

Композиционные материалы на основе полипропилена и наночастиц CoFe_2O_4 , полученные методом полимеризационного наполнения

*А. М. Жуков^{1,2}✉, А. В. Семенов¹, А. Н. Клямкина¹, А. С. Фионов³,
Е. А. Овченков⁴, П. М. Недорезова¹*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: zhukov765311@yandex.ru

²Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Факультет физики, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 09.10.2025 г.; после доработки: 17.11.2025 г.; принята в печать: 18.11.2025 г.

Аннотация – Методом полимеризационного наполнения синтезированы композиционные материалы на основе полипропилена и наноразмерного феррита кобальта (CoFe_2O_4). Исходные наночастицы охарактеризованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), средний размер наночастиц составил около 7,5 нм. Композиты также охарактеризовали методом ПЭМ, согласно которому установлено, что частицы в материале распределены равномерно, при этом часть из них агломерирует. Методами дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа были исследованы теплофизические свойства композитов. Полученные данные свидетельствуют об увеличении термостабильности полипропилена в присутствии наноразмерного CoFe_2O_4 . Также были исследованы магнитные свойства исходного феррита и композитов на его основе. Все полученные образцы можно отнести к классу магнитомягких. Значение намагниченности насыщения (M_s) увеличивается с повышением концентрации феррита кобальта в полипропилене

Ключевые слова: наночастицы, наноматериалы, полимеризационное наполнение, полипропилен, феррит кобальта.

Materials with new functional properties

UDC 691.175.2

DOI: 10.25514/CHS.2025.2.29005

Composite materials based on polypropylene and CoFe_2O_4 nanoparticles obtained by polymerization filling

Alexander M. Zhukov^{1,2}✉, Andrey V. Semenov¹, Alla N. Klyamkina¹, Alexander S. Fionov³, Evgeniy A. Ovchenkov⁴ and Polina M. Nedorezova¹

¹N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: zhukov765311@yandex.ru

²NTI Center “Digital Materials Science: New Materials and Substances” Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Received: October 9, 2025; Revised: November 17, 2025; Accepted: November 18, 2025

Abstract – Composite materials based on polypropylene and nanoscale cobalt ferrite (CoFe₂O₄) have been synthesized for the first time by polymerization filling. The initial nanoparticles were characterized by transmission electron microscopy (TEM), with an average nanoparticle size of about 7.5 nm. Composites were also characterized by the TEM method, according to which it was found that the particles in the material are evenly distributed, while some of them agglomerate. The thermophysical properties of composites were investigated using differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis. The data obtained indicate an increase in the thermal stability of PP in the presence of nanoscale CoFe₂O₄. The magnetic properties of the initial ferrite and composites based on it were also investigated. All the samples obtained can be classified as magnetically soft. The saturation magnetization (Ms) value increases with increasing concentration of cobalt ferrite in polypropylene

Keywords: nanoparticles, nanomaterials, polymerization filling, polypropylene, cobalt ferrite.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитоактивные полимерные нанокомпозиты – это материалы с полимерной матрицей и магнитными наночастицами. Они относятся к «умным» материалам и вызывают большой научный и практический интерес [1]. Указанные материалы используются для решения задач в области охраны окружающей среды. Их уникальные физико-химические свойства, такие как высокая магнитная управляемость и адсорбционная активность, обеспечивают эффективную очистку водных ресурсов, детоксикацию воздушной среды, ремедиацию почв и утилизацию отходов.

Основными преимуществами магнитоактивных полимерных материалов являются:

- Магнитное управление: возможность легко отделять материал от загрязнителей с помощью магнитного поля;
- Высокая адсорбционная способность по отношению к различным типам загрязнителей;
- Возможность повторного использования: полимерные материалы могут быть регенерированы и использованы многократно, что снижает затраты на их утилизацию;
- Селективность: возможность создания материалов с высокой селективностью к определенным загрязнителям.

В основе получения многих видов полимерных композиционных материалов лежит процесс смешения. Виды процессов смешения разнообразны: это смешение через расплав, когда в расплав вводятся жидкие или твердые порошкообразные добавки; смешение двух жидких компонентов (олигомеры, расплавы полимеров); смешение порошков и т. п. Предварительно все ингредиенты должны быть соответствующим образом подготовлены: измельчены, высушены, нагреты, аппретированы и т. д. Полимерные композиционные материалы на основе разнообразных наполнителей уже давно применяют при изготовлении изделий различного назначения. Постоянно ведутся работы по созданию новых композитов с улучшенными или новыми функциональными и эксплуатационными свойствами, которые способны повысить эффективность использования материалов и расширить области их применения. В качестве альтернативного метода для получения композитов с улучшенными свойствами был предложен метод полимеризационного наполнения.

Метод полимеризационного наполнения (полимеризация *in situ*), разработанный в Институте химической физики, который позволяет вводить наполнители в полимерную матрицу непосредственно в ходе ее синтеза, является перспективным методом получения композиционных материалов.

Этот метод приводит к более равномерному распределению наполнителей в полимере, что способствует улучшению функциональных характеристик композита.

Согласно данному методу, полимерные композиции получают путем полимеризации мономера на поверхности каталитически активированных наполнителей. Процесс состоит из трех основных стадий: подготовки наполнителя, активации поверхности наполнителя металлокомплексным катализатором, полимеризации мономера на поверхности наполнителя. В результате, частицы наполнителя покрываются слоем полимера. Степень наполнения и, соответственно, толщина полимерного покрытия легко контролируется условиями проведения процесса. Данный метод позволяет вводить наполнители в высоко- и сверхвысокомолекулярные полимерные матрицы и получать композиционные материалы с равномерным распределением частиц наполнителя в полимере [2]. Использование метода полимеризации *in situ*, позволяет преодолевать существенные недостатки, возникающие в ходе традиционных способов смешения и очень широко варьировать структуру, свойства и толщину полимерного слоя, образующегося на частицах наполнителя в композитах.

