Oxidation of MultiWalled Carbon Nanotubes. *Carbon*. 2008;(46):833–840. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.02.012>
16. Tugelbayev A., Kim J.-H., Lee J.U., Chung C.-W. The Effect of Acid Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Properties of Cement Paste Prepared by Ultrasonication with Polycarboxylate Ester. *Journal of Building Engineering*. 2023;(64):105638. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105638>
17. Pavia M., Emo M., Estellé P., Mohamed A.R., Vigolo B. Controlled Structural Damaging of Multiwalled Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets by Oxidation for Stable Nanofluids with Enhanced Thermal Conductivity. *Journal of Molecular Liquids*. 2023;(390):123194. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123194>
18. Hasnol A.N.Y., Thivagar R., Naresh S., Shuit S.H., Balakrishnan K. Functionalization of Multiwall Carbon Nanotubes (MWCNTS) using Phosphoric Acid for Immobilization of Cellulase. *NanoWorld Journal*. 2023;9(1):15–22. <https://doi.org/10.17756/nwj.2023-112>
19. Singh S., Oum W., Kim S.S., Kim H.W. Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes for Highly Stable Room Temperature and Humidity-Tolerant Triethylamine Sensing. *ACS Sensors*. 2023;8(12):4664–4675. <https://doi.org/10.1021/acssensors.3c01721>
20. O'Rear E.A., Onthong S., Pongprayoon T. Mechanical Strength and Conductivity of Cementitious Composites with Multiwalled Carbon Nanotubes: To Functionalize or Not? *Nanomaterials*. 2024;14(1):80. <https://doi.org/10.3390/nano14010080>
21. Garipov R.R., Khantimerov S.M., Lvov S.G., Shustov V.A., Kurbatova N.V., Suleimanov N.M. Effect of Thermochemical Treatment on the State of SWNT and on the Electrical Conductivity of

- Epoxy-SWNT Composites. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2021;29(4):251–257. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1833191>
22. Aghaei A., Shaterian M., Hosseini-Monfared H., Farokhi A. Single-Walled Carbon Nanotubes: Synthesis and Quantitative Purification Evaluation by Acid/Base Treatment for High Carbon Impurity Elimination. *Chemical Papers*. 2023;(77):249–258. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02478-5>
23. Sezer N., Koç M. Oxidative Acid Treatment of Carbon Nanotubes. *Surfaces and Interfaces*. 2019;(14):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2018.11.001>
24. Глебова Н.В., Нечитайлов А.А. Функционализация поверхности многостенных углеродных нанотрубок. *Письма в журнал технической физики*. 2010;36(19):8–15. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/14152> (дата обращения: 26.11.2025).
25. Забродский А.Г., Глебова Н.В., Нечитайлов А.А., Терукова Е.Е., Теруков Е.И., Томасов А.А. и др. Мембранно-электродные блоки с высокой удельной мощностью на основе функционализированных многостенных углеродных нанотрубок. *Письма в журнал технической физики*. 2010;36(23):98–105. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/14220> (дата обращения: 26.11.2025).
26. Нечитайлов А.А., Глебова Н.В. О механизме влияния кислородно-модифицированных углеродных нанотрубок на кинетику электровосстановления кислорода на платине. *Электрохимия*. 2014;50(8):835. <https://doi.org/10.7868/S042485701408012X>
27. Суслова Е.В., Архипова Е.А., Калашник А.В., Иванов А.С., Савилов С.В., Ся Х. и др. Влияние функционализации допированных азотом углеродных нанотрубок на электропроводность. *Журнал физической химии*. 2019;93(10):1551–1555. <https://doi.org/10.1134/S0044453719100303>
28. Алексашина Е.В., Мищенко С.В., Соцкая Н.В., Ткачев А.Г., Вигдорович В.И., Долгих О.В. Кислотная активация углеродных нанотрубок. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2009;11(2):101–105. <https://elibrary.ru/kxfppb>

