

ВОЗДЕЙСТВИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА НИТИ, СФОРМИРОВАННЫЕ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Д.Ж. Куржумбаев, С.А. Евменова, А.И. Мохова, С.А. Урванов,
Н.В. Казеннов, А.Р. Караева, В.З. Мордкович

Дидар Жаксылыкович Куржумбаев (ORCID 0000-0002-5379-7346)*, Софья Андреевна Евменова (ORCID 0009-0008-7591-4161)

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Российская Федерация, 141701

E-mail: kurzhumbaev.dzh@phystech.edu*, evmenova.sa@phystech.edu

Анна Игоревна Мохова (ORCID 0000-0002-9951-9341), Сергей Алексеевич Урванов (ORCID 0000-0003-3460-5537), Никита Владимирович Казеннов (ORCID 0000-0001-5731-6442), Аида Разимовна Караева (ORCID 0000-0002-9728-354X), Владимир Зальманович Мордкович (ORCID 0000-0002-9553-7657)

Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: mokhova.ai@phystech.edu, urvanov@tisnum.ru, kazennov@tisnum.ru, karaeva@tisnum.ru, mordkovich@tisnum.ru

В данной работе представлено исследование, посвященное воздействию микроволнового излучения на нити, сформированные из углеродных нанотрубок (УНТ), синтезируемых методом химического осаждения из газовой фазы с использованием плавающего катализатора. Воздействие электрического и магнитного полей излучения на нити УНТ изучено отдельно. Выявлено, что воздействие магнитного поля излучения с частотой 2,45 ГГц и мощностью 1300 Вт не приводит к изменению структуры и элементного состава материала нити УНТ. На основе анализа данных энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) показано, что количественное содержание углерода, железа, кислорода и серы приблизительно одинаково для исходной нити УНТ и для нитей УНТ, подвергавшихся воздействию магнитного поля излучения в течение 2 с и 20 мин. Отсутствие взаимодействия магнитного поля микроволнового излучения с материалом УНТ согласуется с наблюдавшимися ранее экспериментальными данными для частот вблизи 10 и 30 ГГц. Также выявлено, что электрическое поле излучения с частотой 2,45 ГГц, наоборот, очень интенсивно взаимодействует с материалом и приводит к заметному нагреву и свечению нитей УНТ. Кратковременное секундное воздействие электрического поля излучения с мощностью от 250 до 2000 Вт привело к значительному изменению как структуры, так и элементного состава УНТ. В частности, воздействие излучения мощностью до 750 Вт включительно способствовало снижению количества аморфного углеродного материала. Кроме того, используя излучение мощностью 1500 Вт, удалось снизить содержание железа до ~6 мас.% с сохранением собственной структуры УНТ. Таким образом, кратковременное воздействие электрического поля микроволнового излучения с частотой 2,45 ГГц может рассматриваться как эффективный и быстрый способ очистки нитей УНТ от частиц остаточного катализатора.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, микроволновое излучение, магнитные потери, магнитная проницаемость

EFFECT OF MICROWAVE RADIATION ON FIBERS FORMED OF CARBON NANOTUBES

D.Zh. Kurzhumbaev, S.A. Evmenova, A.I. Mokhova,
S.A. Urvanov, N.V. Kazennov, A.R. Karaeva, V.Z. Mordkovich

Didar Zh. Kurzhumbaev (ORCID 0000-0002-5379-7346)*, Sofia A. Evmenova (ORCID 0009-0008-7591-4161)
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy per., 9, Dolgoprudny,
141701, Russia

E-mail: kurzhumbaev.dzh@phystech.edu*, evmenova.sa@phystech.edu

Anna I. Mokhova (ORCID 0000-0002-9951-9341), Sergey A. Urvanov (ORCID 0000-0003-3460-5537), Nikita
V. Kazennov (ORCID 0000-0001-5731-6442), Aida R. Karaeva (ORCID 0000-0002-9728-354X), Vladimir Z.
Mordkovich (ORCID 0000-0002-9553-7657)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials of National Research Centre «Kurchatov In-
stitute», Tsentrlnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: mokhova.ai@phystech.edu, urvanov@tisnum.ru, kazennov@tisnum.ru, karaeva@tisnum.ru, mordko-
vich@tisnum.ru

This paper presents a study of microwave exposure on carbon nanotube (CNT) fibers synthesized by the floating catalyst CVD method. The effect of electric and magnetic fields of radiation on the CNT fibers was studied independently. It was found that exposure to a magnetic field of 2.45 GHz radiation with a power of 1300 W does not lead to changes in the structure and elemental composition of the CNT fiber material. Based on the energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) data, it was shown that the quantitative content of carbon, iron, oxygen, and sulfur is approximately the same for the original CNT fiber and for the CNT fibers exposed to the magnetic field of radiation for 2 s and 20 min. The absence of interaction of the microwave magnetic field with the CNT material is consistent with the previously observed experimental data for frequencies near 10 and 30 GHz. It was also found that the electric field of 2.45 GHz radiation, on the contrary, interacts very intensively with the material and leads to noticeable heating and glowing of CNT fibers. Short-term exposure to the electric field of radiation with a power of 250 to 2000 W led to a significant change in both the structure and the elemental composition of CNTs. Notably, exposure to radiation with a power of up to 750 W contributed to a decrease in the amount of amorphous carbon material. In addition, using radiation with a power of 1500 W, it was possible to reduce the iron content to ~6 wt.% while maintaining the intrinsic structure of CNTs. Therefore, short-term exposure to the electric field of microwave radiation with a frequency of 2.45 GHz can be considered as an efficient and rapid method for purifying CNT fibers by removing residual catalyst particles.

Keywords: carbon nanotubes, microwave radiation, magnetic losses, permeability

Для цитирования:

Куржумбаев Д.Ж., Евменова С.А., Мохова А.И., Урванов С.А., Казеннов Н.В., Караева А.Р., Мордкович В.З. Воздействие микроволнового излучения на нити, сформированные из углеродных нанотрубок. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 12. С. 64–73. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.16y.