Полипропилен (ПП) является одним из наиболее широко используемых термопластов наряду с полиэтиленом высокого давления (ПЭВД) и полиэтиленом низкого давления (ПЭНД) [3]. Его популярность обусловлена спектром полезных свойств, среди которых можно выделить: легкость обработки, хороший баланс механических свойств, низкие диэлектрические потери, высокое объемное сопротивление и относительная дешевизна [3, 4]. Тем не менее, непрерывно ведутся поиски новых путей модификации свойств ПП с целью расширения областей его применения. Один из перспективных

способов модификации ПП – введение наноразмерных наполнителей, что позволяет улучшить комплекс свойств этого важного промышленного полимера [5].

В качестве наполнителя в данной работе был выбран наноразмерный феррит кобальта CoFe_2O_4 (CFO), который обладает особыми магнитными и электрофизическими свойствами [6, 7]. Наноразмерный феррит кобальта является одним из наиболее востребованных ферритов, благодаря его широкому спектру применения. [8]. Известно его применение в качестве катализаторов [9–11], адсорбентов [12, 13], электродов литий-ионных источников тока [14, 15]. Это связано с тем, что ферриты, обладающие обратной структурой, как правило, имеют уникальные магнитные свойства и высокую намагниченность насыщения [16]. CoFe_2O_4 , в зависимости от условий синтеза, обладает обратным, либо смешанным типом структуры [17]. Он характеризуется химической стабильностью, высокой каталитической активностью и возможностью повторного использования в органическом катализе, что отмечают авторы работ [17–20].

Модификация полиолефинов путем введения наночастиц позволяет значительно улучшить их функциональные свойства, такие как электрофизические характеристики, теплопроводность, термостойкость и барьерные свойства [21]. Это особенно важно при получении композиционных материалов, в том числе магнитоактивных, так как при таком способе обеспечивается хорошая воспроизводимость свойств.

Для получения магнитоактивных композиционных материалов оптимально использование наночастиц феррита кобальта с их уникальными характеристиками [22–25].

Целью работы является создание новых функциональных материалов с улучшенной термостабильностью, управляемой кристалличностью и магнитными свойствами, перспективные для экологических и технических применений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез наполнителя проводили согласно методике, представленной в работе [26] с некоторыми изменениями в связи со спецификой дальнейшей работы с наночастицами.

В качестве исходных металлосодержащих соединений (МСС) для получения наночастиц использовали нонагидрат нитрата железа(III) $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и гексагидрат нитрата кобальта $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в соотношении 2:1. В качестве поверхностно-активного вещества (ПАВ) использовали гексадецилтриметиламмонийбромид (ГТАБ). Вместо воды в качестве растворителя применяли этанол. Сначала были приготовлены растворы соответствующих солей в этаноле, которые затем перемешивали со скоростью около 1000 об/мин. Затем добавляли этиленгликоль и ГТАБ. После 10 минут перемешивания по каплям добавляли раствор NaOH в этаноле. Образовался коллоидный раствор черного цвета. Затем раствор центрифугировали и сушили. Частицы представляли собой коричнево-черный порошок.

Подготовку наполнителя осуществляли следующим образом: готовили суспензию порошка CoFe_2O_4 в этиловом спирте, обрабатывали ее ультразвуком 30 мин, (мощность УЗ-излучателя составляла 35 Вт), после этого наполнитель вакуумировали при нагреве 200°C , охлаждали и заполняли емкость аргоном. Ранее было показано, что методика предварительной ультразвуковой обработки суспензии наполнителя приводит к уменьшению размеров агломератов и к лучшему распределению наночастиц в полимерной матрице [12].

Синтез композиционных материалов проводили в массе пропилена по методу, описанному в работе [27].

Нанокomпозиты получали при температуре 70°C в стальном реакторе объемом 400 см^3 , снабженным высокоскоростной мешалкой (3000 об/мин) в режиме полного заполнения реактора жидким мономером при давлении, превышающем давление насыщенных паров пропилена, соответствующее данной температуре. Заданное количество наполнителя вводили в реактор, реактор с наполнителем вакуумировали при температуре опыта в течение 1 часа и заполняли жидким пропиленом, после этого вводили катализатор и сокатализатор.

Главным звеном в производстве полиолефинов является катализатор. Разработке и усовершенствованию катализаторов посвящено огромное количество исследований и патентов. В промышленности для полимеризации α -олефинов используются, в основном, гетерогенные нанесенные катализаторы Циглера-Натта, состоящие из галогенидов переходных металлов (титана или ванадия), модифицированных электронодонорными соединениями, и алюминийорганического соединения, используемого в качестве сокатализатора.

Синтез композитов проводили с использованием различных каталитических систем – металлоценовых или циглеровского типа. Установлено, что для эффективного получения композиционных материалов на основе полипропилена с CoFe_2O_4 наиболее перспективен катализатор, разработанный в Институте химической физики, на основе TiCl_4 , AlEt_2Cl и $n\text{-Bu}_2\text{O}$. При активации этого катализатора AlEt_2Cl система характеризуется высокой активностью и стереоспецифичностью при синтезе композиционных материалов на основе изотактического полипропилена.

Для получения материала с заданным содержанием наполнителя варьировали время полимеризации. После окончания полимеризации порошок композиционного материала выгружали из реактора и отмывали от остатков компонентов каталитической системы смесью этилового спирта и HCl , после чего сушили до постоянной массы в вакууме при 60°C . Получены композиты с содержанием CoFe_2O_4 5% мас. и 20% мас.

Размеры железосодержащих наночастиц определяли с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-1011 фирмы JEOL. Для этого, исследуемый материал подвергали УЗ-диспергированию в этиловом спирте, диспергированный порошок наносили на медную подложку.

Рентгеновские спектры насцентных полимерных материалов снимали на дифрактометре URD-6 ($\text{CuK}\alpha$ – излучение, Ni фильтр, скорость сканирования

0,97 град (2θ /мин). Сканирование дифракционной картины охватывало интервал углов дифракции $2\theta = 8^\circ \div 50^\circ$ с поточечным шагом $\Delta 2\theta = 0,02^\circ$.

