

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОКОМПОЗИТОВ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**К.А. Куликовская, В.Н. Водяков, А.А. Шабарин**

Ксения Анатольевна Куликовская *, Владимир Николаевич Водяков

Кафедра механизации переработки с/х продукции, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, ул. Российская, 7, р. п. Ялга, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация, 430904

E-mail: anata.kulikovckaya@gmail.com, vnvod@mail.ru

Александр Александрович Шабарин

Кафедра неорганической и аналитической химии, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, ул. Большевистская, 68, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация, 430005

E-mail: shab_aa@mail.ru

В работе представлены результаты сравнительного изучения физико-механических и реологических характеристик нанокompозитов сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки ГУР 4120 («Тисона») с нанокристаллическим диоксидом кремния дисперсностью 20 нм (0,05% – 0,2%), нановолокнами оксида алюминия марки «Nafen» дисперсностью 10...20 нм (0,1%) и углеродными нанотрубками «Tuballmatrixbeta» (0,1 %). Установлено, что введение диоксида кремния в оптимальной концентрации 0,1...0,15 % способствует повышению предела прочности на 44 %, конечного модуля упругости на 46 %. На предел вынужденной эластичности и начальный модуль упругости большее влияние оказывают углеродные нанотрубки (рост 23 %). Однако результаты в этом случае характеризуются значительным разбросом значений. Нановолокна марки «Nafen» обеспечивают рост предела прочности на 22 %, конечного модуля упругости на 28,6 %. Зависимость комплексной вязкости композитов при температуре 180 °С от угловой скорости описывается степенным соотношением Оствальда-де Вилля. Введение наноразмерных модификаторов приводит к росту коэффициента консистенции сверхвысокомолекулярного полиэтилена в 3,9...6,6 раза при росте индекса течения всего лишь в 1,02...1,28 раза. Показано, что использование в оптимальных (0,1...0,15 %) концентрациях нанокристаллического диоксида кремния, нановолокон оксида алюминия марки «Nafen» и углеродных нанотрубок, совмещенных со сверхвысокомолекулярным полиэтиленом механохимической активацией на планетарношаровой мельнице, позволяет значимо улучшить физико-механические характеристики последнего. При этом более эффективным модификатором является нанокристаллический диоксид кремния. Значительное влияние сверхмалых концентраций наноразмерных модификаторов связано, видимо, с формированием в объеме композита пространственной сетки физических связей, сохраняющейся даже при температуре 180 °С, о чем свидетельствуют результаты реологических испытаний.

Ключевые слова: нанокompозит, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, наноразмерные модификаторы, механохимическая активация, физико-механические характеристики, реологические характеристики

Для цитирования:

Куликовская К.А., Водяков В.Н., Шабарин А.А. Исследование физико-механических и реологических характеристик нанокompозитов сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 11. С. 112–116

For citation:

Kulikovskaya K.A., Vodyakov V.N., Shabarin A.A. Investigation of physico-mechanical and rheological characteristics of nanocomposites of ultrahigh-molecular polyethylene. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 11. P. 112–116

INVESTIGATION OF PHYSICO-MECHANICAL AND RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF NANOCOMPOSITES OF ULTRAHIGH-MOLECULAR POLYETHYLENE

K.A. Kulikovskaya, V.N. Vodyakov, A.A. Shabarin

Ksenia A. Kulikovskaya*, Vladimir N. Vodyakov

Department of Mechanization of Agricultural Products Processing, National Research Ogarev Mordovia State University, Russiyskaya st., 7, Yalga p., Saransk, Republic of Mordovia, 430904, Russia
E-mail: anata.kulikovckaya@gmail.com*, vnvod@mail.ru

Alexander A. Shabarin

Department of Inorganic and Analytical Chemistry, National Research Ogarev Mordovia State University, Bolshevistskaya st., 68, Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russian
E-mail: shab_aa@mail.ru

