

НАПРАВЛЕННЫЙ СИНТЕЗ ТЕРМО- И ТЕПЛОСТОЙКИХ ПОЛИАРИЛЕНЭФИРКЕТОНОВ, ОБЛАДАЮЩИХ КОМПЛЕКСОМ ЦЕННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ

В.В. Шапошникова, С.Н. Салазкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН им. А.Н. Несмеянова), ул. Вавилова, д. 28, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 119334
E-mail: vsh@ineos.ac.ru, snsalsal@ineos.ac.ru

С целью получения полиариленэфиркетонов с комплексом заданных функциональных свойств (высокими термо-, теплостойкостью, механическими свойствами) выполнено исследование закономерностей поликонденсации, протекающей по механизму реакции нуклеофильного замещения активированного галогена в арилдигалогениде, при взаимодействии 4,4'-дифторбензофенона с дикалиевыми дифенолятами бисфенолов в N,N-диметилацетамиде. Изучено влияние продолжительности поликонденсации и концентрации реакционной смеси на молекулярную массу гомо- и сополиариленэфиркетонов в условиях: 1) эквимолярного и 2) неэквимолярного соотношения мономеров (избытке бисфенолов) и блокировании концевых фенольных групп монофункциональным реагентом - 4-фторбензофеноном. В случае сополимерных полиариленэфиркетонов установлено, что концентрация реакционной системы оказывает существенное влияние на скорость роста молекулярной массы синтезируемых полимеров в условиях эквимолярного соотношения мономеров - более высокая концентрация реакционной смеси $C=1$ моль/л по сравнению с $C=0,5$ моль/л обеспечивает более высокую скорость роста молекулярной массы. Получены гомо- и сополимеры с приведенной вязкостью до 2,4 дл/г (концентрация раствора 0,5 г/дл, хлороформ). Показана возможность эффективного регулирования молекулярной массы гомо- и сополимеров в условиях неэквимолярного соотношения мономеров в диапазоне значений приведенной вязкости от 0,3 до 0,75 дл/г.

Выявленные закономерности синтеза полиариленэфиркетонов открыли возможности для целенаправленного управления условиями синтеза, структурой и свойствами полимеров. В зависимости от молекулярной массы и наличия в основной цепи боковой циклической фталидной группы синтезированные гомо- и сополимеры обладают температурой начала размягчения 155-230 °С, температурой начала разложения на воздухе более 450 °С. ПАЭК образуют прочные прозрачные пленки (в зависимости от значений молекулярной массы предел прочности при разрыве для гомо-ПАЭК составляет 80-105 МПа, для со-ПАЭК - 70-90 МПа, модуль высокоэластичности - $2 \cdot 10^3$ МПа). Полученные полимеры обладают комплексом ценных функциональных свойств и перспективны для получения материалов, работоспособных в экстремальных условиях.

Ключевые слова: термопласты, полиариленэфиркетоны, кардовые полимеры, статистические сополимеры, поликонденсация, реакция нуклеофильного замещения

TARGETED SYNTHESIS OF THERMO- AND HEAT-RESISTANT POLYARYLENE ETHER KETONES WITH A COMPLEX OF VALUABLE FUNCTIONAL PROPERTIES

V.V. Shaposhnikova, S.N. Salazkin

Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Organoelement Compounds named after A.N. Nesmeyanov of the Russian Academy of Sciences (INEOS RAS named after A.N. Nesmeyanov), Vavilov str., 28, building 1, Moscow, Russian Federation, 119334
E-mail: vsh@ineos.ac.ru, snsalsal@ineos.ac.ru