For citation:

Kurzhumbaev D.Zh., Evmenova S.A., Mokhova A.I., Urvanov S.A., Kazennov N.V., Karaeva A.R., Mordkovich V.Z. Effect of microwave radiation on fibers formed of carbon nanotubes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 12. P. 64–73. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.16y.

ВВЕДЕНИЕ

Нити из углеродных нанотрубок (УНТ) представляют собой трехмерный массив единичных нанотрубок, которые переплетены между собой, имеют преимущественную ориентацию вдоль одного направления и удерживаются вместе за счет

сил взаимодействия Ван-дер-Ваальса. Исследуемые в литературе нити УНТ, как правило, синтезируются двумя методами, один из которых называют «мокрым» (англ. «wet») [1-3], а другой – «сухим» (англ. «dry») [4-5]. Мокрый метод в общем случае заключается в формировании нити из рас-

творы УНТ под давлением. Что касается сухого метода, он может быть реализован намоткой и скручиванием готового материала УНТ. Например, из массива УНТ типа «лес» (англ. «forest») [6], а также из массива УНТ, синтезированного методом химического осаждения из газовой фазы с использованием плавающего катализатора (англ. «floating catalyst CVD» или «FC-CVD»). Помимо этого, в случае процесса FC-CVD нити могут формироваться прямой намоткой и скручиванием взвеси нанотрубок на выходе из реактора в процессе синтеза [7]. В некоторых работах для формирования нити используется комбинация сухого и мокрого методов [8].

Интерес к исследованию нитей из УНТ во многом объясняется закономерным желанием достичь некоторых выдающихся свойств единичных нанотрубок – таких, как высокая прочность на разрыв, высокая удельная электропроводность, высокая теплопроводность – на макроскопическом уровне. В действительности при формировании массива ориентированных УНТ в виде нити перенос свойств единичных нанотрубок на макроскопический уровень затруднен из-за присутствия дефектов структуры и наличия примесных фаз. Тем не менее, синтезируемые в настоящее время нити УНТ все же обладают рядом свойств, обеспечивающих важные эксплуатационные характеристики функциональных материалов. В первую очередь, это касается низкой плотности и возможности единичных нанотрубок перестраиваться внутри массива без разрыва нити в целом, что в совокупности с электропроводящими свойствами делает нить УНТ перспективным материалом для применений, требующих гибкости, легкости и электронной функциональности [9-16].

Улучшение механических, электро- и теплопроводящих характеристик нитей УНТ является одной из приоритетных задач как в рамках поиска оптимальных условий и методов синтеза, так и в рамках исследования различных способов обработки и функционализации готового материала УНТ [17, 18]. Одним из перспективных решений в области синтеза и обработки УНТ является использование микроволнового излучения [19-21]. В частности, применение электромагнитного (ЭМ) излучения с частотой 2,45 ГГц, воздействие которого рассматривается в качестве возможного способа очистки УНТ от примесных фаз. Так, воздействуя на УНТ излучением данной частоты с мощностью 3200 Вт, в работе [22] авторам удалось понизить содержание примесных фаз до 15,7 мас.%. Подобный эффект свидетельствует о том, что в условиях

достаточно высокой мощности излучения взаимодействие ЭМ поля с материалом УНТ становится настолько интенсивным, что происходит изменение структуры и элементного состава УНТ.

Тем не менее, точная причина интенсивного взаимодействия УНТ с микроволнами по-прежнему остается непроясненной до конца. УНТ в исходном виде, как правило, содержат в своем составе частицы остаточного катализатора, в качестве которого чаще всего выступают такие металлы, как железо, кобальт и никель [23]. Поэтому в качестве объяснения результатов воздействия микроволнового излучения на УНТ нередко рассматривают возможное селективное взаимодействие ЭМ поля с остаточным катализатором. Поскольку используемые катализаторы в макроскопической форме проявляют ферромагнитные свойства, можно предположить, что материал УНТ поглощает энергию излучения за счет взаимодействия с магнитным полем волны. С другой стороны, известно, что УНТ могут обладать достаточно высокой удельной электропроводностью. Следовательно, взаимодействие с микроволновым излучением может также проявляться в возникновении токов проводимости, индуцируемых под действием электрического поля волны. В таком случае, поглощение энергии излучения может сопровождаться выделением джоулева тепла.

В данной работе для того, чтобы однозначно определить преобладающий механизм взаимодействия микроволнового излучения с нанотрубками, нить УНТ подвергалась воздействию излучения различной мощности с частотой 2,45 ГГц. При этом материал в форме нити использовался для того, чтобы исследовать взаимодействие УНТ с электрическим и магнитным полем излучения по отдельности.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Нити изготавливались из материала УНТ, синтезируемого методом FC-CVD с использованием смеси этанола, ацетона и тиофена (массовое соотношение – 1:1:0,03) в качестве исходного сырья и ферроцена в качестве источника железного катализатора. Особенность метода заключается в том, что рост УНТ происходит на поверхности частиц катализатора, взвешенных в потоке газа, – в связи с этим метод иногда называют аэрозольным [24, 25]. Процесс синтеза УНТ более подробно изложен в работе [26]. Для формирования нити исходный материал УНТ, имеющий форму катушки, разматывали и скручивали, параллельно подвергая смачиванию в ацетоне. Диаметр полученных таким способом нитей составлял от 100 до 150 мкм.

