

УДК 678:620.172.2:531.43

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ОРГАНОГЛИНОЙ

С. Н. ДАНИЛОВА<sup>1</sup>, А. А. ОХЛОПКОВА<sup>1, 2+</sup>, С. С. ПЕСЕЦКИЙ<sup>3</sup>, С. Н. МИРОНОВА<sup>1</sup>, О. Р. САВВИНОВА<sup>1</sup>, А. М. СПИРИДОНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, ул. Белинского, 58, 677000, г. Якутск, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем нефти и газа СО РАН, ул. Автоторожная, 20, 677007, г. Якутск, Россия

<sup>3</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

*В данной работе представлены результаты исследований физико-механических свойств и триботехнических характеристик полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и органо-модифицированного слоистого силиката марки МОНАМЕТ 1Р3. Установлены особенности структурообразования в СВМПЭ, наполненном органо-глиной, заключающиеся в изменении геометрической формы и размеров структурных элементов в зависимости от концентрации наполнителя. Выявлена оптимальная концентрация наполнителя в СВМПЭ (0,5–1,0 мас.%), которой соответствуют лучшие физико-механические показатели. Показано, что структура СВМПЭ при этих концентрациях наполнителя изменяется от сферолитной до мелкокристаллической. Методом ИК-спектроскопии выявлено, что при трении композитов протекают трибоокислительные процессы с образованием кислородсодержащих функциональных групп, интенсивность пиков которых снижается при повышении концентрации наполнителя. Зарегистрировано формирование вторичных структур на поверхностях трения полимерных композиционных материалов, образованных из продуктов трибораспада СВМПЭ и органо-модифицированного монтмориллонита, защищающих материал от изнашивания.*

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен, монтмориллонит МОНАМЕТ 1Р3, физико-механические свойства, триботехнические характеристики, ИК-спектроскопия, сканирующая электронная спектроскопия, надмолекулярная структура.

## INVESTIGATION OF PHYSICO-MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE MODIFIED BY ORGANOCLAY

S. N. DANILOVA<sup>1</sup>, A. A. OKHLOPKOVA<sup>1, 2+</sup>, S. S. PESETSKY<sup>3</sup>, S. N. MIRONOVA<sup>1</sup>, O. R. SAVVINOVA<sup>1</sup>, A. M. SPIRIDONOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>North-Eastern Federal University, Belinsky St., 58, 677000, Yakutsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Oil and Gas Problems of the SB RAS, Oktyabrskaya St., 1, 677980, Yakutsk, Russia

<sup>3</sup>V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

*In this paper, we present the results of studies of the mechanical and tribological properties of polymer composite materials (PCM) based on ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) and synthetic organically modified montmorillonite (oMMT) of the brand MONAMET 1P3. The optimal concentration of the filler in UHMWPE, which corresponds to the best mechanical characteristics, was 0.5–1.0 wt.%. It was*

+ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: okhlopkova@yandex.ru

*found that the features of the structure formation of UHMWPE/oMMT composites consist in the changes of geometric shape and size of the structural elements depending on the filler concentration. The structure of UHMWPE varies from spherulitic to fine crystalline when changing the filler concentration. Tribological characteristics were also enhanced when oMMT was added in UHMWPE. The method of IR spectroscopy revealed occurring tribooxidation processes during friction of composites, with the formation of oxygen-containing functional groups. The content of these oxygen-containing functional groups decreases when the concentration of oMMT increase. The formation of secondary structures on friction surfaces of PCMs is recorded. These structures are formed from the products of the tribodisintegration of UHMWPE and oMMT and protect the PCM from wear.*

**Keywords:** ultra-high molecular weight polyethylene, organically modified montmorillonite, mechanical properties, tribological characteristics, IR spectroscopy, scanning electron spectroscopy, supramolecular structure.

## Введение

Свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) зависят не только от размеров, формы и природы наполнителя, но и от их химического состава и строения. Это связано с тем, что природа взаимодействия между наполнителем и полимерной матрицей в композитах, представляющих собой гетерогенную многокомпонентную систему, существенно влияет на весь комплекс свойств. Процесс совмещения компонентов ПКМ, особенно при использовании неполярных полимеров в качестве матрицы, является достаточно сложной технологической задачей [1]. Для улучшения межфазного взаимодействия в системе полимер–наполнитель используют различные методы (механоактивация компонентов, использование воздействия физических полей, обработка поверхности наполнителя поверхностно-активными веществами (ПАВ), аппретами и т. д.) [2], но целесообразно использовать наполнители, поверхность которых модифицирована на стадии синтеза. Использование органомодифицированных наполнителей существенно упрощает технологический процесс изготовления ПКМ, кроме того, решает проблему совмещения гидрофильной поверхности наполнителя с неполярной или слабополярной полимерной матрицей [3].

Таковыми наполнителями являются органомодифицированные силикаты, в частности органомодифицированный монтмориллонит (оММТ), представляющий собой очищенный, обработанный минерал, получаемый из бентонитовых глин. В настоящее время оММТ довольно часто используется в качестве усиливающей добавки при создании ПКМ, применяемых в качестве деталей (подшипников, втулок, муфт, шестерен, звездочек и т. д.) для горнодобывающей промышленности и транспортных средств [4].

**Цель работы** — изучение влияния органомодифицированного силиката на эксплуатационные характеристики и процессы структурообразования композитов на основе СВМПЭ.

## Материалы и методы исследования

Для изготовления композитов был использован сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ)

марки Celanese GUR-4022 (Китай), с молекулярной массой  $5,3 \times 10^6$  г/моль, плотностью  $0,93$  г/см<sup>3</sup> и средним размером частиц  $145$  мкм.

В качестве наполнителя применяли монтмориллонит марки МОНАМЕТ 1Р3 («Метаклэй», Россия), в котором в качестве органомодификатора использовали резорцинольную смолу в присутствии четвертичной аммониевой соли, содержащей алифатические радикалы, в состав которых входят от 14 до 18 метиленовых групп.

Смешение компонентов ПКМ проводили в лопастном смесителе при скорости вращения ротора  $1200$  об/мин. Образцы для испытаний получали, используя широко применяемую технологию горячего прессования при температуре  $175$  °С, давлении  $10$  МПа, при выдержке в течение  $20$  мин и последующим охлаждением.

Физико-механические свойства ПКМ исследовали согласно стандартной методике ГОСТ 11262. Модуль упругости при растяжении определяли согласно ГОСТ 9550 на универсальной разрывной машине «AGS-J» («Shimadzu», Япония) при скорости движения подвижных захватов  $50$  мм/мин.

Триботехнические характеристики определяли на трибометре «UMT-3» («СЕТР», США) согласно ГОСТ 11629 по схеме трения «палец–диск», при нагрузке  $150$  Н и скорости скольжения  $1$  м/с, контрольно изготовлено из стали 45 с твердостью  $40$ – $50$  НРС и шероховатостью  $R_a = 0,06$ – $0,08$  мкм. Продолжительность трения —  $3$  ч, путь трения —  $10,8$  км. Испытание исследуемого образца, цилиндра с диаметром  $10$  мкм и высотой  $20$ – $23$  мкм, проводили в режиме сухого трения.