The paper presents the results of a comparative study of the physicommechanical and rheological characteristics of nanocomposites of ultrahigh-molecular-weight polyethylene, grade GUR 4120 (Ticona) with nanocrystalline silica with a dispersity of 20 nm (0.05% - 0.2%), nano scale aluminum oxide of the mark "Nafen" 10 ... 20 nm (0.1%) and carbon nanotubes Tuballmatrixbeta (0.1%). It was established that the introduction of silicon dioxide in the optimal concentration of 0.1 ... 0.15% contributes to an increase in the tensile strength by 44%, and the final modulus of elasticity by 46%. The limit of forced elasticity and the initial modulus of elasticity are more influenced by carbon nanotubes (an increase of 23%). However, the results in this case are characterized by a significant scatter of values. Nanofibres of the Nafen brand provide growth of strength by 22%, final elastic modulus by 28.6%. The dependence of the complex viscosity of composites at a temperature of 180 °C on the angular velocity is described by the Ostwald de Ville power equation. The introduction of nanoscale modifiers leads to an increase in the consistency coefficient of ultrahigh molecular weight polyethylene by 3.9 ... 6.6 times, with the flow index increasing only by 1.02 ... 1.28 times. It is shown that the use of optimal (0.1 ... 0.15%) concentrations of nanocrystalline silicon dioxide, aluminum oxide nanofibers and carbon nanotubes combined with ultrahigh-molecular polyethylene by mechanochemical activation in a planetary ball mill, significantly improves physical and mechanical characteristics of the latter. In this case, a more effective modifier is nanocrystalline silicon dioxide. The significant effect of ultra-low concentrations of nanoscale modifiers is apparently due to the formation of a spatial network of physical bonds in the composite volume, which persists even at a temperature of 180 °C, as evidenced by the results of rheological tests.

Key words: nanocomposite, ultrahigh molecular weight polyethylene, nanoscale modifiers, mechanochemical activation, physicommechanical characteristics, rheological characteristics

ВВЕДЕНИЕ

Современные полимерные материалы конструкционного назначения являются многокомпонентными системами, в которых наряду с полимерной матрицей присутствуют различные добавки функционального назначения [1, 2], изменяющие эксплуатационные характеристики полимера [3-5].

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) из-за уникального сочетания прочности, низкого коэффициента трения, стойкости к агрессивным средам и износостойкости представляет интерес как один из наиболее перспективных антифрикционных термопластов. Однако он обладает рядом недостатков, таких как хладотекучесть и относительно невысокие значения модуля упругости и твердости, что ограничивает его применение в

высоконагруженных конструкциях. Одним из путей повышения механических характеристик СВМПЭ является его дисперсное упрочнение [6-10].

Перспективным направлением в разработке высокопрочных полимерных композитов является использование углеродных нанотрубок и других наноразмерных модификаторов [11-14] при сверхмалых концентрациях. Вероятным механизмом их модифицирующего действия является при отсутствии взаимодействия между частицами [15] формирование в объеме композита пространственной сетки физических связей адсорбционного типа с образованием в периферии наночастицы граничного слоя с повышенной степенью упорядоченности в результате действия ее силового поля [16].

Целью работы являлось выявление наномодификатора, обеспечивающего наиболее значимое изменение физико-механических и реологических характеристик СВМПЭ марки ГУР 4120 (фирма «Ticona») молекулярной массой 5 млн и размером частиц 20-60 мкм. Исследованы композиции СВМПЭ с гидрофобным нанокристаллическим диоксидом кремния (SiO₂) дисперсностью 20 нм (0,05%-0,2%), нановолокнами оксида алюминия (Al₂O₃) марки «Nafen» дисперсностью 10...20 нм (0,1%) и активированными углеродными нанотрубками (УНТ) «Tuballmatrixbeta» в такой же концентрации. При выборе концентраций исходили из результатов работ [17, 18].

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сухосмешанные порошки СВМПЭ и модификатора подвергали механохимической активации на планетарно-шаровой мельнице «Пулверизетте-7». Режим работы, заданный программой: «обработка порошка с реверсированием вращения карусели и стаканов, частота вращения 1000 об/мин, время цикла 15 мин, время покоя – 15 мин, количество циклов – 6». Были изучены следующие составы: 1 – механоактивированный СВМПЭ; 2 – СВМПЭ + 0,1% УНТ; 3 – СВМПЭ + 0,1% Al₂O₃; 4 – СВМПЭ + 0,05% SiO₂; 5 – СВМПЭ + 0,1% SiO₂; 6 – СВМПЭ + 0,15% SiO₂; 7 – СВМПЭ + 0,2% SiO₂.