Теплофизические характеристики (температура и энтальпия плавления и кристаллизации) нанокомпозитов определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием прибора DSC-7 (Perkin-Elmer) при скорости нагрева/охлаждения 10 К/мин. Кристалличность (К) определяли по формуле $K\% = (\Delta H / \Delta H_0) \times 100$. Энтальпию плавления ПП со степенью кристалличности 100% (ΔH_0) принимали равной 165 ± 18 Дж/г. Термогравиметрический анализ (ТГА) образцов проводили на термомикровесах TG 209 F1 Iris (Netzsch, Германия) в динамических условиях в аргоне при скорости нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 600°C .

Магнитные измерения проводились с помощью магнитометра импульсного поля, измерителя магнитной восприимчивости, а также вибрационного магнитометра EG&G PARC 155. Магнитометр импульсного поля позволяет достичь напряженности поля 35 Тл со временем нарастания около 8 миллисекунд. Магнитную восприимчивость измеряли в переменном поле напряженностью 1 мТл и частотой 118 Гц. Вибрационный магнитометр для образцов использовался для измерений в магнитном поле не сильнее 0,5 Тл.

Исследование удельного объемного сопротивления ρ_v на постоянном токе и диэлектрической проницаемости ϵ на частотах 1 кГц и 1 МГц образцов композитов проводили в емкостной ячейке с плоскими электродами круглой формы. При измерениях использовали вольтметр электрометрический В7Э-42 и калибратор ПЗ20 в качестве источника напряжения, измерители LCR E7-8 (рабочая частота 1 кГц) и E7-12 (рабочая частота 1 МГц). Исследования на частоте 1 ГГц выполняли в коаксиальном резонаторе с торцовым зазором, в качестве генератора и индикатора резонанса использовали анализатор спектра Rohde&Schwartz FSP7.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены микрофотографии синтезированного наполнителя.

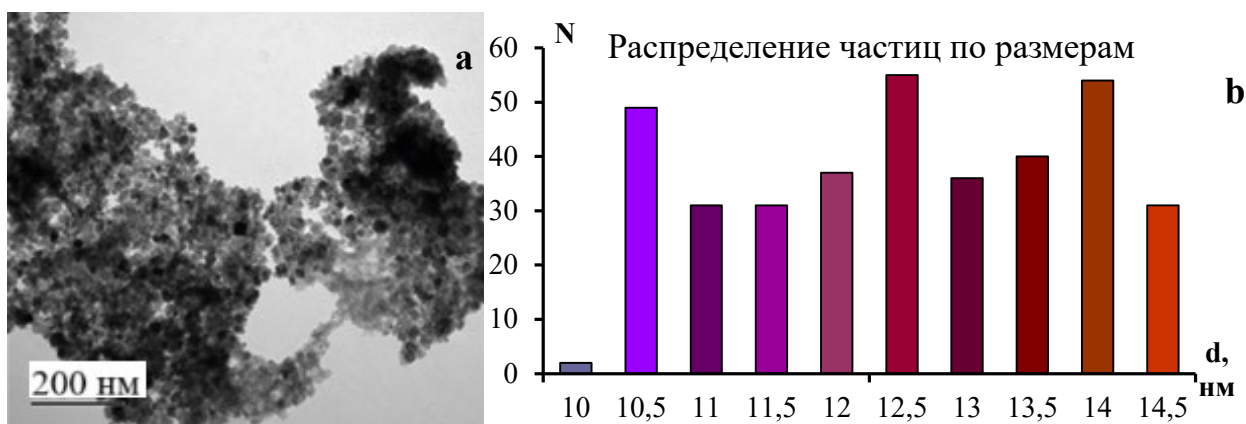


Рис. 1. Микрофотография ПЭМ наночастиц феррита кобальта CoFe_2O_4 (a) и распределение частиц по размерам (b)

Fig. 1. TEM micrography of cobalt ferrite CoFe_2O_4 nanoparticles (a) and particle size distribution (b)

Размеры частиц, согласно просвечивающей электронной микроскопии, составили около $12,5 \pm 2$ нм.

На рисунке 2 представлена микрофотография нанокompозита PP/CFO с содержанием наполнителя 5% мас.

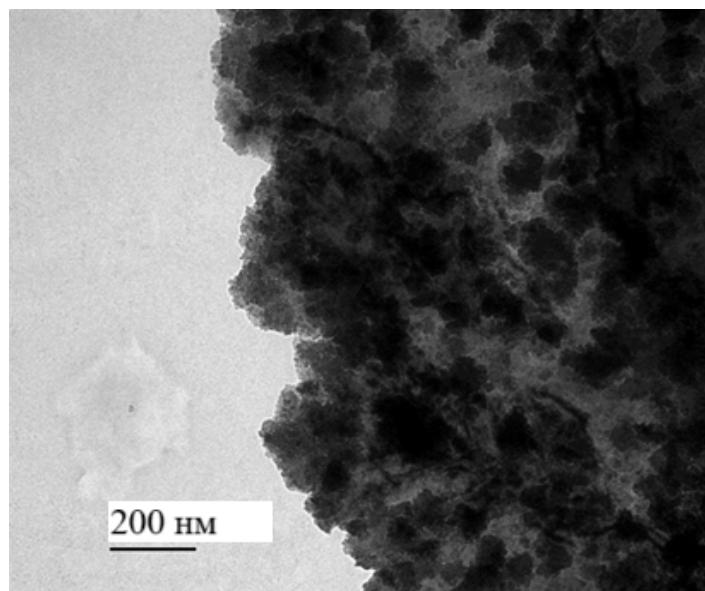


Рис. 2. Микрофотография ПЭМ для нанокompозита PP / 5% мас. CFO.

Fig. 2. TEM micrography for PP/5% wt. CFO nanocomposite.

Согласно этой микрофотографии, частицы в материале распределены достаточно равномерно, при этом часть из них агломерирует.

Рентгенограммы чистого ПП и нанокompозитов с различным содержанием наполнителя представлены на рисунке 3.

