

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИАЦИОННО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ ТЕЛОМЕРОВ ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Д.П. Кирюхин, Г.А. Кичигина, П.П. Куш

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, пр. Академика Семенова, 1, Черноголовка, Россия, 142432
E-mail: kir@icp.ac.ru, kga@icp.ac.ru, kpp@icp.ac.ru

В результате радиационно-инициированной теломеризации тетрафторэтилена (ТФЭ) в ряде растворителей получены коллоидные растворы теломеров $R_1(C_2F_4)_nR_2$ с различными концевыми функциональными группами R_1 и R_2 . Значение n и концевые группы R_1 , R_2 определяют свойства полученных теломеров (растворимость, адгезию, антифрикционные, гидрофобные и др.). Рассмотрены некоторые перспективные направления использования теломеров ТФЭ: 1) получение функциональных гибридных полимерных композиционных материалов для авиационной и ракетной техники на основе эпоксидных связующих и функционализированных нанотрубок, модифицированных теломерами ТФЭ; 2) гидрофобизация высокопористых материалов на основе кварцевых волокон (ТКВ и ТЗМК-10) и покрытий на основе фторлаков; 3) модифицирование эпоксидного углепластика 4) формирование защитных композиционных покрытий на металлах и сплавах с использованием плазменного электролитического окисления (ПЭО); 5) модификация свойств природных целлюлозосодержащих композиционных материалов; 6) синтез новых теломеров ТФЭ с перфторированными концевыми функциональными звеньями.

Ключевые слова: композиционные материалы, тетрафторэтилен, теломеры, радиационно-химический синтез

COMPOSITE MATERIALS USING RADIATION-SYNTHESIZED TETRAFLUOROETHYLENE TELOMERES

D.P. Kiryukhin, G.A. Kichigina, P.P. Kushch

Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the RAS, ave. Akademika Semenova, 1, Chernogolovka, Russia, 142432
E-mail: kir@icp.ac.ru, kga@icp.ac.ru, kpp@icp.ac.ru

As a result of radiation-initiated telomerization of tetrafluoroethylene (TFE) in a number of solvents, colloidal solutions of $R_1(C_2F_4)_nR_2$ telomeres with different terminal functional groups R_1 and R_2 were obtained. The value of n and various end groups R_1 , R_2 determine the properties of the obtained telomeres (solubility, adhesion, antifriction, hydrophobic, etc.). Some promising areas of use of TFE telomeres are considered: 1) production of functional hybrid polymer composite materials for aviation and rocket technology based on epoxy binders and functionalized nanotubes modified with TFE telomeres; 2) hydrophobization of highly porous materials based on quartz fibers (TQF and TZMK-10) and coatings based on fluorolacids; 3) modification of epoxy carbon fiber 4) formation of protective composite coatings on metals and alloys using plasma electrolytic oxidation (PEO); 5) modification of the properties of natural cellulose-containing composite materials; 6) synthesis of new TFE telomeres with perfluorinated end functional links.

Key words: composite materials, tetrafluoroethylene, telomeres, radiation-chemical synthesis

Для цитирования:

Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куш П.П. Композиционные материалы с использованием радиационно-синтезированных теломеров тетрафторэтилена. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 4. С. 12–18. DOI: 10.6060/RCJ.2023674.3.

For citation:

Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P. Composite materials using radiation-synthesized tetrafluoroethylene telomers. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 4. P. 12–18. DOI: 10.6060/RCl.2023674.3.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, тефлон, фторопласт-4) обладает комплексом ценных свойств, но нерастворим практически во всех известных растворителях, что существенно ограничивает возможности его применения. Нерастворимость ПТФЭ связана с его высокой молекулярной массой и спецификой строения полимерной молекулы. В результате исследований, проведенных в Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии РАН (ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г.Черноголовка), с использованием радиационно-химического способа иницирования реакции получены растворимые в обычных растворителях теломеры ТФЭ. Теломеры ТФЭ – это короткие полимерные цепочки с n звеньями мономера, по концам которых находятся звенья телогена (растворителя) – передатчика цепи $R_1-(C_2F_4)_n-R_2$. Значение n зависит от исходной концентрации ТФЭ в растворе, химического состава растворителя и условий проведения реакции, а использование различных растворителей позволяет

получать разные функциональные концевые группы R_1, R_2 , которые в значительной мере определяют свойства полученных теломеров (растворимость, адгезию, антифрикционные, гидрофобные и др. свойства) [1].

В табл. 1 приведены теломеры ТФЭ с различными концевыми звеньями и длиной тетрафторэтиленового блока, полученные в ряде растворителей. Коллоидные растворы теломеров ТФЭ находят применение для создания защитных гидрофобных, антифрикционных, термостойких покрытий на различные изделия, получения фторопластовых смазок для уменьшения трения, для создания различных функциональных нанокompозитов. Необходимо особо отметить, что жидкофазное состояние продукта не вызывает трудностей в создании покрытий и допускает использование традиционных способов их нанесения (кистью, окунанием, пульверизатором).

Таблица 1

Радиационно-синтезированные теломеры ТФЭ

Растворитель-телоген	Формула теломера	n
ацетон, C_3H_6O	$CH_3(CO)CH_2(C_2F_4)_nH$	3-30
хлористый бутил, C_4H_9Cl	$C_4H_8Cl(C_2F_4)_nH$	7-18
хлороформ, $CHCl_3$	$Cl(C_2F_4)_nCHCl_2$	40-47
хлористый метилен CH_2Cl_2	$H(C_2F_4)_nCHCl_2$	18-28
четырёххлористый углерод, CCl_4	$Cl(C_2F_4)_n CCl_3$	35-44
фреон-114В2, $C_2Br_2F_4$	$C_2BrF_4 (C_2F_4)_nBr$	20-370
фреон 113, $C_2F_3Cl_3$	$Cl(C_2F_4)_n C_2F_3Cl_2$	80-150
фреон113+ C_2H_5OH	$C_2F_3Cl_2(C_2F_4)_n C_2H_4OH$	10-20
фреон113+ NH_3	$Cl(C_2F_4)_nNH_2$ $C_2F_3Cl_2(C_2F_4)_nNH_2$	10-15 20-45
1,1,1,3,3,3-гексафтор-2-пропанол, $C_3H_2OF_6$, (ГФИП)	$(CF_3)_2COH(C_2F_4)_n H$	> 30
2,2,2-трифторэтанол, $C_2H_2F_3OH$	$CF_3CHON(C_2F_4)_n H$	150
этанол, C_2H_5OH	$C_2H_4OH(C_2F_4)_n H$	2-5
2,2,2-трифторэтанол+ этанол		20-40
пентафторхлорбензол (ПФХБ), C_6F_5Cl	$Cl(C_2F_4)_n C_6F_5$	7-160
гексафторбензол C_6F_6 ,	$F(C_2F_4)_n C_6F_5$	> 30
фторбензол, C_6H_5F	$F(C_2F_4)_n C_6H_5$	> 15
перфторксилол $C_6F_4(CF_3)_2$	$F(C_2F_4)_n CF_2CF_3C_6F_4$	> 30
диметилдихлорсилан (ДМДХС), C_2H_6ClSi	$Cl(C_2F_4)_n(CH_3)_2Si$	35-70
триметилхлорсилан (ТМХС), C_3H_9ClSi	$Cl(C_2F_4)_n(CH_3)_3Si$	20-30
карбогал, C_8F_{16}	$F_3C(C_2F_4)_nC_7F_{13}$	20-50
хладон 350, C_7F_{14}	$F_3C(C_2F_4)_nC_7F_{11}$	

n – среднее число звеньев ТФЭ

В данном обзоре кратко рассмотрены исследования по некоторым из перспективных направлений использования теломеров ТФЭ, проведенные совместно с коллегами из других организаций.

Для производства авиационной и ракетной техники, помимо конструкционных, требуются полимерные композиционные материалы (ПКМ), в идеале сочетающие в себе набор необходимых функциональных свойств: гидрофобность, антиобледенение, защита от молниевых разрядов, антистатическая защита, экранирование электромагнитных волн. Разработка таких композиционных материалов активно проводится во ФГУП «ВИАМ» (г. Москва) по ряду направлений. В наших совместных работах проведены исследования по использованию различных радиационно-синтезированных теломеров ТФЭ для модифицирования этих материалов.

