

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ТЕЛОМЕРОВ ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

Д.П. Кирюхин, Г.А. Кичигина, П.П. Куш, Ю.М. Шульга, М.В. Жидков, Е.В. Голосов

ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, просп. Академика Семенова, 1, Черноголовка, Россия, 142432

E-mail: kir@icp.ac.ru, kga@icp.ac.ru, kpp@icp.ac.ru, shulga@icp.ac.ru, zhidkov@icp.ac.ru, golosov@icp.ac.ru

Приводятся данные о влиянии гамма-излучения ^{60}Co на гидрофобные свойства и молекулярную структуру фторсодержащих покрытий на алюмоборосиликатной стеклоткани, полученных из растворов теломеров ТФЭ. Анализ проведенных ИК и КР-спектроскопических исследований показал, что под действием излучения в присутствии кислорода воздуха происходит отрыв концевых групп теломеров, состоящих из фрагментов молекул телогенов, в которых проводился синтез. Помимо этого, происходит образование COOH -концевых групп, приводящее к ухудшению гидрофобности образцов. Обнаружено, что облучение теломерных покрытий в вакууме не влияет на гидрофобные свойства теломерных покрытий. Показано, что под действием излучения морфологическая структура теломеров становится более неоднородной, появляются области с более выраженной кристаллической структурой. Проведено сравнение радиационной стойкости индивидуальных теломеров ТФЭ и покрытий на их основе с промышленным ПТФЭ (тефлон).

Ключевые слова: композиционные материалы, политетрафторэтилен, теломеры ТФЭ, радиационно-химический синтез и стойкость материалов

STUDY OF RADIATION RESISTANCE OF TETRAFLUOROETHYLENE TELOMERES AND COATINGS BASED ON THEM

D.P. Kiryukhin, G.A. Kichigina, P.P. Kushch, Yu.M. Shulga, M.V. Zhidkov, E.V. Golosov

Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry RAS, ave. Academician Semanova, 1, Chernogolovka, Russia, 142432

E-mail: kir@icp.ac.ru, kga@icp.ac.ru, kpp@icp.ac.ru, shulga@icp.ac.ru, zhidkov@icp.ac.ru, golosov@icp.ac.ru

Data are presented on the effect of ^{60}Co gamma radiation on the hydrophobic properties and molecular structure of fluorine-containing coatings on aluminoborosilicate glass fabric obtained from TFE telomer solutions. Analysis carried out by IR and Raman spectroscopic studies showed that, as part of ensuring respiration, the terminal groups of individuals consisting of fragments of telogen molecules in which synthesis occurs are separated. In addition, the formation of COOH -terminal groups occurs, leading to a deterioration in the hydrophobicity of the samples. It was found that irradiation of telomeric coatings in a vacuum does not affect the hydrophobic properties of telomeric coatings. It has been shown that under the influence of radiation, the morphological structure of telomeres becomes more heterogeneous, and areas with a more pronounced crystalline structure appear. A comparison was made of the radiation resistance of individual TFE telomers and coatings based on them with industrial PTFE (Teflon).

Keywords: composite materials, polytetrafluoroethylene, TFE telomeres, radiation-chemical synthesis and durability of materials

Для цитирования:

Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куш П.П., Шульга Ю.М., Жидков М.В., Голосов Е.В. Исследование радиационной стойкости теломеров тетрафторэтилена и покрытий на их основе. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXIX. № 1. С. 9–14. DOI: 10.6060/rcj.2025691.2.

For citation:

Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Shulga Yu.M., Zhidkov M.V., Golosov E.V. Study of radiation resistance of tetrafluoroethylene telomers and coatings based on them. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 69. N 1. P. 9–14. DOI: 10.6060/rcj.2025691.2.