Дифрактограммы характерны для ПП, содержащего две кристаллические полиморфные модификации - α - и γ - фазы. При введении наполнителя на рентгенограмме появляются пики при $2\theta \approx 31,8^\circ$ и $45,8^\circ$, интенсивность которых увеличивается с увеличением содержания CoFe_2O_4 . Присутствие этих пиков означает, что частицы CoFe_2O_4 сохраняют свою кристаллическую форму в нанокompозитах, не интеркалируясь и не расслаиваясь во время процесса синтеза. Степень кристалличности образцов находили по соотношению интегральной интенсивности кристаллической составляющей и общей интенсивности. Полученные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Степень кристалличности нанокompозитов по данным PCA.

Table 1. The degree of crystallinity of nanocomposites according to XRD data.

Содержание наполнителя, % мас.	Кристалличность, %
0	36,9
5	46,6
20	39,6

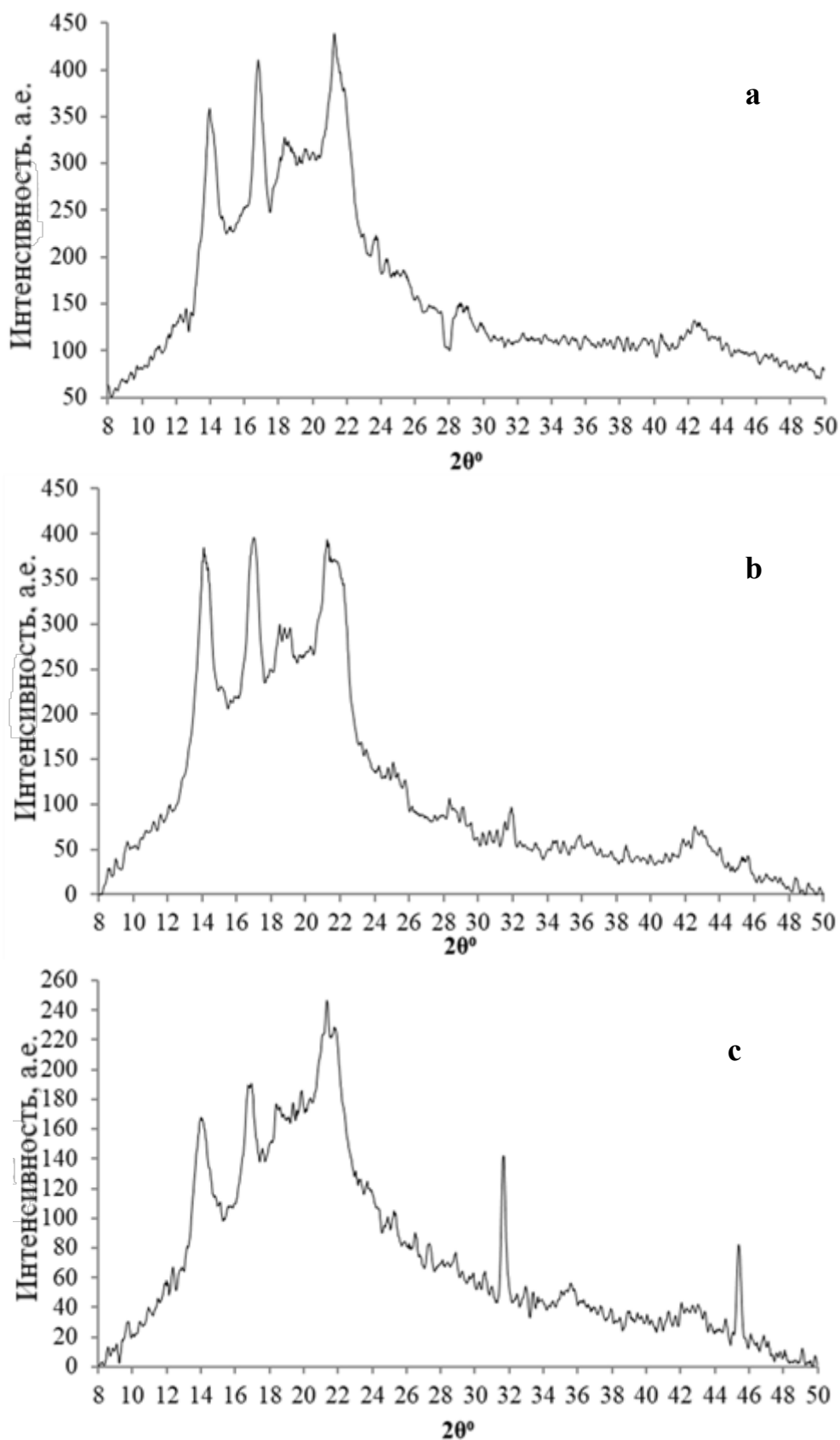


Рис. 3. Дифрактограммы чистого полипропилена (а) и композиций на его основе, содержащих 5% мас. CoFe_2O_4 (б) и 20% мас. CoFe_2O_4 (с).

Fig. 3. Diffractograms of pure polypropylene (a) and compositions based on it containing 5% wt. CoFe_2O_4 (b) and 20% wt. CoFe_2O_4 (c).

В отсутствие феррита кобальта полипропилен формирует кристаллические структуры, состоящие из сферолитов разного размера. При введении наночастиц наблюдается уменьшение размера сферолитов и повышение их плотности, что приводит к более компактной структуре с увеличенной кристалличностью. Этот эффект особенно заметен при использовании наночастиц и метода полимеризационного наполнения, при котором наночастицы равномерно распределяются в полимерной матрице и эффективно контролируют рост кристаллитов. Согласно данным РСА, оптимальная концентрация частиц для максимального повышения кристалличности ~5% мас. При концентрациях >5% мас. начинается агломерация частиц, что снижает их эффективность как нуклеирующих агентов.

Методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) изучено влияние содержания нанонаполнителей на теплофизические характеристики композитов. В таблице 2 представлены данные о температуре и энтальпии 2-го плавления и температуре кристаллизации. Методом термогравиметрического анализа (ТГА) в атмосфере аргона определена температура максимальной скорости потери массы (T_{\max}).