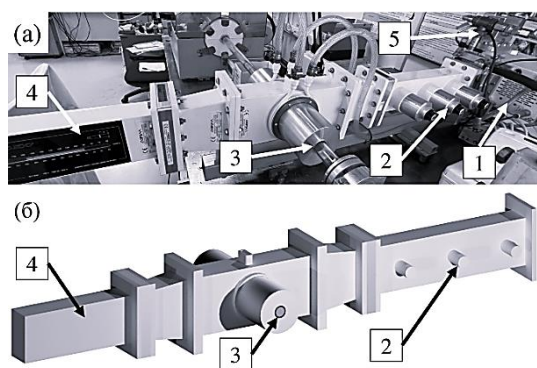


Рис. 1. Экспериментальная СВЧ установка (а) и соответствующая расчетная модель (б) (1 – генератор излучения; 2 – реактивные штыри; 3 – кварцевая труба; 4 – подвижная коротко-замыкающая стенка; 5 – изолятор)

Fig. 1. Experimental setup (a) and computational model (b) (1 – microwave power supply; 2 – three-stub tuner; 3 – quartz tube; 4 – sliding short circuit; 5 – isolator)

Поскольку синтезируемый материал помимо УНТ содержит в своем составе аморфный углерод и частицы остаточного катализатора (в основном, фазы железа α -Fe, γ -Fe и карбид железа Fe₃C [27, 28]), в нитях УНТ также присутствуют примеси.

Структура и морфология нитей УНТ исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-7600F. Элементный состав материала УНТ определялся по данным метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС).

Эксперименты по воздействию микроволнового излучения проводились на установке Sairem GMP G3, состоящей из генератора сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения и волноводной нагрузки со встроенной кварцевой трубой (рис. 1а). Основой генератора установки является магнетрон, работающий на фиксированной частоте $2,450 \pm 0,025$ ГГц с максимальной мощностью до 2 кВт. Используемой частоте излучения соответствует длина волны, равная 12,2 см. Волноводная нагрузка имеет переменное поперечное сечение и состоит из трех волноводных секций: двух стандарта WR340 (сечение – $86,36 \times 43,18$ мм) и одной стандарта WR430 (сечение – $109,22 \times 54,61$ мм). Через центральную волноводную секцию WR430 проходит кварцевая труба, в которую помещается образец. Кварцевая труба расположена вдоль направления, коллинеарного вектору напряженности электрического поля $\vec{E}$ и перпендикулярного вектору индукции магнитного поля $\vec{B}$. Крайняя волноводная секция заканчивается подвижной коротко-замыкающей стенкой (КЗ), которая отражает излучение обратно в сторону генера-

тора. Во избежание перегрева магнетрона за счет отраженного излучения установка оборудована изолятором и контуром водяного охлаждения. Для контроля за отраженным излучением в установке предусмотрен детектор отраженного излучения, регистрирующий показания мощности с шагом в 10 Вт.

В ходе экспериментов нить УНТ располагалась в кварцевой лодочке или трубке. Взаимодействие микроволнового излучения с кварцем в рамках данной работы считалось пренебрежимо малым, независимо от мощности используемого излучения. С целью исключения контакта УНТ с кислородом все эксперименты проводились в среде инертного газа (Ar и He).

Для того, чтобы убедиться в правильном расположении нити УНТ, была построена расчетная модель, соответствующая основным узлам установки (рис. 1б). Учесть пространственное распределение электрического и магнитного поля при постановке эксперимента позволило решение одно-родного волнового уравнения (1) для внутреннего пространства установки:

$$\nabla \cdot \mu^{-1} (\nabla \cdot \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость, ε – диэлектрическая проницаемость, $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля, σ – удельная электропроводность, ω – частота излучения, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, k_0 – волновой вектор в вакууме.

В качестве граничного условия на внешних поверхностях модельной установки тангенциальная составляющая электрического поля принималась равной нулю. То есть:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{n}$ – вектор нормали к внешней поверхности модели.

Кроме этого, на внешних границах модели, соответствующих входу и выходу кварцевой трубы, а также входу и выходу заполненного газом внутреннего пространства трубы, учитывалось рассеяние излучения на бесконечной области. Физически данное условие соответствует тому, что часть излучения выходит из установки через отверстия для кварцевой трубы и при этом не отражается обратно. Формулировка для векторного электрического поля:

$$\mathbf{n} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{E}) - i k_0 \mathbf{n} \cdot (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) = 0. \quad (3)$$

Для исследования воздействия магнитного поля нить УНТ подвергалась воздействию СВЧ излучения мощностью 1300 Вт. Были подготовлены

два образца с разной продолжительностью пребывания в поле излучения. Первый образец подвергался воздействию в течение 2 с – такой продолжительности, как правило, достаточно для того, чтобы на образцах малого объема становилось заметным влияние ЭМ поля. Второй образец подвергался воздействию в течение 20 мин.

Для исследования воздействия электрического поля образцы подвергались воздействию СВЧ излучения мощностью 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 и 2000 Вт. Воздействие проводилось в течение 1 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результат численного решения волнового уравнения (1) методом конечных элементов представлен на рис. 2. Можно заметить, что колебания электрического поля во внутреннем пространстве установки происходят в плоскости YZ, то есть так же, как в обычном прямоугольном волноводе, – поперек широкой стенки. При этом колебания магнитного поля, наоборот, происходят вдоль широкой стенки, то есть в плоскости XZ. В соответствии с расчетными данными по распределению ЭМ поля, нить в экспериментах размещалась в плоскости колебаний либо электрического, либо магнитного поля.

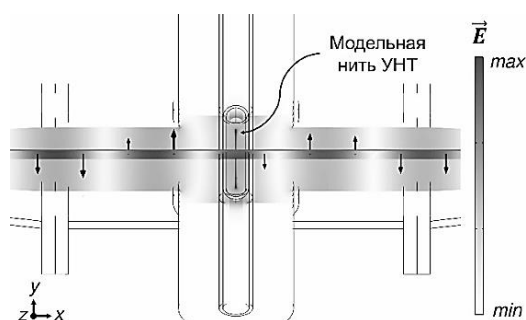


Рис. 2. Распределение электрического поля в модельной СВЧ установке (модельная нить УНТ ориентирована вдоль направления Y; направление вектора E показано стрелками)
Fig. 2. Electric field distribution in a model microwave installation (the model CNT fiber is oriented along the Y direction; the direction of the E vector is shown by arrows)



Рис. 3. Размещение нити УНТ вдоль направления Z для исследования воздействия магнитного поля излучения
Fig. 3. Placement of the CNT fiber along the direction Z for studying the effect of the magnetic field of radiation

При исследовании воздействия магнитного поля нить УНТ помещалась в кварцевую трубку, заходящую внутрь волновода через узкое окно в верхней части установки и ориентированную вдоль широкой стенки волновода (рис. 3). При исследовании воздействия электрического поля нить УНТ размещалась поперек широкой стенки волновода, как показано на рис. 2.