In order to obtain polyarylene ether ketones with a set of specified functional properties (high thermal and heat resistance, mechanical properties), a study was made of the regularities of polycondensation proceeding according to the mechanism of the reaction of nucleophilic substitution of an activated halogen in an aryl dihalide upon the interaction of 4,4'-difluorobenzophenone with dipotassium diphenolates of bisphenols in N, N-dimethylacetamide. The influence of the duration of polycondensation and the concentration of the reaction mixture on the molecular weight of homo- and copolyarylene ether ketones was studied under the conditions of: 1) equimolar and 2) non-equimolar ratio of monomers (excess of bisphenols) and blocking of terminal phenolic groups with a monofunctional reagent - 4-fluorobenzophenone. In the case of copolymer polyarylene ether ketones, it has been established that the concentration of the reaction system has a significant effect on the growth rate of the molecular weight of the synthesized polymers under conditions of an equimolar ratio of monomers - a higher concentration of the reaction mixture $C=1$ mol/l compared to $C=0.5$ mol/l provides more high rate of molecular weight growth. Homo- and copolymers with reduced viscosity up to 2,4 dl/g (solution concentration 0.5 g/dl, chloroform) were obtained. The possibility of effective regulation of the molecular weight of homo- and copolymers under conditions of non-equimolar ratio of monomers in the range of reduced viscosity from 0,3 to 0,75 dl/g is shown.

The revealed regularities in the synthesis of poly(arylene ether ketones) have opened up opportunities for purposeful control of the synthesis conditions, structure, and properties of polymers. Depending on the molecular weight and the presence of a side cyclic phthalide group in the main chain, the synthesized homo- and copolymers have a softening start temperature of 155-230 °C, and a decomposition start temperature in air of more than 450 °C. PAEK form strong transparent films (depending on the molecular weight values, the tensile strength for homo-PAEK is 80-105 MPa, for co-PAEK - 70-90 MPa, the modulus of high elasticity - $2 \cdot 10^3$ MPa). The resulting polymers have a complex of valuable functional properties and are promising for obtaining materials that can work under extreme conditions.

Key words: thermoplastics, poly(aryleneetherketones), card polymers, random copolymers, polycondensation, nucleophilic substitution reaction

Для цитирования:

Шапошникова В.В., Салазкин С.Н. Направленный синтез термо- и теплостойких полиарилэфирикетонов, обладающих комплексом ценных функциональных свойств. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 4. С. 37–42. DOI: 10.6060/RCJ.2023674.7.

For citation:

Shaposhnikova V.V., Salazkin S.N. Targeted synthesis of thermo- and heat-resistant polyarylene ether ketones with a complex of valuable functional properties. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 4. P. 37–42. DOI: 10.6060/RCJ.2023674.7.

ВВЕДЕНИЕ

Решение актуальной фундаментальной проблемы науки о высокомолекулярных соединениях, связанной с исследованием процессов образования макромолекул контролируемого химического строения для разработки научных принципов синтеза полиарилэфирикетонов (ПАЭК) с заданными функциональными и технологическими свойствами, направлено на создание новых уникальных материалов различного назначения. ПАЭК относятся к классу высокотермо-, тепло-, хемостойких термопластов [1–9], обладающих высокими механическими свойствами, а именно, уни-

кальной удельной ударной вязкостью с надрезом, и перспективны для изготовления тонкостенных изделий сложного профиля литьем под давлением, интеллектуальных материалов, проявляющих эффект обратимого электронного переключения при внешних воздействиях (давления, электрического поля и т.п.) [10–12], материалов трибологического назначения [13–15] и в качестве оптически прозрачных токопроводящих адгезивов [16–19] для склеивания солнечных элементов.

Для успешного решения задачи синтеза ПАЭК с комплексом заданных функциональных свойств первостепенное значение имеют всесто-

ронные знания о закономерностях поликонденсации и о возможностях влияния на этот процесс. Поэтому в настоящей работе было выполнено исследование: 1) влияния продолжительности поликонденсации на молекулярную массу гомо- и со-ПАЭК в условиях: а) эквимолярного и б) неэквимолярного соотношения мономеров (избытке бисфенолов) и блокировании концевых фенольных групп монофункциональным реагентом - 4-фторбензофеноном (4-ФБ); 2) свойств синтезированных полимеров.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве примера приведена методика синтеза гомо-ПАЭК при эквимолярном соотношении мономеров и концентрации мономеров (С) 0,5 моль на 1 л растворителя [20]. Изучение изменения приведенной вязкости во времени проводили путем отбора проб (объем пробы 10 - 15 см³) из реакционной массы через определенные интервалы времени после начала поликонденсации.