Таблица 2. Температуры плавления ($T_{\text{пл}}$), энтальпии плавления ($\Delta H_{\text{пл}}$), температуры кристаллизации ($T_{\text{кр}}$), температура максимальной скорости потери массы (T_{\max}) нанокompозитов PP/CoFe₂O₄

Table 2. Melting temperatures ($T_{\text{пл}}$), melting enthalpy ($\Delta H_{\text{пл}}$), crystallization temperatures ($T_{\text{кр}}$), and the temperature of the maximum mass loss rate (T_{\max}) of PP/CoFe₂O₄ nanocomposites

Содержание наполнителя, % мас.	$T_{\text{пл1}}$, °C	$\Delta H_{\text{пл1}}$, Дж/ГПП	К, %	$T_{\text{пл2}}$, °C	$\Delta H_{\text{пл2}}$, Дж/ГПП	$T_{\text{кр}}$, °C	T_{\max} , °C
0	158,8	61,6	37,3	160,4	39,9	116,4	475,2
5	159,4	73,1	44,3	159,8	64,9	122,3	476,3
20	159,7	83,1	50,4	160,1	75,3	122,5	479,8

Данные ДСК указывают, что введение наночастиц приводит к увеличению энтальпии плавления и, соответственно, кристалличности полимера, синтезированного на поверхности наполнителя. Введение наполнителей приводит к увеличению температуры кристаллизации ПП, то есть исследованные углеродные нанонаполнители оказывают нуклеирующий эффект.

Известно, что с помощью рентгенографии определяют устойчивые и метастабильные кристаллические полимерные фазы и аморфную фазу, в то время как метод ДСК позволяет оценить общую кристалличность полимера и кинетику кристаллизации. При небольшом содержании наполнителя значения степени кристалличности, полученные обоими методами, находятся в хорошем соответствии. Тогда как при высокой концентрации CoFe₂O₄ (20% мас.) метод ДСК фиксирует бóльшую кристалличность полимера.

Исследование полученных нанокомпозиций методом ТГА показало (табл. 2), что введение наполнителя приводит к небольшому росту температуры максимальной скорости потери массы, что свидетельствует о тенденции к увеличению термостабильности ПП в присутствии наноразмерного CoFe_2O_4 .

На рисунке 4 представлены зависимости магнитного момента от магнитного поля чистого наноразмерного феррита кобальта и нанокомпозиций.

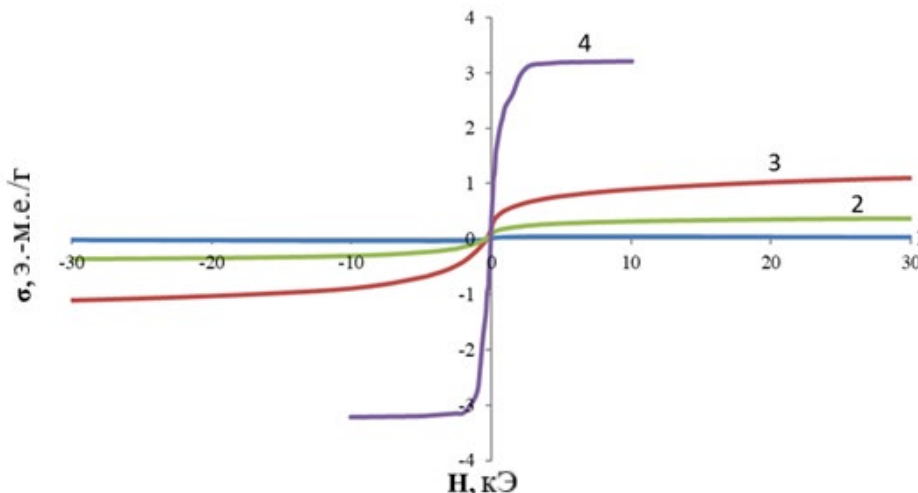


Рис. 4. Кривые размагничивания образцов ненаполненного ПП (1), композиции с наполнением CoFe_2O_4 5% мас. (2), с наполнением 20% мас. (3) и чистого CoFe_2O_4 (4).

Fig. 4. Demagnetization curves of samples of unfilled PP (1), compositions with 5% wt. CoFe_2O_4 filling (2), with 20% wt. filling (3) and pure CoFe_2O_4 (4).

При анализе кривых установлено, что все исследуемые образцы можно отнести к классу магнитомягких. Значение намагниченности насыщения (M_s) увеличивается с увеличением концентрации феррита кобальта в полипропилене. Для исходного феррита значение M_s близко к справочному значению для объемного феррита кобальта. Для чистого полипропилена магнитные характеристики близки к нулевым.

Данные о значениях удельного объемного сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения ρ_v , $\text{tg}\delta$, ϵ полученных композиционных материалов PP/CFO.

Table 3. The values of ρ_v , $\text{tg}\delta$, and ϵ of the obtained PP/CFO composite materials.

Содержание наполнителя % мас.	ρ_v , Ohm×m		$\text{tg}\delta$		ϵ	
	10V	100V	1 kHz	1 MHz	1 kHz	1 MHz
0	$8,7 \times 10^{13}$	$6,7 \times 10^{13}$	0,0174	0,0151	1,75	1,68
5	$2,3 \times 10^8$	$1,2 \times 10^8$	0,0261	0,0103	1,81	1,7
20	$5,8 \times 10^{11}$	$2,8 \times 10^{11}$	0,024	0,0105	1,6	1,5

Согласно полученным данным, композиции, содержащие наночастицы феррита кобальта в количестве 5% мас. увеличивают диэлектрическую проницаемость на ~4%, в то время как значения удельного сопротивления ниже на 5 порядков, что говорит о заметном улучшении характеристик исходного материала. С увеличением концентрации частиц происходит падение диэлектрической проницаемости, что связано с увеличением агломерации частиц и, как следствие, с увеличением ρ_v .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены нанокпозиционные материалы на основе полипропилена и наноразмерного феррита кобальта с содержанием наполнителя 5% мас. и 20% мас. Для синтеза нанокпозиционных материалов использован метод полимеризационного наполнения, что позволяет добиться более равномерного распределения наполнителя в полимерной матрице. Исходные наночастицы и композиционные материалы охарактеризованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), средний размер наночастиц составил около 7,5 нм. Установлено, что частицы в композите распределены равномерно, при этом часть из них агломерирует. Методами дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа определены теплофизические свойства композитов. Введение CoFe_2O_4 приводит к возрастанию степени кристалличности, температуры кристаллизации и термостабильности полипропилена. Установлено, что для увеличения диэлектрической проницаемости композитов и снижения их удельного сопротивления с $\sim 10^{13}$ до $\sim 10^8$, необходимая концентрация наполнителя не должна превышать 5% мас.

