

И. А. Старостина, К. Б. Вернигоров, Р. А. Перелыгина,
В. И. Машуков, Е. Н. Черезова, А. И. Загидуллин,
Р. М. Гарипов, М. В. Колпакова, Ю. М. Казаков, О. В. Стоянов

**О РОЛИ НЕКОТОРЫХ НЕФТЕПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ В ДЛИТЕЛЬНОМ ТОРМОЖЕНИИ
ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ СОПОЛИМЕРА ЭТИЛЕНА С ВИНИЛАЦЕТАТОМ
В ПРИСУТСТВИИ ФЕНОЛЬНОГО АНТИОКСИДАНТА**

Ключевые слова: нефтеполимерные смолы, сополимер этилена с винилацетатом, ИК-спектроскопия МНПВО, ЯМР-спектроскопия, термоокисление, фенольные антиоксиданты.

Проведен анализ полимерных композиций на основе сополимера этилена с винилацетатом в присутствии нефтеполимерных смол в целях подтверждения термостабилизирующих способностей данных модификаторов. Для исследования выбраны смолы, различающиеся по содержанию различных структурных фрагментов – ароматических, метильных, метиленовых, метиновых, фрагментов с двойной связью. Помощью инфракрасной спектроскопии методом нарушенного полного внутреннего отражения (ИК МНПВО) получены спектры образцов. Проведен анализ относительной интенсивности сигналов, отражающих наличие кислородосодержащих групп, образовавшихся в результате термоокисления этиленовых звеньев в композициях в течение суток. Источниками этих сигналов служили валентные колебания карбонильных групп и С-О-С связей. Данные сравнивали с результатами для полимерных материалов на основе сополимера этилена с винилацетатом и полиэтилен высокого давления, модифицированных нефтеполимерными смолами марок С5-9 и 2353, а также с данными для контрольных образцов, не подвергнутых термическому старению. Результаты ИК-спектроскопии МНПВО показали, что все выбранные смолы в различной степени обладают термостабилизирующими способностями. Обнаружено торможение окисления образцов, зависящее от марки нефтеполимерной смолы. Сделано предположение, что, в случае использования в рецептуре полимерного композита нефтеполимерной смолы, функцию донора водорода в процессе ингибирования термоокисления высокомолекулярных соединений могут выполнять атомы водорода поликлинических ароматических фрагментов нефтеполимерных смол. Положительный эффект антиокислительного действия нефтеполимерных смол совместно с фенольным антиоксидантом Ирганокс 1010 заметно проявляется в процессе длительного процесса термоокисления полимера, что может быть обусловлено восстановлением более активного фенольного антиоксиданта за счет менее активной смолы.

**I. A. Starostina, K. B. Vernigorov, R. A. Perelygina,
V. I. Mashukov, E. N. Cherezova, A. I. Zagidullin,
R. M. Garipov, M. V. Kolpakova, Yu. M. Kazakov, O. V. Stoyanov**

**THE ROLE OF SOME PETROLEUM POLYMER RESINS IN LONG-TERM BRAKING
THERMAL OXIDATION OF ETHYLENE COPOLYMER WITH VINYL ACETATE
IN THE PRESENCE OF A PHENOLIC ANTIOXIDANT**

Keywords Petroleum polymer resins, ethylene-vinyl acetate copolymer, ATR IR spectroscopy, NMR spectroscopy, thermal oxidation, phenolic antioxidants.