В предварительно продутую аргонем четырехгорлую колбу, снабженную мешалкой, термометром, трубкой для подачи аргона, насадкой для азеотропной отгонки воды, загружали 0,1 моля 4,4'-дифторбензофенона, 0,1 моля бисфенола, 0,13 моля предварительно измельченного и прокаленного K₂CO₃, 200 мл ДМАА и 100 мл хлорбензола. Колбу помещали в масляную баню, температуру в которой постепенно (~0,5 ч) увеличивали до 185 °С. Продолжительность синтеза после завершения отгонки азеотропной смеси хлорбензол-вода 10 ч. По окончании синтеза реакционную массу охлаждали и растворяли в хлороформе. Полученный раствор фильтровали от соли, промывали водой. Полимер выделяли в виде пленки путем упаривания его раствора в хлороформе при 25 °С и сушили при постепенном повышении температуры от 60 до 140 °С в течение 18 ч, а затем при 150 °С в течение 12 ч. Выход 96–98% от теоретического.

Пробы полимеров выделяли по аналогичной методике.

В случае синтеза ПАЭК при неэквимолярном соотношении мономеров (избытке бисфенола) недостаток дифторпроизводного компенсировали добавлением монофункционального реагента – 4-ФБ в количестве, сохраняющем баланс по функциональным группам F и OH.

Приведенную вязкость ($\eta_{пр}$) измеряли в хлороформе при 25 °С при концентрации 0,5 г полимера в 100 мл растворителя на вискозиметре Оствальда с диаметром капилляра 0,6 мм.

Пленки полимеров получали поливом раствора 0,5 г полимера в 10 мл хлороформа на подложку из целлофана. После испарения хлороформа пленки полимеров сушили в термощкафу при постепенном подъеме температуры от 60 до 155 °С в течение 36 ч.

Термомеханические испытания пленочных образцов полимеров проводили на анализаторе TA Instruments TMA Q400 под нагрузкой 0,1 МПа со скоростью 1,5 °С/мин в режиме сжатия.

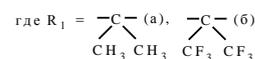
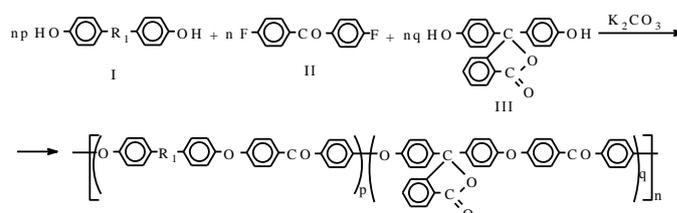
Механические свойства пленок исследовали на динамометре типа “Поляни”.

Термогравиметрические исследования проводили на приборе Derivatograph- C (МОМ, Венгрия) на воздухе и в аргоне при скорости нагрева 10 °С/мин на образцах массой ~20 мг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании влияния продолжительности поликонденсации на молекулярную массу гомо- и со-ПАЭК в качестве показателя изменения молекулярной массы была выбрана $\eta_{пр}$, что обусловлено симбатным характером изменения значений $\eta_{пр}$ и среднемассовой молекулярной массы, установленным ранее в работе [20].

Синтез ПАЭК осуществляли реакцией нуклеофильного замещения активированного арилгалогенида в N,N-диметилацетамиде по следующей схеме:



$$p/q = 1/0 \text{ (в случае R1=a, б); } 0/1; 0,75/0,25 \text{ (в случае R1=a, б)}$$

Рис. 1. Схема получения гомо- и со-ПАЭК

Результаты исследования зависимости $\eta_{пр}$ гомо-ПАЭК на основе 4,4'-дифторбензофенона и ряда бисфенолов (бисфенола А (ПАЭК-А), бисфенола АF (ПАЭК-АF) и фенолфталеина (ПАЭК-Ф)) от продолжительности синтеза при С=0,5 моль/л и эквимолярном соотношении мономеров представлены на рис. 2.

При анализе графика изменения $\eta_{пр}$ во времени для гомо-ПАЭК (кривые 1-3) видно, что к началу отсчета продолжительности синтеза значения $\eta_{пр}$ ПАЭК-А (кривая 2) немного больше, чем в

случае ПАЭК-АФ (кривая 3) и кардового ПАЭК-Ф (кривая 1). При дальнейшем проведении синтеза скорость роста $\eta_{пр}$ ПАЭК-А сопоставима со скоростью увеличения $\eta_{пр}$ ПАЭК-АФ, но меньше скорости роста этого показателя для ПАЭК-Ф. Наибольшие конечные значения $\eta_{пр}$ отмечены для ПАЭК-А и ПАЭК-Ф ($\eta_{пр} \sim 2,3$ дл/г), а наименьшие – для ПАЭК-АФ ($\eta_{пр} = 1,22$ дл/г). Однако в образце кардового ПАЭК-Ф на после 9 ч синтеза отмечено образование незначительных количеств гель-фракции.

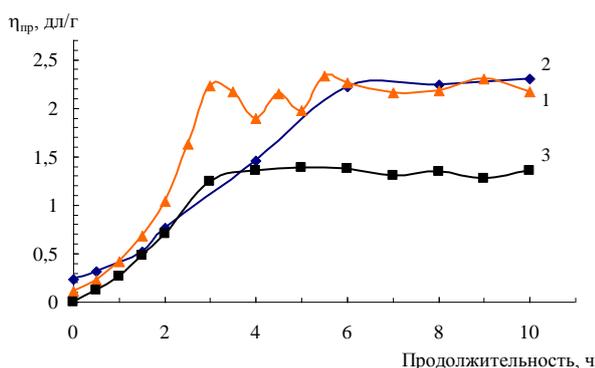


Рис. 2. Изменение $\eta_{пр}$ во времени при синтезе гомополимеров: ПАЭК-Ф (кривая 1), ПАЭК-А (кривая 2) и ПАЭК-АФ (кривая 3)

На рис. 3 представлена зависимость значений $\eta_{пр}$ со-ПАЭК на основе 4,4'-дифторбензофенона и смеси бисфенолов: бисфенола А и фенолфталеина (ПАЭК-А/Ф-75/25), бисфенола АФ и фенолфталеина (ПАЭК-АФ/Ф-75/25) при $r/q=0,75/0,25$ от продолжительности синтеза при эквимольном соотношении мономеров и различном значении C .

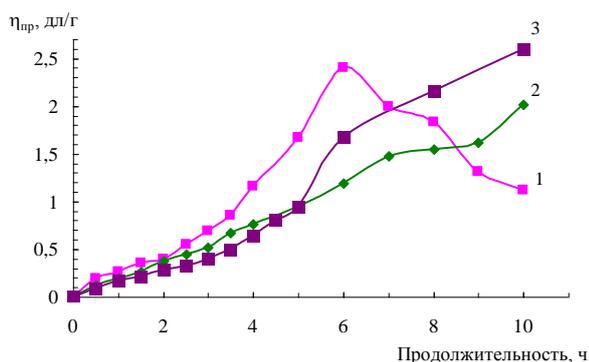


Рис. 3. Изменение $\eta_{пр}$ во времени при синтезе ПАЭК-А/Ф-75/25 (кривые 1 (C=1 моль/л), 3 (0,5 моль/л)) и ПАЭК-АФ/Ф-75/25 (кривая 2 (C=1 моль/л))

При анализе изменения $\eta_{пр}$ во времени для со-ПАЭК (кривые 1-3), видно, что скорость нарастания молекулярной массы у со-ПАЭК-А/Ф-75/25

при $C=1$ моль/л (кривая 1) выше по сравнению с со-ПАЭК-АФ/Ф-75/25 ($C=1$ моль/л) (кривая 2) и ПАЭК-А/Ф-75/25 ($C=0,5$ моль/л) (кривая 3). Более низкая скорость нарастания молекулярной массы со-ПАЭК-АФ/Ф-75/25 при $C=1$ моль/л обусловлена большей кислотностью бисфенола АФ (следовательно, меньшей реакционной способностью бисфенола АФ в реакции нуклеофильного замещения активированного арилдигалогенида) по сравнению с бисфенолом А. Различная реакционная способность бисфенолов оказывает влияние не только на скорость изменения молекулярной массы во времени, но и на значения $\eta_{пр}$. Сополимеры ПАЭК-А/Ф-75/25, полученные при эквимольном соотношении мономеров, обладают $\eta_{пр}$ равной 1,7 ($C=0,5$ моль/л) и 2,4 ($C=1$ моль/л) дл/г через 6 ч после отсчета начала синтеза. При проведении синтеза более 6 ч в пробах этих сополимеров отмечено присутствие незначительных количеств геля. Интерпретация результатов в этом случае является затруднительной, поскольку отбираемые в процессе синтеза пробы реакционной массы неоднородны по составу из-за ее гетерогенности и расслаивания. Следует отметить, что более высокая концентрация реакционной системы ($C=1$ моль/л) обеспечивает более высокую скорость роста молекулярной массы сополимеров ПАЭК-А/Ф-75/25 (кривая 1).

С целью регулирования молекулярной массы полимеров было выполнено исследование влияния продолжительности синтеза на значения $\eta_{пр}$ гомо- и сополимеров при проведении поликонденсации в условиях неэквимольного соотношения мономеров (избытке бисфенолов) и блокировании концевых фенольных групп монофункциональным реагентом - 4-ФБ.

Характер изменения $\eta_{пр}$ во времени для гомополимеров ПАЭК-А и ПАЭК-АФ, получаемых при неэквимольном соотношении мономеров и $C=0,5$ моль/л, различен (рис. 4, кривые 1 и 2). В случае ПАЭК-АФ (кривая 2) скорость роста $\eta_{пр}$ в течение первых 4 ч после начала синтеза выше, чем у ПАЭК-А (кривая 1). Тем не менее, после завершения поликонденсации ПАЭК-А обладает чуть более высокими конечными значениями $\eta_{пр}$ по сравнению с ПАЭК-АФ.

Результаты исследований, выполненных на примере гомополимеров, были учтены при установлении оптимальных условий синтеза сополимеров с регулируемой молекулярной массой. При синтезе сополимеров в условиях неэквимольного соотношения мономеров было изучено влияние продолжительности поликонденсации на $\eta_{пр}$ при различной концентрации реакционной массы:

$C=0,5$ и 1 моль/л (рис. 4, кривые 3-5). Показано, что в случае сополимера ПАЭК-А/Ф-75/25 при $C=1$ моль/л (кривая 3) скорость увеличения молекулярной массы в течение 5 ч с момента начала синтеза является наименьшей по сравнению с другими образцами сополимеров, представленными на рис. 4. Затем она возрастает и после 10 ч синтеза сополимер ПАЭК-А/Ф-75/25 обладает максимальным значением $\eta_{пр}$.

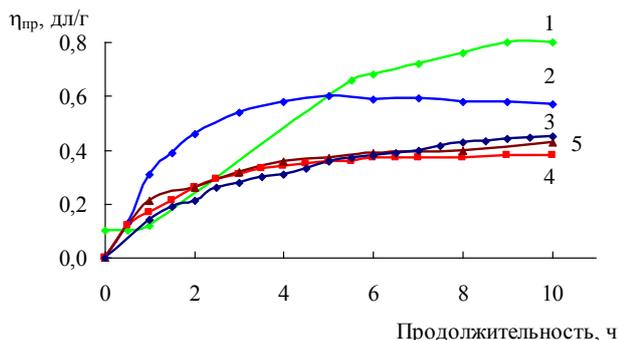


Рис. 4 Изменение $\eta_{пр}$ во времени при синтезе гомополимеров ПАЭК-А (кривая 1) и ПАЭК-АФ (кривая 2) и соотношении Ia или Ib : II : 4-ФБ = 1,00 : 0,99 : 0,02; сополимеров ПАЭК-А/Ф-75/25 (кривые 3 ($C=1$ моль/л), 5 ($C=0,5$ моль/л)) и ПАЭК-АФ/Ф-75/25 (кривая 4 ($C=1$ моль/л)) и соотношении Ia или Ib : II : 4-ФБ = 1,00 : 0,97 : 0,06.

Осуществить строгое сопоставление активности фенолятов бисфенолов в синтезе ПАЭК как при эквимолярном, так и при неэквимолярном соотношении мономеров, затруднительно, поскольку реакционная система гетерогенна и количественных данных о растворимости фенолятов бисфенолов и олигомеров с концевыми фенолятными группами нет (также, как и отсутствуют данные о скорости образования фенолятов). Разброс значений $\eta_{пр}$ в течение всего синтеза в случае всех ПАЭК, по-видимому, также обусловлен гетерогенностью реакционной массы, которая является причиной неоднородности проб, отбираемых в процессе синтеза.

Выявленные закономерности синтеза ПАЭК открыли возможности для целенаправленного управления условиями синтеза, структурой и

свойствами полимеров.

В зависимости от молекулярной массы и наличия в основной цепи боковой циклической фталидной группы синтезированные гомо- и сополимеры обладают температурой начала размягчения ($T_{н.разм.}$) 155-230 °С, температурой начала разложения на воздухе более 450 °С. Введение в макромолекулу полимера фталидной группы способствует увеличению $T_{н.разм.}$. ПАЭК образуют прочные прозрачные пленки (в зависимости от значений молекулярной массы предел прочности при разрыве для гомо-ПАЭК составляет 80-105 МПа, для со-ПАЭК - 70-90 МПа, модуль высокоэластичности - $2 \cdot 10^3$ МПа).

ВЫВОДЫ

Впервые исследовано влияние параметров поликонденсации (продолжительности синтеза и концентрации мономеров) на молекулярную массу полиариленэфиркетонов, получаемых реакцией нуклеофильного замещения в условиях эквимолярного и неэквимолярного соотношения мономеров. Найдены условия для получения полимеров с регулируемой молекулярной массой, обладающих комплексом ценных функциональных свойств (высокой термо- и термостойкостью, хорошими механическими свойствами), и перспективных для получения материалов, работоспособных в экстремальных условиях.

Работа по исследованию закономерностей синтеза гомо- и сополимеров выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-19-00535.

Работа по исследованию свойств полимеров выполнена в рамках Государственного задания №075-00697-22-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

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. Rao V.L. J. Macromol. Sci. Part C. 1995. V. 35. N4. P. 661-712. DOI: 10.1080/15321799508021753.
2. Kemmish D. Update on the technology and applications of polyaryletherketones. - Shawbury: Smithers Rapra Technology. 2010. 142 p.
3. Sabu T., Visakh P.M. Handbook of engineering and speciality thermoplastics: Volume 3: polyethers and polyesters. - Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons. Inc.; Salem, Massachusetts: Scrivener Publishing LLC. 2011. 562 p.

REFERENCES

1. Rao V.L. J. Macromol. Sci. Part C. 1995. V. 35. N 4. P. 661-712. DOI: 10.1080/15321799508021753.
2. Kemmish D. Update on the technology and applications of polyaryletherketones. - Shawbury: Smithers Rapra Technology. 2010. 142 p.
3. Sabu T., Visakh P.M. Handbook of engineering and speciality thermoplastics: Volume 3: polyethers and polyesters. - Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons. Inc.; Salem, Massachusetts: Scrivener Publishing LLC. 2011. 562 p.

4. Шапошникова В.В., Салазкин С.Н. Известия Академии наук. Серия химическая. 2014. № 10. С. 2213–2223. DOI: 10.1007/s11172-014-0725-1.
5. Kawaguchi S., Morikawa A. High Performance Polymers. 2018. V. 30. N 1. P. 67–75. DOI: 10.1177/0954008316679493.
6. Zhao Z., Gu Y., Chao D., Liu X. European Polymer Journal. 2019. V. 116. P. 336–341. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.04.026.
7. Салазкин С.Н., Шапошникова В.В. Высокомолекулярные соединения. Серия С. 2020. 62. N 2. С. 108–121. DOI: 10.1134/S1811238220020125.
8. Шапошникова В.В., Салазкин С.Н. Известия Академии наук, серия химическая. 2022. № 2. С. 212–219. DOI: 10.1007/s11172-022-3399-0.
9. Саморядов А.В., Лукашенко Е.Д., Калугина Е.В., Шапошникова В.В. Российский химический журнал. 2021. Т. 65. № 3. С. 79–84. DOI: 10.1134/S1070363221130363.
10. Пономарев А.Ф., Мошелев А.В., Ильясов В.Х., Лачинов А.Н., Салазкин С.Н., Шапошникова В.В., Шарпов Д.С., Корнилов В.М. Высокомолекулярные соединения, серия С. 2009. Т. 51. № 7. С. 1300–1305. DOI: 10.1134/S1811238209010081.
11. Шапошникова В.В., Ткаченко А.С., Звукова Н.Д., Перегудов А.С., Клеменкова З.С., Пономарев А.Ф., Ильясов В.Х., Лачинов А.Н., Салазкин С.Н. Известия академии наук. Серия химическая. 2016. № 2. С. 502–506. DOI: 10.1007/s11172-016-1329-8.
12. Lachinov A.N., Karamov D.D., Galiev A.F., Lachinov A.A., Yusupov A.R., Shaposhnikova V.V., Salazkin S.N., Chebotareva A.B. Applied Sciences. 2023. V. 13. N 6. Paper № 3684. DOI: 10.3390/app13063684.
13. Краснов, А.П., Аскадский А.А., Горошков М.В., Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Наумкин А.В., Сорокин А.Е., Соловьева В.А. Доклады Академии наук. 2018. Т. 479. № 6. С. 639–644. DOI: 10.1134/S0012500818040080.
14. Горошков М.В., Шапошникова В.В., Аскадский А.А., Благодатских И.В., Наумкин А.В., Салазкин С.Н., Краснов А.П. Трение и износ. 2018. Т. 39. № 2. С. 149–156. DOI: 10.3103/S1068366618020058.
15. Горошков М.В., Краснов А.П., Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Любимова А.С., Наумкин А.В., Полуниин С.В., Быков А.В. Трение и износ. 2019. Т. 40. № 6. С. 678–686. DOI: 10.3103/S1068366619060102.
16. Chebotareva A.B., Untila G.G., Kost T.N., Stepanov A.S., Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2017. V. 165. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.02.025.
17. Chebotareva A.B., Untila G.G., Kost T.N., Stepanov A.S., Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V. Solar Energy. 2019. V. 193. P. 828–836. DOI: 10.1016/j.solener.2019.10.027.
18. Чеботарева А.Б., Кост Т.Н., Степанов А.С., Салазкин С.Н., Шапошникова В.В. Известия Академии наук, серия химическая. 2022. № 2. С. 368–373. DOI: 10.1007/s11172-022-3421-6.
19. Lachinov A.N., Karamov D.D., Galiev A.F., Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V., Kost T.N., Chebotareva A.B. Polymers. 2023. V. 15. Paper N 928. DOI: 10.3390/polym15040928.
20. Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Сергеев В.А., Благодатских И.В., Дубровина Л.В., Сакунц А.А., Павлова С.С.А. Известия Академии наук. Серия химическая. 1996. № 10. С. 2526–2530.