Скорость изнашивания (мм<sup>3</sup>/Нм) рассчитывали по формуле:

$$K = \frac{m_1 - m_2}{\rho Fd},$$

где  $m_1$  и  $m_2$ , мг — масса образца до и после испытания;  $\rho$ , мг/мм<sup>3</sup> — плотность образца;  $F$ , Н — прижимающее усилие;  $d$ , м — путь трения.

Процессы трибодеструкции ПКМ исследовали методом ИК-спектроскопии. Спектры образцов получали на ИК-спектрометре «Varian 7000 FT-IR» («Varian», США) в области длин волн  $400$ – $4000$  см<sup>-1</sup>, методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Надмолекулярную структуру компози-

тов исследовали на растровом электронном микроскопе «JSM-7800FX» («JEOL», Япония) с приставкой «X-MAX-20» («Oxford Instruments plc», Англия). Термодинамические характеристики ПКМ исследовали на дифференциальном сканирующем калориметре «DSC 204 F1 Phoenix Netzsch» («Netzsch», Германия), скорость нагревания — 20 °С/мин, навеска образца — 25 ± 2 мг.

### Результаты и их обсуждение

Структура ММТ представляет собой трехслойный пакет (рис. 1), состоящий из нескольких параллельных слоев, состоящих из двух кремнекислородных тетраэдров с расположенными между ними алюмокислородным октаэдрическим слоем. Все вершины тетраэдров обращены к центру структурного слоя и соединяются с октаэдрическим слоем через атомы кислорода, а в несвязанных вершинах октаэдра располагаются атомы гидроксида. Из-за такой структуры составляющие элементы ММТ слабо связаны, и легко нарушаются при внедрении в межпакетное межслоевое пространство полярных молекул, что приводит к увеличению межслоевого пространства.

В результате изоморфных замещений решетка минералов этой группы всегда электрически не уравновешена, вследствие чего зарегистрировано повышение отрицательного заряда на поверхности частиц. Возникающий отрицательный заряд компенсируется адсорбцией катионов щелочных и щелочноземельных металлов, и, таким образом, образуется межслоевой комплекс монтмориллонита вместе с адсорбированной водой [4, 5, 6].

Толщина отдельных пластин монтмориллонита составляет примерно 1 нм, а поперечный размер может находиться в диапазоне от нескольких нанометров до нескольких микрометров [7]. Такая форма способствует формированию структуры ПКМ с высоко текстурированными силикатными слоями в полимерной матрице.

Порошкообразный ММТ обычно представляет собой агломераты, каждый из которых содержит до нескольких десятков силикатных пластин глинистого минерала. Наличие таких агломератов существенно ухудшает эксплуатационные показатели ПКМ, т. е. наполнитель не распределяется в полимерной матрице равномерно. Для того, чтобы обеспечить диспергирование глины и интеркаляцию макромолекул полимера в пространстве между силикатными пластинами, порошки ММТ обрабатывают ПАВ.

В качестве ПАВ для обработки глин обычно используют четвертичные аммониевые соли (ЧАС). Положительно заряженные  $\text{NH}_4^+$  взаимодействуют с отрицательно заряженной поверхностью алюмосиликата, вытесняя внутрислоевые катионы щелочных и щелочноземельных металлов, и тем самым, увеличивают расстояние между силикатными пластинами, способствуя интеркаляции макромолекул полимера или их фрагментов в межслоевое пространство [8]. Основным недо-

статком использования ЧАС является их низкая термостойкость — при переработке СВМПЭ (примерно 200 °С) начинается деструкция ПАВ. Поэтому наряду с модифицированием ЧАС, дополнительно глины обрабатывают термостабилизаторами. Для этого используется резорцинольная смола, представляющая собой ароматический эфир, который содержит полярные мостиковые эфирные группы [7].

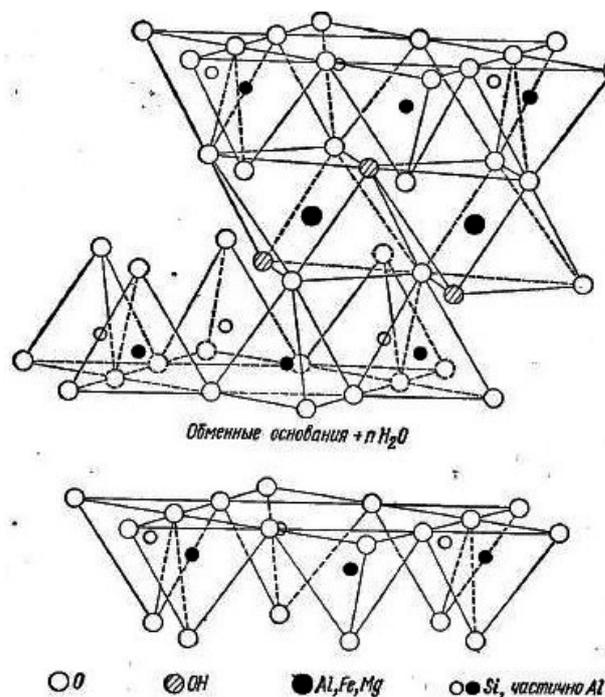


Рисунок 1 — Схематическое изображение структуры монтмориллонита 0020 [5]

Fig. 1 — Schematic representation of the structure of montmorillonite 0020 [5]

Анализ ИК-спектров оММТ (рис. 2) свидетельствует о том, что основные пики относятся к валентным и деформационным колебаниям связей кремния с кислородом, водорода с кислородом, углерода с водородом и с кислородом. Выраженная широкая полоса при 1007  $\text{cm}^{-1}$  соответствует валентным колебаниям Si–O–Si связей кремнекислородных тетраэдров. Полосы при 777  $\text{cm}^{-1}$  и 689  $\text{cm}^{-1}$  относятся к Si–O–Si колебаниям колец из  $\text{SiO}_4$  тетраэдров. Полосы в области меньших частот, между 910–938  $\text{cm}^{-1}$  соответствуют деформационным колебаниям немостиковых связей Al–O–H, а полоса поглощения 962  $\text{cm}^{-1}$  — валентным колебаниям немостиковых Si–O связей. Полоса поглощения при 1113  $\text{cm}^{-1}$  относится к ассиметричным колебаниям внешних Si–O связей. Кроме того, пик в области 3625  $\text{cm}^{-1}$  относится к O–H валентным колебаниям, связанных с наличием гидроксильных групп на поверхности глин. Эти OH– группы относят к «внутренним», т. е. полностью окружены атомами алюминия и кислорода внутри силикатного слоя [9, 10].



Рисунок 2 — ИК-спектр органоимодифицированного монтмориллонита  
Fig. 2 — IR spectra of organically modified montmorillonite

Зарегистрированные пики в области 1592 и 1486  $\text{cm}^{-1}$  относятся к скелетным колебаниям ароматических С–С связей, обусловленных модифицированием поверхности ММТ резорциновой смолой. На ИК-спектрах также зарегистрированы пики в области 2912  $\text{cm}^{-1}$  и 1463  $\text{cm}^{-1}$ , которые соответствуют валентным колебаниям – $\text{CH}_2$  группы, входящей в состав четвертичных аммониевых солей. Таким образом, все зарегистрированные пики для ММТ соответствуют справочным и литературным данным по химическому составу и строению [11, 12].

