

Термохимическое поведение полиакрилонитрильных волокон, модифицированных высокодисперсными материалами

Л. А. Щербина, И. С. Радковский,
И. А. Будкоте

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь

Аннотация. С целью оценки влияния высокодисперсных частиц на термохимическое поведение, модифицируемой ими терморезактивной структуры полиакрилонитрильных волокон, осуществлено изучение методом синхронного термического анализа изменение характера теплового потока и потери массы образцами волокон при варьировании в них содержания частиц CuO, ZnO, MgO, Fe₃O₄ и Ni от 0 до 5,0 % (масс.), имеющих размер от 20 до 110 нм и удельную площадь поверхности от 5 до 40 м²/г.

Установлены существенные различия во влиянии природы и содержания наноразмерных частиц на протекание термохимических процессов в терморезактивной структуре наномодифицированных полиакрилонитрильных волокнистых материалов. Наиболее активное, но антибатное, влияние, на термохимическое поведение полиакрилонитрильных волокон оказывают наноразмерные частицы CuO, MgO, а наименее заметное влияние – ZnO и Ni.

Отмечена закономерность, проявляющаяся в том, что введение в полиакрилонитрильные волокна наноразмерных в количестве до 0,5 % (масс), как правило, приводит к большему удельному изменению температур начала, максимума, окончания и величин тепловых эффектов, а также потери массы при термохимическом превращении в процессах полициклизации и термоокислительной деструкции полимерной структуры волокон, чем последующее увеличение содержания этих наночастиц в волокне.

Получены данные, указывающие на перспективность эффективного применения наноразмерных модификаторов для направленного модифицирования терморезактивных свойств и огнестойкости полиакрилонитрильных волокнистых материалов как при разработке прекурсоров углеродных волокнистых материалов, содержащих активные включения, так и материалов с пониженной горючестью или повышенной теплостойкостью.

Ключевые слова: высокодисперсная частица, наночастица, полиакрилонитрил, волокно, термический анализ, термоокислительная стабилизация, полициклизация, горение, теплота, потеря массы.

Информация о статье: поступила 19 ноября 2025 года.

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2025)», которая состоялась 18–19 ноября 2025 года в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» (Республика Беларусь).

Thermochemical behavior of polyacrylonitrile fibers modified with highly dispersed materials

Leonid A. Shcherbina, Ivan S. Radkovsky,
Iryna A. Budkute

Belarusian State University of Food and Chemical Technologies,
Republic of Belarus

Abstract. To assess the influence of highly dispersed particles on the thermochemical behavior of the thermosetting structure of polyacrylonitrile fibers they modify, a research was carried out using synchronous thermal analysis to determine changes in the nature of heat flow and mass loss in fiber samples with varying particle contents of CuO, Zn, ZnO, MgO, Fe₃O₄, and Ni from 0 to 5.0 % (wt.), with sizes ranging from 20 to 110 nm and specific surface areas ranging from 5 to 40 m²/g.

Significant differences were found in the influence of the nature and content of nanoscale particles on the thermochemical processes in the thermosetting structure of nanomodified polyacrylonitrile fibrous materials. Nanoscale CuO and MgO particles exert the most active, yet antibate, influence on the thermochemical behavior of polyacrylonitrile fibers, while ZnO and Ni particles exert the least noticeable influence. A pattern has been noted whereby the introduction of nanoscale

modifiers in amounts of up to 0.5% [by weight] into polyacrylonitrile fibers typically leads to a greater specific change in the onset, maximum, and end temperatures and magnitudes of thermal effects, as well as mass loss during thermochemical transformation during polycyclization and thermal-oxidative degradation of the fiber's polymer structure, than a subsequent increase in the content of these nanoparticles in the fiber.

Data have been obtained indicating the potential for the effective use of nanoscale modifiers for targeted modification of the thermosetting properties and fire resistance of polyacrylonitrile fibrous materials, both in the development of precursors for carbon fibrous materials containing active inclusions and in materials with reduced flammability or increased heat resistance.

Keywords: fine particle, nanoparticle, polyacrylonitrile, fiber, thermal analysis, thermo-oxidative stabilization, polycyclization, combustion, heat, mass loss.

Article info: received November 19, 2025.

The article summarizes the research materials presented at the International Scientific and Technical Conference "International Conference on Textile and Apparel Innovation" (ICTAI-2025), held on November 18–19, 2025 at Vitebsk State Technological University (Republic of Belarus).

Введение

Без сомнения, модифицирование структуры может служить оптимальным вариантом расширения спектра свойств материалов на основе уже выпускаемых промышленностью волокнообразующих полимеров, а также корректировки их целевых характеристик. Для этого современные технологии все больше обращаются к явлениям, связанным с особым физическим влиянием наноразмерных структур на свойства матриц композитных систем. Эти тенденции не обошли стороной и полимерные материалы, в том числе анизотропные волокнистые структуры. Исследователи отмечают влияние наноразмерных частиц (НЧ) на физико-химические, механические, теплофизические, электрические и другие свойства материалов (Блохин и др., 2012; Ленартович и др., 2024).

Например, наноразмерные частицы ZnO, CuO, MgO, а также Si и Zn проявляют антибактериальные эффекты (Мацакова и Симакова, 2020; Дмитриевская, 2017; Тамаю et al., 2015; Bindhu et al., 2016). Медь используется в каталитических реакциях (Воробьева, 2022) и для создания электропроводящих материалов (Жабин и Няфкин, 2022). Применимость никеля и других металлов для модификации волокнистых материалов принципиально аналогична меди и цинка. Высокодисперсный MgO также находит применение в гетерогенном катализе в органическом синтезе (Jun et al., 2015; Selim et al., 2015). Помимо этого, он представляет интерес в производстве датчиков влажности и газов кислотного характера, в процессах водо- и газоочистки от газов кислотного характера, примесей кислотного характера (Rizwan et al.,

2007), для дезактивации химического оружия и боевых отравляющих веществ, нейтрализации токсических выбросов (Zeyneb, Sema, and Sabriye, 2012). Электрофизическую активность волокнистым материалам могут придавать оксиды железа (Важенина и др., 2023). Повышение огне- и термостойкости полимерных материалов можно ожидать при введении в них наночастиц оксида и бората цинка, MgO (Хай и др., 2018; Буй и др., 2019; Хархуш и др., 2019).