Получены магнитомягкие композиционные материалы. Значение намагниченности насыщения (M_s) увеличивается с 0,4 э.-м.е./г, для композита, содержащего 5% мас. CoFe_2O_4 , до 1,2 э.-м.е./г для композита, содержащего 20% мас. CoFe_2O_4 . Для исходного феррита значение M_s близко к справочному значению для объемного феррита кобальта. В дальнейшем, полученные наноматериалы будут изучены с точки зрения механических и биоцидных свойств. Также, авторы планируют получать ряд ферритов других металлов и исследовать влияние природы феррита на свойства композиционного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Российской академии наук.

ACKNOWLEDGEMENT

The work was carried out according to the program of Fundamental Scientific Research of the Russian Federation.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Наджарьян Т.А., Костров С.А., Крамаренко Е.Ю. (2024). Магнитоактивные полимерные композиты: достижения и перспективы развития. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*, (6), 83–99. <https://cyberleninka.ru/article/n/magnitoaktivnye-polimernye-kompozity-dostizheniya-i-perspektivy-razvitiya>.
2. Новокшонова Л.А., Мешкова И.Н. (1994) Каталитическая полимеризация на твердых поверхностях как метод введения наполнителей в. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*, 36(4), 629–639. <https://cyberleninka.ru/article/n/kataliticheskaya-polimerizatsiya-na-tyverdyh-poverhnostyah-kak-metod-vvedeniya-napolniteley-v-poliiolefiny>.
3. Karian H. (2003). Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, Revised and Expanded. *CRC Press*. P. 1-2.
4. Zhou Y., Hu J., Dang B., & He J. (2017). Effect of Different Nanoparticles on Tuning Electrical Properties of Polypropylene Nanocomposites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(3), 1380–1389. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006183>.
5. Khalaj M.-J., Ahmadi H., Lesankhosh R., & Khalaj G. (2016). Study of Physical and Mechanical Properties of Polypropylene Nanocomposites for Food Packaging Application: Nano-Clay Modified with Iron Nanoparticles. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.007>.
6. Dai Y.Q., Dai J.M., Tang X.W., Zi Z.F., Zhang K.J., Zhu X.B., Yang J., & Sun Y.P. (2015). Magnetism of CoFe₂O₄ Thin Films Annealed under the Magnetic Field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 394, 287–291. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.089>.
7. Singh S., Munjal S., & Khare N. (2015). Strain/Defect Induced Enhanced Coercivity in Single Domain CoFe₂O₄ Nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 386, 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.03.057>.
8. Thakur P., Gahlawat N., Punia P., Kharbanda S., Ravelo B., & Thakur A. (2022). Cobalt Nanoferrites: A Review on Synthesis, Characterization, and Applications. *J Supercond Nov Magn*, 35(10), 2639–2669. <https://doi.org/10.1007/s10948-022-06334-1>.
9. Zhao Y., Cao B., Lin Z., & Su X. (2019). Synthesis of CoFe₂O₄/C Nano-Catalyst with Excellent Performance by Molten Salt Method and Its Application in 4-Nitrophenol Reduction. *Environmental Pollution*, 254, 112961. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112961>.
10. Huang S., Xu Y., Xie M., Xu H., He M., Xia J., Huang L., & Li H. (2015). Synthesis of Magnetic CoFe₂O₄/g-C₃N₄ Composite and Its Enhancement of Photocatalytic Ability under Visible-Light. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 478, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.03.035>.
11. Gan L., Shan, S., Yuen C.W.M., Jiang S., & Hu E. (2015). Hydrothermal Synthesis of Magnetic CoFe₂O₄/Graphene Nanocomposites with Improved Photocatalytic Activity. *Applied Surface Science*, 351, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.130>.
12. Abdolmohammad-Zadeh H., & Rahimpour E. (2015). CoFe₂O₄ Nano-Particles Functionalized with 8-Hydroxyquinoline for Dispersive Solid-Phase Micro-Extraction and Direct Fluorometric Monitoring of Aluminum in Human Serum and Water Samples. *Analytica Chimica Acta*, 881, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.035>.
13. Foroughi F., Hassanzadeh-Tabrizi S.A., Amighian J., & Saffar-Teluri A. (2015). A Designed Magnetic CoFe₂O₄-Hydroxyapatite Core-Shell Nanocomposite for Zn(II) Removal with High Efficiency. *Ceramics International*, 41(5), 6844–6850. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.133>.
14. Şener T., Kayhan E., Sevim M., & Metin Ö. (2015). Monodisperse CoFe₂O₄ Nanoparticles Supported on Vulcan XC-72: High Performance Electrode Materials for Lithium-Air and Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 288, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.120>.