Использование наполнителей в СВМПЭ, прежде всего, направлено на улучшение его эксплуатационных характеристик. Наблюдаемые нами изменения при исследовании физико-механических и триботехнических характеристик ПКМ с разным содержанием оММТ, представлены на рис. 3 и 4.

Как видно из рис. 3, ПКМ, содержащие менее 2% (здесь и далее концентрация выражена в мас.%) оММТ, отличаются высокими значениями прочности при растяжении и модуля упругости. Лучшие физико-механические показатели имеет ПКМ, содержащий 0,5% оММТ: зарегистрировано повышение предела прочности на 26%, модуля упругости на 27%, по сравнению с ненаполненным СВМПЭ. Увеличение содержания наполнителя до 5% сопровождается некоторым снижением деформационно-прочностных характеристик. Ухудшение свойств ПКМ при превышении оптимальной концентрации вводимых частиц объясняется агломерацией наполнителей, неравномерным распределением их в объеме матрицы, что сопровождается формированием дефектных областей, в которых инициируется разрушение композита при нагружении [14].

Установлено, что наполнение СВМПЭ оММТ приводит также к улучшению триботехнических характеристик, по сравнению с ненаполненным материалом: уменьшению скорости линейного изнашивания в 4 раза; скорости изнашивания — в 17 раз. Возможно, это связано с тем,

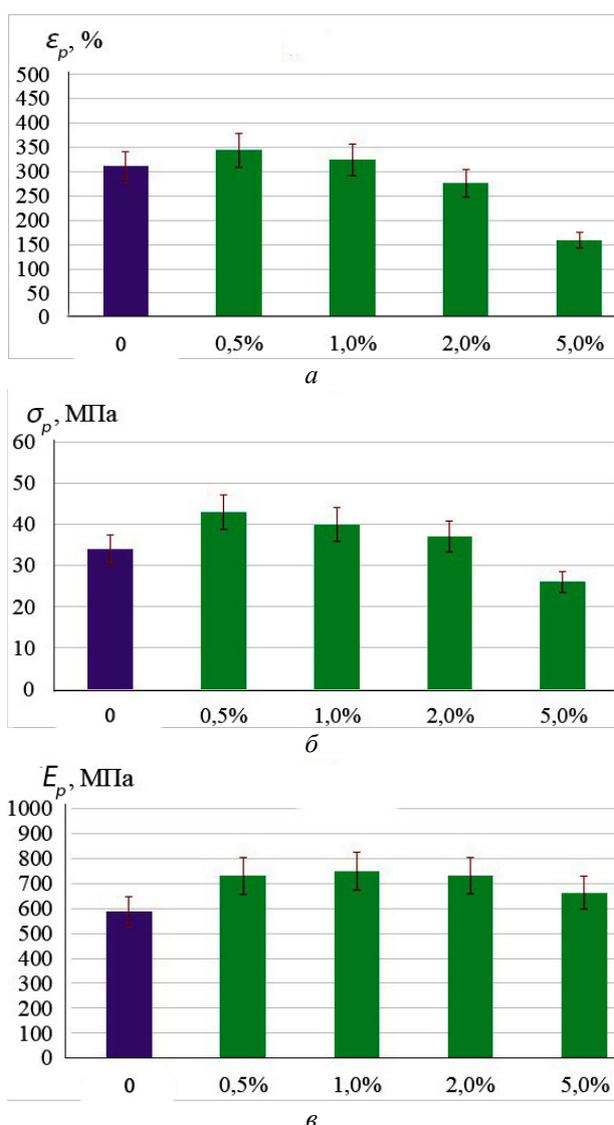


Рисунок 3 — Зависимость механических характеристик ПКМ от содержания наполнителя: а)  $\epsilon_p$ , % — относительное удлинение; б)  $\delta_p$ , МПа — предел прочности при растяжении; в)  $E_p$ , МПа — модуль упругости при растяжении

Fig. 3 — Dependence of mechanical characteristics of PCM on the content of filler: а)  $\epsilon_p$ , % — relative extension; б)  $\delta_p$ , MPa — tensile strength; в)  $E_p$ , MPa — elastic modulus

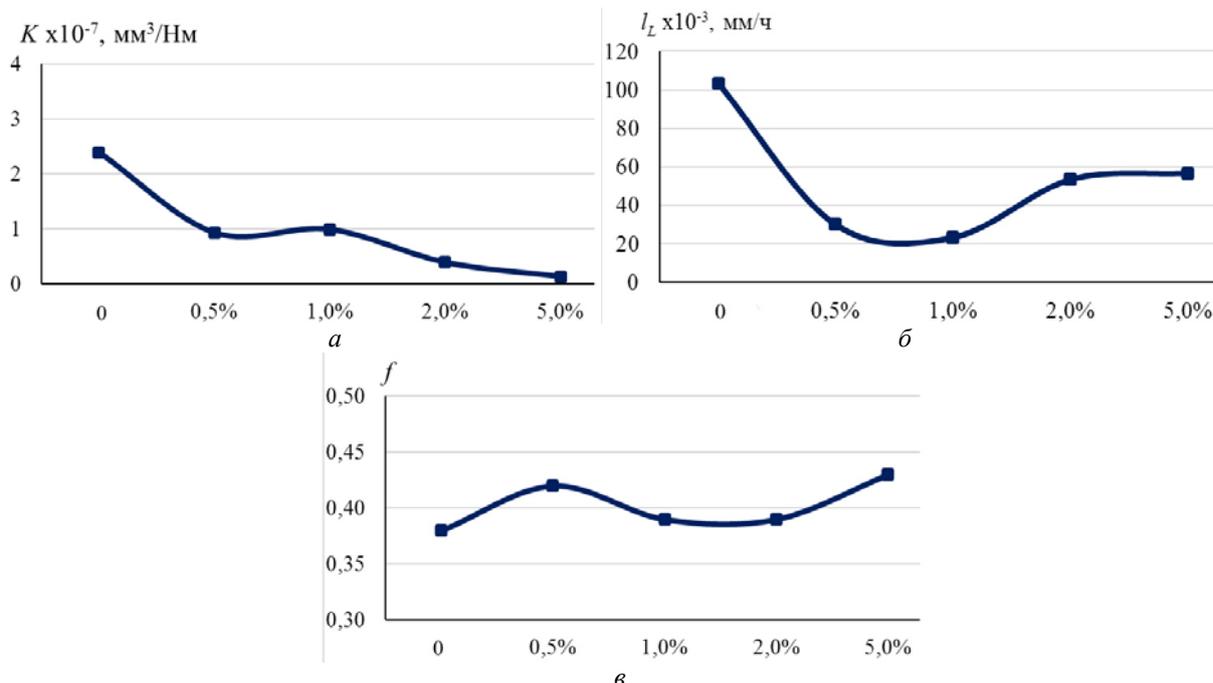


Рисунок 4 — Зависимости триботехнических характеристик ПКМ от содержания наполнителя: а)  $K$ ,  $\times 10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/Нм — скорость изнашивания; б)  $I_L$ ,  $\times 10^{-3}$  мм/ч — скорость линейного изнашивания; в)  $f$  — коэффициент трения

Fig. 4 — Results of research of tribotechnical properties of PCM depending on the content of filler: а)  $K$  — wear rate, ( $\times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/Nm); б)  $I_L$  — linear wear rate, ( $\times 10^{-3}$  mm/hr); в)  $f$  — coefficient of friction

что при трении исследуемых материалов в результате трибохимических реакций образуются вторичные структуры из материала полимера и наполнителя на поверхности изделия и контртела, и в дальнейшем истирание идет по продуктам трения [15]. Для проверки этого предположения исследовали химическое строение поверхности трения ПКМ методом ИК-спектроскопии. На рис. 5 представлены ИК-спектры до и после трения.