The polymer compositions based on ethylene-vinyl acetate copolymer in the presence of petroleum polymer resins were analyzed in order to confirm the thermal stabilizing properties of these modifiers. Resins with different contents of various structural fragments - aromatic, methyl, methylene, methine, fragments with a double bond - were selected for the study. Spectra of the samples were obtained using infrared spectroscopy by the attenuated total reflection method (IR ATR). An analysis was made of the relative intensity of signals reflecting the presence of oxygen-containing groups formed as a result of thermal oxidation of ethylene units in the compositions over a period of 24 hours. The sources of these signals were the stretching vibrations of carbonyl groups and C-O-C bonds. The data were compared with the results for polymer materials based on ethylene-vinyl acetate copolymer and high-pressure polyethylene modified with C5-9 and 2353 petroleum polymer resins, as well as with the data for control samples not subjected to thermal aging. The results of the IR spectroscopy of the IR ATR showed that all the selected resins possessed thermostabilizing capabilities to varying degrees. Inhibition of oxidation of the samples was detected, depending on the grade of the petroleum polymer resin. It was suggested that, in the case of using a petroleum polymer resin in the formulation of the polymer composite, the function of a hydrogen donor in the process of inhibiting the thermal oxidation of high-molecular compounds can be performed by hydrogen atoms of polycyclic aromatic fragments of petroleum polymer resins. The positive effect of the antioxidant action of petroleum polymer resins together with the phenolic antioxidant Irganox 1010 is noticeably manifested in the process of a long-term process of polymer thermal oxidation, which can be due to the restoration of a more active phenolic antioxidant due to a less active resin.

Введение

Данная статья является продолжением работ, выполненных нами ранее [1-3] и посвященных термостабилизирующими свойствам

нефтеполимерных смол (НПС) в композициях с такими полиолефинами, как полиэтилен высокого давления (ПЭВД) и сополимер этилена с винилацетатом (СЭВА). Ранее НПС в таком качестве

не исследовались, хотя имеются литературные данные по их использованию в композициях на основе полиолефинов [4-6]. В частности, обнаружено улучшение технологических свойств kleев-расплавов на основе СЭВА, возрастание адгезионной прочности СЭВА к стали, повышение деформационно-прочностных характеристик [4].

Исследование термического старения в воздушной среде ПЭВД, так и СЭВА, модифицированных НПС, выявило ряд положительных эффектов, таких как сдвиг температуры начала потери массы в сторону более высоких значений по данным термогравиметрического анализа и снижение теплового эффекта термического окисления по данным дифференциальной сканирующей калориметрии. В частности, такие эффекты нами были установлены для ПЭВД и СЭВА, содержащих 5% масс. некоторых НПС [7], причем исследованные образцы НПС различались по химической структуре (наличие и концентрация ароматических, метильных, метиленовых групп и т.д.) [8, 9].

Сказанное выше потребовало более детального изучения процессов термического окисления полиолефинов в присутствии НПС. Этому и посвящена настоящая работа.

Экспериментальная часть

Объектом исследования в данной работе являлся промышленный СЭВА с 14%-ным содержанием винилацетатных звеньев марки 11306-075 производства ПАО «Казаньоргсинтез», (ТУ6-05-1636-97), содержащий 0,1% масс. антиоксиданта Ирганокс 1010 (пентаэритрол тетракис(3-(3,5-дитрет-бутил4-гидроксифенил)пропионат)).

В качестве модификаторов использовались НПС различных марок, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Используемые марки НПС

Table 1 – Grades of Oil-based polymer resins (OPR) used

НПС	Температура размягчения, °C
Марка Б НК НХФХ	85
Марка 2353	115
ПЛАСТ 2	128
C ₅₋₉	75
C200S	96

При исследовании данных НПС методом ЯМР ¹Н-спектроскопии установлено [8,9], что все входящие в их состав протоны делятся на 6 групп: А – ароматические, дающие сигнал в области 6,2-8,0 млн⁻¹; В - олефиновые, дающие сигнал в области 4,0-6,2 млн⁻¹; С- метильные и метиленовые в α -положении к бензольному кольцу, дающие сигнал в области 2,0-3,6 млн⁻¹; D - метиновые парафинов и нафтенов, дающие сигнал в области 1,5-2,0 млн⁻¹; Е - метиленовые парафинов и нафтенов, дающие сигнал