В результате воздействия магнитного поля никакие внешние проявления взаимодействия излучения с нитью УНТ замечены не были – образцы не нагревались и не двигались в ЭМ поле. При этом чувствительность датчика отраженного излучения оказалась недостаточной для того, чтобы зарегистрировать поглощение ЭМ энергии образцом на уровне более 10 Вт.

Путем анализа изображений РЭМ выявлено, что по своей структуре нити УНТ, подвергавшиеся воздействию магнитного поля СВЧ излучения, не отличаются от исходной нити УНТ. Диаметр нитей остался неизменным, наблюдавшиеся значения находились в пределах неоднородности сечения исходной нити. Количество аморфного углеродного материала внутри нити визуально также осталось прежним. Изменения в плотности и длине исследованных нитей УНТ не обнаружены.

Анализ элементного состава методом ЭДС также подтвердил отсутствие влияния магнитного поля СВЧ излучения на нить УНТ (табл. 1). Во всех образцах были обнаружены углерод, железо, кислород и сера. Присутствие небольшого количества серы (менее 1 мас.%) можно объяснить остатком от разложения тиофена, используемого при синтезе УНТ в составе реакционной смеси. Массовые доли всех элементов оказались приблизительно одинаковыми для исходной нити УНТ и для нитей УНТ, подвергавшихся воздействию магнитного поля СВЧ излучения в течение 2 с и 20 мин. Небольшие расхождения, вероятнее всего, объясняются локальностью метода ЭДС, а не результатами воздействия ЭМ поля на УНТ.

Отсутствие взаимодействия нити УНТ с магнитным полем СВЧ излучения свидетельствует о том, что ни сами УНТ, ни частицы остаточного катализатора не обладают магнитными потерями на частоте 2,45 ГГц. Данный факт можно объяснить тем, что частицы остаточного катализатора (железа и его соединений) имеют линейный размер, сопоставимый с диаметром УНТ. В соответствии с теорией микромагнетизма, такой размер является критическим для перехода в однодоменное состояние как для частиц α -Fe, так и для окси-

дов железа. Результаты согласуются с представленными ранее данными о слабом взаимодействии УНТ с микроволновым излучением на частотах вблизи 10 и 30 ГГц [29].

Таблица 1

Элементный состав нитей УНТ, подвергнутых воздействию магнитного поля микроволнового излучения, по данным ЭДС (мас.%)

Table 1. Elemental composition of CNT fibers exposed to the magnetic field of microwave radiation, according to EDS (wt.%)

Элемент	Длительность воздействия		
	0 с	2 с	20 мин
C	80,6	82,5	82,7
Fe	14,9	15,2	14,6
O	4,1	1,7	2,1
S	0,5	0,6	0,6
Всего	100,0	100,0	100,0

В то же время, при размещении нити УНТ в области электрического поля СВЧ излучения кратковременное воздействие в течение 1 с оказалось достаточным для того, чтобы нить УНТ нагрелась в результате протекания индуцируемых токов проводимости и светилась (рис. 4). При этом секундный нагрев нити УНТ не приводил к чрезмерному нагреву поверхности кварцевой лодочки. По мере увеличения мощности излучения свечение нити становилось более интенсивным. Однако несмотря на интенсивный нагрев и свечение, нить УНТ в результате воздействия излучения мощностью от 250 до 1500 Вт не претерпела разрыв. К разрыву нити привело только воздействие излучения с самой высокой мощностью (1750 и 2000 Вт).

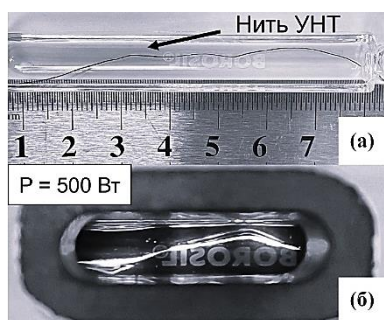


Рис. 4. Исходная нить УНТ в кварцевой лодочке (а) и нагретая нить УНТ в электрическом поле СВЧ излучения мощностью 500 Вт (б)

Fig. 4. Initial CNT fiber in a quartz boat (a) and heated CNT fiber in an electric field of 500 W microwave radiation (b)

Анализ изображений РЭМ выявил, что в структуре нитей, подвергавшихся воздействию электрического поля СВЧ излучения мощностью

до 750 Вт включительно, произошло снижение количества аморфного углеродного материала (рис. 5). Однако в нитях, подвергавшихся воздействию излучения более высокой мощности, содержание аморфного материала снова увеличилось, что, по всей видимости, связано с разрушением структуры самих УНТ. Наиболее отчетливо это проявилось при максимальной мощности излучения, то есть при 2000 Вт (рис. 5г).