Это указывает на перспективность расширения ассортимента полимерных волокнистых материалов путем их модификации на наноразмерном уровне. К числу таких материалов можно отнести полиакрилонитрильные (ПАН) волокна, в том числе используемые в качестве прекурсоров углеродных волокнистых материалов (УВМ) и текстильных материалов.

Введение наноразмерных модификаторов в структуру ПАН волокон текстильного и технического назначения или УВМ должно позволить изменить их поведение в энергетических полях различной природы, а также скорректировать их физико-химическую, электрофизическую, биологическую активность, придать им каталитические свойства и другие характеристики.

Отсутствие достаточных сведений о том, как повлияют наноразмерные частицы на стабильность протекания технологических процессов получения и переработки ПАН волокнистых материалов, сдерживает широкое внедрение перспективных наноразмерных модификаторов в производственную практику.

Специфической отличительной особенностью ПАН волокон от большинства других видов распространенных

волокнистых материалов является то, что их полимерная структура термореактивна. Это можно рассматривать как их недостаток, так и их достоинство. Объясняется это тем, что в результате нагревания в таких материалах активируется экзотермический процесс полициклизации первичной структуры полиакрилонитрила, который активно распространяется на более высокие уровни его структурной организации. При этом к недостаткам ПАН волокон можно отнести то, что выделяющаяся тепловая энергия по автотермическому механизму может приводить к воспламенению оказавшихся в тепловом поле полиакрилонитрильных материалов. Это осложняет разработку негорючих изделий на основе волокнообразующих сополимеров акрилонитрила. Тем не менее, разработка технологических решений по управлению автотермическим процессом полициклизации полимерной структуры полиакрилонитрильных материалов перспективна для практического использования их важнейшего преимущества перед другими видами волокон в качестве ценного предшественника углеродных волокнистых материалов.

С этих позиций представляет практический интерес рассмотрение влияния наноразмерных частиц различной природы на внутрискруктурные превращения полиакрилонитрильного субстрата в воздушной среде: и при его термоокислительной стабилизации (полициклизации) в результате нагревания, и при его термоокислительной деструкции в процессе горения.

Для проведения таких исследований хорошо подходит метод синхронного термического анализа, позволяющий в процессе нагревания исследуемых образцов контролировать фактическое изменение их температуры и массы. Это позволяет в одном акте эксперимента оценить влияние наноразмерных частиц не только на процесс превращения полиакрилонитрильных прекурсоров в углеродные волокнистые материалы со специальными свойствами, но и на негорючесть полиакрилонитрильных волокон, используемых в бытовых изделиях (трикотаже, ковровых изделиях и др.).

Исходя из имеющихся данных, в качестве наноразмерных модификаторов были использованы оксиды меди (CuO), цинка (ZnO), магния (MgO), которые потенциально способны изменить протекание термоокислительных процессов в полиакрилонитрильном волокне, а также оксид железа (Fe_3O_4) и никель (Ni) для придания УВМ на основе полиакрилонитрильных прекурсоров специфической электрофизической активности. Не-

смотря на большое количество источников, посвященных применению рассматриваемых веществ для модификации свойств полимерных материалов, информация о влиянии наноразмерных частиц CuO, ZnO, MgO, Fe_3O_4 , Ni на термореактивное поведение полиакрилонитрильных волокнистых материалов при нагревании практически отсутствует.

Поэтому целью данной работы стала оценка методом синхронного термического анализа влияния указанных наноразмерных частиц на процесс термохимического превращения в воздушной среде полиакрилонитрильных волокон, как при термообработке, так и при термоокислительной деструкции в процессе горения, для подтверждения потенциальных направлений использования наноразмерных модификаторов.

Методы и средства исследований

В качестве модифицированных наноразмерными частицами модельных образцов были использованы ПАН волокна на основе волокнообразующего терсополимера (ВТП) поли[акрилонитрил (АН) (91) – со – метилакрилат(МА) (8) – со – 2-акриламид-2 метилпропансульфо кислота (АМПС) (1 % (масс))], сформованные из прядильных растворов, содержащих наноразмерные частицы никеля (Ni), оксидов меди (CuO), цинка (ZnO), магния (MgO) или железа (Fe_3O_4), имеющих размер от 20 до 110 нм, удельную площадь поверхности от 5 до 40 м²/г и полученные методом взрыва проводника в инертной или кислородсодержащей среде (таблица 1).

Получение ПАН волокон с линейной плотностью 0,33 текс осуществляли аналогично [Щербина и др., 2023] из (21,0 ± 0,3) % (масс.) растворов ВТП в диметилформамиде (ДМФ). Содержание модификаторов в прядильных растворах (здесь и далее по тексту в % от массы системы «ВТП–НЧ») составляло: 0; 0,1; 0,5; 5,0. После формования и пластификационного вытягивания в 5 раз при температуре (96 ± 2) °С гель-волокна сушили при (20 ± 5) °С.