в области 1,05-1,5 млн⁻¹; F- метильные, дающие сигнал в области 0,5-1,05 млн⁻¹. Результаты проведенного ранее ¹Н-ЯМР анализа [10] состава НПС представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Состав НПС (метод ЯМР ¹Н) [10]

Table 2 – Composition of OPR (¹H NMR method) [10]

НПС	Нормализованные интенсивности, %					
	A	B	C	D	E	F
Марка Б НК НХФХ	28,7	4,64	31,65	17,72	10,97	6,33
2353	22,28	7,98	20,25	22,59	17,89	8,48
ПЛАСТ 2	11,89	11,89	31,72	25,38	11,89	10,09
C ₅₋₉	15,93	6,37	17,2	19,747	14,65	23,57
C200S	0	6,2	12,5	22,7	28,0	30,6

Полимерные композиции получали смешением СЭВА и НПС в смесителе Brabender[®] GmbH & Co. KG в течение 10 минут при температуре 130°C. Полученные композиции подвергали прессованию на гидравлическом прессе YT-30RS. Режим прессования: температура 130°C, удельное давление 3,4 МПа, время нагревания 5 мин, время выдержки под давлением 5 мин, время охлаждения 2 мин.

Термическое старение образцов проводили при температуре 130°C в течение 24 часов в термошкафу в воздушной среде.

ИК-спектры многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) получали с помощью ИК-Фурье микроскопа модели Cary 620 FTIR (Agilent Technologies, США) путем усреднения результатов 100 сканирований. Исследовали полосы 1720 см⁻¹ (валентные колебания C=O групп) и 1170 см⁻¹ (валентные колебания C-O-C групп).

Обсуждение результатов

На сегодняшний день не разработана единая классификация НПС по их видам, однако имеются две наиболее представительные. Первая из них – классификация, предложенная Ю. В. Думским с колл. [8,9], в которой в качестве основных выделяют ароматические, сополимерные и алифатические смолы. Сополимерные – это смолы, которые получают сополимеризацией алкенилароматических и алифатических мономеров, содержащихся во фракциях C₅ и C_{8-C₁₀}.

Другая классификация, принадлежащая Р.Милденбергу с соавт. [11], несколько шире. В отдельные классы данные авторы предлагают выделять дициклопентадиеновые смолы, модифицированные смолы и смолы на основе чистого мономера. Модифицированные смолы – те, которые получают из химически модифицированных исходных реагентов.

Нами были выбраны смолы (таблица 2), принадлежащие к различным классам. Например, НПС марки Б НК НХФХ, безусловно, относится к ароматическим – из 17-ти исследованных нами марок смол, у нее самое высокое содержание ароматических протонов (28,7%). В исследование включены «гибридные смолы» с практически

одинаковым содержанием ароматических, алифатических и олефиновых протонов – это ПЛАСТ 2. Наконец, по содержанию концевых метильных протонов (тип F) можно видеть, что выбранные представители НПС заметно различаются также и по молекулярной массе.

При выделении авторами [8,9] различных типов протонов по данным ЯМР можно заметить не совсем строгую их градацию. Так, протоны типа С (метильные и метиленовые в α -положении к бензольному кольцу) также входят в состав ароматических структур. Вероятнее всего, к типу А Ю.В. Думский с коллегами относили фенильные протоны, т.е. протоны бензольного кольца. Поэтому НПС C200S, которая характеризуется полным отсутствием протонов типа А, нельзя отнести к алифатическим смолам, поскольку у данной марки имеются протоны типа С (12,5%). В данном контексте необходимо отметить, что для получения более полной информации о составе структурных фрагментов НПС нами были сняты их ИК-МНПВО спектры [12]. Обнаружено, что на спектрах исследуемых НПС имеются множественные сигналы от ароматических структур, в частности, относящиеся к колебаниям моно-замещенных (740 - 775 см^{-1}), и орто-дизамещенных (1020-1045 см^{-1}) ароматических циклов. Расчет относительной интенсивности указанных сигналов свидетельствует, что орто-дизамещенные ароматические группировки преобладают в составе исследованных НПС [12].