Зарегистрированы пики поглощения при  $2912 \text{ см}^{-1}$  и  $2848 \text{ см}^{-1}$ , которые относятся к симметричным и асимметричным валентным колебаниям  $>\text{CH}_2$  группы, а также пик при  $1463 \text{ см}^{-1}$ , отвечающий за деформационные колебания, и полоса кристалличности  $720 \text{ см}^{-1}$ . Выявлено, что после трения ПКМ во всех образцах образуются пики, связанные с валентным колебанием  $>\text{C}=\text{O}$  группы ( $1725 \text{ см}^{-1}$  и  $1562 \text{ см}^{-1}$ ), а также с участием группы  $>\text{C}-\text{O}$  в скелетных колебаниях молекулы (в интервале  $1400-1000 \text{ см}^{-1}$ ) [11, 12].

Появление на поверхности трения ПКМ пиков, соответствующих кислородсодержащим группам, указывает на протекание трибоокислительных процессов [16]. Увеличение содержания оММТ приводит к снижению интенсивности этих пиков, и появлению новых полос поглощения, относящихся к валентным колебаниям Si-O-Si связей кремнекислородного каркаса. Данные результаты свидетельствуют об образовании на поверхности трения защитного слоя из наполнителя.

Для выявления механизма изнашивания проведено исследование топографии поверхностей трения ПКМ, результаты которого представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, на поверхностях трения

ПКМ имеются бороздки, ориентированные вдоль направления скольжения, которые образуются в результате пластического оттеснения материала микронеровностями поверхности стального контртела. В процессе трения частицы оММТ локализуются на поверхности материала в виде агломератов или сплошных участков с высоким содержанием наполнителя. При этом уменьшается площадь контакта полимерной матрицы с поверхностью контртела, приводя к повышению износостойкости ПКМ.

Изменения физико-механических свойств, как правило, обусловлены структурными изменениями материала. При введении наполнителя в матрицу СВМПЭ частицы оММТ влияют на подвижность макромолекул, что сказывается на формировании упорядоченных элементов при кристаллизации СВМПЭ [17]. Ниже приведены результаты исследования поверхности ПКМ методом электронной микроскопии, позволяющие выявить особенности структуры материалов. На микрофотографиях (рис. 7) видно, что с увеличением содержания наполнителя происходит изменение надмолекулярной структуры от сферолитной до мелкокристаллической и неупорядоченной. При малых содержаниях оММТ наблюдается образование мелкосферолитной структуры ПКМ с образованием плотной упаковки, что подтверждает улучшение прочностных показателей. Такое явление объясняется структурной лабильностью мелких сферолитов, успевающих перестраиваться во время внешних воздействий при разрыве, тогда как крупносферолитная структура начинает разрушаться [18].

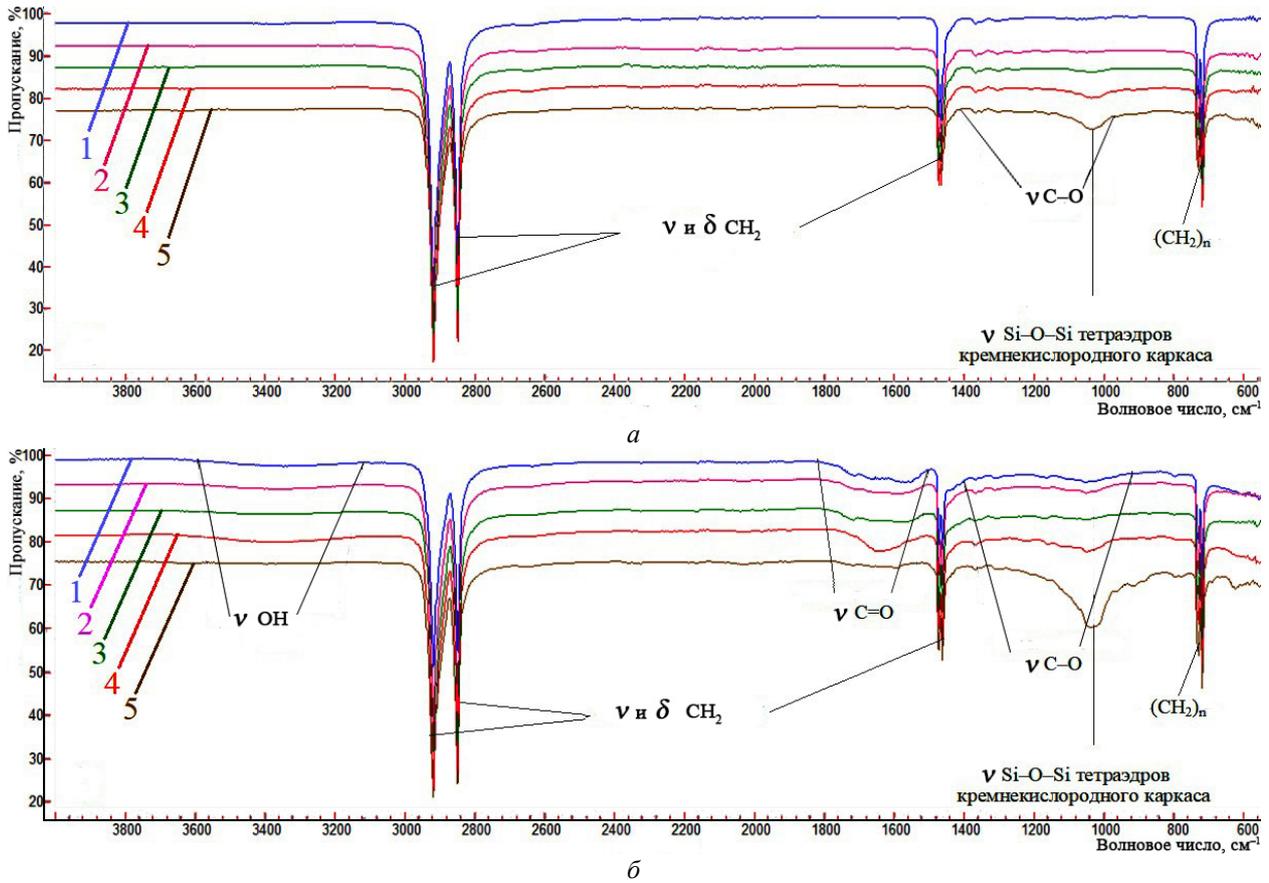


Рисунок 5 — ИК-спектры поверхностей образцов ПКМ на основе СВМПЭ, наполненных оММТ: а) до трения и б) после трения: 1 – ненаполненный СВМПЭ; 2 – 0,5%; 3 – 1%; 4 – 2%; 5 – 5%  
 Fig. 5 — IR spectra of PCM surface based on UHMWPE filled by oMMT: а) before friction and б) after friction: 1 – unfilled UHMWPE; 2 – 0,5%; 3 – 1%; 4 – 2%; 5 – 5%