REFERENCES

1. Ali Z., Yaqoob S., Yu J., D'Amore A. Critical Review on the Characterization, Preparation, and Enhanced Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Carbon Nanotubes and Their Hybrid Filler Polymer Composites for Various Applications. *Composites Part C: Open Access*. 2024;(13):100434. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100434>
2. Yadav R.S., Kuřitka I. Recent Developments on Nanocomposites Based on Spinel Ferrite and Carbon Nanotubes for Applications in Electromagnetic Interference Shielding and Microwave Absorption. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2024;49(3):371–407. <https://doi.org/10.1080/10408436.2023.2214577>
3. Ijaz H., Mahmood A., Abdel-Daim M.M., Sarfraz R.M., Zaman M., Zafar N., et al. Review on Carbon Nanotubes (CNTs) and their Chemical and Physical Characteristics, with Particular Emphasis on Potential Applications in Biomedicine. *Inorganic Chemistry Communications*. 2023;(155):111020. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111020>
4. Thakur C.K., Karthikeyan C., Abou-Dahech M.S., Altabakha M.M.A.M., Al Shahwan M.J.S., Ashby C.R., et al. Microwave-Assisted Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotubes for Biosensor and Drug Delivery Applications. *Pharmaceutics*. 2023;15(2):335. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020335>
5. Qu S., Yang D., Gao N., Xu P., Jiang X., Cheng K., et al. Polymer Binder-Free Aqueous Spinning of Biomimetic CNT based Hierarchical Hollow Fiber for Structural and Energy Storage Application. *Chemical Engineering Journal*. 2024;(486):150113. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150113>
6. Kanagamani K., Geethamani P., Muthukrishnan P. Applications of Carbon Nanotubes in Energy Storage Devices. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2023;(30):423–429. <https://doi.org/10.56042/ijct.v30i4.69419>
7. Pyrzynska K. Recent Applications of Carbon Nanotubes for Separation and Enrichment of Lead Ions. *Separations*. 2023;10(3):152. <https://doi.org/10.3390/separations10030152>
8. Teng Y., Li J., Yao J., Kang L., Li Q. Filled Carbon-Nanotube Heterostructures: from Synthesis to Application. *Microstructures*. 2023;(3):2023019. <https://doi.org/10.20517/microstructures.2023.07>
9. Yang S. Properties, Applications, and Prospects of Carbon Nanotubes in the Construction Industry. *Architecture, Structures and Construction*. 2023(3):289–298. <https://doi.org/10.1007/s44150-023-00090-z>

10. Cai X., Wang S., Peng L.-M. Recent Progress of Photodetector based on Carbon Nanotube Film and Application in Optoelectronic Integration. *Nano Research Energy*. 2023;2(2):e9120058. <https://doi.org/10.26599/NRE.2023.9120058>
11. Łukawski D., Hochmańska-Kaniewska P., Janiszewska-Latterini D., Lekawa-Raus A. Functional Materials Based on Wood, Carbon Nanotubes, and Graphene: Manufacturing, Applications, and Green Perspectives. *Wood Science and Technology*. 2023;(57):989–1037. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01484-4>
12. Alosime E.M. A Review on Surface Functionalization of Carbon Nanotubes: Methods and Applications. *Discover Nano*. 2023;(18):12. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03789-6>
13. Iakoubovskii K. Techniques of Aligning Carbon Nanotubes. *Central European Journal of Physics*. 2009;7(4):645–653. <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0072-2>
14. Li H., Wang G., Wu Y., Jiang N., Niu K. Functionalization of Carbon Nanotubes in Polystyrene and Properties of their Composites: A Review. *Polymers*. 2024;16(6):770. <https://doi.org/10.3390/polym16060770>
15. Datsyuk V., Kalyva M., Papagelis K., Parthenios J., Tasis D., Siokou A., et al. Chemical Oxidation of MultiWalled Carbon Nanotubes. *Carbon*. 2008;(46):833–840. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.02.012>
16. Tugelbayev A., Kim J.-H., Lee J.U., Chung C.-W. The Effect of Acid Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Properties of Cement Paste Prepared by Ultrasonication with Polycarboxylate Ester. *Journal of Building Engineering*. 2023;(64):105638. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105638>
17. Pavia M., Emo M., Estellé P., Mohamed A.R., Vigolo B. Controlled Structural Damaging of Multiwalled Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets by Oxidation for Stable Nanofluids with Enhanced Thermal Conductivity. *Journal of Molecular Liquids*. 2023;(390):123194. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123194>
18. Hasnol A.N.Y., Thivagar R., Naresh S., Shuit S.H., Balakrishnan K. Functionalization of Multiwall Carbon Nanotubes (MWCNTS) using Phosphoric Acid for Immobilization of Cellulase. *NanoWorld Journal*. 2023;9(1):15–22. <https://doi.org/10.17756/nwj.2023-112>
19. Singh S., Oum W., Kim S.S., Kim H.W. Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes for Highly Stable Room Temperature and Humidity-Tolerant Triethylamine Sensing. *ACS Sensors*. 2023;8(12):4664–4675. <https://doi.org/10.1021/acssensors.3c01721>
20. O'Rear E.A., Onthong S., Pongprayoon T. Mechanical Strength and Conductivity of Cementitious Composites with Multiwalled Carbon Nanotubes: To Functionalize or Not? *Nanomaterials*. 2024;14(1):80. <https://doi.org/10.3390/nano14010080>
21. Garipov R.R., Khantimerov S.M., L'vov S.G., Shustov V.A., Kurbatova N.V., Suleimanov N.M. Effect of Thermochemical Treatment on the State of SWNT and on the Electrical Conductivity of Epoxy-SWNT Composites. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2021;29(4):251–257. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1833191>
22. Aghaei A., Shaterian M., Hosseini-Monfared H., Farokhi A. Single-Walled Carbon Nanotubes: Synthesis and Quantitative Purification Evaluation by Acid/Base Treatment for High Carbon Impurity Elimination. *Chemical Papers*. 2023;(77):249–258. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02478-5>
23. Sezer N., Koç M. Oxidative Acid Treatment of Carbon Nanotubes. *Surfaces and Interfaces*. 2019;(14):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.11.001>
24. Glebova N.V., Nechitailov A.A. [Surface Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotubes]. *Technical Physics Letters*. 2010;36(19):8–15. (In Russ.) Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/14152> (accessed 26.11.2025).
25. Zabrodski A.G., Glebova N.V., Nechitailov A.A., Terukova E.E., Terukov E.I., Tomasov A.A., et al. [Membrane-Electrode Assemblies with High Specific Power Based on Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes]. *Technical Physics Letters*. 2010;36(23):98–105. (In Russ.) Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/14220> (accessed 26.11.2025).
26. Nechitailov A.A., Glebova N.V. [Mechanism of the Effect of Oxygen-Modified Carbon Nanotubes on the Kinetics of Oxygen Electroreduction on Platinum]. *Elektrokhimiya*. 2014;50(8):835. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S042485701408012X>
27. Suslova E.V., Arkhipova E.A., Kalashnik A.V., Ivanov A.S., Savilov S.V., Xia H., et al. [Effect of the Functionalization of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes on Electrical Conductivity]. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*. 2019;93(10):1551–1555. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0044453719100303>

28. Aleksashina E.V., Mischenko S.V., Sotskaya N.V., Tkachyov A.G., Vigdorovich V.I., Dolgikh O.V. Activation of Carbon Nanotubes by Acid. *Condensed Matter and Interphases*. 2009;11(2):101–105. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/kxfppb>

Об авторах:

Хантимеров Сергей Мансурович, кандидат физико-математических наук, руководитель КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН (420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4385-3268>, Researcher ID: N-9127-2016, Scopus ID: 23502060300, SPIN-код: 6694-8272, khantim@mail.ru

Гарипов Ранис Рамисович, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории физики углеродных наноструктур и композитных систем КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН (420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0694>, Researcher ID: AAO-7766-2021, Scopus ID: 57223588617, SPIN-код: 2653-6370, gari_rtrf@mail.ru

Емельянов Иван Андреевич, бакалавр Казанского (Приволжского) федерального университета (420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1013-710X>, ban924@mail.ru

Сулейманов Наиль Муратович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник и заведующий лабораторией физики углеродных наноструктур и композитных систем КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН (420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7, литера А), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2277-4982>, Researcher ID: ABH-4186-2020, Scopus ID: 6603867983, SPIN-код: 5237-3594, nail.suleimanov@mail.ru

Вклад авторов:

С. М. Хантимеров – формулирование идеи исследования, целей и задач; административное управление планированием и проведением исследования; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

Р. Р. Гарипов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

И. А. Емельянов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных, создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Н. М. Сулейманов – разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей, проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 11.10.2025; поступила после рецензирования 12.11.2025;
принята к публикации 10.03.2026*

About the authors:

Sergey M. Khantimerov, Cand.Sci. (Eng.), Director, ZPTI – Subdivision of FIC KazanSC of RAS (10/7 Sibirskiy Trakt St., Kazan 420029, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4385-3268>, Researcher ID: N-9127-2016, Scopus ID: 23502060300, SPIN-code: 6694-8272, khantim@mail.ru

Ranis R. Garipov, Cand.Sci. (Eng.), Junior Research Fellow in Laboratory of the Physics of Carbon Nanostructures and Composite Systems, ZPTI – Subdivision of FIC KazanSC of RAS (10/7 Sibirskiy Trakt St.,

Kazan 420029, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0694>, Researcher ID: AAO-7766-2021, Scopus ID: 57223588617, SPIN-code: 2653-6370, gari_rtrf@mail.ru

Ivan A. Yemelyanov, Undergraduate Student, Kazan (Volga Region) Federal University (18 Kremlevskaya St., Kazan 420008, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1013-710X>, ban924@mail.ru

Nail M. Suleimanov, Dr.Sci. (Eng.), Leading Researcher and is a Head of the Laboratory of the Physics of Carbon Nanostructures and Composite Systems, ZPTI – Subdivision of FIC KazanSC of RAS (Lit. A, 10/7 Sibirsky Trakt St., Kazan 420029, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2277-4982>, Researcher ID: ABH-4186-2020, Scopus ID: 6603867983, SPIN-code: 5237-3594, nail.suleimanov@mail.ru

Authors contribution:

S. M. Khantimerov – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; management and coordination responsibility for the research activity planning and execution; preparation, creation and presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

R. R. Garipov – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data; application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyses or synthesize study data; preparation, creation and presentation of the published work, specifically visualization; preparation, creation and presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

I. A. Emelyanov – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data, preparation, creation and presentation of the published work, specifically visualization.

N. M. Suleimanov – development or design of methodology; creation of models, verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication, reproducibility of results, experiments and other research outputs.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 11.10.2025; revised 12.11.2025; accepted 10.03.2026