В ФГУП «ВИАМ» были получены гибридные полимерные композиционные материалы (ГПКМ) на основе стеклоткани и эпоксидного связующего с функционализированными нанотрубками. Такие материалы обеспечивают достаточную защиту от статического электричества, от молниевых разрядов, позволяют обеспечить требуемый уровень электропроводности ПКМ [2–4]. Но, кроме этого, актуален вопрос и о способах повышения гидрофобности полученных композитов.

В качестве гидрофобизатора ГПКМ в совместной работе были использованы радиационно-синтезированные теломеры тетрафторэтилена в ацетоне (торговая марка «Черфлон» (ЧФ) [1], таблица 1). Гибридные полимерные композиционные материалы были получены методом многослойного прессования препрегов [5]. Для одновременного введения гидрофобизатора (теломеров ТФЭ) и функционализированных нанотрубок в композит была разработана специальная технология, включающая обработку растворов теломеров и смеси реагентов ультразвуком и термообработку [5]. В результате проведенных исследований был получен композит с гидрофобными свойствами. Изучение электрофизических и гидрофобных свойств ГПКМ показало, что, рельеф поверхности представляет собой нерегулярную структуру с многомодальной шероховатостью. Величина краевого угла смачивания определяется степенью гидрофобности материала и геометрическими параметрами рельефа.

Помимо времени термообработки на краевые углы смачивания и поверхностное сопротивление, оказывает влияние и соотношение компонентов в связующем УНТ-ФГФ + ЧФ + эпоксидная

композиция (ЭК). Было установлено, что оптимальным для пропитки является следующий состав: УНТ-ФГФ (7 масс. ч) + ЧФ (7 масс. ч.) + ЭК (100 масс. ч.). Для образца ГПКМ, полученного при прессовании препрега, пропитанного композицией такого состава, были измерены краевые углы смачивания, коэффициенты отражения, пропускания и поглощения электромагнитного излучения и поверхностного сопротивления. Образец ГПКМ обладает рядом функциональных свойств. Величина удельного объемного сопротивления исследованного образца ГПКМ вдоль и поперек плоскости укладки армирующего наполнителя составляет 19 Ом·см и $6.7 \cdot 10^2$ Ом·см соответственно. Пластина ГПКМ толщиной 0.68 мм ослабляет ЭМИ в диапазоне 27–34 ГГц в 100 раз. При этом доля отраженного излучения составляет 75–80%. Поверхность ГПКМ обладает гидрофобными свойствами, характеризующимися высоким значением краевого угла смачивания 136° . Набор свойств созданного материала свидетельствует о перспективности его практического применения.

В ФГУП «ВИАМ» был разработан фторопластовый лак ФП-5182 с рекордно низкой проницаемостью для паров воды для защиты от влаги радио-прозрачных обтекателей антенн из стеклопластика. Для повышения углов смачивания водой были применены теломеры тетрафторэтилена, полученные в ацетоне и пентафторхлорбензоле (табл. 1). Растворы теломеров ТФЭ вводились в лак ФП-5182. В качестве подложки использовались пластины алюминиевого сплава [6]. Введение теломеров в состав лака ФП-5182 позволяет на 7% повысить гидрофобность получаемых покрытий (краевые углы смачивания выше 100°). Химический состав теломерного раствора (концевые группы теломера) не оказывает существенного влияния на гидрофобность покрытия. Выявлены оптимальные технологические условия модифицирования покрытия. Показано, что более предпочтительно покрытие с объемным наполнением теломера, поскольку повышается гидрофобность всего покрытия и не страшны механические повреждения поверхности покрытия. Помимо этого, было изучено влияние шероховатости поверхности, которая оказывает существенное влияние на качество гидрофобного покрытия. Максимальная гидрофобность покрытий была достигнута при совместном применении теломеров ТФЭ и регулировании шероховатости поверхности с использованием порошков аэросила.