Анализ полученных ранее ИК-спектров МНПВО для ПЭВД и СЭВА в присутствии НПС марок 2353 и $C_{5.9}$ [1-3] выявил интересный факт, указывающий на то, что Ирганокс 1010, добавляемый в полиолефины при производстве, расходуется в течение 8-ми часов термостатирования при высоких температурах (130°C для СЭВА и 160°C для ПЭВД). В течение этого времени Ирганокс 1010 подавляет термоокислительные процессы, более эффективно, чем НПС 2353 и $C_{5.9}$. При более продолжительном времени термообработки эффективность Ирганокса 1010 снижается, однако одновременно начинает проявляться стабилизирующее действие смол, особенно заметное при использовании НПС марки 2353. Так, например, интенсивность некоторых полос на ИК-спектрах (1720 см^{-1} и 1170 см^{-1}) при данной модификации остается на начальном уровне по истечении 24 ч термообработки [1-3]. В частности, для полосы 1720 см^{-1} все сказанное иллюстрирует таблица 3, в которой представлены изменения относительной интенсивности для различных композиций в зависимости от времени старения.

В силу отмеченных обстоятельств для других марок смол - ПЛАСТ 2, Б НК НХФХ и C200S нами исследовались модифицированные ими материалы, прошедшие 24-х часовую выдержку при повышенных температурах.

Полученные данные сравнили также с ранее полученными результатами для материалов, модифицированных НПС $C_{5.9}$ и 2353, а также контрольными образцами, не подвергнутыми термическому старению. Все композиции содержали 0,1% Ирганокса 1010.

Результаты ИК-спектроскопии МНПВО показали, что все выбранные нами НПС в различной степени обладают термостабилизирующими способностями.

Таблица 3 – Относительные интенсивности полосы 1720 см^{-1} для композиций на основе ПЭВД и СЭВА

Table 3 – Relative intensities of the 1720 cm^{-1} band for compositions based on LDPE and EVAC

Композиция	Время выдержки при повышенной температуре, час				
	0	2	8	16	24
ПЭВД	0,04	0,08	0,12	0,13	0,14
ПЭВД+0,1% Ирганокс 1010	0,04	0,02	0,03	0,14	0,15
ПЭВД+НПС $C_{5.9}$	0,01	0,1	0,13	0,12	0,11
ПЭВД+НПС 2353	0	0	0	0	0
СЭВА+ Ирганокс 1010	0,04	0,08	0,11	0,1	0,12
СЭВА+Ирганокс+ НПС $C_{5.9}$	0,04	0,05	0,1	0,12	0,11
СЭВА+Ирганокс+ НПС 2353	0,02	0	0	0,03	0,03

На рис. 1 приведены обзорные ИК-МНПВО спектры исследованных материалов с «новыми» НПС.

Анализ полосы 1720 см^{-1} вновь выявил тот факт, что НПС всех марок подавляют образование C=O групп в течение 24 часов воздействия высоких температур. Аналогичный результат наблюдается и для полосы 1170 см^{-1} . Для контрольного образца СЭВА + Б НК НХФХ его относительная интенсивность составляла 0,002 и остается без изменений после 24-х часов термоокисления. Полученные результаты иллюстрируются таблицей 4, в которой представлены относительные интенсивности полос 1720 и 1170 см^{-1} для всех пяти композиций «СЭВА+НПС».

Единственное исключение относится к НПС марки C200S, при модификации которой наблюдается возрастание интенсивности данной полосы после термообработки.