Исследованию радиационной стойкости политетрафторэтилен (ПТФЭ, тефлон, Ф-4) посвящено значительное количество работ. ПТФЭ относят к полимерам с низкой радиационной стойкостью, заметные повреждения полимера наблюдаются уже при дозах облучения менее 1 Мрад [1–3]. Облучение ПТФЭ при температурах близких плавлению полимера позволяет получать продукт («радиационно-модифицированный ПТФЭ») с высокими физико-химическими и механическими свойствами: износостойчивость, радиационная стойкость и др. [4, 5]. Однако практическое использование такого радиационно-модифицированного ПТФЭ сильно ограничено. В последнее время синтезированы низкомолекулярные фторполимерные материалы – теломеры ТФЭ $R_1(C_2F_4)_nR_2$ с различными концевыми функциональными группами R_1 и R_2 , растворимые в обычных растворителях и позволяющие получать защитные экологически чистые гидрофобные антифрикционные, термостойкие покрытия для различных изделий, получения фторопластовых смазок для уменьшения трения, а также для создания различных функциональных нанокомпозитов [6–8]. Радиационная стойкость теломеров ТФЭ и покрытий на их основе до сих пор не исследована. В настоящем сообщении приводятся первые результаты об исследовании радиационной стойкости теломеров ТФЭ и покрытий на их основе.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для нанесения покрытий применялись радиационно-синтезированные теломеры ТФЭ в различных растворителях и смеси растворителей. Использованы тетрафторэтилен (C_2F_4 , ТФЭ), трифтортрихлорэтан ($C_2F_3Cl_3$, фреон113) производства ООО «Завод полимеров Кирово-Чепецкого химического комбината», ацетон, пентафторхлорбензол (C_6F_5Cl , ПФХБ), этанол (C_2H_5OH) и газообразный аммиак (NH_3). Радиационная теломеризация проводилась в запаянных стеклянных ампулах. Образцы готовились по стандартной методике: в стеклянную ампулу (объем ~ 50 мл) помещали определенное количество растворителя, освободили от растворенного воздуха и при 77К намораживали необходимое количество ТФЭ, ампулу запаивали.

В качестве образцов стеклоткани использовали стандартную алюмоборосиликатную стеклот-

кань с простейшим тканым переплетением (размер волокон и межволоконных полостей стеклоткани составляет ~ 10 мкм), размером 5×5 см. Стеклоткань была подвергнута стандартной обработке: прогрета при 450–470 °С для удаления технического замасливателя, отмыта водным раствором аммиака и высушена при 120 °С. Нанесение растворов теломеров на образцы стеклоткани проводилось методом пропитки.

ИК спектры нарушенного полного внутреннего отражения (ИК НПВО) образцов стеклоткани регистрировали при комнатной температуре в диапазоне 400 – 4000 cm^{-1} на ИК – Фурье-спектрометре “Perkin Elmer Spectrum Two” с приставкой НПВО.

Для измерения угла смачивания (θ) поверхности водой проводился анализ контура сидящей капли на приборе OCA 20 (Data Physics Instruments GmbH, Фильдерштадт, Германия) при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В целом ИК-спектры необлученной и облученной стеклоткани идентичны, частоты колебаний всех основных полос поглощения сохраняются. Влияние гамма-облучения на стеклоткань сводится к незначительному удалению следов замасливателя.

На рис. 1 приведены ИК-спектры необлученной и облученной стеклоткани с покрытием из теломеров ТФЭ/ацетон. ИК-спектры ПТФЭ и теломеров ТФЭ в ацетоне достаточно хорошо изучены [9], в целом они идентичны. В спектрах теломеров, помимо основных полос поглощения, присущих ПТФЭ, наблюдаются полосы поглощения концевых групп, являющихся фрагментами молекул ацетона. Наиболее интенсивные полосы валентных колебаний C-F тетрафторэтиленовой цепи регистрируются в области 1100–1300 cm^{-1} , а деформационных в области 500–700 cm^{-1} . Положение и относительная интенсивность основных полос поглощения (C-F) не меняется с изменением дозы облучения, т.е. облучение дозой до 600 кГр не оказывает влияния на спектральные характеристики полимерной цепи.