Для исследований изготавливали пластины размером 200×200×1,1 мм термопрессованием активированных порошков на гидравлическом прессе GT-7014-H50C при температуре 180 °С, усилие 100 кН, времени прессования 15 мин и охлаждения 30 мин. Из них для физико-механических испытаний (ГОСТ 11262-2017) вырубали штанцем по 5 образцов (тип 1) каждого состава, для реологических испытаний вырубали диски диаметром 20 мм. До начала испытаний образцы кондиционировались по ГОСТ 12423-2013.

Физико-механические испытания проведены на разрывной машине UAI-7000 M при температуре 23 ± 2 °С и скорости растяжения 10 мм/мин.

В связи с тем, что растяжение образцов после достижения предела вынужденной эластичности сопровождалось развитием больших деформаций с ориентацией полимерных цепей и упрочнением полимера, текущие значения напряжений (МПа) вычисляли как истинные по формуле:

$$\sigma = lF/(l_0A_0), \quad (1)$$

где l и $l_0 = 25$ – значения текущей и рабочей длин образца, мм; A_0 – начальная площадь сечения, мм², F – текущее значение усилия растяжения, Н.

Деформацию растяжения вычисляли в мере Генки по формуле:

$$\varepsilon_H = \ln(l/l_0) \quad (3)$$

Значения начального E_H и конечного E_K модулей упругости (МПа) определяли, как тангенсы угла наклона касательных соответственно к

начальному и конечному прямолинейным участкам кривых $\sigma = f(\varepsilon_H)$. Значение предела вынужденной эластичности принимали равным условному пределу текучести и определяли по ГОСТ 11262-2017.

Реологические исследования проведены на реометре HAAKE MARS III в динамическом режиме при амплитуде осцилляций рифленого ротора 0,001 рад, угловых скоростях 0...800 с⁻¹ и температурах – 150...180 °С. Согласно [19] указанные испытания эквивалентны испытаниям с вращающимся ротором, если угловая скорость осциллирующего ротора соответствует скорости сдвига расплава, достигаемой при его вращении. При обработке результатов использован принцип температурно-временной суперпозиции, что позволило расширить диапазон угловых скоростей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены типичный вид кривых растяжения. Полученные значения физико-механических характеристик исследованных нанокомпозитов представлены в таблице.

Из результатов следует, что минимальная деформация по Генки при разрыве образцов состава: 1,64±0,01 (413±1%) – состав 1, максимальная – 1,76±0,01 (480 %±1%) – состав 5. Наибольшее влияние на предел прочности σ_p и конечный модуль упругости E_K оказывает нанокристаллический диоксид кремния. Ввод данного модификатора в оптимальной концентрации (0,1...0,15%) способствует повышению предела прочности на 44%, конечного модуля упругости на 46%. Достигнутые значения упруго-прочностных показателей определяют возможные эксплуатационные характеристики изделий, полученных твердофазным формованием нанокомпозитов СВМПЭ.

На предел вынужденной эластичности $\sigma_{вз}$ и начальный модуль упругости E_H наибольшее влияние оказывают УНТ (рост 23%). Однако результаты при этом характеризуются наибольшим разбросом значений, поскольку углеродные нанотрубки имеют заметную склонность к агломерации [18, 20].

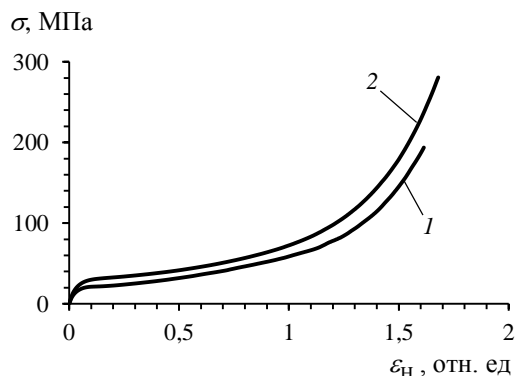


Рис. 1. Типичный вид кривых растяжения образцов; цифры у кривых – номера составов
Fig. 1. Typical view of stretch curves of samples; the numbers for the curves are the numbers of the compositions

Физико-механические характеристики нанокompозитов СВМПЭ
 Table. Physical - mechanical characteristics of nanocomposites UHMWPE