При исследовании термохимического поведения экспериментальных образцов использовали термоанализатор ZCT-A (КНР). Для этого образец волокна массой до (10 ± 3) мг помещали в керамические тигли, предварительно прокаленные в течение часа в муфельной печи при 1000 °С и охлажденные в эксикаторе. Далее тигель с образцом и пустой тигель сравнения помещали в ячейку весов термоанализатора. Регистрацию изменения массы и теплофизических процессов, происходящих с образцом, осуществляли при скорости подъема

Таблица 1 – Свойства высокодисперсных модификаторов
Table 1 – Properties of highly dispersed modifiers

Материал	Удельная площадь поверхности (м ² /г)	Размер частиц (нм)	Насыпная плотность (г/см ³)	Чистота (%)
Оксид меди (CuO), смесь (CuO и Cu ₂ O)	20 ± 2	50–90	2,22	≥ 99,8
Оксид цинка (ZnO)	10 ± 3	20–40	0,48	≥ 98
Оксид магния (MgO)	40 ± 10	20–30	0,15	≥ 99,9
Оксид железа (Fe ₃ O ₄)	10 ± 2	80–110	1,03	≥ 98
Никель металлический (Ni)	5,2 ± 0,8	70–80	0,66	≥ 99,8

температуры 10 °С/мин.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

В качестве примера на рисунках 1 и 2 представлены термограммы модельных образцов ПАН волокон, модифицированных наноразмерными частицами ZnO и MgO. Во всех случаях на термограммах отсутствовали тепловые эффекты, связанные с фазовыми переходами, но четко проявлялись характерные для ПАН экстремумы экзотермических эффектов. Первый экзотермический

эффект связан с активным протеканием процесса полициклизации в структуре нагреваемого полиакрилонитрильного волокна. Второй экзотермический эффект вызван процессом горения ПАН материала в воздушной среде (рисунки 1 б и 2 б). Во всех случаях эти экзотермические процессы сопровождались уменьшением массы модельных образцов (рисунки 1 а и 2 а).

Потеря массы полиакрилонитрильным волокном в температурной области протекания процесса полициклизации вызвана выделением побочных продуктов ре-

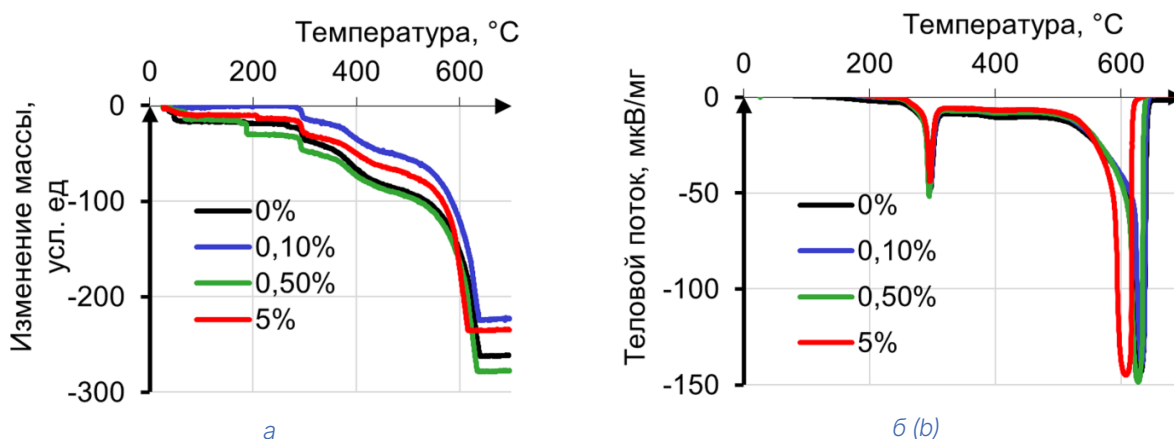


Рисунок 1 – Термограммы образцов полиакрилонитрильных волокон, содержащих наноразмерные частицы оксида цинка:
а – изменение массы; б – термический эффект

Figure 1 – Thermograms of polyacrylonitrile fiber samples containing nanosized zinc oxide particles:
а – weight loss; б – thermal effect

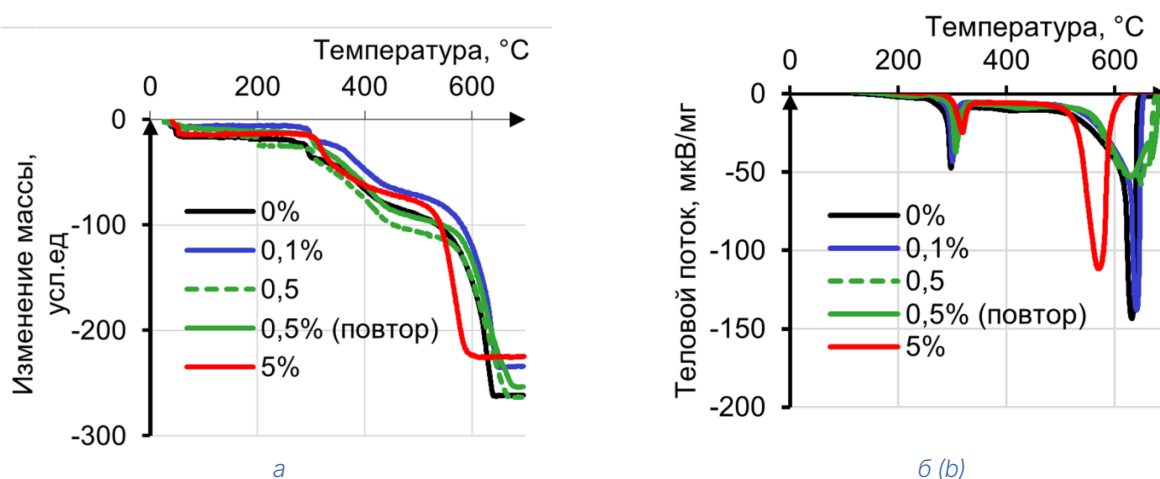


Рисунок 2 – Термограммы образцов полиакрилонитрильных волокон, содержащих наноразмерные частицы оксида магния:
а – изменение массы; б – термический эффект

Figure 2 – Thermograms of polyacrylonitrile fiber samples containing nanosized magnesium oxide particles:
a – weight loss; b – thermal effect

акций перестройки химической структуры полимерного субстрата, в диапазоне температур горения – прежде всего его окислительной деструкцией и возгонкой продуктов деструкции.