Наиболее интенсивные полосы поглощения концевых групп, состоящих из фрагментов молекулы ацетона, регистрируются при 1729 cm^{-1}

(C=O) и 1370 см^{-1} (CH₃) (рис. 1, вставка *a*). Эти полосы незначительно отличаются по частоте от полос поглощения в чистом ацетоне, поскольку фрагменты молекул ацетона входят в состав теломера. С увеличением дозы гамма-облучения интенсивность этих полос поглощения падает (кривые 1-6, рис. 1*a*). Это означает, что наблюдается уменьшение количества концевых ацетоновых групп. На рис. 2*a* приведена зависимость относительной интенсивности полос 1729 см^{-1} (кривая 1) и 1370 см^{-1} (кривая 2) от дозы облучения. В качестве полос сравнения взяты полосы поглощения стеклоткани 718 см^{-1} и 1402 см^{-1} , интенсивность которых не меняется в процессе облучения.

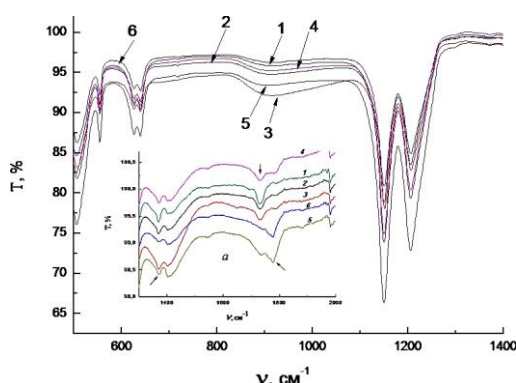


Рис. 1. ИК-спектры стеклоткани с покрытием из теломеров ТФЭ/ацетон. Необлученный образец (1) и облученные образцы 2 – 50, 3 – 100, 4 – 200, 5 – 400, 6 – 600 кГр. *a* – фрагмент спектра $1300 - 2000\text{ см}^{-1}$ в увеличенном масштабе

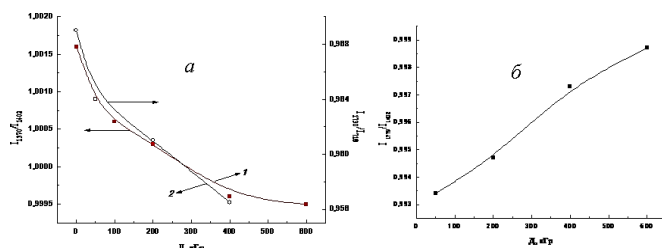


Рис. 2. Зависимости относительных интенсивностей полос поглощения 1729 см^{-1} (1), 1370 см^{-1} (2) (*a*) и полосы 1779 см^{-1} (*b*) от дозы облучения

В спектре облученных покрытий помимо уменьшения интенсивности ацетоновых полос наблюдается появление новой полосы с частотой 1779 см^{-1} (кривые 2-6, рис. 1*a*). Причем, очевидно, что ее интенсивность растет с увеличением дозы облучения (рис. 2*b*). Анализ имеющихся литературных данных [10–12] позволяет сделать, по крайней мере, два предположения относительно появления этой полосы. С одной стороны, в ИК-спектрах облученного ПТФЭ появляется полоса в области 1780 см^{-1} , которая, согласно квантово-химическим расчетам в спектрах цепочечных молекул C_nF_{2n} , характеризует колебания концевых групп –

$\text{CF}=\text{CF}_2$, образующихся в результате радиолиза [12]. С другой стороны, есть данные, что при облучении на воздухе, в присутствии кислорода и паров воды, происходит образование концевых групп COOH [13]. Сделанное отнесение подтверждается результатами квантово-химических расчетов модельных молекул $\text{C}_n\text{F}_{2n}\text{O}$ и исследованиями, проведенными в работе [14].