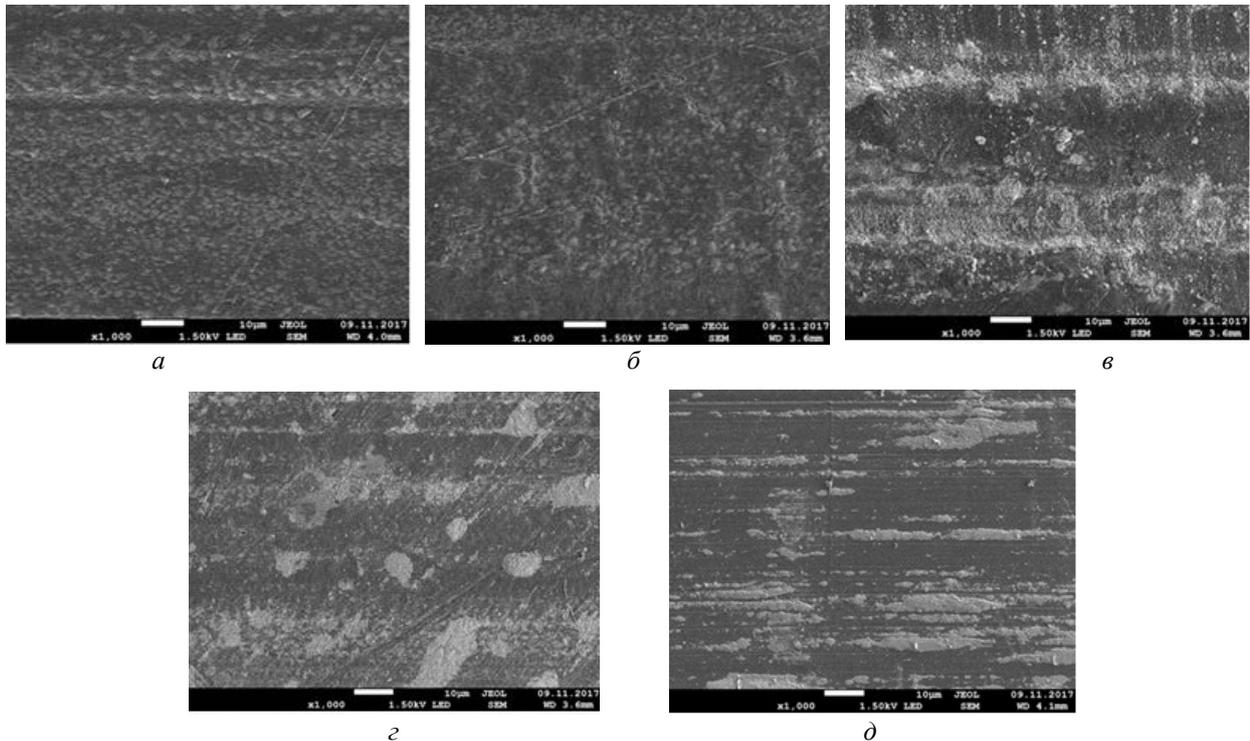


Рисунок 6 — Микрофотографии поверхностей трения образцов ПКМ на основе СВМПЭ, наполненного оММТ ( $\times 1000$ ): а – СВМПЭ; б – 0,5%; в – 1%; г – 2%; д – 5% оММТ  
 Fig. 6 — Morphology of wear surface PCM based on UHMWPE filled by oMMT ( $\times 1000$ ): а – UHMWPE; б – 0,5%; в – 1%; г – 2%; д – 5%