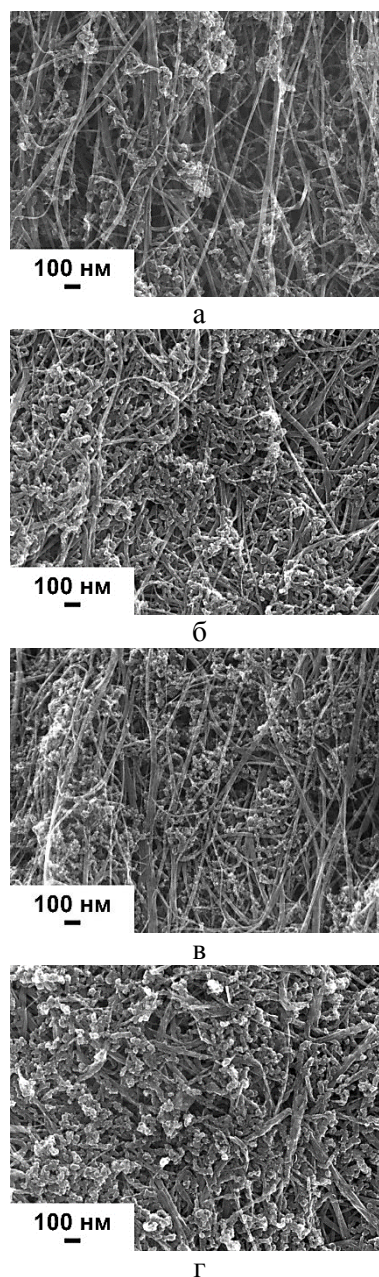


Рис. 5. РЭМ-изображения нити УНТ после воздействия электрического поля СВЧ излучения разной мощности в течение 1 с: (а) 750 Вт; (б) 1250 Вт; (в) 1500 Вт; (г) 2000 Вт
Fig. 5. SEM images of a CNT fiber after exposure to an electric field of microwave radiation of different powers for 1 s: (a) 750 W; (б) 1250 W; (в) 1500 W; (г) 2000 W

Элементный анализ с помощью метода ЭДС также выявил заметные изменения в составе нитей УНТ, подвергавшихся воздействию электрического поля СВЧ излучения. Изменения в составе главным образом представлены снижением количества железа в нитях УНТ (табл. 2). Можно заметить, что секундное воздействие электрического поля СВЧ излучения оказалось достаточным для значительного уменьшения количества железа в составе нити. Так, воздействуя на нить излучением с мощностью 1500 Вт, удалось снизить содержание железа до 6 мас.% с сохранением собственной структуры УНТ. Поскольку на поверхности кварцевой лодочки после экспериментов с высокой мощностью наблюдались осадки черного и оранжевого цвета, эффект очистки УНТ, вероятно, объясняется нагревом и агломерированием частиц остаточного катализатора с последующим выходом наружу. Однако точное определение механизма снижения количества железа при воздействии электрического поля микроволнового излучения требует дальнейшего рассмотрения.

Таблица 2

Содержание железа в нитях УНТ, подвергнутых воздействию электрического поля микроволнового излучения, по данным ЭДС (мас.%)

Table 2. Iron content in CNT fibers exposed to microwave electric field, according to EDS (wt.%)

№	Мощность, Вт	Fe	Примечание
1	0	14,9-18,1	Исходная нить
2	250	15,6-16,4	Снижение количества аморфного углерода
3	500	7,6-11,2	
4	750	8,7-11,6	Наименьшее количество аморфного углерода
5	1000	6,1-7,5	Рост количества аморфного углерода
6	1250	5,1-7,3	
7	1500	6,1-6,3	
8	1750	11,6-15,5	Нить оборвалась
10	2000	0-0,2	Нить оборвалась, УНТ сильно деформированы

Таким образом, воздействие именно электрического поля СВЧ излучения с частотой 2,45 ГГц может рассматриваться как эффективный и быстрый способ очистки УНТ от частиц остаточного катализатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vigolo B., Pénicaud A., Coulon C., Sauder C., Pailler R., Journet C., Bernier P., Poulin P. Macroscopic fibers and ribbons of oriented carbon nanotubes. *Science*. 2000. V. 290. N 5495. P. 1331-1334. DOI: 10.1126/science.290.5495.1331.

ВЫВОДЫ

В работе исследовано влияние воздействия по отдельности магнитного и электрического поля микроволнового излучения на структуру и состав материала нитей, сформированных из углеродных нанотрубок.

Установлено, что воздействие магнитного поля СВЧ излучения с частотой 2,45 ГГц не оказывает влияния на структуру и элементный состав даже при использовании мощности 1300 Вт в течение 20 мин.

Выявлено, что кратковременное воздействие электрического поля СВЧ излучения с частотой 2,45 ГГц способствует изменению количества аморфного углерода, изменению структуры УНТ и уменьшению количества частиц остаточного катализатора в составе нитей УНТ. В частности, продемонстрировано, что с использованием излучения мощностью 1500 Вт в течение 1 с можно добиться снижения содержания железа до 6 мас.%.

Полученные результаты могут быть полезны для исследования магнитных свойств материалов, содержащих УНТ, в микроволновом диапазоне частот, а также для исследования способов модификации и обработки УНТ с целью изменения структуры и элементного состава.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП НИЦ «Курчатовский институт» — ТИСНУМ).

Авторы выражают благодарность Батовой Н.И. за проведение исследований методом растровой электронной микроскопии.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of the NRC «Kurchatov Institute» TISNCM.

The authors gratefully acknowledge Batova N.I. for SEM measurements.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. Vigolo B., Pénicaud A., Coulon C., Sauder C., Pailler R., Journet C., Bernier P., Poulin P. Macroscopic fibers and ribbons of oriented carbon nanotubes. *Science*. 2000. V. 290. N 5495. P. 1331-1334. DOI: 10.1126/science.290.5495.1331.