В нашем случае наличие полосы 1779 см^{-1} вызывает естественный вопрос о ее природе и влиянии на нее концевых групп теломеров. Связано ли ее появление с наличием кислородсодержащих ацетоновых концевых групп? Для выяснения этого вопроса были получены покрытия стеклоткани из растворов других теломеров, в частности, полученных в ПФХБ с концевыми группами C_6F_5 , Cl и смесях растворителей $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3 + \text{NH}_3$ и $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ с $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_2$, Cl, NH_2 и OH – группами. Образцы стеклоткани с покрытиями из этих теломеров были облучены дозой 600 кГр, при которой интенсивность полосы 1779 см^{-1} максимальна. В ИК-спектрах всех необлученных образцов (рис. 3 *b*–*г*, кривые 1) не регистрируется полоса в области 1780 см^{-1} . Облучение же всех образцов дозой 600 кГр приводит к изменениям в их спектрах и появлению полосы с частотой $1775\text{--}1779\text{ см}^{-1}$ (рис. 3, кривые 2).

Мы не будем останавливаться на подробном анализе ИК-спектров покрытий из теломеров в указанных растворителях. Спектры их были изучены ранее и был доказан факт вхождения фрагментов молекул растворителей в состав теломеров в качестве концевых групп [16, 17].

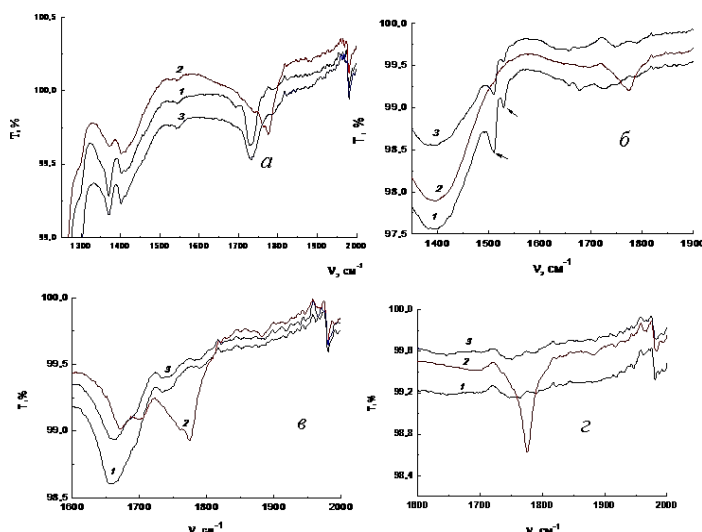


Рис. 3. ИК-спектры стеклоткани с покрытием из теломеров ТФЭ/ацетон (*a*), ТФЭ/ПФХБ (*b*), ТФЭ/фреон 113+аммиак (*в*), ТФЭ/фреон 113+этанол (*г*). Необлученный образец (1), облученный дозой 600 кГр в воздухе (2) и в вакууме (3)

Отметим лишь некоторые результаты. В спектрах теломеров ТФЭ/ПФХБ наиболее характерные полосы поглощения ароматических соединений регистрируются в области $1500\text{--}1600\text{ см}^{-1}$, они соответствуют валентным колебаниям связи $\text{C}=\text{C}$ в бензольном кольце. В спектре теломера регистрируется полоса поглощения 1512 см^{-1} , которая соответствует этим колебаниям (рис. 4б, кривая 1). Кроме того, регистрируется менее интенсивная полоса с частотой 1003 см^{-1} , которая относится, по-видимому, к плоскостным деформационным колебаниям связей $\text{C}-\text{F}$ в бензольном кольце.

При облучении образца дозой 600 кГр , как и в случае теломеров ТФЭ/ацетон, интенсивность этих полос уменьшается настолько, что они практически не регистрируются (рис. 3б, кривая 2). Это означает, что наблюдается практически полное удаление концевых бензольных групп.

В ИК-спектрах теломеров ТФЭ/фреон113 + аммиак регистрируются полосы поглощения концевых фреоновых и аминогрупп. Валентные колебания связи $\text{N}-\text{H}$ аминогруппы наблюдаются в области 3150 см^{-1} , а деформационные колебания регистрируются в области 1650 см^{-1} . Интенсивности этих полос существенно уменьшаются в облученном образце (рис. 3в, кривые 1 и 2). Полоса 3150 см^{-1} практически исчезает. Аналогичная картина наблюдается и в спектрах образца стеклоткани с покрытием из теломеров ТФЭ/фреон113 + этанол.