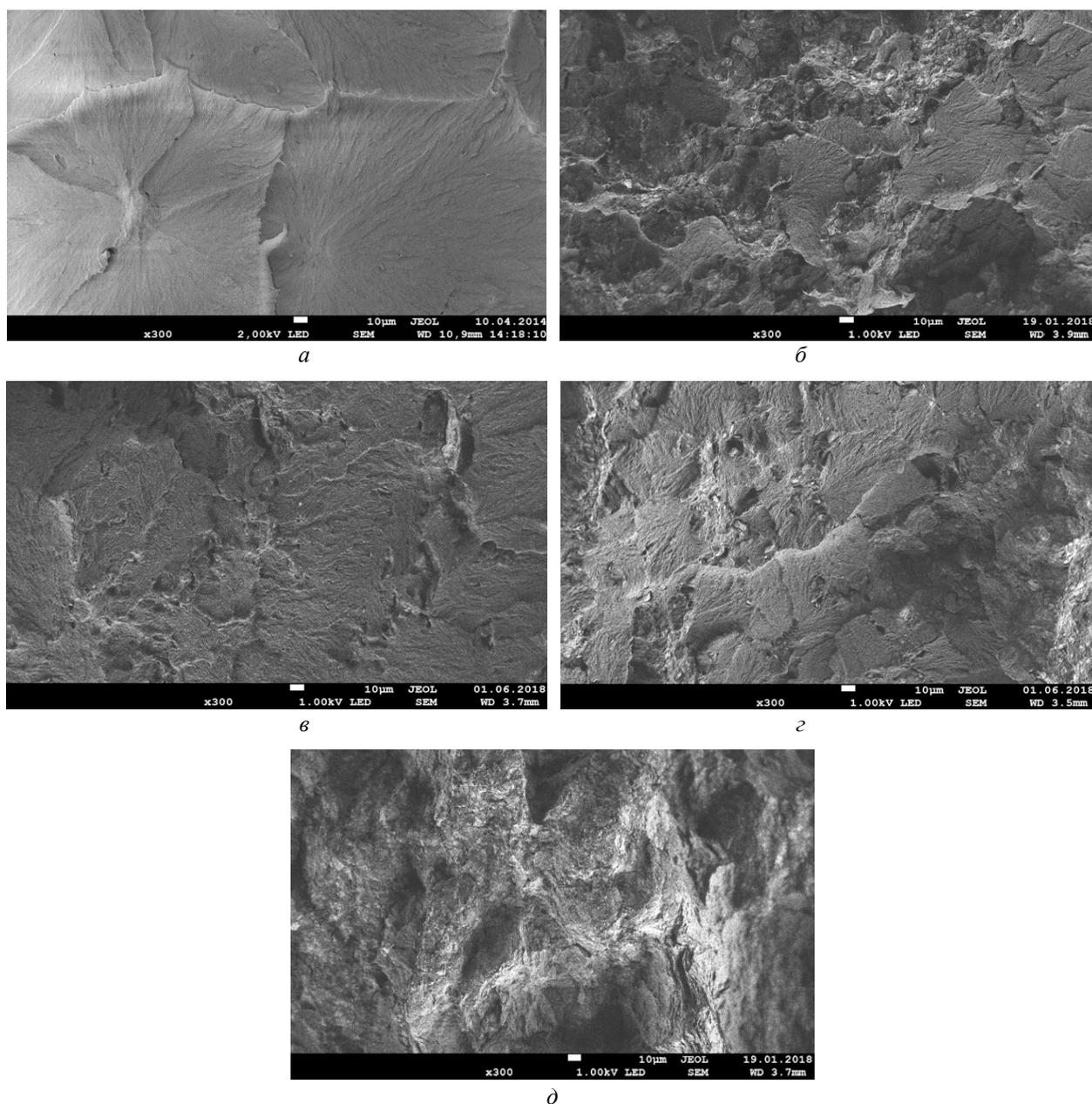


Рисунок 7 — Надмолекулярная структура ПКМ на основе СВМПЭ ( $\times 300$ ): а – СВМПЭ; б – 0,5%; в – 1%; з – 2%; д – 5% оММТ  
 Fig. 7 — Supramolecular structure of PCM based on UHMWPE filled by oMMT ( $\times 300$ ): а – unfilled UHMWPE; б – 0,5%; в – 1%; з – 2%; д – 5%

Наблюдаемые изменения структуры с увеличением содержания наполнителя можно объяснить взаимодействием органотфильной поверхности наполнителя и СВМПЭ, которая ограничивает подвижность макромолекул в расплаве, затрудняет формирование упорядоченной структуры. Кроме этого, большое количество частиц наполнителя приводит к увеличению числа центров кристаллизации и, как следствие, ограничивается рост кристаллитов вследствие пространственных затруднений [19].

Для оценки влияния наполнителя на структурообразование и поведение в расплавленном состоянии проведены исследования методом дифференциально-сканирующей калориметрии, результаты которых представлены в табл. 1.

Таблица 1 — Результаты исследований композитов методом ДСК

Table 1 — The results of studies of composites by the DSC method

Композит	$T_{пл}$ , °C	$\Delta H_{пл}$ , Дж/г	$\alpha$ , %
СВМПЭ исх.	128	172	59
СВМПЭ + 0,5 % оММТ	128	171	58
СВМПЭ + 1 % оММТ	128	168	57
СВМПЭ + 2 % оММТ	128	166	57
СВМПЭ + 5 % оММТ	128	162	55

Из данных, приведенных в табл. 1 видно, что температура плавления всех образцов не изменяется, что свидетельствует о неизменности структуры кристаллитов СВМПЭ при введении оММТ. При этом наблюдается небольшое снижение кристалличности связующего.

Увеличение содержания наполнителя в СВМПЭ приводит к незначительному уменьшению его энтальпии плавления, которое может быть объяснено снижением скорости кристаллизации и подвижности макромолекул вследствие увеличения вязкости расплава [20, 21].

## Выводы

На основании полученных данных выявлена эффективность использования органофункционального монтмориллонита в качестве модификатора СВМПЭ. Прочностные показатели увеличиваются на 26%, а износостойкость в 17 раз относительно исходного СВМПЭ. Установлены закономерности структурообразования в СВМПЭ, наполненных оММТ, заключающиеся в изменении геометрической формы и размеров структурных элементов в зависимости от концентрации наполнителя. Выявлена оптимальная концентрация наполнителя в СВМПЭ (0,5–1,0 мас.%), которой соответствуют лучшие физико-механические показатели. Показано, что структура СВМПЭ при этих концентрациях наполнителя изменяется от крупносферолитной до мелкокристаллической. Исследование поверхностей трения методами ИК- и сканирующей электронной микроскопии свидетельствует о протекании в процессе изнашивания ПКМ трибоокислительных процессов с образованием кислородсодержащих функциональных групп. Показано, что с увеличением концентрации оММТ в композитах наблюдается снижение интенсивности трибоокислительного распада модифицированного СВМПЭ. Зарегистрировано формирование вторичной структуры на поверхностях трения ПКМ, образованной из фрагментов трибораспада СВМПЭ и оММТ, защищающей материал от изнашивания. Зарегистрировано снижение энтальпии плавления с увеличением содержания наполнителя до 5 мас.%, что свидетельствует о снижении подвижности макромолекулярных цепей, вследствие увеличения вязкости расплава и снижения скорости кристаллизации.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Госзадание 11.1557.2017/4.6, Госзадание 11.7221.2017/6.7) и РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-01299 (исследование структуры ПКМ методом электронной микроскопии).

## Обозначения

ДСК — дифференциальная сканирующая кало-

риметрия; ММТ — монтмориллонит; оММТ — органофункциональный монтмориллонит; ПКМ — полимерный композиционный материал; СВМПЭ — сверхвысокомолекулярный полиэтилен; СЭМ — сканирующий электронный микроскоп; ЧАС — четвертичная аммониевая соль;  $E_p$ , МПа — модуль упругости;  $f$  — коэффициент трения;  $L_s$ ,  $\times 10^{-3}$  мм/ч — скорость линейного изнашивания;  $K$ ,  $\times 10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/Нм — скорость изнашивания;  $T_{пл}$ , °С — температура плавления;  $\alpha$ , % — степень кристалличности;  $\Delta H_{пл}$ , Дж/г — энтальпия плавления;  $\delta$ , см<sup>-1</sup> — волновое число деформационных колебаний;  $\epsilon_p$ , % — относительное удлинение;  $\sigma_p$ , МПа — предел прочности;  $\nu$ , см<sup>-1</sup> — волновое число валентных колебаний.

## Литература

1. Брык М. Т. Деструкция наполненных полимеров. М.: Химия, 1989. 192 с.
2. Данилова С. Н., Охлопкова А. А., Гаврильева А. А., Охлопкова Т. А., Борисова Р. В., Дьяконов А. А. Износостойкие полимерные композиционные материалы с улучшенным межфазовым взаимодействием в системе «Полимер-волокно» // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, 2016. № 5 (55). С. 80–92.
3. Демидёнок К. В., Бахов Ф. Н., Черкина У. Ю., Соломин И. А., Новиков А. И., Злобин В. Б., Алешинская С. В., Хилаждинов В. В. Перспективы использования органофункционального монтмориллонита в материалах для дорожной разметки // Вестник евразийской науки. 2013. № 5 (18). С. 10 [Электронный ресурс]. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/90tvn513.pdf> (дата обращения: 14.03.2018).
4. Ray S. S., Okamoto M. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing // Progress in polymer science, 2003, vol. 28, no. 11, pp. 1539–1641.
5. Ахмадеев Р. Г., Данюшевский В. С. Химия промывочных и тампонажных жидкостей: учебник для вузов. М.: Недра, 1981. 152 с.
6. Овчаренко Ф. Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов. Киев: Изд-во Академии наук Украинской ССР, 1961. 292 с.
7. Демидёнок К. В., Бахов Ф. Н., Черкина У. Ю., Алешинская С. В. Смесевые композиции на основе полиэтиленового воска и органофункционального монтмориллонита // Вестник евразийской науки. 2013. № 5 (18). С. 10 [Электронный ресурс]. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/92tvn513.pdf> (дата обращения 10.03.2018).
8. Третьякова В. Д., Бахов Ф. Н., Демидёнок К. В. Повышение характеристик композиционных материалов на основе полиамида посредством модификации наночастицами монтмориллонита // Вестник евразийской науки. 2011. № 4 (9), С. 8 [Электронный ресурс]. URL: <https://naukovedenie.ru/sbornik9/9-2.pdf> (дата обращения 20.02.2018).
9. Бахов Ф. Н. Получение органофункционального монтмориллонита с повышенной термической стабильностью // Вестник евразийской науки. 2013. № 3 (16). С. 9 [Электронный ресурс]. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/29tvn313.pdf> (дата обращения 12.03.2018).
10. Уоррел У. Глины и керамическое сырье. М.: Мир, 1978. 237 с.
11. Лебедев М. С., Жерновский И. В., Фомина Е. В., Потопова И. Ю. Аспекты применения инфракрасной спектроскопии алюмосиликатных сырьевых компонентов в строительном материаловедении // Технические науки – от теории к практике: сборник статей по материалам XXIV Международной заочной научной-практической конференции. Новосибирск: СибАК, 2013. С. 94–106.
12. Васильев А. В., Гриненко Е. В., Щукин А. О., Федулina Т. Г. Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений. СПб.: СПбГЛТА, 2007. 30 с.
13. Казыцына Л. А., Кулетская Н. Б. Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1971. 264 с.