Составы	$\sigma_{вз}$, МПа	σ_p , МПа	$E_{и}$, МПа	$E_{к}$, МПа	ϵ_H , отн. ед
1	15,7±1,3	214±9	360±2	511±22	1,64±0,01
2	19,3±2,9	274±43	441±70	657±111	1,71±0,03
3	16,7±1,0	261±13	366±37	657±46	1,71±0,01
4	16,0±1,5	278±15	365±39	674±33	1,7±0,02
5	16,6±1,1	308±2,5	345±19	704±45	1,76±0,01
6	15,0±0,4	296±18	358±37	747±58	1,73±0,03
7	15,7±0,4	237±12	363±29	601±24	1,66±0,02

Из реологических исследований следует, что частотные зависимости комплексной вязкости композитов (рис. 2) с коэффициентом корреляции не ниже 0,99 описываются в диапазоне 5 порядков степенной зависимостью Оствальда–де Вале [18]. Введение наноразмерных модификаторов в сверхмалых концентрациях (0,1%) приводит к росту коэффициента консистенции СВМПЭ в 3,9...6,6 раза при росте индекса течения всего лишь в 1,02...1,28 раза, поскольку данный параметр зависит от средней молекулярной массы и разветвленности полимера, содержания наполнителей и температуры [19].

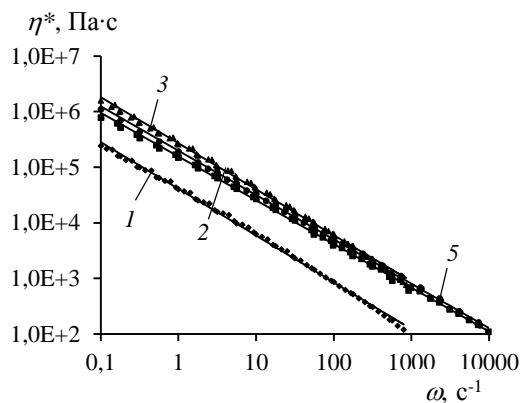


Рис. 2. Зависимость комплексной вязкости композитов при температуре приведения 180 °С от угловой скорости ротора; цифры у кривых – номера составов

Fig. 2. The dependence of the complex viscosity of composites at a reduction temperature of 180 °C on the angular velocity of the rotor; the numbers for the curves are the numbers of the compositions

Для четырех составов СВМПЭ + SiO₂ установлено, что максимальные значения вязкости достигаются при содержании модификатора 0,1%, что подтверждает вывод об оптимальности данной концентрации.

Наибольший рост вязкости имеет место при модификации СВМПЭ нановолокнами Al₂O₃ (состав 3), что связано, видимо, со значительным отношением их длины к диаметру. При этом влияние данного модификатора на упруго-прочностные характеристики не является существенным (таблица).

ВЫВОДЫ

Использование в оптимальных (0,1...0,15%) концентрациях нанокристаллического диоксида кремния, нановолокон оксида алюминия марки «Nafen» и углеродных нанотрубок, совмещенных с СВМПЭ механохимической активацией на планетарно-шаровой мельнице, позволяет значимо улучшить упруго-прочностные характеристики последнего.

Более эффективным модификатором является нанокристаллический диоксид кремния, что может быть объяснено лучшим диспергированием его в полимерной матрице из-за меньшей склонности наночастиц к агломерации.

Значительное влияние сверхмалых концентраций наноразмерных модификаторов на упруго-прочностные и реологических характеристики СВМПЭ связано с формированием в объеме композита пространственной сетки физических связей, которая сохраняет устойчивость, как это следует из реологических исследований, даже при температуре 180 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кахраманов Н.Т., Азизов А.Г., Осипчик В.С. Наноструктурированные композиты и полимерное материаловедение. *Пласт. массы*. 2016. № 1-2. С. 49-59.
2. Maksimkin A.V. Bulk oriented nanocomposites of ultrahigh molecular weight polyethylene reinforced with fluorinated multi-walled carbon nanotubes with nanofibrillar structure. *Compos. Pt. B: Eng.* 2016. V. 94. P. 292–298. DOI:10.1016/gh.2016.03.061.
3. Гоголева О.В., Петрова П.Н., Майер А.Ф. Изучение влияния терморасширенного графита на свойства и структуру