Анализ термограмм модельных образцов модифицированных волокон показывает, что природа наночастиц и их содержание в структуре полиакрилонитрильного субстрата оказывает влияние на его термохимическое поведение.

На основе анализа экстремумов экспериментально полученных термограмм образцов модифицированных волокон были определены фактические значения температур начала ($T_{нач}$), максимума ($T_{макс}$) и окончания ($T_{кон}$) экзотермических эффектов при термическом превращении полиакрилонитрильной матрицы волокон, модифицированных с наноразмерными частицами (рисунок 3).

Изменения значений тепловых эффектов, оцениваемых по площадям пиков, и потери массы образцами модельных волокон в результате введения в них наночастиц различной природы можно проследить по данным, представленным на рисунке 4.

В результате анализа полученных экспериментальных результатов установлено, что введение и увеличе-

ние содержания от 0,1 до 5,0 % наноразмерных частиц CuO наиболее существенно в рассматриваемой серии экспериментов снижает температуры максимума и начала процесса полициклизации в структуре полиакрилонитрильных волокон, а также температурные диапазоны процесса горения.

При этом введение до 0,5 % наноразмерных частиц CuO в структуру полиакрилонитрильных волокон снижает тепловой эффект полициклизации, а до 0,1 % – тепловой эффект горения. Дальнейшее увеличение содержания наноразмерных частиц CuO приводит к возрастанию тепловых эффектов полициклизации и горения вплоть до максимальных значений из всей серии экспериментов. При этом изменение массы образцов, содержащих наноразмерные частицы CuO , в результате протекания полициклизации и горения находится в диапазоне среднестатистических значений во всей серии экспериментов. Исключением является введение 5,0 % наноразмерных частиц CuO , что приводит к наибольшим потерям массы модифицированными волокнами при горении.

В противоположность влиянию наноразмерных частиц CuO , выражающемуся в кажущемся снижении потенциального барьера термохимических превращений в полиакрилонитрильных волокнах, введение наночастиц

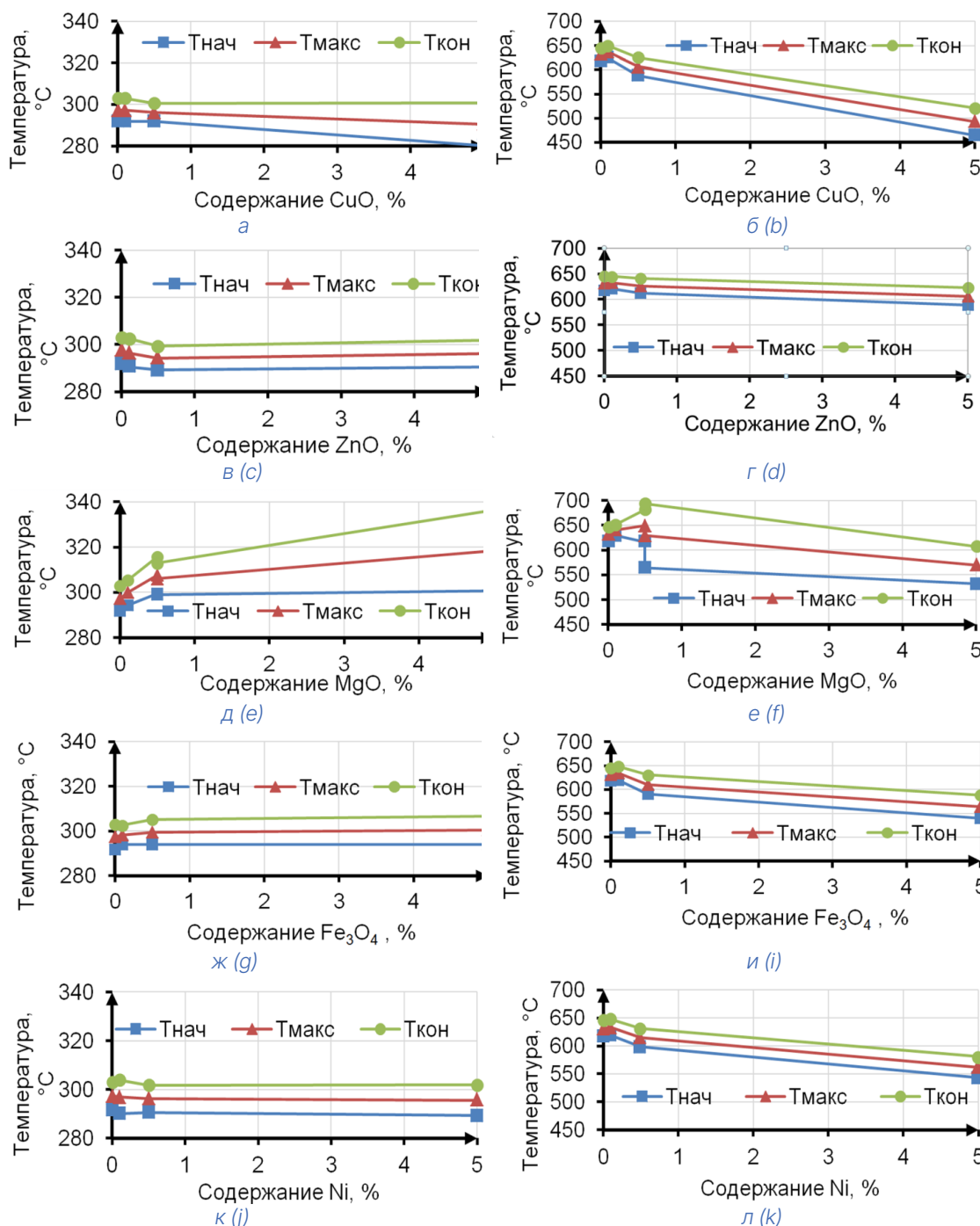


Рисунок 3 – Влияние содержания наноразмерных частиц (в % от массы волокна) на температуры начала (T_{нач}), максимума (T_{макс}) и окончания (T_{кон}) пиков экзотермических эффектов полициклизации (а, в, д, ж, к) и горения (б, г, е, и, л) полимерной структуры наномодифицированных полиакрилонитрильных волоконт
 Figure 3 – Effect of the content of nanosized particles (in % of the fiber mass) on the temperature of the onset (T_{initial}), maximum (T_{max}), and end (T_{final}) of the peaks of the exothermic effects of polycyclization (a, c, d, g, j) and combustion (b, d, f, i, k) of the polymer structure of nanomodified polyacrylonitrile fibers