Таким образом, полученные данные демонстрируют способность НПС стабилизировать термоокислительные процессы в СЭВА, усиливая и продлевая действие фенольного антиоксиданта (ФАО) Ирганокса 1010. Механизм термоокисления полимеров и механизм действия Ирганокса 1010, хорошо известны [13-15]. Стадией, определяющей скорость в цикле автоокисления, является отрыв атома водорода пероксидным радикалом ROO[•], образующимся в процессе термоокисления полимера, от его основной цепи с образованием относительно стабильного полимерного гидропероксида (ROOH). Обрыв цепи окисления обусловлен быстрым взаимодействием ФАО (ArOH)

с образующимися пероксидными радикалами ROO^\bullet . Как следствие, концентрация радикалов ROO^\bullet снижается, и процесс окисления тормозится. При этом, пока не израсходован внешний донор водорода ArOH , отрыв водорода от полимерной цепи не происходит. Образующиеся при отрыве атома

водорода от ArOH феноксильные радикалы устойчивы (ArO^\bullet), обладают низкой реакционной способностью, претерпевая далее, как правило, внутримолекулярные превращения с образованием хиноидных структур [13-15, 16].

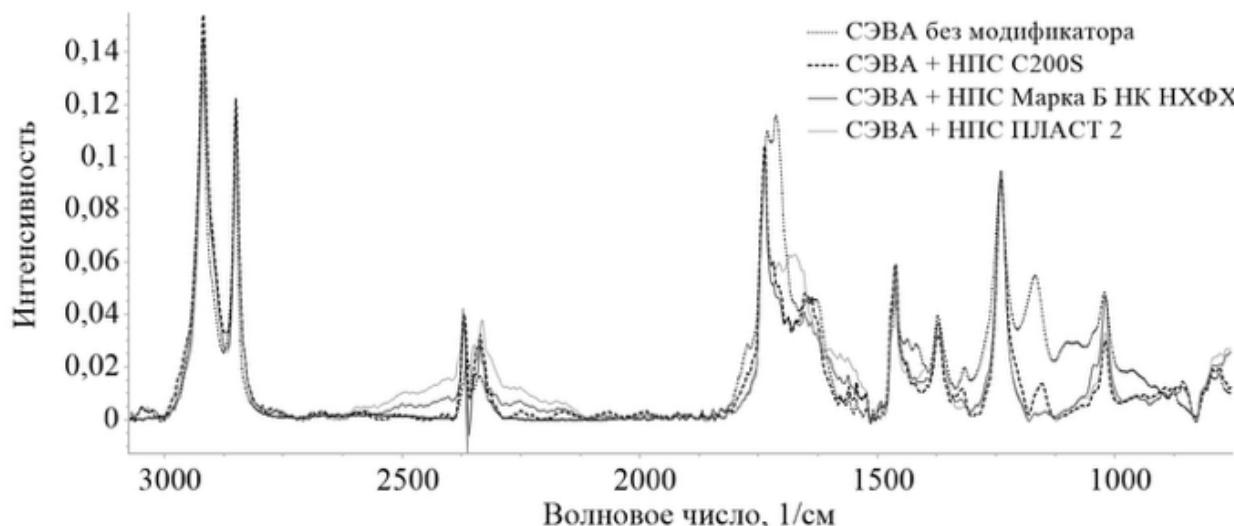


Рис. 1 – Обзорные ИК-МНПВО спектры СЭВА в присутствии НПС: НПС ПЛАСТ 2 (—), Марка Б НК НХФХ (—), С200S (---) и без модификатора (···)

Fig. 1 – Overview IR ATR spectra of ethylene vinyl acetate copolymer (EVAC) in the presence of OPR: NPS PLAST 2 (—), Mark B NK NHFH (—), C200S (---) and without modifier (···)

Таблица 4 – Изменение относительных интенсивностей полос при 1720 и 1170 cm^{-1} для композиций «СЭВА+НПС»

Table 4 – Change in relative intensities of bands at 1720 and 1170 cm^{-1} for EVAC+OPR compositions