Таким образом, анализ ИК-спектров всех образцов с различными теломерами свидетельствует о том, что под действием излучения происходит отрыв концевых групп теломеров. Кроме этого, можно заключить, что на появление полосы $\sim 1780\text{ см}^{-1}$ не оказывает влияния химический состав концевых групп (C_6F_5 , Cl , $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_2$, NH_2 , OH , H , CH_3 , $\text{CH}_2\text{C}=\text{OCH}_3$) поскольку она регистрируется во всех облученных образцах, для всех теломерных покрытий.

Для выяснения природы полосы в области 1780 см^{-1} ($-\text{CF}=\text{CF}_2$ или COOH), появляющейся в результате облучения образцов в воздухе (в присутствии кислорода и паров воды), проведено дополнительное исследование. Образцы стеклоткани со всеми теломерными покрытиями были облучены той же максимальной дозой 600 кГр в вакууме. На рис. 3 (кривые 3) приведены фрагменты ИК-спектров образцов, облученных в вакууме. Спектры 3 идентичны спектрам 1 исходных необлученных образцов, в них отсутствуют полосы в области 1780 см^{-1} , которые наблюдаются в спектрах 2. Следует отметить также, что в спектрах 3,

наблюдается еще одна интересная деталь. Интенсивности полос ацетоновых (1729 и 1370 см^{-1}), бензольных (1512 см^{-1}) и аминогрупп (1650 см^{-1} и 3150 см^{-1}) уменьшаются незначительно (кривые 3, рис. 4), т.е. в отсутствии кислорода и паров воды влияние радиации на молекулярную структуру теломера, в частности, концевых групп существенно снижается. Регистрация полосы $\sim 1780\text{ см}^{-1}$ во всех образцах только при облучении в присутствии кислорода и паров воды позволяет нам предположить, что ее наличие и рост интенсивности с ростом дозы облучения могут быть связаны с появлением концевых COOH групп, как отмечалось в [17, 18].

Ранее [6–8] с использованием теломеров ТФЭ в ряде растворителей были получены гидрофобные покрытия стеклоткани. Было показано, что значение краевого угла смачивания (Θ) покрытий стеклоткани и их гидрофобные свойства зависят от химического состава концевых групп теломеров. Лучшие гидрофобные покрытия были получены из перфторированных теломеров и теломеров с концевыми NH_2 -группами. Минимальные краевые углы были получены при использовании теломеров, имеющих концевые OH -группы. Таким образом, если наше предположение об образовании COOH -групп в процессе облучения верно, краевые углы смачивания облученных покрытий должны уменьшаться с дозой облучения.

Результаты измерений краевых углов смачивания, полученные в данной работе, приведены в таблице 1. При облучении образцов в воздушной среде краевые углы смачивания уменьшаются с увеличением дозы облучения (обр. № 2 - 6). Краевые углы смачивания образцов, облученных одинаковой дозой 600 кГр в вакууме и на воздухе, существенно различаются (обр. № 6 и № 7). Важно отметить, что краевые углы необлученных и облученных в вакууме образцов одинаковы, что свидетельствует об отсутствии гидроксильных групп, ухудшающих гидрофобность покрытия. Полученные результаты являются косвенным подтверждением заключения, сделанного из анализа ИК-спектров, о появлении гидроксильных групп в составе теломерного покрытия в ходе радиолитического разложения в воздухе.

Минимальные краевые углы получены на образцах № 5 и № 6, в ИК-спектрах которых интенсивность появляющейся полосы 1779 см^{-1} максимальна (рис. 2а, кривые 5 и 6), а максимальный угол получен на образце № 7, где эта полоса отсутствует в ИК-спектре.