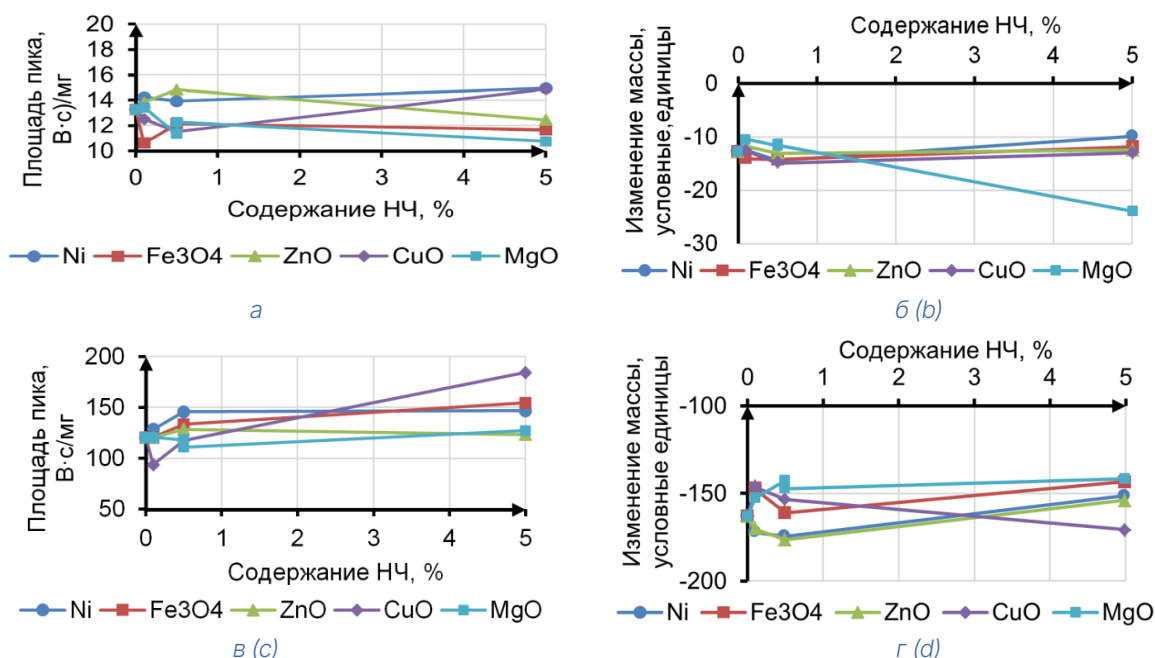


Рисунок 4 – Влияние содержания наноразмерных частиц (в % от массы волокна) на площади пиков и потерю массы при экзотермических эффектах полициклизации (а, б) и горения (в, г) полимерной структуры наномодифицированных полиакрилонитрильных волокон
 Figure 4 – Influence of nanosized particles content (in % of the fiber mass) on the peak areas and mass loss during of polycyclization exothermic effects (a, b) and combustion (c, d) of the nanomodified polyacrylonitrile fibers polymer structure

MgO приводит к наибольшему смещению протекания процесса полициклизации в область более высоких температур, в наибольшей степени расширяя температурный диапазон проявления данного процесса, а также температурный диапазон процесса горения. Эти экспериментальные данные указывают на увеличение потенциального барьера термохимических процессов в присутствии наноразмерных частиц MgO.

При этом введение наночастиц MgO и увеличение их содержания до 5,0 % (масс.) вызывает максимальное снижение теплового эффекта и максимальное снижение массы образцов модифицированных волокон в процессе полициклизации (в данном исследовании). Вместе с тем, существенного влияния наноразмерных частиц MgO в количестве 5,0 % (масс.) на протекание процесса горения модифицированных волокон не отмечено.

Таким образом, наноразмерные частицы CuO, по-видимому, способствуют «облегчению» протекания процессов полициклизации и горения ПАН материалов.

А наноразмерные частицы MgO затрудняют протекание процессов полициклизации и горения, и, видимо, направляют процесс полициклизации по иной кинетической схеме, делая его менее теплотворным и приводя к более значительной потере атомов углерода в виде побочных летучих продуктов.

Полученные результаты позволяют рассматривать наноразмерные частицы CuO в количестве до 0,5 % (масс.) как потенциальный регулятор процесса термоокислительной стабилизации полиакрилонитрильных прекурсоров при получении УВМ. При этом наноразмерные частицы MgO в количестве до 0,5 % (масс.) целесообразно апробировать в качестве замедлителя горения полиакрилонитрильных волокнистых материалов.

Введение наноразмерных частиц Fe₃O₄ в количестве до 0,5 % также, как и в случае введения частиц MgO, повышает температуру протекания процесса полицикликации, но это повышение не столь значительно и практически не отмечается при дальнейшем увеличении

содержания наночастиц Fe_3O_4 в структуре волокон до 5,0 % [масс.].

Наноразмерные частицы ZnO и Ni , по-видимому, оказывают наименьшее (из всех рассматриваемых вариантов) влияние на процесс полициклизации. При этом увеличение содержания наноразмерных частиц ZnO до 0,5 % все же незначительно снижает температуры начала, максимума и окончания процесса полициклизации и незначительно повышает его тепловую отдачу. Дальнейшее повышение содержания ZnO в структуре волокон существенно не влияет на данные температурные показатели процесса полициклизации, но незначительно снижает его тепловой эффект.