15. Li Y., Meng Y., Xiao M., Liu X., Zhu F., & Zhang Y. (2019). The Surface Capacitance Behavior and Its Contribution to the Excellent Performance of Cobalt Ferrite/Carbon Anode in Lithium Storage. *J Mater Sci: Mater Electron*, 30(13), 12659–12668. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01629-x>.
16. Gupta N., Jain P., Rana R., & Shrivastava S. (2017). Current Development in Synthesis and Characterization of Nickel Ferrite Nanoparticle. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.031>.
17. Vinosha P.A., Manikandan A., Preetha A.C., Dinesh A., Slimani Y., Almessiere M.A., Baykal A., Xavier B., & Nirmala G.F. (2021). Review on Recent Advances of Synthesis, Magnetic Properties, and Water Treatment Applications of Cobalt Ferrite Nanoparticles and Nanocomposites. *J Supercond Nov Magn*, 34, 995–1018. <https://doi.org/10.1007/s10948-021-05854-6>.
18. Kazemi M., Ghobadi M., & Mirzaie A. (2018). Cobalt Ferrite Nanoparticles (CoFe₂O₄ MNPs) as Catalyst and Support: Magnetically Recoverable Nanocatalysts in Organic Synthesis. *Nanotechnology Reviews*, 7(1), 43–68. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2017-0138>.
19. Qin H., He Y., Xu P., Huang D., Wang Z., Wang H., Wang Z., Zhao Y., Tian Q., & Wang C. (2021). Spinel Ferrites (MFe₂O₄): Synthesis, Improvement and Catalytic Application in Environment and Energy Field. *Advances in Colloid and Interface Science*, 294, 102486. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102486>.
20. Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Nkambule T.TI., & Mamba B.B. (2020). Spinel Ferrite Nanoparticles and Nanocomposites for Biomedical Applications and Their Toxicity. *Materials Science and Engineering: C*, 107, 110314. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110314>.
21. Галашина Н.М. (1994). Полимеризационное наполнение как метод получения новых композиционных материалов (Обзор). *Высокомолекулярные соединения. Серия А*, 36(4), 640–650. <https://cyberleninka.ru/article/n/polimerizatsionnoe-napolnenie-kak-metod-polucheniya-novyh-kompozitsionnyh-materialov-obzor>.
22. Manohar A., Vijayakanth V., Vattikuti S.V.P., & Kim K.H. (2022). A Mini-Review on AFe₂O₄ (A = Zn, Mg, Mn, Co, Cu, and Ni) Nanoparticles: Photocatalytic, Magnetic Hyperthermia and Cytotoxicity Study. *Materials Chemistry and Physics*, 286, 126117. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126117>.
23. El-Sheikh Said.M., Harraz F.A., & Hessien M.M. (2010). Magnetic Behavior of Cobalt Ferrite Nanowires Prepared by Template-Assisted Technique. *Materials Chemistry and Physics*, 123(1), 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.04.005>.
24. Zhao Y., Li J., Yin Z., Zhang X., Huang J., Cao L., & Wang H. (2020). Interface-Mediated Local Conduction at Tubular Interfaces in BiFeO₃–CoFe₂O₄ Nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 823, 153699. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153699>.
25. Hunyek A., & Sirisathitkul C. (2011). Electromagnetic and Dynamic Mechanical Properties of Extruded Cobalt Ferrite-Polypropylene Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 50(6), 593–598. <https://doi.org/10.1080/03602559.2010.543743>.
26. Pon-On W., Charoenphandhu N., Tang I.-M., Jongwattanapisan P., Krishnamra N., & Hoonsawat R. (2011). Encapsulation of Magnetic CoFe₂O₄ in SiO₂ Nanocomposites Using Hydroxyapatite as Templates: A Drug Delivery System. *Materials Chemistry and Physics*, 131(1), 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.10.008>.
27. Недорезова П.М., Шевченко В.Г., Щеголихин Щ., Цветкова В.И., Королев Ю.М. (2004). Полимеризационно наполненные электропроводящие композиции полипропилен-графит, полученные с использованием высокоэффективных металлоценовых катализаторов. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*, 46(3), 426–436. <https://cyberleninka.ru/article/n/polimerizatsionno-napolnennye-elektroprovodyaschie-kompozitsii-polipropilen-grafit-poluchennye-s-ispolzovaniem-vysokoeffektivnyh>.

References:

1. Najarian T.A., Kostrov S.A., & Kramarenko E.Yu. (2024). Magnetoactive Polymer Composites: Achievements and Development Prospects. *Bulletin of the Moscow University. Series 3. Physics. Astronomy*, (6), 83–99. <https://cyberleninka.ru/article/n/magnitoaktivnye-polimernye-kompozity-dostizheniya-i-perspektivy-razvitiya> (in Russ.).
2. Novokshonova L.A., & Meshkova I.N. Catalytic Polymerization On Solid Surfaces As A Method Of Introducing Fillers into Polyolefins. *High molecular weight compounds. Series A*, 36(4), 629–639. <https://cyberleninka.ru/article/n/kataliticheskaya-polimerizatsiya-na-tverdyh-poverhnostyah-kak-metod-vvedeniya-napolniteley-v-poliiolefiny> (in Russ.).
3. Karian H. (2003). Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, Revised and Expanded. *CRC Press*. P. 1–2.
4. Zhou Y., Hu J., Dang B., & He J. (2017). Effect of Different Nanoparticles on Tuning Electrical Properties of Polypropylene Nanocomposites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(3), 1380–1389. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006183>.
5. Khalaj M.-J., Ahmadi H., Lesankhosh R., & Khalaj G. (2016). Study of Physical and Mechanical Properties of Polypropylene Nanocomposites for Food Packaging Application: Nano-Clay Modified with Iron Nanoparticles. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.007>.
6. Dai Y.Q., Dai J.M., Tang X.W., Zi Z.F., Zhang K.J., Zhu X.B., Yang J., & Sun Y.P. (2015). Magnetism of CoFe₂O₄ Thin Films Annealed under the Magnetic Field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 394, 287–291. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.089>.
7. Singh S., Munjal S., & Khare N. (2015). Strain/Defect Induced Enhanced Coercivity in Single Domain CoFe₂O₄ Nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 386, 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.03.057>.
8. Thakur P., Gahlawat N., Punia P., Kharbanda S., Ravelo B., & Thakur A. (2022). Cobalt Nanoferrites: A Review on Synthesis, Characterization, and Applications. *J Supercond Nov Magn*, 35(10), 2639–2669. <https://doi.org/10.1007/s10948-022-06334-1>.
9. Zhao Y., Cao B., Lin Z., & Su X. (2019). Synthesis of CoFe₂O₄/C Nano-Catalyst with Excellent Performance by Molten Salt Method and Its Application in 4-Nitrophenol Reduction. *Environmental Pollution*, 254, 112961. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112961>.
10. Huang S., Xu Y., Xie M., Xu H., He M., Xia J., Huang L., & Li H. (2015). Synthesis of Magnetic CoFe₂O₄/g-C₃N₄ Composite and Its Enhancement of Photocatalytic Ability under Visible-Light. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 478, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.03.035>.
11. Gan L., Shan, S., Yuen C.W.M., Jiang S., & Hu E. (2015). Hydrothermal Synthesis of Magnetic CoFe₂O₄/Graphene Nanocomposites with Improved Photocatalytic Activity. *Applied Surface Science*, 351, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.130>.
12. Abdolmohammad-Zadeh H., & Rahimpour E. (2015). CoFe₂O₄ Nano-Particles Functionalized with 8-Hydroxyquinoline for Dispersive Solid-Phase Micro-Extraction and Direct Fluorometric Monitoring of Aluminum in Human Serum and Water Samples. *Analytica Chimica Acta*, 881, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.035>.
13. Foroughi F., Hassanzadeh-Tabrizi S.A., Amighian J., & Saffar-Teluri A. (2015). A Designed Magnetic CoFe₂O₄-Hydroxyapatite Core-Shell Nanocomposite for Zn(II) Removal with High Efficiency. *Ceramics International*, 41(5), 6844–6850. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.133>.
14. Şener T., Kayhan E., Sevim M., & Metin Ö. (2015). Monodisperse CoFe₂O₄ Nanoparticles Supported on Vulcan XC-72: High Performance Electrode Materials for Lithium-Air and Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 288, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.120>.
15. Li Y., Meng Y., Xiao M., Liu X., Zhu F., & Zhang Y. (2019). The Surface Capacitance Behavior and Its Contribution to the Excellent Performance of Cobalt Ferrite/Carbon Anode in Lithium Storage. *J Mater Sci: Mater Electron*, 30(13), 12659–12668. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01629-x>.