Образец	Время, ч	Интенсивность полос	
		1720 cm^{-1}	1170 cm^{-1}
СЭВА	0	0,016	0,002
	24	0,117	0,055
СЭВА + НПС С _{5.9}	0	0,04	0,004
	24	0,112	0,043
СЭВА + НПС Марка Б НК НХФХ	0	0,026	0,002
	24	0,0365	0,002
СЭВА + НПС С200S	0	0,034	0,003
	24	0,052	0,12
СЭВА + НПС Пласт 2	0	0,037	0,003
	24	0,041	0,002
СЭВА + НПС 2353	0	0,019	0,004
	24	0,019	0,004

В случае использования в рецептуре полимерного композита нефтеполимерной смолы функцию донора водорода в процессе ингибирования термоокисления высокомолекулярных соединений могут выполнять атомы водорода полициклических ароматических фрагментов НПС, поскольку энергия диссоциации атомов водорода в этом случае невелика [17,18]. Образующиеся при этом радикалы устойчивы вследствие делокализации неспаренного электрона по системе π -связей ароматических фрагментов. В дальнейшем образовавшиеся радикалы могут участвовать в реакции диспропорционирования и других внутримолекулярных превращениях с образованием молекулярных продуктов.

При введении в композицию одновременно ФАО и НПС возникает вероятность появления синергического стабилизирующего эффекта, когда в процессе эксплуатации изделия более активный ФАО восстанавливается за счет менее активного стабилизатора - НПС. Следует отметить, что синергическим действием обладают и смеси двух ингибиторов, один из которых (замещенный фенол) обрывает цепи по реакции с ROO^\bullet , а другой – по реакции с R^\bullet (хинон) [13-16]. Можно предположить, что появление хинонов также возможно в данном случае в процессе расходования фенола при ингибировании длительного термоокислительного процесса.

Заключение

Таким образом, все выбранные смолы в различной степени обладают термостабилизирующими способностями. Обнаружено торможение окисления образцов, зависящее от марки нефтеполимерной смолы. Сделано предположение, что, в случае использования в рецептуре полимерного композита нефтеполимерной смолы, функцию донора водорода в процессе ингибиования термоокисления высокомолекулярных соединений могут выполнять атомы водорода поликлинических ароматических фрагментов нефтеполимерных смол. Положительный эффект антиокислительного действия НПС совместно с ФАО заметно проявляется в процессе длительного процесса термоокисления СЭВА, что, по-видимому, может быть обусловлено восстановлением более активного ФАО за счет менее активной НПС, а также возможного перехода фенолов в хиноны при расходовании ФАО в реакции ингибиования термоокисления.