Высокопористые теплозащитные материалы на основе кварцевых волокон (ТЗМК) и тонкое кварцевое волокно (ТКВ) имеют низкую удельную плотность и теплопроводность, могут длительно эксплуатироваться при температуре до 120 °С, в том числе, в экстремальных условиях. Недостатком этих материалов является гидрофильность, обусловленная химическим составом волокон и высокоразвитой пористой структурой. Присутствие воды в межволоконном пространстве материалов, в частности, марок ТКВ и ТЗМК-10 аннулирует их высокие тепло-, звукоизоляционные и эксплуатационные свойства, а при низких температурах приводит к их разрушению. Растворы теломеров ТФЭ, синтезированные в ряде растворителей (ацетон, хлористый бутил, пентафторхлорбензол, фреон 113+аммиак, фреон 113+этанол, триметилхлорсилан) (таблица 1) были использованы для гидрофобизации высокопористых материалов ТКВ и ТЗМК-10 [7]. В результате получены образцы гидрофобного ТЗМК-10 и ТКВ. Было показано, что от состава теломера, в частности от его концевых групп, существенно зависят краевые углы смачивания.

Наиболее перспективными для гидрофобизации ТЗМК-10 являются теломеры ТФЭ, синтезированные в ацетоне и смеси растворителей фреон 113+ аммиак. Водопоглощение образцов ТЗМК-10 уменьшается на 2 порядка (более чем в 100 раз), а краевые углы смачивания достигают значений 100 - 140° в зависимости от состава теломеров. Полученные гидрофобные материалы ТЗМК-10 и ТКВ, обладая высокой гидрофобностью, устойчивостью к агрессивным средам, термостабильностью могут найти применение в экстремальных климатических условиях Арктики [8].

Разработана технология модифицирования антифрикционных эпоксидных углепластиков методом нанесения растворов теломеров ТФЭ/ацетон на углеродную ткань [9, 10]. Для модифицирования были использованы углепластики, полученные из армирующей ткани и связующего по традиционной технологии. С использованием сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии доказано образование сплошной фторполимерной пленки толщиной от 10 до 1000 нм в зависимости от исходной концентрации теломера в растворе. Установлено, что модификация углепластика теломерами ТФЭ приводит к изменению его износостойкости по сравнению с исходным материалом. Полученный материал демонстрирует повышенную износостойкость при использовании его в паре со сталью ШХ15. Проведенные исследования дают

основание полагать, что износостойкость углепластиков, модифицированных теломерами ТФЭ, практически не зависит от ориентации волокон. Это делает разработанную технологию получения модифицированных углепластиков перспективной для их применения, в том числе, с параллельной ориентацией волокон, в подшипниках, работающих в водной среде. Продемонстрирована практическая возможность использования растворов теломеров ТФЭ для создания тонких трибологических покрытий на поверхности углеродных волокон.

Получен новый композиционный материал трибологического назначения на основе полититаната калия и теломеров ТФЭ. Показано, что добавление к базовой смазке литол-24 полититаната калия (3 масс.%), обработанного теломерами ТФЭ в ацетоне, приводит к уменьшению модуля силы трения на 45%, по сравнению с исходной смазкой. Это в два раза больше, по сравнению с аналогичной смазкой с добавлением сульфида молибдена, традиционно используемого в качестве антифрикционного компонента. Новый композиционный наноструктурированный материал может быть успешно применен в качестве присадки к смазочным маслам.

В Институте химии ДВО РАН (г. Владивосток) проведена разработка новых способов формирования защитных композиционных покрытий на металлические поверхности с использованием радиационно-синтезированных теломерных растворов ТФЭ и плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) [11, 12]. Предложен способ формирования защитных полимерсодержащих покрытий на магниевом сплаве МА8 методом ПЭО с применением растворов теломеров ТФЭ в этилацетате (ЭА), фреоне 113 и пентафторхлорбензоле (табл. 1). Установлено, что тип растворителя влияет на морфологическое строение композиционного покрытия и, следовательно, на его свойства. Сформированные композиционные покрытия на 4 и 2 порядка снижают токи коррозии в сравнении с металлом без покрытия и базовым ПЭО-покрытием, соответственно. Наилучшими антикоррозионными свойствами обладают покрытия, полученные с использованием раствора ТФЭ/ПФХБ. Внедрение фторполимерной компоненты в состав покрытий существенно улучшает трибологические характеристики изделий из магниевого сплава МА8, снижая износ покрытия в 2–82 раза (в зависимости от вида раствора теломера ТФЭ) в сравнении с материалом без покрытия. Наиболее износостойким оказалось композиционное покрытие, созданное с использованием теломеров ТФЭ во фреоне 113, имеющих наибольшую длину полимерной цепи (табл. 2).

Таблица 2

Трибологические и гидрофобные свойства покрытий

Вид покрытия	Износ, мм ³ /(Н·м)	Θ, °
Без покрытия	3,8 · 10 ⁻³	38 ± 1
Базовое ПЭО-покрытие	1,7 · 10 ⁻³	49 ± 2
Теломеры ТФЭ/ЭА	1,6 · 10 ⁻³	142 ± 2
Теломеры ТФЭ/фреон 113	4,6 · 10 ⁻⁵	135 ± 2
Теломеры ТФЭ/ПФХБ	1,5 · 10 ⁻⁴	138 ± 2

Все исследуемые композиционные покрытия являются гидрофобными. Лучшие гидрофоб-

ные свойства имеет покрытие, полученное с использованием теломерного раствора ТФЭ в этилацетате (ЭА). Для такого покрытия значение контактного угла (Θ) достигает 142° (табл. 2).

Таким образом, используя теломеры с разными концевыми группами, можно получить покрытие, отвечающее предъявляемым требованиям, с улучшенными антикоррозионными, износостойкими или гидрофобными свойствами.

Совместно с Мытищинским филиалом МГТУ им. Н. Э. Баумана (Московская обл., г. Мытищи) проведена модификация целлюлозосодержащих материалов (древесный шпон и бумага) растворами радиационно-синтезированных теломеров ТФЭ/ацетон. Изучены изменения физико-механических свойств обработанных и необработанных материалов [13,14] (табл. 3).

Таблица 3

Предел прочности (МПа) при растяжении шпона и бумаги

Наименование	Исходный материал	Обработка теломером ТФЭ/ацетон	Увеличение прочности, %
<i>Растяжение вдоль волокон</i>			
Сосна	103±11	145±15	40
Бук	140±16	162±16	16
Береза	136±18	148±15	9
<i>Растяжение поперек волокон</i>			
Сосна	5±1	6±2	20
Бук	7±2	9±2	28
Береза	6±1	7±2	17
<i>Растяжение вдоль полотна</i>			
Бумага писчая	13±2	17±5	31
Бумага газетная	16±4	23±5	44
<i>Растяжение поперек полотна</i>			
Бумага писчая	12±2	15±5	25
Бумага газетная	15±4	20±4	33

Показано, что обработка раствором теломеров ТФЭ образцов бумаги и шпона сосны, бука и березы приводит к увеличению предела прочности при растяжении как вдоль, так и поперек волокон. Нанесение защитной поверхностной пленки из теломеров ТФЭ на шпон и бумагу снижает возможные потери веществ в экстракт, повышает химическую устойчивость материалов, а также меняет химический состав экстрагируемой композиции. Фторполимерное покрытие увеличивает огнестойкость всех исследованных материалов на ~30 °С. Улучшение физико-механических и химических свойств целлюлозосодержащих природных материалов свидетельствует о целесообразности применения теломеров ТФЭ.

Кроме этого, проведены также исследования покрытий древесных материалов, полученных при совместном использовании теломеров ТФЭ и синтетических латексов на водной основе (акриловых, стирол-акрилового и полиуретанового) [14]. Установлены оптимальные сочетания наносимых слоев полимерных покрытий, позволяющих получать поверхность древесины с низкой смачиваемостью. Применение теломеров ТФЭ в качестве наружного слоя покрытия повышает термостойкость древесных материалов.