16. Gupta N., Jain P., Rana R., & Shrivastava S. (2017). Current Development in Synthesis and Characterization of Nickel Ferrite Nanoparticle. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.031>.
17. Vinosha P.A., Manikandan A., Preetha A.C., Dinesh A., Slimani Y., Almessiere M.A., Baykal A., Xavier B., & Nirmala G.F. (2021). Review on Recent Advances of Synthesis, Magnetic Properties, and Water Treatment Applications of Cobalt Ferrite Nanoparticles and Nanocomposites. *J Supercond Nov Magn*, 34, 995–1018. <https://doi.org/10.1007/s10948-021-05854-6>.
18. Kazemi M., Ghobadi M., & Mirzaie A. (2018). Cobalt Ferrite Nanoparticles (CoFe₂O₄ MNPs) as Catalyst and Support: Magnetically Recoverable Nanocatalysts in Organic Synthesis. *Nanotechnology Reviews*, 7(1), 43–68. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2017-0138>.
19. Qin H., He Y., Xu P., Huang D., Wang Z., Wang H., Wang Z., Zhao Y., Tian Q., & Wang C. (2021). Spinel Ferrites (MFe₂O₄): Synthesis, Improvement and Catalytic Application in Environment and Energy Field. *Advances in Colloid and Interface Science*, 294, 102486. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102486>.
20. Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Nkambule T.T.I., & Mamba B.B. (2020). Spinel Ferrite Nanoparticles and Nanocomposites for Biomedical Applications and Their Toxicity. *Materials Science and Engineering: C*, 107, 110314. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110314>.
21. Galashina N.M. (1994). Polymerization filling as a method of obtaining new composite materials (Review). *High molecular weight compounds. Series A*, 36(4), 640–650. <https://cyberleninka.ru/article/n/polimerizatsionnoe-napolnenie-kak-metod-polucheniya-novyh-kompozitsionnyh-materialov-obzor> (in Russ.).
22. Manohar A., Vijayakanth V., Vattikuti S.V.P., & Kim K.H. (2022). A Mini-Review on AFe₂O₄ (A = Zn, Mg, Mn, Co, Cu, and Ni) Nanoparticles: Photocatalytic, Magnetic Hyperthermia and Cytotoxicity Study. *Materials Chemistry and Physics*, 286, 126117. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126117>.
23. El-Sheikh Said.M., Harraz F.A., & Hessien M.M. (2010). Magnetic Behavior of Cobalt Ferrite Nanowires Prepared by Template-Assisted Technique. *Materials Chemistry and Physics*, 123(1), 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.04.005>.
24. Zhao Y., Li J., Yin Z., Zhang X., Huang J., Cao L., & Wang H. (2020). Interface-Mediated Local Conduction at Tubular Interfaces in BiFeO₃–CoFe₂O₄ Nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 823, 153699. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153699>.
25. Hunyek A., & Sirisathitkul C. (2011). Electromagnetic and Dynamic Mechanical Properties of Extruded Cobalt Ferrite-Polypropylene Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 50(6), 593–598. <https://doi.org/10.1080/03602559.2010.543743>.
26. Pon-On W., Charoenphandhu N., Tang I.-M., Jongwattanapisan P., Krishnamra N., & Hoonsawat R. (2011). Encapsulation of Magnetic CoFe₂O₄ in SiO₂ Nanocomposites Using Hydroxyapatite as Templates: A Drug Delivery System. *Materials Chemistry and Physics*, 131(1), 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.10.008>.
27. Nedorezova P.M., Shevchenko V.G., Shchegolikhin S., Tsvetkova V.I., & Korolev Yu.M. (2004). Polymerization-Filled Electrically Conductive Polypropylene-Graphite Compositions Obtained Using Highly Efficient Metallocene Catalysts. *High molecular weight compounds. Series A*, 46(3), 426–436. <https://cyberleninka.ru/article/n/polimerizatsionno-napolnennye-elektroprovodyaschie-kompozitsii-polipropilen-grafit-poluchennye-s-ispolzovaniem-vysokoeffektivnyh> (in Russ.).