14. Виноградов А. В., Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Слепцова М. И. Дисперсно-наполненные полимеры: концепт лекций. Якутск: Якутский университет, 2008. 194 с.
15. Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Алексеев А. А., Васильев А. П. Разработка и исследование полимерных композиционных материалов на основе активации политетрафторэтилена и углеродных наполнителей // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова. Т. 48, № 4. 2015. С. 51–63.
16. Гоголева О. В., Петрова П. Н. Исследование влияния технологий совмещения компонентов на свойства композитов на основе СВМПЭ // Вопросы материаловедения. 2017. Т. 91, № 3. С. 121–126.
17. Азаров В. И., Буров А. В., Оболенская А. В. Химия древесины и синтетических полимеров: учебник для вузов. СПб.: СПбЛТА, 1999. 628 с.
18. Сутягин В. М., Бондалетова Л. И. Химия и физика полимеров: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2003. 208 с.
19. Стручкова Т. С., Васильев А. П., Джин Х. Ч. Влияние оксида алюминия на свойства политетрафторэтилена // Арктика XXI век. Технические науки. 2014. № 1 (2). С. 10.
20. Охлопкова А. А., Васильев С. В., Петрова П. Н., Федоров А. Л., Тусов А. Г. Базальтофторопластовые композиты антифрикционного назначения // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, Т. 10, № 5, 2013. С. 30–36.
21. Никифоров Л. А. Структура и механические и триботехнические свойства нанокомпозитов на основе модифицированного природными силикатами сверхвысокомолекулярного полиэтилена: авторефер. дис. канд. техн. наук. Казань, 2017. 19 с.
- ing properties of composite materials through its modification by nanoparticles of montmorillonite]. *Vestnik evrazijskoj nauki*, 2011, no. 4 (9), Available at: <https://naukovedenie.ru/sbornik9/9-2.pdf>. (accessed 20 February 2018).
9. Bahov F. N. Poluchenie organomodificirovannogo montmorillonita s povyshennoj termicheskoj stabil'nost'yu [Production of organomodified montmorillonite with high thermal stability]. *Vestnik evrazijskoj nauki*, 2013, no. 3 (16), Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/29tvn313.pdf>. (accessed 12 March 2018).
10. Worrall W. *Gliny i keramicheskoe syr'e* [Clays and ceramic raw materials]. Moscow: Mir Publ., 1978. 237p.
11. Lebedev M. S., Zhernovskij I. V., Fomina E. V., Potapova I. Yu. Aspekty primeneniya infrakrasnoj spektroskopii alyumosilikatnyh syr'evyh komponentov v stroitel'nom materialovedenii [Aspects of application of infrared spectroscopy for aluminosilicate raw components in building materials study]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: sbornik statej po materialam XXIV Mezhdunarodnoj zaochnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Engineering sciences – from theory to practice: Proceedings of XXIV International correspondence research and practice conference]. Novosibirsk, 2013, pp. 94–105.
12. Vasil'ev A. V., Grinenko E. V., Shchukin A. O., Fedulina T. G. *Infakrasnaya spektroskopiya organicheskikh i prirodnykh soedineniy* [Infrared spectroscopy of organic and natural compounds]. Saint Petersburg: GLTA Publ., 2007, 30p.
13. Kazicyna L. A., Kupletskaya N. B. *Primenenie UF-, IK- i YaMR-spektroskopii v organicheskoy khimii* [Application of UV, IR and NMR Spectroscopy in Organic Chemistry]. Moscow: Vysshaja shkola Publ., 1971. 264 p.
14. Vиноградов А. В., Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Слепцова М. И. Дисперсно-наполненные полимеры: конспект лекций [Dispersed-filled composite materials: abstract of lectures], Yakutsk, 2008. 194 p.
15. Okhlopko A. A., Struchkova T. S., Alekseev A. A., Vasilyev A. P. Razrabotka i issledovanie polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove aktivacii politetraforehtilena i uglerodnykh napolnitelei [Development and research of polymeric composite materials based on activated polytetrafluoroethylene and carbon filler]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova* [Vestnik of the North-Eastern federal M. K. Ammosov university], 2015, vol. 48, no. 4, pp. 51–63.
16. Gogoleva O. V., Petrova P. N. Issledovanie vliyaniya tekhnologij sovmeshcheniya komponentov na svoystva kompozitov na osnove SVMPEH [Research of influence of different technologies of obtaining on the properties of composites based on UHMWPE]. *Voprosy materialovedeniya*, 2017, vol. 91, no. 3, pp. 121–126.
17. Azarov V. I., Burov A. V., Obolenskaya A. V. *Himiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Chemistry of wood and synthetic polymers]. Saint Petersburg: SPbLTA Publ., 1999. 628 p.
18. Sutyagin V. M., Bondaletova L. I. *Khimiya i fizika polimerov: uchebnoe posobiye* [Chemistry and physics of polymers. Textbook]. Tomsk: TPU Publ., 2003. 208 p.
19. Struchkova T. S., Vasil'ev A. P., Dzhin H. Ch. Vliyanie oksida alyuminiya na svoystva politetraforehtilena [Influence of aluminum oxide on the properties of polytetrafluoroethylene]. *Arktika XXI vek. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 1 (2), pp. 3–10.
20. Okhlopko A. A., Vasil'ev S. V., Petrova P. N., Fedorov A. L., Tuisov A. G. Bazal'tofloroplastovye kompozity antifrikcionnogo naznacheniya [Basalt-Fluoroplastic composites of antifrictional assignment]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova* [Vestnik of the North-Eastern federal M. K. Ammosov university], 2013, vol. 10, no. 5, pp. 30–36.
21. Nikiforov L. A. Strukturа i mekhanicheskie i tribotekhnicheskie svoystva na nokompozitov na osnove modifitsirovannogo prirodnyimi silikatami sverhvyssokomolekulyarnogo poliehtilena. Avtorefer. dis. kand. tekhn. Nauk [Structure and mechanical and tribotechnical properties of nanocomposites based ultra-high molecular weight polyethylene modified by natural silicates. Ph. D. thesis]. Kazan, 2017. 19 p.