Проведено изучение спектров комбинационного рассеяния (КР) света полученных образцов

[18]. Спектроскопия КР, как известно, позволяет получить дополнительную информацию о молекулярной структуре образцов и, соответственно, о влиянии на нее гамма-излучения, поскольку во многих случаях оба спектра (ИК и КР) являются взаимно дополняющими по содержащейся в них спектральной информации [18]. Получено подтверждение о том, что гамма-излучение, в первую очередь, влияет на концевые группы теломеров, происходит их отрыв. Весьма вероятно, что происходит разрыв теломерной цепи и образование теломеров с более короткой длиной цепи, по крайней мере, для образцов ТФЭ/фреон113+этанол. Анализ спектров КР подтвердил, что в состав теломеров ТФЭ/фреон113+этанол в качестве концевых групп входят, как фрагменты молекул этанола, так и фреона 113. Помимо этого, показано, что под действием излучения морфологическая структура теломеров становится более неоднородной, появляются области с более выраженной кристаллической структурой.

В последнее время исследована радиационно-инициированная теломеризация тетрафторэтилена в пентафторхлорбензоле, пентафторбромбензоле и гексафторбензоле [19]. Анализ ИК-спектров полученных теломеров показал, что под действием гамма-излучения, так же как и в представленных

выше результатов, происходят изменения молекулярной структуры теломеров, выражающиеся в отрыве концевых бензольных колец и образовании концевых карбоксильных групп. Показано, что наиболее радиационностойкими оказались теломеры, синтезированные в пентафторбромбензоле.

Таблица
Краевые углы смачивания стеклоткани с гидрофобным покрытием из теломеров ТФЭ в ацетоне

№ образца	Доза, кГр	Θ, град.
1	0	140.2±1.8
2	50	134.8±0.9
3	100	134.5±1.2
4	200	124.4±1.6
5	400	112.6±2.3
6	600	112.0±1.7
7	600 (вакуум)	140.8±4.2

Работа выполнена по Государственному заданию Российской Федерации (номер гос. Регистрации 124013000722-8.).

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

1. Панишин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. М.: Химия. 1978. 228 с.
2. Радиационная стойкость органических материалов. Справочник. Под ред. В.К. Миличука, В.И. Тупикова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 171 с.
3. Фторполимеры. Под ред. Л. Уолла. Пер. с англ. Под ред. И.Л. Кнунянца, В.А. Пономаренко. М.: Мир, 1975. 448 с.
4. Хатилов С.А., Конова Е.М., Артамонов Н.А. Рос. Хим. Журнал. 2008. Т. 52. №5. С. 64–72.
5. Хатилов С.А., Серов С.А., Бузник В.М. Влияние облучения на молекулярную и надмолекулярную структуру ПТФЭ. Монография "Фторполимерные материалы" (глава 8). Томск: Изд-во НТЛ, 2017. 600 с.
6. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куц П.П. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2023. Т. LXVII. № 4. С. 12–18. DOI: /RCJ10.6060.2023674.3.
7. 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. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куц П.П., Бузник В.М. Низкомолекулярные фторполимерные материалы. Монография "Фторполимерные материалы" (глава 4).—Томск: Изд-во НТЛ, 2017. 600 с.
8. Бузник В.М., Игнатиева Л.Н., Кайдалова Т.А., Ким И.П., Кирюхин Д.П., Курявый В.Г., Савченко Н.Н., Слободюк А.Б. Высокомолек. соед., А. 2008. Т. 50. № 9. С. 1641–1647.
9. Schierholdz K., Lappan U., Lunkwitz K. Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. 1999. V. B 151. P. 232–237.