Из этого краткого обзора по перспективным направлениям использования радиационно-синтезированных теломеров ТФЭ очевидно, что не

все теломеры, приведенные в табл. 1, были применены для модифицирования различных материалов. В связи с этим особый интерес вызывал радиационный синтез в перфторированных растворителях, поскольку позволял получить теломеры, которые по своим свойствам будут наиболее близки к высокомолекулярному ПТФЭ. Были синтезированы новые теломеры ТФЭ с перфторированными концевыми группами в карбогале и хладоне 350 (табл. 1) [15, 16]. Эти растворители были выбраны в качестве телогенов, поскольку они инертны, совместимы с большинством конструкционных и уплотнительных материалов. Исследованы кинетические особенности и механизм процесса, молекулярное строение и структура полученных теломеров [16]. Образуются перфторированные теломеры, концевыми группами в которых являются фрагменты молекул карбогала или хладона 350. Исходная концентрация ТФЭ оказывает суще-

ственное влияние на длину цепи теломеров, теплофизические и структурные характеристики. Растворы теломеров ТФЭ, полученные при концентрации мономера $C=0.46$ моль/л, по своим характеристикам близки к промышленному ПТФЭ, имеют большую кристалличность и узкое молекулярно-массовое распределение. С использованием теломеров ТФЭ/карбогал получена гидрофобная алюмоборосиликатная стеклоткань с краевым углом смачивания 147° .

Работа выполнена по Государственному заданию Российской Федерации (номер гос. Регистрации АААА-А19-119041090087-4).

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

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

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куц П.П., Бузник В.М. Низкомолекулярные фторполимерные материалы. Монография "Фторполимерные материалы" / отв. ред. В.М. Бузник / (глава 4). – Томск: Изд-во НТЛ, 2017. 600 с.
2. Каблов Е.Н. Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1(34). С. 3–33.
3. Акатенков Р.В., Аношкин И.В., Беляев А.А., Битт В.В., Богатов В.А., Дьячкова Т.П., Куцевич К.Е., Кондрашов С.В., Романов А.М., Широков В.В., Хоробров Н.В. Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1(18). С. 35–42.
4. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 3–4. С. 24–42.
5. Каблов Е.Н., Соловьянич Л.В., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю., Бузник В.М., Куц П.П., Кичигина Г.А., Кирюхин Д.П., Дьячкова Т.П. Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 91–97.
6. Кондрашов Е.К., Неведов Н.И., Вереинова Н.П., Куц П.П., Кичигина Г.А., Кирюхин Д.П., Бузник В.М. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 1. С. 2–10.
7. Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П. Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. Вып. 2. С. 214–221. DOI: 10.31857/S0044461820020085.
8. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куц П.П. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2020. Т. LXIV. № 4. С. 20–29. DOI: 0.6060/rcj.2020644.2.
9. Мерзин А.М., Морозов А.В., Сачек Б.Я., Горячева И.Г., Кирюхин Д.П., Бирюкова М.И., Бузник В.М., Анисимов А.И., Лишевич И.В., Бахарева В.Е. Трение и износ. 2013. Т. 34. № 5. С. 483–489.
10. Бирюкова М.И., Юрков Г.Ю., Кирюхин Д.П., Ашмарин А.А., Кондрашов С.В. Перспективные материалы. 2014. № 5. С. 49–53.
11. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Nadaraia K.V., Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Buznik V.M. Surface and Coatings Technology. 2018. V. 346. P. 53–62. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.04.036.
12. Nadaraia K.V., Suchkov S.N., Imshinetskiy I.M. et al. Journal of Magnesium and Alloys. 2023. V. 11. N. 5. P. 1721–1739. DOI: 10.1016/j.jma.2023.03.006.
1. Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Buznik V.M. Nizkomolekuliarnye ftorpolimernye materialy. Monografiia "Ftorpolimernye materialy" / otv. red. V.M. Buznik / (glava 4). Tomsk: Izd-vo NTL, 2017. – 600 c.
2. Kablov E.N. Aviation Materials and Technologies. 2015. № 1(34). P. 3–33.
3. Akatenkov R.V., Anoshkin I.V., Belyaev A.A., Bitt V.V., Bogatov V.A., Dyachkova T.P., Kutzevich K.E., Kondrashov S.V., Romanov A.M., Shirokov V.V., Khorobrov N.V. Aviation Materials and Technologies. 2011. N 1. P. 35–42.
4. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Y. Nanotechnologies in Russia. 2013. V. 8. N 3–4. P. 163–185. DOI: 10.1134/S1995078013020080.
5. Kablov E.N., Solov'yanchik L.V., Kondrashov S.V., Buznik V.M., Yurkov G.Y., Kushch P.P., Kichigina G.A., Kiryukhin D.P., D'yachkova T.P. Nanotechnologies in Russia. 2016. V. 11. N 11–12. P. 782–790. DOI: 10.1134/S1995078016060124.
6. Kondrashov E.K., Nefedov N.I., Evreinova N.P., Kushch P.P., Kichigina G.A., Kiryukhin D.P., Buznik V.M. Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik. 2016. N 1. P. 2–10. DOI: 10.1134/S1070427220020081.
7. Kichigina G.A., Kushch P.P., Kiryukhin D.P. Russian Journal of Applied Chemistry. 2020. V. 93. N 2. P. 212–218.
8. Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P. Russian Journal of General Chemistry. 2021. V. 91. N 12. P. 2699–2707. DOI: 10.1134/S1070363221120458.
9. Mezrin A.M., Morozov A.V., Sачek B.Y., Goryacheva I.G., Kiryukhin D.P., Biryukova M.I., Buznik V.M., Anisimov A.V., Lishchevich I.V., Bakhareva V.E. Journal of Friction and Wear. 2013. V. 34. N 5. P. 368–373. DOI: 10.3103/S1068366613050097.
10. Biryukova M.I., Yurkov G.Yu., Kiryukhin D.P., Ashmarin A.A., Kondrashov S.V. Perspektivnye materialy. 2014. N 5. P. 49–53.
11. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Nadaraia K.V., Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Buznik V.M. Surface and Coatings Technology. 2018. V. 346. P. 53–62. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.04.036.