При введении наночастиц ZnO температурные показатели, характеризующие проявление процесса горения, снижаются, как и в присутствии большинства других рассматриваемых модификаторов. Однако это влияние наночастиц ZnO на горение ПАН волокон оказалось не столь значительным.

Увеличение содержания в структуре ПАН волокон наноразмерных частиц Ni от 0,5 до 5,0 % [масс.], в целом, не оказало достоверного влияния на температурный диапазон протекания процесса полициклизации, однако более существенно снизило его тепловой эффект, в сравнении с введением наночастиц ZnO .

Что касается влияния наноразмерных частиц ZnO и Ni на протекание процесса горения ПАН волокон, то в присутствии данных модификаторов не наблюдается влияния увеличения их содержания на тепловой эффект данного процесса. В то же время прослеживается следующая закономерность: при увеличении содержания наноразмерных частиц ZnO и Ni до 0,5 % [масс.] в структуре ПАН волокон имеется тенденция к существенному увеличению значения потери их массы, которая затем постепенно снижается при росте содержания наноразмерных частиц ZnO и Ni до 5,0 % [масс.].

Также важно отметить следующую наблюдаемую закономерность: введение наноразмерных частиц в количестве примерно до 0,5 % [масс.] в матрицу ПАН волокон, как правило, приводит к большему удельному изменению (росту или снижению, в зависимости от природы модификатора) всех рассматриваемых показателей при термохимическом превращении данной полимерной структуры, чем последующее увеличение содержания в ней тех же наноразмерных частиц до 5,0 % [масс.].

Выводы

Установлено, что из всех апробированных в данной работе модификаторов только введение и увеличение содержания наноразмерных частиц MgO в матрице полиакрилонитрильных волокнистых материалов приводит к существенному увеличению температур начала, максимума и окончания температурной зоны протекания процесса полициклизации, а также расширению этой зоны в область более высоких температур. При этом только в присутствии наноразмерных частиц MgO было отмечено существенное расширение температурного диапазона процесса термоокислительной деструкции (горения, окисления) полиакрилонитрильной матрицы со смещением максимума и окончания данного процесса в область более высоких температур.

Наибольшее влияние на снижение температуры начала и максимума проявления теплового эффекта процесса полициклизации с расширением зоны этого процесса в область более низких температур, а также на наиболее существенное снижение температурной зоны проявления теплового эффекта горения оказывает присутствие в структуре полиакрилонитрильных волокон наноразмерных частиц CuO .

Наибольшее снижение величины теплового эффекта полициклизации наблюдалось при содержании в волокне 0,1 % Fe_3O_4 и 5,0 % MgO . Наибольшее снижение теплоты горения наблюдалось при содержании в волокне 0,1 % CuO . Вместе с тем, повышение содержания наноразмерных частиц CuO до 5,0 % привело к максимальным из всей серии экспериментов выделениям тепловой энергии в процессе полициклизации и горения. Наименьшее влияние на тепловую отдачу при горении оказали наноразмерные частицы ZnO , MgO и Ni .

Что касается изменения массы образцов в процессах полициклизации и горения, то его характер также связан с природой и содержанием наноразмерных частиц в полиакрилонитрильных волокнах. При этом в наибольшей степени имеются отличия во влиянии HCl MgO на динамику изменения массы ПАН волокон при полициклизации. Этот процесс в присутствии наночастиц MgO протекает антибатно по отношению к вариантам с введением других наночастиц. Так, при введении в волокно до 0,1 % MgO сначала отмечается незначительное уменьшение потери массы образцов, по сравнению с другими образцами, а при дальнейшем увеличении содержания в полиакрилонитрильных волокнах MgO до 5,0 % – стремительный рост потери массы. Последнее

нежелательно, так как приводит к снижению выхода углерода при получении УВМ на основе полиакрилонитрильных прекурсоров.

Таким образом, исследование термического поведения наномодифицированных полиакрилонитрильных волокон позволяет отметить различия во влиянии природы и содержания наноразмерных частиц на протекающие термохимических процессов в термореактивной полимерной структуре волокон и дает возможность указать наиболее эффективные направления применения рассмотренных модификаторов полиакрилонитрильных волокнистых материалов:

- наноразмерные частицы MgO в количестве около 0,5 % (масс.), как модификатор, потенциально способный снизить горючесть полиакрилонитрильных волокнистых

материалов текстильного назначения;

- наноразмерные частицы CuO в количестве около 0,5 % (масс.), как модификатор, способный снизить тепловой эффект полициклизации с целью оптимизации процесса термоокислительной стабилизации полиакрилонитрильных прекурсоров в производстве углеродных волокнистых материалов;

- наноразмерные частицы Fe₃O₄ и Ni в качестве модификаторов электрофизической активности углеродных волокнистых материалов, которые могут быть введены в структуру полиакрилонитрильных прекурсоров в количестве не менее 5 % (масс) без существенного нарушения процесса их термоокислительной стабилизации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Блохин, А.Н. Таров, В.П., Толстых, М.С. (2012). Влияние нанодисперсных частиц на прочностные свойства полимерных матриц. *Вестник ТГТУ*, Т18, № 3, С. 737–741.

Буй, Х.Х., Хоанг, В.А., Хархуш, А. А., Хоанг, Т.Х. и Юртов, Е.В. (2019). Исследование влияния наночастиц оксида цинка на огне- и термостойкость наноматериалов на основе ненасыщенной полиэфирной смолы. *Успехи в химии и химической технологии*, Т 33, № 10. С. 8–9.

Важенина, И.Г., Столяр, С.В., Тюменцева, А.В., Волочаев, М.Н., Исхаков, Р.С., Комогорцев, С.В., Пьянков, В.Ф. и Николаева, Е.Д. (2023). Исследование магнитных наночастиц оксида железа, покрытых оксидом кремния, методом ферромагнитного резонанса. *Физика твердого тела*, Т 65, № 6, С. 923–9275. DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55644.01N.