2. Behabtu N., Young C.C., Tsentalovich D.E., Kleinerman O., Wang X., Ma A.W.K., Bengio E.A., Ter Waarbeek R.F., De Jong J.J., Hoogerwerf R.E., Fairchild S.B., Ferguson J.B., Maruyama B., Kono J., Talmon Y., Cohen Y., Otto M.J., Pasquali M. Strong, Light, Multifunctional Fibers of Carbon Nanotubes with Ultrahigh Conductivity. *Science*. 2013. V. 339. N 6116. P. 182-186. DOI: 10.1126/science.1228061.
3. Yang Z., Yang Y., Huang Y., Shao Y., Hao H., Yao S., Xi Q., Guo Y., Tong L., Jian M., Shao Y., Zhang J. Wet-spinning of carbon nanotube fibers: dispersion, processing and properties. *Natl. Sci. Rev.* 2024. V. 11. N 10. P. nwae203. DOI: 10.1093/nsr/nwae203
4. Li Y.-L., Kinloch I. A., Windle A.H. Direct Spinning of Carbon Nanotube Fibers from Chemical Vapor Deposition Synthesis. *Science*. 2004. V. 304. N 5668. P. 276-278. DOI: 10.1126/science.1094982.
5. Koziol K., Vilatela J., Moisala A., Motta M., Cunniff P., Sennett M., Windle A. High-Performance Carbon Nanotube Fiber. *Science*. 2007. V. 318. N 5858. P. 1892-1895. DOI: 10.1126/science.1147635.
6. Kuznetsov A.A., Fonseca A.F., Baughman R.H., Zakhidov A.A. Structural Model for Dry-Drawing of Sheets and Yarns from Carbon Nanotube Forests. *ACS Nano*. 2011. V. 5. N 2. P. 985-993. DOI: 10.1021/nn102405u.
7. Dariyal P., Arya A.K., Singh B.P., Dhakate S.R. A review on conducting carbon nanotube fibers spun via direct spinning technique. *J. Mater. Sci.* 2021. V. 56. N 2. P. 1087-1115. DOI: 10.1007/s10853-020-05304-z.
8. Wang H.-Z., Jiao X.-Y., Gao Z.-Q., Hou P.-X., Xu L.-L., Shi C., Liang Y., Wang Y.-P., Liu C. Highly Conductive Double-Wall Carbon Nanotube Fibers Produced by Dry-Jet Wet Spinning. *Adv. Funct. Mater.* 2024. V. 34. N 39. P. 2404538. DOI: 10.1002/adfm.202404538.
9. Di J., Zhang X., Yong Z., Zhang Y., Li D., Li R., Li Q. Carbon-Nanotube Fibers for Wearable Devices and Smart Textiles. *Adv. Mater.* 2016. V. 28. N 47. P. 10529-10538. DOI: 10.1002/adma.201601186.
10. Du D., Tang Z., Ouyang J. Highly washable e-textile prepared by ultrasonic nanosoldering of carbon nanotubes onto polymer fibers. *J. Mater. Chem. C*. 2018. V. 6. N 4. P. 883-889. DOI: 10.1039/C7TC05179D.
11. Schulz M.J., Chitranshi M., Chauhan D., Kubley A., Pujari A., Xu C., Chen D., Chaudhary S., Hou G., Bell G., Brandewie B., Kaneria R., Hudepohl R. Pioneering carbon nanotube textile engineering & fashion technology. *J. Text. Eng. Fash. Technol.* 2019. V. 5. N 2. P. 89-92. DOI: 10.15406/jteft.2019.05.00187.
12. Komatsu N., Ichinose Y., Dewey O.S., Taylor L.W., Trafford M.A., Yomogida Y., Wehmeyer G., Pasquali M., Yanagi K., Kono J. Macroscopic weavable fibers of carbon nanotubes with giant thermoelectric power factor. *Nat. Commun.* 2021. V. 12. N 1. P. 4931. DOI: 10.1038/s41467-021-25208-z.
13. Hossain M.M., Li B.M., Sennik B., Jur J.S., Bradford P.D. Adhesive free, conformable and washable carbon nanotube fabric electrodes for biosensing. *npj Flex. Electron.* 2022. V. 6. N 1. P. 97. DOI: 10.1038/s41528-022-00230-3.
14. Duy L.T., Sial Q.A., Seo H. Improvement of Stretchable and Washable Carbon-Nanotube-Based Textile Supercapacitors by using Molybdenum Trioxide Nanoflakes and Prewashing Treatment. *Adv. Mater. Technol.* 2022. V. 7. N 7. P. 2101204. DOI: 10.1002/admt.202101204.
2. Behabtu N., Young C.C., Tsentalovich D.E., Kleinerman O., Wang X., Ma A.W.K., Bengio E.A., Ter Waarbeek R.F., De Jong J.J., Hoogerwerf R.E., Fairchild S.B., Ferguson J.B., Maruyama B., Kono J., Talmon Y., Cohen Y., Otto M.J., Pasquali M. Strong, Light, Multifunctional Fibers of Carbon Nanotubes with Ultrahigh Conductivity. *Science*. 2013. V. 339. N 6116. P. 182-186. DOI: 10.1126/science.1228061.
3. Yang Z., Yang Y., Huang Y., Shao Y., Hao H., Yao S., Xi Q., Guo Y., Tong L., Jian M., Shao Y., Zhang J. Wet-spinning of carbon nanotube fibers: dispersion, processing and properties. *Natl. Sci. Rev.* 2024. V. 11. N 10. P. nwae203. DOI: 10.1093/nsr/nwae203
4. Li Y.-L., Kinloch I. A., Windle A.H. Direct Spinning of Carbon Nanotube Fibers from Chemical Vapor Deposition Synthesis. *Science*. 2004. V. 304. N 5668. P. 276-278. DOI: 10.1126/science.1094982.
5. Koziol K., Vilatela J., Moisala A., Motta M., Cunniff P., Sennett M., Windle A. High-Performance Carbon Nanotube Fiber. *Science*. 2007. V. 318. N 5858. P. 1892-1895. DOI: 10.1126/science.1147635.
6. Kuznetsov A.A., Fonseca A.F., Baughman R.H., Zakhidov A.A. Structural Model for Dry-Drawing of Sheets and Yarns from Carbon Nanotube Forests. *ACS Nano*. 2011. V. 5. N 2. P. 985-993. DOI: 10.1021/nn102405u.
7. Dariyal P., Arya A.K., Singh B.P., Dhakate S.R. A review on conducting carbon nanotube fibers spun via direct spinning technique. *J. Mater. Sci.* 2021. V. 56. N 2. P. 1087-1115. DOI: 10.1007/s10853-020-05304-z.
8. Wang H.-Z., Jiao X.-Y., Gao Z.-Q., Hou P.-X., Xu L.-L., Shi C., Liang Y., Wang Y.-P., Liu C. Highly Conductive Double-Wall Carbon Nanotube Fibers Produced by Dry-Jet Wet Spinning. *Adv. Funct. Mater.* 2024. V. 34. N 39. P. 2404538. DOI: 10.1002/adfm.202404538.
9. Di J., Zhang X., Yong Z., Zhang Y., Li D., Li R., Li Q. Carbon-Nanotube Fibers for Wearable Devices and Smart Textiles. *Adv. Mater.* 2016. V. 28. N 47. P. 10529-10538. DOI: 10.1002/adma.201601186.
10. Du D., Tang Z., Ouyang J. Highly washable e-textile prepared by ultrasonic nanosoldering of carbon nanotubes onto polymer fibers. *J. Mater. Chem. C*. 2018. V. 6. N 4. P. 883-889. DOI: 10.1039/C7TC05179D.
11. Schulz M.J., Chitranshi M., Chauhan D., Kubley A., Pujari A., Xu C., Chen D., Chaudhary S., Hou G., Bell G., Brandewie B., Kaneria R., Hudepohl R. Pioneering carbon nanotube textile engineering & fashion technology. *J. Text. Eng. Fash. Technol.* 2019. V. 5. N 2. P. 89-92. DOI: 10.15406/jteft.2019.05.00187.
12. Komatsu N., Ichinose Y., Dewey O.S., Taylor L.W., Trafford M.A., Yomogida Y., Wehmeyer G., Pasquali M., Yanagi K., Kono J. Macroscopic weavable fibers of carbon nanotubes with giant thermoelectric power factor. *Nat. Commun.* 2021. V. 12. N 1. P. 4931. DOI: 10.1038/s41467-021-25208-z.
13. Hossain M.M., Li B.M., Sennik B., Jur J.S., Bradford P.D. Adhesive free, conformable and washable carbon nanotube fabric electrodes for biosensing. *npj Flex. Electron.* 2022. V. 6. N 1. P. 97. DOI: 10.1038/s41528-022-00230-3.
14. Duy L.T., Sial Q.A., Seo H. Improvement of Stretchable and Washable Carbon-Nanotube-Based Textile Supercapacitors by using Molybdenum Trioxide Nanoflakes and Prewashing

15. **Hossain Md. M., Lubna M.M., Bradford P.D.** Multifunctional and Washable Carbon Nanotube-Wrapped Textile Yarns for Wearable E-Textiles. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2023. V. 15. N 2. P. 3365-3376. DOI: 10.1021/acsami.2c19826.
16. **Grabowska K., Januszkiewicz Ł., Pabjańczyk-Wlazło E.** Shielding Effectiveness of Textile Woven Fabric with Carbon Nanotubes Yarn. *J. Nat. Fibers*. 2024. V. 21. N 1. P. 2418347. DOI: 10.1080/15440478.2024.2418347.
17. **Наумова В.А., Мордкович В.З., Хасков М.А., Де В.В., Кульницкий Б.А., Караева А.Р.** Роль воды в процессе деметаллизации продуктов каталитического синтеза длинных углеродных нанотрубок. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 10. С. 66-74. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.5y.
18. **Караева А.Р., Хасков М.А., Куржумбаев Д.Ж., Кульницкий Б.А., Мордкович В.З.** Исследование фторированных двустенных углеродных нанотрубок. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 10. С. 38-48. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.4y.
19. **Агеева Е.А., Жукова Е.А., Караева А.Р., Мордкович В.З.** Изменение физических свойств сверхдлинных углеродных нанотрубок в результате их очистки различными методами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 9. С. 74-79. DOI: 10.6060/tcct.20165909.1y.
20. **Щегольков А.В., Орлова Н.В., Щегольков А.В., Чумак М.А.** Исследование морфологии углеродных нанотрубок, полученных СВЧ-синтезом, для композитного электронагревателя с эффектом саморегулирования температуры. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 2. С. 70-78. DOI: 10.6060/ivkkt.20256802.7157.
21. **Baghel P, Sakhiya A.K., Kaushal P.** Ultrafast growth of carbon nanotubes using microwave irradiation: characterization and its potential applications. *Heliyon*. 2022. V. 8. N 10. P. e10943. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10943.
22. **Lichta G., Hofstetterb K., Licht S.** Intense, self-induced sustainable microwave plasma using carbon nanotubes made from CO₂. *Nanoscale*. 2025. V. 15. DOI: 10.1039/D4NR04097J.
23. **Караева А.Р., Урванов С.А., Казеннов Н.В., Митберг Э.Б., Мордкович В.З.** Особенности углеродных нанотрубок, полученных в присутствии металлоценов элементов VIII группы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 4-9. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.6y.
24. **Shandakov S.D., Kosobutsky A.V., Rybakov M.S., Sevostyanov O.G., Russakov D.M.** Effect of gaseous and condensate products of ethanol decomposition on aerosol CVD synthesis of single-walled carbon nanotubes. *Carbon*. 2018. V. 126. P. 522-531. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.10.064.
25. **Novikov I.V., Krasnikov D.V., Lee I.H., Agafonova E.E., Serebrennikova S.I., Lee Y., Kim S., Nam J.-S., Kondrashov V.A., Han J., Rakov I.I., Nasibulin A.G., Jeon I.** Aerosol CVD Carbon Nanotube Thin Films: From Synthesis to Advanced Applications: A Comprehensive Review. *Adv. Mater.* 2025. P. 2413777. DOI: 10.1002/adma.202413777.
26. **Mordkovich V.Z., Kazennov N.V., Ermolaev V.S., Zhukova E.A., Karaeva A.R.** Scaled-up process for producing longer carbon nanotubes and carbon cotton by macro-spools. *Diam. Relat. Mater.* 2018. V. 83. P. 15-20. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.01.017.
27. **Kulnitskiy B.A., Perezhogin I.A., Bredikhina A.S., Lazareva E.S., Zhukova E.A., Karaeva A.R., Mordkovich Treatment.** *Adv. Mater. Technol.* 2022. V. 7. N 7. P. 2101204. DOI: 10.1002/admt.202101204.
15. **Hossain Md. M., Lubna M.M., Bradford P.D.** Multifunctional and Washable Carbon Nanotube-Wrapped Textile Yarns for Wearable E-Textiles. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2023. V. 15. N 2. P. 3365-3376. DOI: 10.1021/acsami.2c19826.
16. **Grabowska K., Januszkiewicz Ł., Pabjańczyk-Wlazło E.** Shielding Effectiveness of Textile Woven Fabric with Carbon Nanotubes Yarn. *J. Nat. Fibers*. 2024. V. 21. N 1. P. 2418347. DOI: 10.1080/15440478.2024.2418347.
17. **Naumova V.A., Mordkovich V.Z., Khaskov M.A., De V.V., Kulnitskiy B.A., Karaeva A.R.** The role of water in the process of demetallization of products of the catalytic synthesis of long carbon nanotubes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 10. P. 66-74 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.5y.
18. **Karaeva A.R., Khaskov M.A., Kurzhumbaev D.Zh., Kulnitskiy B.A., Mordkovich V.Z.** Investigation of fluorinated double-wall carbon nanotubes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 10. P. 38-48 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.4y.
19. **Ageeva E.A., Zhukova E.A., Karaeva A.R., Mordkovich V.Z.** Changes in physical properties of super long carbon nanotubes after different methods of purification. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2016. V. 59. N 9. P. 74-79 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20165909.1y.
20. **Shchegolkov A.V., Orlova N.V., Shchegolkov A.V., Chumak M.A.** Study of morphology of carbon nanotubes produced by microwave synthesis for composite electric heater with temperature self-regulation effect. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 2. P. 70-78 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20256802.7157.
21. **Baghel P, Sakhiya A.K., Kaushal P.** Ultrafast growth of carbon nanotubes using microwave irradiation: characterization and its potential applications. *Heliyon*. 2022. V. 8. N 10. P. e10943. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10943.
22. **Lichta G., Hofstetterb K., Licht S.** Intense, self-induced sustainable microwave plasma using carbon nanotubes made from CO₂. *Nanoscale*. 2025. V. 15. DOI: 10.1039/D4NR04097J.
23. **Karaeva A.R., Urvanov S.A., Kazennov N.V., Mitberg E.B., Mordkovich V.Z.** Features of carbon nanotubes obtained in presence of metallocenes of group VIII elements. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 4-9 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.6y.
24. **Shandakov S.D., Kosobutsky A.V., Rybakov M.S., Sevostyanov O.G., Russakov D.M.** Effect of gaseous and condensate products of ethanol decomposition on aerosol CVD synthesis of single-walled carbon nanotubes. *Carbon*. 2018. V. 126. P. 522-531. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.10.064.
25. **Novikov I.V., Krasnikov D.V., Lee I.H., Agafonova E.E., Serebrennikova S.I., Lee Y., Kim S., Nam J.-S., Kondrashov V.A., Han J., Rakov I.I., Nasibulin A.G., Jeon I.** Aerosol CVD Carbon Nanotube Thin Films: From Synthesis to Advanced Applications: A Comprehensive Review. *Adv. Mater.* 2025. P. 2413777. DOI: 10.1002/adma.202413777.
26. **Mordkovich V.Z., Kazennov N.V., Ermolaev V.S., Zhukova E.A., Karaeva A.R.** Scaled-up process for producing longer carbon nanotubes and carbon cotton by

- V.Z., Blank V.D.** Structural features of iron-containing particles inside carbon nanotubes. *Mater. Res. Express*. 2017. V. 4. N 7. P. 075053. DOI: 10.1088/2053-1591/aa7b20.
28. **Kulnitskiy B.A., Mordkovich V.Z., Karaeva A.R., Urvanov S.A., Blank V.D.** Cubic and tetragonal maghemite formation inside carbon nanotubes under chemical vapor deposition process conditions. *Fuller. Nanotub. Carbon Nanostructures*. 2020. V. 28. N 11. P. 913–918. DOI: 10.1080/1536383X.2020.1784146.
 29. **Kurzhumbaev D.Zh., Mitberg E.B., Kalenov D.S., Parikhomenko M.P., Eremin I.S., Urvanov S.A., Karaeva A.R., Mordkovich V.Z., von Gratoski S.V.** Carbon Nanotube Thread as a Material for Flexible Microwave Absorbers. *J. Electromagn. Waves Appl.* 2023. V. 37. N 6. P. 767-781. DOI:10.1080/09205071.2023.2204405.
 27. **Kulnitskiy B.A., Perezhogin I.A., Bredikhina A.S., Lazareva E.S., Zhukova E.A., Karaeva A.R., Mordkovich V.Z., Blank V.D.** Structural features of iron-containing particles inside carbon nanotubes. *Mater. Res. Express*. 2017. V. 4. N 7. P. 075053. DOI: 10.1088/2053-1591/aa7b20.
 28. **Kulnitskiy B.A., Mordkovich V.Z., Karaeva A.R., Urvanov S.A., Blank V.D.** Cubic and tetragonal maghemite formation inside carbon nanotubes under chemical vapor deposition process conditions. *Fuller. Nanotub. Carbon Nanostructures*. 2020. V. 28. N 11. P. 913–918. DOI: 10.1080/1536383X.2020.1784146.
 29. **Kurzhumbaev D.Zh., Mitberg E.B., Kalenov D.S., Parikhomenko M.P., Eremin I.S., Urvanov S.A., Karaeva A.R., Mordkovich V.Z., von Gratoski S.V.** Carbon Nanotube Thread as a Material for Flexible Microwave Absorbers. *J. Electromagn. Waves Appl.* 2023. V. 37. N 6. P. 767-781. DOI:10.1080/09205071.2023.2204405.

Поступила в редакцию 06.05.2025

Принята к опубликованию 20.06.2025

Received 06.05.2025

Accepted 20.06.2025