REFERENCES

1. Kahramanov N.T., Azizov A.G., Osipchik V.S. Nanostructured composites and polymer materials. *Plastich. Massy*. 2016. N 1-2. P. 49-59 (in Russian).
2. Maksimkin A.V. Bulk oriented nanocomposites of ultrahigh molecular weight polyethylene reinforced with fluorinated multi-walled carbon nanotubes with nanofibrillar structure. *Compos. Pt. B: Eng.* 2016. V. 94. P. 292–298. DOI:10.1016/gh.2016.03.061.
3. Gogoleva O.V., Petrova P.N., Mayer A.F. Study of the effect of thermally expanded graphite on the properties and structure of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Vestn. VSGUTU*. 2015. N 2. P. 23 - 29 (in Russian).

- сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Вестн. ВГУТУ*. 2015. № 2. С. 23–29.
- Zoo Y. S., An J.-W., Lim D.-Ph., Lim D.-S. Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE. *Tribol. Lett.* 2004 (16). N 4. P. 305-309.
 - Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Попков О.В. Перспективные технологии получения функциональных материалов конструкционного назначения на основе нанокompозитов с УНТ. *Труды ВИАМ*. 2016. № 3 (39). С. 54-64.
 - Медведева Е.В., Чердынцев В.В. Структура содержащих неравноосные неорганические включения полимерных композиционных материалов. *Совр. пробл. науки и образования*. 2013. № 5. 11 с.
 - Базаркина В.В., Огнев А.Ю., Кривеженко Д.С. Оценка влияния углеродных нанотрубок на три-ботехнические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Матер. XVII Междунар. науч.-практ. конф. «Современные техника и технологии». 2011. С. 97-98.
 - Харитонов А.П., Симбирцева Г.В., Ткачев А.Г. Упрочнение эпоксидных композитов и сверхвысокомолекулярного полиэтилена фторированными углеродными нанотрубками, мало-слойным и многослойным графеном. Сб. тезисов докладов 10-й Междунар. конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». Москва. 2016. С. 478-479.
 - Pardo S.G. Toughening Strategies of Carbon Nanotube/Polycarbonate Composites with Electromagnetic Interference Shielding Properties. *Polym. Comp.* 2013. V. 34. N 11. P. 1938–1949.
 - Ajaya P.M., Zhou O.Z. Applications of Carbon Nanotubes. *Topics Appl. Phys.* 2001. V. 80. P. 391–425.
 - Голубев И.Г., Быков В.В. Перспективы применения полимерных нанокompозитов. *Техника и оборудование для села*. 2012. № 5. С. 9–12.
 - Кропотин О.В., Машков Ю.К., Егорова В.А. Влияние углеродных модификаторов на структуру и износостойкость полимерных нанокompозитов на основе политетрафторэтилена. *Журн. технич. физики*. 2014. Т. 84. Вып. 5. С. 66-70.
 - Зорин И.М., Земцова Е.Г., Макаров И.А. Получение композиционного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и модифицированного нанодисперсного аэросила. *Пластич. массы*. 2015. № 9. С. 40-42.
 - Гордеев Ю.И., Абкорян А.К., Ковалевская О.В. Перспективные композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, матрично-наполненные сверхтонкими порошками оксида алюминия. *Технол. проц. и материалы*. 2010. Т. 1. № 14. С. 299-300.
 - Микитаев А.К., Козлов Г.В. Структурная модель усиления нанокompозитов полиметилметакрилат /углеродные нанотрубки при ультрамалых содержаниях. *Журн. технич. физики*. 2016. № 10. С. 99-103.
 - Авдейчик С.В. Введение в физику нанокompозиционных машиностроительных материалов. Гродно: ГГАУ. 2009. 439 с.
 - Охлопкова А.А., Охлопкова Т.А., Борисова Р.В. Управление процессами структурообразования в полимерных композиционных материалах на основе СВМПЭ. *Наука и образование*. 2015. № 2. С. 73-78.
 - Рябов С.А., Захарычев Е.А., Семчиков Ю.Д. Исследование влияния времени функционализации углеродных нанотрубок на физико-механические свойства полимерных композитов на их основе. *Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского*. 2013. № 2 (1). С. 71–74.
 - Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС. 2003. 312 с.
 - Pegel S., Potschke P., Petzold G. Dispersion, agglomeration, and network formation of multi walled carbon nanotubes in polycarbonate melts. *Polymer*. 2008. V. 49. P. 974–984.
 - Zoo Y. S., An J.-W., Lim D.-Ph., Lim D.-S. Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE. *Tribol. Lett.* 2004 (16). N 4. P. 305-309.
 - Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Popkov O.V. Promising technologies for obtaining functional materials of structural designation based on nanocomposites with CNT. *Trudy VIAM*. 2016. N 3 (39). P. 54-64 (in Russian).
 - Medvedeva E.V., Cherdynstev V.V. Structure containing unequal-axis inorganic inclusions of polymer composites. *Sovr. Probl. Nauki Obraz.* 2013. N 5. 11 p. (in Russian).
 - Bazarkina V.V., Ognev A.Yu., Krivezhenko D.S. Evaluation of the effect of carbon nanotubes on the tribotechnical properties of ultrahigh molecular weight polyethylene. Proc.MXVII Intern. scientific-practical conf. "Modern technology and technology." 2011. P. 97-98 (in Russian).
 - Kharitonov A.P., Simbirtseva G.V., Tkachev A.G. Hardening of epoxy composites and ultrahigh-molecular polyethylene by fluorinated carbon nanotubes, multilayer and multilayer graphene. Coll. Abstracts of the 10th International. conf. "Carbon: fundamental problems of science, materials science, technology." Moscow. 2016. P. 478-479 (in Russian).
 - Pardo S.G. Toughening Strategies of Carbon Nanotube/Polycarbonate Composites with Electromagnetic Interference Shielding Properties. *Polym. Comp.* 2013. V. 34. N 11. P. 1938–1949.
 - Ajaya P.M., Zhou O.Z. Applications of Carbon Nanotubes. *Topics Appl. Phys.* 2001. V. 80. P. 391–425.
 - Golubev I. G., Bykov V.V. Prospects for the use of polymer nanocomposites. *Tekhnika Oborud.Sela*. 2012. N 5. P. 9–12 (in Russian).
 - Kropotin OV, Mashkov Yu.K., Egorova V.A. Effects of carbon modifiers on the structure and durability of polymer nanocomposites based on polytetrafluoroethylene. *Zhurn. Tekhnich. Fiz.* 2014. V. 84. N 5. P. 66-70 (in Russian).
 - Zorin I.M., Zemtsova E.G., Makarov I.A. Obtaining a composite material based on ultrahigh molecular weight polyethylene and modified nanodispersed aerosil. *Plastich. Massy*. 2015. N 9. P. 40-42 (in Russian).
 - Gordeev Yu.I., Abkoryan A.K, Kovalevskaya O.V. Perspective composite materials based on ultrahigh molecular weight polyethylene, matrix-filled with ultrafine alumina powders. *Tekhnol. Prots. Mater.* 2010. V. 1. N 14. P. 299-300 (in Russian).
 - Mikitaev A.K., Kozlov G.V. Structural model of amplification of polymethyl methacrylate / carbon nanotube nanocomposites with ultra-low contents. *Zhurn. Tekhnich. Fiz.* 2016. N 10. P. 99-103 (in Russian).
 - Avdeyichik S.V. Introduction to the physics of nanocomposite engineering materials. Grodno: GGAU. 2009. 439 p. (in Russian).
 - Okhlopkova A.A., Okhlopkova T.A., Borisova R.V. Management of structure formation processes in polymer composite materials based on UHMWPE. *Nauka Obraz.* 2015. N 2. P. 73-78 (in Russian).
 - Ryabov S.A., Zakharychev E.A., Semchikov Yu.D. Investigation of the effect of the time of functionalization of carbon nanotubes on the physicomechanical properties of polymer composites based on them. *Vestn. Nizhegorod. Un-ta im. N.I. Lobachevsky*. 2013. N 2 (1). P. 71–74 (in Russian).
 - Schramm G. Fundamentals of practical rheology and rheometry. M.: Koloss. 2003. 312 p. (in Russian).
 - Pegel S., Potschke P., Petzold G. Dispersion, agglomeration, and network formation of multi walled carbon nanotubes in polycarbonate melts. *Polymer*. 2008. V. 49. P. 974–984.

Поступила в редакцию (Received) 05.02.2019

Принята к опубликованию (Accepted) 30.09.2019