## References

1. Bryk M. T. *Destruxiya napolnennykh polimerov* [Degradation of filled polymers]. Moscow: Khimiya Publ., 1989. 192 p.
2. Danilova S. N., Okhlopko A. A., Gavrilieva A. A., Okhlopko T. A., Borisova R. V., Dyakonov A. A. Iznosostojkie polimernye kompozitsionnye materialy s uluchshennym mezhfazovym vzaimodejstviem v sisteme "Polimer-volokno" [Wear resistant polymer composite materials with improved interfacial interaction in the system "Polymer-fiber"]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova* [Newsletter of the North-Eastern federal M. K. Ammosov university], 2016, vol. 55, no. 5, pp. 80–92.
3. Demidyonok K. V., Bahov F. N., Cherkina U. Yu., Solomkin I. A., Novikov A. I., Zlobin V. B., Aleshinskaya S. V., Hilazhdinov V. V. Perspektivy ispol'zovaniya organomodificirovannogo montmorillonita v materialah dlya dorozhnoj razmetki [Prospects of use of modified montmorillonite in the materials for pavement marking]. *Vestnik evrazijskoj nauki*, 2013, no. 5 (18), Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/90tvn513.pdf> (accessed 14 March 2018).
4. Ray S. S., Okamoto M. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress in polymer science*, 2003, vol. 28, no. 11, pp. 1539–1641.
5. Ahmadeev R. G., Danyushevskij V. S. *Himiya promyvochnykh i tamponaznykh zhidkostej* [Chemistry of washing and plugging fluids]. Moscow: Nedra Publ., 1981. 152 p.
6. Ovcharenko F. D. *Gidrofil'nost' glin i glinistykh mineralov* [The hydrophilicity of clays and clay minerals]. Kiev: AN USSR Publ., 1961. 292p.
7. Demidyonok K. V., Bahov F. N., Cherkina U. Yu., Aleshinskaya S. V. Smesevye kompozicii na osnove poliehtilenvogo voska i organomodificirovannogo montmorillonite [Mixing of organomodified montmorillonite with polyethylene wax]. *Vestnik evrazijskoj nauki*, 2013, no. 5 (18), Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/92tvn513.pdf>. (accessed 10 March 2018).
8. Tretyakova V. D., Bahov F. N., Demidyonok K. V. Povyshenie harakteristik kompozitsionnykh materialov na osnove poliamida posredstvom modifikacii nanochastich amimontmorillonita [Improvement of properties of composite materials through its modification by nanoparticles of amimontmorillonite]. *Vestnik evrazijskoj nauki*, 2011, no. 4 (9), Available at: <https://naukovedenie.ru/sbornik9/9-2.pdf>. (accessed 20 February 2018).
9. Bahov F. N. Poluchenie organomodificirovannogo montmorillonita s povyshennoj termicheskoj stabil'nost'yu [Production of organomodified montmorillonite with high thermal stability]. *Vestnik evrazijskoj nauki*, 2013, no. 3 (16), Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/29tvn313.pdf>. (accessed 12 March 2018).
10. Worrall W. *Gliny i keramicheskoe syr'e* [Clays and ceramic raw materials]. Moscow: Mir Publ., 1978. 237p.
11. Lebedev M. S., Zhernovskij I. V., Fomina E. V., Potapova I. Yu. Aspekty primeneniya infrakrasnoj spektroskopii alyumosilikatnyh syr'evyh komponentov v stroitel'nom materialovedenii [Aspects of application of infrared spectroscopy for aluminosilicate raw components in building materials study]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: sbornik statej po materialam XXIV Mezhdunarodnoj zaochnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Engineering sciences – from theory to practice: Proceedings of XXIV International correspondence research and practice conference]. Novosibirsk, 2013, pp. 94–105.
12. Vasil'ev A. V., Grinenko E. V., Shchukin A. O., Fedulina T. G. *Infakrasnaya spektroskopiya organicheskikh i prirodnykh soedineniy* [Infrared spectroscopy of organic and natural compounds]. Saint Petersburg: GLTA Publ., 2007, 30p.
13. Kazicyna L. A., Kupletskaya N. B. *Primenenie UF-, IK- i YaMR-spektroskopii v organicheskoy khimii* [Application of UV, IR and NMR Spectroscopy in Organic Chemistry]. Moscow: Vysshaja shkola Publ., 1971. 264 p.
14. Vиноградов А. В., Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Слепцова М. И. Дисперсно-наполненные полимеры: конспект лекций [Dispersed-filled composite materials: abstract of lectures], Yakutsk, 2008. 194 p.
15. Okhlopko A. A., Struchkova T. S., Alekseev A. A., Vasilyev A. P. Razrabotka i issledovanie polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove aktivacii politetraforehtilena i uglerodnykh napolnitelei [Development and research of polymeric composite materials based on activated polytetrafluoroethylene and carbon filler]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova* [Vestnik of the North-Eastern federal M. K. Ammosov university], 2015, vol. 48, no. 4, pp. 51–63.
16. Gogoleva O. V., Petrova P. N. Issledovanie vliyaniya tekhnologij sovmeshcheniya komponentov na svoystva kompozitov na osnove SVMPEH [Research of influence of different technologies of obtaining on the properties of composites based on UHMWPE]. *Voprosy materialovedeniya*, 2017, vol. 91, no. 3, pp. 121–126.
17. Azarov V. I., Burov A. V., Obolenskaya A. V. *Himiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Chemistry of wood and synthetic polymers]. Saint Petersburg: SPbLTA Publ., 1999. 628 p.
18. Sutyagin V. M., Bondaletova L. I. *Khimiya i fizika polimerov: uchebnoe posobiye* [Chemistry and physics of polymers. Textbook]. Tomsk: TPU Publ., 2003. 208 p.
19. Struchkova T. S., Vasil'ev A. P., Dzhin H. Ch. Vliyanie oksida alyuminiya na svoystva politetraforehtilena [Influence of aluminum oxide on the properties of polytetrafluoroethylene]. *Arktika XXI vek. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 1 (2), pp. 3–10.
20. Okhlopko A. A., Vasil'ev S. V., Petrova P. N., Fedorov A. L., Tuisov A. G. Bazal'tofloroplastovye kompozity antifrikcionnogo naznacheniya [Basalt-Fluoroplastic composites of antifrictional assignment]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova* [Vestnik of the North-Eastern federal M. K. Ammosov university], 2013, vol. 10, no. 5, pp. 30–36.
21. Nikiforov L. A. Strukturа i mekhanicheskie i tribotekhnicheskie svoystva na nokompozitov na osnove modifitsirovannogo prirodnyimi silikatami sverhvyssokomolekulyarnogo poliehtilena. Avtorefer. dis. kand. tekhn. Nauk [Structure and mechanical and tribotechnical properties of nanocomposites based ultra-high molecular weight polyethylene modified by natural silicates. Ph. D. thesis]. Kazan, 2017. 19 p.

Поступила в редакцию 18.05.2018