13. Иванкин А.Н., Санаев В.Г., Горбачева Г.А., Агеев А.К., Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куц П.П. Известия вузов. Лесной журнал. 2018. № 2. С. 122–132. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.122.
14. Горбачева Г.А., Зарубина А.Н., Сашина Д.О., Султанова А.Ф., Иванкин А.Н., Скуратов Н.В., Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П., Санаев В.Г. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 6. С. 20–25. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-6-20-25.
15. Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П., Шульга Ю.М. Химия высоких энергий. 2021. Т. 55. № 5. С. 388–392. DOI: 10.31857/S0023119321050065.
16. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куц П.П., Василец В.Н., Кабачков Е.Н., Шульга Ю.М. Химия высоких энергий. 2022. Т. 56. № 3. С. 208–214. DOI: 10.31857/S002311932203007X.
12. Nadaraia K.V., Suchkov S.N., Imshinetskiy I.M. et al. Journal of Magnesium and Alloys. 2023. V. 11. N. 5. P. 1721–1739. DOI: 10.1016/j.jma.2023.03.006.
13. Ivankin A.N., Sanaev V.G., Gorbacheva G.A., Ageev A.K., Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P. Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2018. N 2. P. 122–132.
14. Gorbacheva G.A., Zarubina A.N., Sashina D.O., Sultanova A.F., Ivankin A.N., Skuratov N.V., Kichigina G.A., Kushch P.P., Kiriukhin D.P., Sanaev V.G. Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik. 2022. N 6. P. 20–25. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-6-20-25.
15. Kichigina G.A., Kushch P.P., Kiryukhin D.P., Shulga Y.M. High Energy Chemistry. 2021. V. 55. N 5. P. 388–392. DOI: 10.1134/S0018143921050064.
16. Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Kabachkov E.N., Shulga Y.M., Vasilets V.N. High Energy Chemistry. 2022. V. 56. N 3. P. 184–189. DOI: 10.1134/S0018143922030079.

Поступила в редакцию 05.06.2023
Принята к опубликованию 07.11.2023

Received 05.06.2023
Accepted 07.11.2023