REFERENCES

1. Panshin Yu.A., Malkevich S.G., and Dunaevskaya Ts.S. Ftoroplasty (Fluoroplastics), Moscow: Khimiya. 1978.
2. Milinchuk V.K. and Tupikov V.I. Organic Radiation Chemistry Handbook, Kemp. T.J., Ed., Chichester: Ellis Horwood, 1989.
3. Fluoropolymers, Wall, L.A., Ed., New York: Wiley-Interscience, 1972.
4. Khatipov S.A., Konova E.M., Artamonov N.A. Ross. Khim. Zh. 2008. V. 52. N. 5. P. 64.
5. Khatipov S.A., Serov S. A., Bouzник V.M. Ftoropolimernye materialy (Fluoropolymer Materials), Bouzник, V.M., Ed., Tomsk: Izd. NTL, 2017, ch. 8.
6. Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P. Ros. Khim. Zh. 2023. V. 67. N4. P. 12–18. DOI: 10.6060/RCJ.2023674.3.
7. Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P. Ros. Khim. Zh. 2020. V. LXIV. № 4. P. 20–29. DOI: 0.6060/rcj.2020644.2.
8. Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Bouzник V.M. Ftoropolimernye materialy (Fluoropolymer Materials), Bouzник, V.M., Ed., Tomsk: Izd. NTL, 2017, ch. 4.
9. Bouzник V.M., Ignatieva L.N., Kaidalova T.A., Kiryukhin D.P., Kuryavii V.G., Savchenko N.N., Slobodyuk A.B. Polym. Sci. Ser. A Chem. Phys. 2008. 50 (9). P. 965–970. DOI: 10.1134/S0965545X08090058.
10. Schierholdz K., Lappan U., Lunkwitz K. Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. 1999. V. B 151. P. 232–237.
11. He J.L., Li W.Z., Wang L.D., Wang J., Li H.D. Ibid. 1998. V. B 135. P. 512–516.

10. He J.L., Li W.Z., Wang L.D., Wang J., Li H.D. *Inst. Meth. Phys. Res.* 1998. V. B 135. P. 512–516.
11. Lunkwitz K., Lappan U., Lehmann D. *Rad. Phys. Chem.* 2000. V. 57. P. 373–376.
12. Tikhomirov L.A. *High Energy Chem.* 1983. V. 17. P. 267–270.
13. Ignatieva L.N., Bouznik V.M. *J. Phys. Chem.* 2005. V. 79. P. 1631–1638.
14. Lappan U., Gebler U., Lunkwitz K. *J. Appl. Polym. Sci.* 1999. V. 74. P. 1571–1576.
15. Куц П.П., Кичигина Г.А., Кирюхин Д.П. *Химия высоких энергий.* 2018. Т. 52. № 1. С. 38–43 DOI: 10.7868/S0023119718010076
16. Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П. *Химия высоких энергий.* 2013. Т. 47. № 1. С. 34–38. DOI: 10.7868/S0023119713010067
17. Kichigina G.A., Kushch P.P., Zhidkov M.V., Shulga Yu.M., Golosov E.V., Kiryukhin D.P. *High Energy Chemistry.* 2024. V. 58. No. 4. P. 406. DOI: 10.1134/S0018143924700292
18. Kichigina G.A., Kushch P.P., Shulga Yu.M., Kabachkov E.N., and Kiryukhin D.P. *High Energy Chemistry.* 2024. V. 58. N 5. P. 549. DOI: 10.1134/S0018143924700449.
12. Lunkwitz K., Lappan U., Lehmann D. *Rad. Phys. Chem.* 2000. V. 57. P. 373–376.
13. Tikhomirov L.A. *High Energy Chem.* 1983. V. 17. P. 267–270.
14. Ignatieva L.N., Bouznik V.M. *J. Phys. Chem.* 2005. V. 79. P. 1631–1638.
15. Lappan U., Gebler U., Lunkwitz K. *J. Appl. Polym. Sci.* 1999. V. 74. P. 1571–1576.
16. Kushch P. P., Kichigina G. A., Kiryukhin D. P. *High Energy Chemistry.* 2018. V. 52. N 1. P. 52–57. DOI: 10.1134/S0018143918010071
17. Kichigina G. A., Kushch P. P., Kiryukhin D. P. *High Energy Chemistry.* 2013. V. 47. N 1. P. 27–31. DOI: 10.1134/S0018143913010049.
18. Kichigina G.A., Kushch P.P., Zhidkov M.V., Shulga Yu.M., Golosov E.V., Kiryukhin D.P. *High Energy Chemistry.* 2024. V. 58. N 4. P. 406. DOI: 10.1134/S0018143924700292.
19. Kichigina G.A., Kushch P.P., Shulga Yu.M., Kabachkov E.N., and Kiryukhin D.P. *High Energy Chemistry.* 2024. V. 58. N 5. P. 549. DOI: 10.1134/S0018143924700449.

Поступила в редакцию (Received) 08.02.2024

Принята к опубликованию (Accepted) 18.04.2024