Воробьева, Е.В. и Борисов, И.М. (2022). Особенности окисления предельных углеводородов (C10-C15) в контакте с дисперсной медью, взаимосвязь процесса с физико-химическими показателями. *Известия вузов. Химия и хим. технология*, Т 65, № 7, С. 79–87. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6577.

Дмитриевская, А. А. (2017). Биоцидные свойства суспензий наночастиц металлов и их оксидов. *Бюллетень медицинских Интернет-конференций*, Т 7, № 6, С 876–878.

Жабин, А.Н. и Няфкин, А.Н. (2022). Волокнистые металлические композиционные материалы на основе меди (обзор). *Труды ВИАМ*, № 9 (115), С. 99–110. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-99-110.

Ленартович, Л. А., Прокопчук, Н.Р., Касперович, О.М., Петрушеня и А.Ф., Любимов, А.Г. (2024). Влияние наночастиц оксидов металлов на свойства полимерных материалов (обзор). *Труды БГТУ*, Серия 2, № 2, С. 65–76.

Мацакова, Е.Г. и Симакова, Д.И. (2020). Наночастицы, проявляющие антибактериальные эффекты: свойства, получение, механизм действия, применение. *Российские нанотехнологии*, Т 15, № 2, С. 238–243. doi: 10.1134/s1992722320020156.

Хай, Х.Т., Хархуш, А.А., Серцова, А.А., Маракулин, С.И. и Юртов, Е.В. (2018). Разработка антипиренов на основе наночастиц оксида и бората цинка для повышения огне- и термостойких характеристик пластифицированного ПВХ. *Успехи в химии и химической технологии*, Т 32, № 10, С. 59–61.

Хархуш, А.А., Хоанг, Т.Х., Сейткасымова, А.А. и Юртов, Е.В. (2019). Влияние концентраций оксида магния на огне- и термостойкость ненасыщенных полиэфирных смол. *Успехи в химии и химической технологии*, Т 33, № 10, С. 59–61.

Щербина, Л. А., Городнякова, И.С., Пчелова, Н.В., Будкуте, И. А. и Устинов, К.Ю. (2023). Структурно-морфологические особенности волокон, получаемых по диметилформамидной технологии из терсополимеров акрилонитрила, метилакрилата и итаконовой кислоты. *Полимерные материалы и технологии*, Т 9, № 2, С. 55–67. doi: 10.32864/

polymmattech-2023-9-2-55-67.

Tamayo, L.A., Zapata, P.A., Rabagliati, F.M., Azócar, M.I., Muñoz, L.A., Zhou, X., Thompson, G.E. and Pérez, M.A. (2015). Antibacterial and non-cytotoxic effect of nanocomposites based in polyethylene and copper nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, No. 26 (3), pp. 129–135. doi: 10.1007/s10856-015-5475-6.

Bindhu, M.R., Umadevi, M., Micheal, M.K., Arasu, M.V. and Al-Dhabi, N.A. (2016). Structural, morphological and optical properties of MgO nanoparticles for antibacterial applications. *Materials Letters*, vol. 166, pp. 19–22.

Jun, Ch., Shuanghong, T., Jiang, L. and Ya, X. (2015). Catalytic performance of MgO with different exposed crystal facets towards the ozonation of 4-chlorophenol. *Applied Catalysis A: General*, 2015, vol. 506, pp. 118–125.

Selim, D., Selim, D., Öztürk, B., Erol, M., Yildirim, S., Yildirim, S., Yigit, E., Sancakoglu, O., Çelik, S. and Batar, T. (2015). Synthesis and comparison of the photocatalytic activities of flame spray pyrolysis and sol-gel derived magnesium oxide nano-scale particles. *Materials Science in Semiconductor Processing*, No. 34, pp. 154–161. DOI: 10.1016/j.mssp.2015.02.029.

Rizwan, W., Ansari, S.G., Mushtaq, A.D., Kim, Y.S. and Shin, H.-S. (2007). Synthesis of magnesium oxide nanoparticles by sol-gel process. *Materials Science Forum*, vol. 558–559, pp. 983–986. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.558-559.983.

Zeyneb, C., Sema, E. and Sabriye, Y. (2012). Magnesium Oxide Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Uranium Sorption Properties. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, vol. 31, No. 4, pp. 536–543.

REFERENCES

Blokhin, A.N. Tarov, V.P. and Tolstykh, M.S. (2012). Influence of Nanodispersed Particles on the Strength Properties of Polymer Matrices [Vliyaniye nanodispersnykh chastic na prochnostnye svoystva polimernykh matric]. *Vestnik TGTU = Bulletin of TSTU*, vol.18, No. 3, pp. 737–741 [in Russian].

Bui, H.H., Hoang, V.A., Kharkhush, A.A., Hoang, T.H. and Yurtov, E.V. (2019). Study of the effect of zinc oxide nanoparticles on the fire and heat resistance of nanomaterials based on unsaturated polyester resin [Issledovaniye vliyaniya nanochastits oksida tsinka na ogne- i termostoykost' nanomaterialov na osnove nenasyshchennoy poliefirnoy smoly]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*, vol. 33, No. 10. P. 8–9 [in Russian].

Vazhenina, I.G., Stolyar, S.V.; Tyumentseva, A.V., Volochaev, M.N., Iskhakov, R.S., Komogortsev, S.V., Pyankov, V.F. and Nikolaeva, E.D. (2023). Study of magnetic iron oxide nanoparticles coated with silicon oxide by the ferromagnetic resonance method [Issledovaniye magnitnykh nanochastits oksida zheleza, pokrytykh oksidom kremniya, metodom ferromagnitnogo rezonansa]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, Vol. 65, No. 6, pp. 923–9275. DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55644.01H [in Russian].