Литература

1. Р.А. Перельгина, И.А. Старостина, А.И. Загидуллин, Р.М. Гарипов, Н.А. Кузина, О.В. Стоянов *Клей. Герметики. Технологии*, **9**, 25–30 (2024), DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-9-25-30.
2. Р.А. Перельгина, И.А. Старостина, А.И. Загидуллин, Р.М. Гарипов, С.Н. Рusanova, О.В. Стоянов *Все материалы. Энциклопедический справочник*, **8**, 14–19 (2022), DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-8-14-19.
3. Р.А. Перельгина, И.А. Старостина, А.И. Загидуллин, Р.М. Гарипов, С.Н. Рusanova, О.В. Стоянов *Клей. Герметики. Технологии*, **11**, 10–15 (2022), DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-11-10-15.
4. Р.М. Хузаханов Дис. д-ра тех. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, 2013, 321 с.
5. Я.В. Капицкая Дис. канд. тех. наук: / Казанский государственный технологический университет, Казань, 2006, 171 с.
6. О.В. Стоянов Автореферат дис. д-ра тех. наук: Казанский государственный технологический университет, Казань, 1997, 36 с.
7. Р.А. Перельгина Автореферат дис. канд. тех. наук / Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, 2024, 18 с.
8. Ю.В. Думский, Б.И. Но, Г.М. Бутов *Химия и технология нефтеполимерных смол*. Химия, Москва, 1999. 312 с.
9. Ю.В. Думский *Нефтеполимерные смолы*. Химия, Москва, 1988. 168 с.
10. E. Kraus, L. Orf, I. Starostina, A. Efimova, O. Stoyanov *Polym. Eng. Sci.*, **58**, 2288–2292 (2018), DOI: 10.1002/pen.24849
11. R. Mildenberg, M. Zander, G. Collin *Hydrocarbon resins*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1997. 173 p.
12. Р.А. Перельгина, И.А. Старостина, К.В. Вернигоров, В.В. Бушков, В.И. Машуков, Р.М. Зиятдинова, Ю.Г. Галиметдинов, Х.С. Абзальдинов, Ю.М. Казаков, О.В. Стоянов *Вестн. технол. ун-та*, **28**(8), 34–38 (2025), DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_8_34.
13. Н.М. Эмануэль, А.И. Бучаченко *Химическая физика старения и стабилизации полимеров*. Наука, Москва, 1982. 360 с.
14. Е.Т. Денисов, В.В. Азатян *Ингибирование цепных реакций*. М.: Институт химической физики в Черноголовке. Институт структурной макрокинетики РАН, Черноголовка, 1997. 286 с.
15. В.А. Рогинский *Фенольные антиоксиданты. Реакционная способность и эффективность*. Наука, Москва, 1988. 124 с.
16. Ю.А. Михеев, Л.Н. Гусев, Г.Е. Заиков *Усп. хим.*, **66**(1), 3–30 (1997).
17. А.А. Берлин *Избранные труды. Воспоминания современников*. Наука, Москва, 2002. 362 с.
18. Н.В. Зык, Е.К. Белоглазкина *Ароматичность и ароматические углеводороды*. КолосС, Москва, 1998. 49 с.

References

1. R.A. Perelygina, I.A. Starostina, A.I. Zagidullin, R.M. Garipov, N.A. Kuzina, O.V. Stoyanov *Adhesives. Sealants. Technologies*, **9**, 25–30 (2024), DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-9-25-30.
2. R.A. Perelygina, I.A. Starostina, A.I. Zagidullin, R.M. Garipov, S.N. Rusanova, O.V. Stoyanov *All materials. Encyclopedic Reference Book*, **8**, 14–19 (2022), DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-8-14-19.
3. R.A. Perelygina, I.A. Starostina, A.I. Zagidullin, R.M. Garipov, S.N. Rusanova, O.V. Stoyanov
4. *Adhesives. Sealants. Technologies*, **11**, 10–15 (2022), DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-11-10-15.
5. R.M. Khuzakhanov Doctoral dissertation, Kazan National Research Technological University, Kazan, 2013, 321 p.
6. Ya.V. Kapitskaya Candidate dissertation: Kazan State Technological University, Kazan, 2006, 171 p.
7. O.V. Stoyanov Abstract of Doctoral Dissertation in Technical Sciences: Kazan State Technological University, Kazan, 1997, 36 p.
8. R.A. Perelygina Abstract of Candidate Dissertation in Technical Sciences / Kazan National Research Technological University, Kazan, 2024, 18 p.
9. Yu.V. Dumsky, B.I. Но, G.M. Butov *Chemistry and Technology of Petroleum-Based Polymers*. Chemistry, Moscow, 1999. 312 pp.
10. Yu.V. Dumsky *Petroleum-Based Polymers*. Chemistry, Moscow, 1988. 168 pp.
11. E. Kraus, L. Orf, I. Starostina, A. Efimova, O. Stoyanov *Polym. Eng. Sci.*, **58**, 2288–2292 (2018), DOI: 10.1002/pen.24849
12. R. Mildenberg, M. Zander, G. Collin *Hydrocarbon resins*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1997. 173 p.
13. R.A. Perelygina, I.A. Starostina, K.V. Vernigorov, V.V. Bushkov, V.I. Mashukov, R.M. Ziyatdinova, Yu.G. Galyametdinov, Kh.S. Abzaldinov, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov *Vestnik Tehnologicheskogo Universiteta*, **28**(8), 34–38 (2025), DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_8_34.
14. N.M. Emanuel, A.I. Buchachenko *Chemical Physics of Aging and Stabilization of Polymers*. Nauka, Moscow, 1982. 360 p.
15. E.T. Denisov, V.V. Azatyan *Inhibition of Chain Reactions*. Moscow: Institute of Chemical Physics in Chernogolovka. Institute of Structural Macrokinetics of

- the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 1997. 286 p.
16. 15. V.A. Roginsky *Phenolic Antioxidants. Reactivity and effectiveness*. Nauka, Moscow, 1988. 124 p.
17. 16. Yu.A. Mikheev, L.N. Gusev, G.E. Zaikov
18. *Usp. Khim.*, **66**(1), 3–30 (1997).
19. 17. A.A. Berlin *Selected Works. Memories of Contemporaries*. Nauka, Moscow, 2002. 362 pp.
20. 18. N.V. Zyck, E.K. Beloglazkina *Aromaticity and Aromatic Hydrocarbons*. KolosS, Moscow, 1998. 49 pp.

© **И. А. Старостина** – доктор химических наук, доцент, профессор кафедры Физики, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, irinastarostina@mail.ru; **К. Б. Вернигоров** – кандидат химических наук, генеральный директор, ООО «Сибур ПолиЛаб», Москва, Россия, VernigorovKB@sibur.ru; **Р. А. Перелыгина** – кандидат технических наук, ассистент кафедры Физики, КНИТУ, raperelygina@mail.ru; **В. И. Машуков** – кандидат химических наук, директор «Прикладные разработки», ООО «Сибур ПолиЛаб»; **Е. Н. Черезова** – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры Технологии синтетического каучука (ТСК), КНИТУ, cherezova59@mail.ru; **А. И. Загидуллин** – кандидат технических наук, доцент, доцент каф. Технологии пластических масс (ТПМ), КНИТУ, ZagidullinAI@corp.knrtu.ru; **Р. М. Гарипов** – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры ТПМ, КНИТУ, GaripovRM@corp.knrtu.ru; **М. В. Колпакова** – кандидат технических наук, Научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Набережночелнинский государственный педагогический университет, Набережные Челны, Россия; **Ю. М. Казаков** – доктор технических наук, доцент, профессор каф. Химии и технологии переработки эластомеров, ректор, КНИТУ; **О. В. Стоянов** – доктор технических наук, профессор, заведующий каф. ТПМ, КНИТУ, ov_stoyanov@mail.ru.

© **I. A. Starostina** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, irinastarostina@mail.ru; **K. B. Vernigorov** – PhD (Chemical Sci.), General Director, Sibur Polylab LLC, Moscow, Russia, VernigorovKB@sibur.ru; **R. A. Pereleygina** – PhD (Technical Sci.), Assistant Professor, Department of Physics, KNRTU, raperelygina@mail.ru; **V. I. Mashukov** – PhD (Chemical Sci.), Director of Applied Development, Sibur PolyLab LLC; **E. N. Cherezova** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Professor of the Department of Synthetic Rubber Technology, KNRTU, cherezova59@mail.ru; **A. I. Zagidullin** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Associate Professor of the Plastics Technology (PT) department, KNRTU, ZagidullinAI@corp.knrtu.ru; **R. M. Garipov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Professor of the PT Department, KNRTU, GaripovRM@corp.knrtu.ru; **M. V. Kolpakova** – PhD (Technical Sci.), Researcher, Research Department, Naberezhnye Chelny State Pedagogical University, Naberezhnye Chelny, Russia; **Yu. M. Kazakov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Professor of the Department of Elastomers Chemistry and Processing Technology, Rector, KNRTU; **O. V. Stoyanov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the PT department, KNRTU, ov_stoyanov@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 01.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 11.09.25.