4. Shaposhnikova V.V., Salazkin S.N. Russian Chemical Bulletin. 2014. V. 63. N 10. P. 2213–2223. DOI: 10.1007/s11172-014-0725-1.
5. Kawaguchi S., Morikawa A. High Performance Polymers. 2018. V. 30. N 1. P. 67–75. DOI: 10.1177/0954008316679493.
6. Zhao Z., Gu Y., Chao D., Liu X. European Polymer Journal. 2019. V. 116. P. 336–341. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.04.026.
7. Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V. Polymer Science, Series C. 2020. V. 62. N 2. P. 111–123. DOI: 10.1134/S1811238220020125.
8. Shaposhnikova V.V., Salazkin S.N. Russian Chemical Bulletin. 2022. V. 71. N 2. P. 212–219. DOI: 10.1007/s11172-022-3399-0.
9. Samoryadov A.V., Lukashenko E.D., Kalugina E.V., Shaposhnikova V.V. Ros. Khim. Zh. 2021. V. 65. N 3. P. 79–84.
10. Ponomarev A.F., Koshelev A.V., Ilyasov V.H., Lachinov A.N., Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V., Sharapov D.S., Kornilov V.M. Polymer Science, Series C. 2009. V. 51. N 7. P. 1300–1305.
11. Shaposhnikova V.V., Tkachenko A.S., Zvukova N.D., Peregudov A.S., Klemenkova Z.S., Salazkin S.N., Ponomarev A.F., Ilyasov V.K., Lachinov A.N. Russian Chemical Bulletin. 2016. V. 65. N 2. P. 502–506. DOI: 10.1007/s11172-016-1329-8.
12. Lachinov A.N., Karamov D.D., Galiev A.F., Lachinov A.A., Yusupov A.R., Shaposhnikova V.V., Salazkin S.N., Chebotareva A.B. Applied Sciences. 2023. V. 13. N 6. Paper N 3684. DOI: 10.3390/app13063684.
13. Krasnov A.P., Askadskii A.A., Goroshkov M.V., Shaposhnikova V.V., Salazkin S.N., Naumkin A.V., Sorokin A.E., Solov'eva V.A. Doklady Chemistry. 2018. V. 479. N 2. P. 58–63. DOI: 10.1134/S0012500818040080.
14. Goroshkov M.V., Shaposhnikova V.V., Askadsky A.A., Blagodatskikh I.V., Naumkin A.V., Salazkin S.N., Krasnov A.P. Journal of Friction and Wear. 2018. V. 39. N 2. P. 114–120. DOI: 10.3103/S1068366618020058.
15. Goroshkov M.V., Krasnov A.P., Shaposhnikova V.V., Salazkin S.N., Lyubimova A.S., Naumkin A.V., Polunin S.V., Bykov A.V. Journal of Friction and Wear. 2019. V. 40. N 6. P. 515–520. DOI: 10.3103/S1068366619060102.
16. Chebotareva A.B., Untila G.G., Kost T.N., Stepanov A.S., Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2017. V. 165. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.02.025.
17. Chebotareva A.B., Untila G.G., Kost T.N., Stepanov A.S., Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V. Solar Energy. 2019. V. 193. P. 828–836. DOI: 10.1016/j.solener.2019.10.027.
18. Chebotareva A.B., Kost T.N., Stepanov A.S., Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V. Russian Chemical Bulletin. 2022. V. 71. N 2. P. 368–373. DOI: 10.1007/s11172-022-3421-6.
19. Lachinov A.N., Karamov D.D., Galiev A.F., Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V., Kost T.N., Chebotareva A.B. Polymers. 2023. V. 15. Paper N 928. DOI: 10.3390/polym15040928.
20. Shaposhnikova V.V., Salazkin S.N., Sergeev V.A., Blagodatskikh I.V., Dubrovina L.V., Sakunts A.A., Pavlova S.S.A. Izv. RAN. Ser. Khim. 1996. N 10. P. 2526–2530.

Поступила в редакцию (Received) 05.06.2023

Принята к опубликованию (Accepted) 04.11.2023