Vorobyova, E.V. and Borisov, I.M. (2022). Features of oxidation of saturated hydrocarbons (C10–C15) in contact with dispersed copper, the relationship of the process with physicochemical parameters [Osobennosti okisleniya predel'nykh uglevodorodov (S10–S15) v kontakte s dispersnoy med'yu, vzaimosvyaz' protsesssa s fiziko-khimicheskimi pokazatelyami]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = News of universities. Chemistry and chemical technology*, vol. 65, No. 7, pp. 79–87. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6577 [in Russian].

Dmitrievskaya, A.A. (2017). Biocidal properties of suspensions of metal nanoparticles and their oxides [Biotsidnyye svoystva suspenziy nanochastits metallov i ikh oksidov]. *Byulleten' meditsinskikh Internet-konferentsiy = Bulletin of Medical Internet Conferences*, vol. 7, No. 6, pp. 876–878 [in Russian].

Zhabin, A.N. and Nyafkin, A.N. (2022). Copper-based fibrous metal composite materials (review) [Voloknistyye metallicheskiye kompozitsionnyye materialy na osnove medi (obzor)]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, No. 9 (115), pp. 99–110. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-99-110 [in Russian].

Lenartovich, L.A., Prokopchuk, N.R., Kaspersky, O.M., Petrushenya, A.F. and Lyubimov, A.G. (2024). Vliyaniye nanochastits metallov na svobstva polimernykh materialov (review) [Vliyaniye nanochastits oksidov metallov na svoystva polimernykh materialov (obzor)]. *Trudy BGTU, = Bulletin of BSTU*, Series 2, No. 2, pp. 65–76 [in Russian].

Matsakova, E.G. and Simakova, D.I. (2020). Nanoparticles exhibiting antibacterial effects: properties, production, mechanism of action, application [Nanochastitsy, proyavlyayushchiye antibakterial'nyye efekty: svoystva, polucheniye, mekhanizm deystviya, primeneniye]. *Rossiyskiye nanotekhnologii = Russian Nanotechnologies*, vol. 15, No. 2, pp. 238–

243. doi: 10.1134/s1992722320020156 [in Russian].

Hai, H.T., Kharkhush, A.A., Sertsova, A.A., Marakulin, S.I., and Yurtov, E.V. (2018). Development of flame retardants based on zinc oxide and zinc borate nanoparticles to enhance the flame and heat resistance of plasticized PVC [Razrabotka antipirenov na osnove nanochastits oksida i borata tsinka dlya povysheniya ogne- i termostoykikh kharakteristik plastifitsirovannogo PVKH]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*, vol. 32, No. 10, pp. 59–61 [in Russian].

Kharkhush, A.A., Hoang, T.H., Seitkasymova, A.A., and Yurtov, E.V. (2019). Effect of magnesium oxide concentrations on the flame and heat resistance of unsaturated polyester resins [Vliyaniye kontsentratsiy oksida magniya na ogne- i termostoykost' nenasyshchennykh poliefirnykh smol]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*, vol. 33, No. 10, pp. 59–61 [in Russian].

Shcherbina, L.A., Gorodnyakova, I.S., Pchelova, N.V., Budkute, I.A. and Ustinov, K.Yu. (2023). Structural and morphological features of fibers obtained by dimethylformamide technology from tersopolymers of acrylonitrile, methyl acrylate and itaconic acid [Strukturno-morfologicheskiye osobennosti volokon, poluchayemykh po dimetilformamidnoy tekhnologii iz tersopolimerov akrilonitrila, metilakrilata i itakonovoy kisloty]. *Polimernyye materialy i tekhnologii = Polymer Materials and Technologies*, vol. 9, No. 2, pp. 55–67. doi: 10.32864/polymmattech-2023-9-2-55-67 [in Russian].

Tamayo, L.A., Zapata, P.A., Rabagliati, F.M., Azócar, M.I., Muñoz, L.A., Zhou, X., Thompson, G.E. and Páez, M.A. (2015). Antibacterial and non-cytotoxic effect of nanocomposites based in polyethylene and copper nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, No. 26 (3), pp. 129–135. doi: 10.1007/s10856-015-5475-6.

Bindhu, M.R., Umadevi, M., Micheal, M.K., Arasu, M.V. and Al-Dhabi, N.A. (2016). Structural, morphological and optical properties of MgO nanoparticles for antibacterial applications. *Materials Letters*, vol. 166, pp. 19–22.

Jun, Ch., Shuanghong, T., Jiang, L. and Ya, X. (2015). Catalytic performance of MgO with different exposed crystal facets towards the ozonation of 4-chlorophenol. *Applied Catalysis A: General*, 2015, vol. 506, pp. 118–125.

Selim, D., Selim, D., Öztürk, B., Erol, M., Yildirim, S., Yildirim, S., Yigit, E., Sancakoglu, O., Çelik, S. and Batar, T. (2015). Synthesis and comparison of the photocatalytic activities of flame spray pyrolysis and sol-gel derived magnesium oxide nano-scale particles. *Materials Science in Semiconductor Processing*, No. 34, pp. 154–161. DOI: 10.1016/j.mssp.2015.02.029.

Rizwan, W., Ansari, S.G., Mushtaq, A.D., Kim, Y.S. and Shin, H.-S. (2007). Synthesis of magnesium oxide nanoparticles by sol-gel process. *Materials Science Forum*, vol. 558–559, pp. 983–986. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.558-559.983.

Zeyneb, C., Sema, E. and Sabriye, Y. (2012). Magnesium Oxide Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Uranium Sorption Properties. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, vol. 31, No. 4, pp. 536–543.

Щербина Леонид Александрович

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь.

E-mail: htvms73@yandex.by

Радковский Иван Сергеевич

Ассистент кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь.

Будкоте Ирина Александровна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений», Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь.

Leonid A. Shcherbina

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor, Chair of the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus.

E-mail: htvms73@yandex.by

Ivan S. Radkovsky

Assistant of the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus.

Iryna A. Budkute

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor of the Department "Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds", Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus.