

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 547-31/-39

DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_6_37

Н. М. Аль-Базили, А. М. Багавеев, К. Р. Гизутдинов,
Я. А. Жукова, М. Р. Морякова, Э. А. Качаева, Л. Г. Утвленова,
И. З. Файзуллин, Е. Н. Черезова, С. И. Вольфсон, Р. М. Ахмадуллин

**2,6-ДИ-ТРЕТБУТИЛ-4-(3-ГИДРОКСИПРОПИЛ) ФЕНОЛ:
СИНТЕЗ, АНТИОКСИДАНТНАЯ АКТИВНОСТЬ**

Ключевые слова: 2,6-ди-трет-бутил-4-(3-гидроксипропил) фенол, антиоксидант, пространственно-затрудненные фенолы, синтез.

В полимерной химии стабилизаторы применяют с целью сохранения на необходимом для эксплуатации уровне физико-механических и оптических свойств продукции, находящейся под длительным воздействием окружающей среды. Растущий рынок и расширение областей использования полимеров и полимерной продукции вызывает потребность в разработке технологий и методов производства новых видов антиоксидантов. Современный подход в химии антиоксидантов заключается в разработке методов получения полифункциональных соединений, которые способны выполнять одновременно функции акцепторов свободных радикалов и разрушителей гидропероксидов. На протяжении ряда лет ведутся разработки полифункциональных антиоксидантов на базе замещенных фенолов различного строения. Для использования замещенных фенолов в качестве промежуточных продуктов для синтеза полифункциональных соединений они должны иметь дополнительные реакционноспособные группы. В данной статье приведены результаты разработки синтеза 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола, который может быть использован в качестве промежуточного продукта для синтеза полифункционального фосфорсодержащего антиоксиданта. 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенол получен при атмосферном и повышенном давлении по реакции между 2,6-дитретбутилфенолом и аллиловым спиртом в присутствии щелочи. Структура полученного соединения подтверждена методами ЯМР ^1H , ^{13}C и ИК-спектроскопии. Проведено исследование эффективности действия 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола, как акцептора радикалов, в модельной реакции с 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (далее по тексту ДФПГ). Экспериментально определено, что реакция подчиняется уравнению первого порядка, константа скорости равна $3,672 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, что сравнимо с параметрами промышленного антиоксиданта Ирганокс-1010. Установлено влияние 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола на стабильность свойств индустриального масла И-20А при его термоокислении. Согласно ГОСТ термоокисление масла проводили при 170°C в течение 4 часов с расходом кислорода $300 \text{ см}^3/\text{мин}$. Установлено, что 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенол обеспечивает снижение количества осадка при термоокислительном старении индустриального масла на уровне Ирганокс-1010. Однако количество низкомолекулярных кислот и кислотное число в присутствии 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола выше, чем при стабилизации масла Ирганоксом-1010.

N. M. Al-Bazili, A. M. Bagaveev, K. R. Gizutdinov,
Y. A. Zhukova, M. R. Moryakova, E. A. Kachaeva, L. G. Utivlenova,
I. Z. Fayzullin, E. N. Cherezova, S. I. Wolfson, R. M. Akhmadullin

2,6-DI-TERT-BUTYL-4-(3-HYDROXYPROPYL)PHENOL: SYNTHESIS AND ANTIOXIDANT ACTIVITY

Keywords: 2,6-Di-tert-butyl-4-(3-hydroxypropyl) phenol, antioxidant, hindered phenols, synthesis.

In polymer chemistry, stabilizers are used to maintain the physical-mechanical and optical properties of materials at levels necessary for their performance under prolonged environmental exposure. The growing market and the expanding range of polymer applications create a demand for the development of technologies and methods for the production of new types of antioxidants. A modern approach in antioxidant chemistry involves the design of multifunctional compounds capable of acting simultaneously as free radical scavengers and hydroperoxide decomposers. For many years, research has focused on the development of multifunctional antioxidants based on substituted phenols of various structures. To be used as intermediates in the synthesis of multifunctional compounds, such substituted phenols must contain additional reactive groups. This paper presents the results of the synthesis of 2,6-di-tert-butyl-4-(3-hydroxypropyl)phenol, which may serve as an intermediate for the preparation of multifunctional phosphorus-containing antioxidants. The compound was synthesized under both atmospheric and elevated pressure by the reaction of 2,6-di-tert-butylphenol with allyl alcohol in the presence of alkali. The structure of the obtained product was confirmed by ^1H NMR, ^{13}C NMR, and FTIR spectroscopy. The efficiency of 2,6-di-tert-butyl-4-(3-hydroxypropyl)phenol as a radical scavenger was evaluated in a model reaction with 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH). It was experimentally determined that the reaction follows first-order kinetics with a rate constant of $3.672 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, which is comparable to that of the commercial antioxidant Irganox 1010. The effect of 2,6-di-tert-butyl-4-(3-hydroxypropyl)phenol on the oxidative stability of industrial oil I-20A under thermal oxidation conditions was also investigated. According to GOST standards, thermal oxidation of the oil was carried out at 170°C for 4 hours, with an oxygen flow rate of $300 \text{ cm}^3/\text{min}$. It was found that the addition of the synthesized compound led to a reduction in the amount of sediment formed during thermal oxidative degradation, at a level comparable to Irganox 1010. However, the amount of low molecular weight acids and the acid number were higher in the presence of 2,6-di-tert-butyl-4-(3-hydroxypropyl)phenol compared to the oil stabilized with Irganox 1010.

Введение

Растущее потребление полимерной продукции и расширение областей её использования формирует широкий спрос на различные виды стабилизаторов, в том числе обладающих антиоксидантной активностью [1-8]. Это обуславливает необходимость разработки новых структур антиоксидантов и эффективных методик их синтеза.

Известно, что при термоокислительном старении полимерных материалов образуются активные пероксидные радикалы и гидропероксиды, развивающие процесс окисления. Функция антиоксидантов заключается в акцептировании образующихся радикалов (первичные стабилизаторы) и безрадикальном разрушении гидропероксидов (вторичные стабилизаторы).

Среди акцепторов свободных радикалов наибольшее распространение получили пространственно-затрудненные фенолы, в частности 2,6-Ди-трет-бутил-4-метилфенол (Агидол-1, Инол), пентаэритритилтетраakis(3-(3,5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенил)пропионат) (Агидол-110, Ирганокс-1010) и вторичные ароматические амины [9-11]. В группе безрадикальных разрушителей гидропероксидов наиболее распространены органические эфиры фосфористой кислоты: трис(2,4-ди-трет-бутилфенил)фосфит (Иргасфос 168), бис(2,4-ди-трет-бутилфенил)пентаэритритилдифосфит (Рианокс 626) и др. [12]. При одновременном использовании в процессе стабилизации антиоксидантов (АО) различных механизмов действия многими исследователями отмечено появление эффекта антиокислительного синергизма [13].

Активно развивается направление, посвященное синтезу полифункциональных АО, способных работать одновременно как акцепторы свободных радикалов и безрадикальные разрушители гидропероксидов [14]. Преимуществом использования полифункциональных АО является также упрощение производственного процесса.

Известны эффективные полифункциональные АО, содержащие в молекуле пространственно-затрудненные фенольные группы и атомы трехвалентного фосфора [13]. Для этих соединений также отмечено проявление синергизма антиокислительного действия.

Синтез подобных соединений базируется на реакции между треххлористым фосфором и 2,6-ди-алкил-4-(гидроксиалкил)фенолами. При этом в качестве синтона для синтеза последних предлагается использовать 2,6-ди-алкилфенолы.

В литературе влияние условий процесса на выход 2,6-ди-алкил-4-(гидроксиалкил)фенола описано фрагментарно [15 – 18]

Целью настоящей работы является синтез 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола (далее по тексту НР-1) – промежуточного продукта для синтеза полифункционального фосфорсодержащего антиоксиданта и исследование антиоксидантной активности НР-1.

Экспериментальная часть

Для синтеза в качестве исходных реагентов, активаторов использованы 2,6-дитрет.-бутилфенол

(99,95%, Acros Organics), аллиловый спирт (99,00%, ТУ 6-02-574-84), гидроксид натрия (99,00%, ГОСТ 4328-77).

Спектры ЯМР снимали на многофункциональном спектрометре Bruker Avance 400 (Германия) с рабочей частотой 400 (^1H) и 100 (^{13}C) МГц в растворе CDCl_3 .

ИК спектры регистрировали на ИК-Фурье спектрометре «Perkin Elmer» в режиме НПВО в диапазоне 4000-550 cm^{-1} .

Синтез 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола в автоклаве (НР-1)

В автоклав из нержавеющей стали загружали 189,44 г (0,918 моль) 2,6-ди-третбутилфенола (2,6-ДТБФ), 73,92 г (1,273 моль) аллилового спирта, и 10,56 г (0,264 моль) гидроксида натрия. Реакцию проводили под азотной подушкой в течение 4,5 ч. при температуре 160°C и непрерывном перемешивании при давлении 21 атм. Далее реакционную массу охлаждали до комнатной температуры, нейтрализовывали 4 М водным раствором соляной кислоты до pH=4. Продукт экстрагировали толуолом 200 мл, отделяли органическую фазу, используя делительную воронку. Затем из органической фазы отгоняли при атмосферном давлении непрореагировавший аллиловый спирт и толуол. Кубовый продукт подвергали вакуумной перегонке в токе аргона, собирая фракцию, кипящую при 200-215°C/22 мм.рт.ст. Выделенный продукт представляет собой вязкое масло желтого цвета с характерным запахом, кристаллизующееся при стоянии. $T_{\text{пл}} = 69 - 70^\circ\text{C}$.

Синтез 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола при атмосферном давлении

В трехгорлую колбу, снабженную перемешивающим устройством, обратным холодильником помещали 25,0 г (0,121 моль) 2,6-ДТБФ, 70,7 г (1,217 моль) аллилового спирта и 30,0 г (0,750 моль) гидроксида натрия. Реакцию проводили в атмосфере аргона 6 часов при температуре кипения (97°C) с постепенным повышением до 114°C. Далее реакционную массу охлаждали до комнатной температуры, нейтрализовывали 4 М водным раствором соляной кислоты до pH=4. Продукт экстрагировали толуолом (50 мл), отделяли органическую фазу, используя делительную воронку. Затем отгоняли при атмосферном давлении непрореагировавший аллиловый спирт и толуол. Кубовый продукт подвергали вакуумной перегонке в токе аргона, собирая фракцию, кипящую при 200-215°C/22 мм.рт.ст. Продукт представляет собой вязкое масло желтого цвета с характерным запахом, кристаллизующееся при стоянии. $T_{\text{пл}} = 70^\circ\text{C}$.

Определение константы скорости взаимодействия антиоксиданта с радикалами в модельной реакции с 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом

Испытания проводили по методике, описанной в работах [19, 20]. Предварительно готовили растворы антиоксиданта ($C_{\text{АО}} = 1 \cdot 10^{-2}$ моль/л) и 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (ДФПГ) ($C = 1 \cdot 10^{-4}$ моль/л) в 1,4-диоксане. Изменение оптической плотности растворов фиксировали при 520 нм, в течение 30 мин.

В качестве антиоксидантов испытаны 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил) фенол (НР-1), 2,6-ДТБФ, Ирганокс 1010.

Определение стабилизирующей эффективности замещенных фенолов при термоокислении индустриального масла

Использовано индустриальное масло И-20А (ГОСТ 20799-88). Термоокисление масла определяли при 170°C в течение 4 часов с расходом кислорода 300 см³/мин. при концентрации АО 0,25% и 1%мас. согласно методике [21].

Обсуждение результатов

Алкилирование 2,6-ди-третбутилфенола аллиловым спиртом проводили при повышенном и атмосферном давлении в присутствии гидроксида натрия (Рис. 1). Гидроксид натрия используется для активации 2,6-замещенных фенолов в реакции SN2-замещения в пара-положение [22].

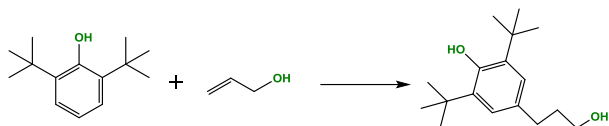


Рис. 1 – Схема взаимодействия 2,6-ДТБФ с аллиловым спиртом

Fig. 1 – Scheme of interaction between 2,6-DTBP and allyl alcohol

Полученный продукт охарактеризован методами ИК- и ЯМР- спектроскопии. На ИК-спектре выделенного продукта (Рис. 2) отмечены полосы характерные поглощения валентных и деформационных колебаний НО-группы замещенного фенола с максимумами при $\nu(\text{OH}_{\text{Ar}})$ 3591-3734 и $\delta(\text{OH}_{\text{Ar}})$ 1472 см⁻¹ и уширенный пик гидроксиалкильной группы в интервале $\nu(\text{OH}_{\text{Alk}})$ 3107-3591 и $\delta(\text{OH}_{\text{Alk}})$ 1434 см⁻¹.

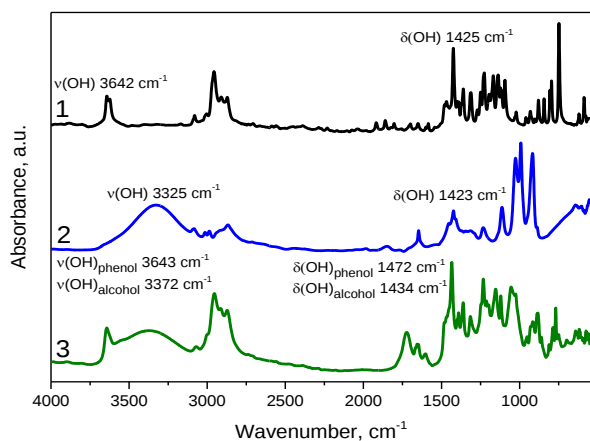


Рис. 2 – ИК-спектры 2,6-ДТБФ (1), аллилового спирта (2) 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола (3)

Fig. 2 – IR spectra of 2,6-DTBP (1), allyl alcohol (2), and 2,6-di-tert-butyl-4-(3-hydroxypropyl)phenol (3)

В ЯМР ¹H спектре выделенного продукта (Рис. 3) наблюдается синглет метильных протонов при 1.47 ppm (A), сигналы метиленовых протонов проявляются при 1.87-1.94 (D), 2.63-2.67 (C) и 3.71-3.74 (E) ppm. Химический сдвиг атома водорода гидроксильной группы отмечен при 5.09 ppm (F). Протоны ароматического кольца (B) резонируют при 7.03 ppm. Полученный спектр соответствует структуре 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола (НР-1).

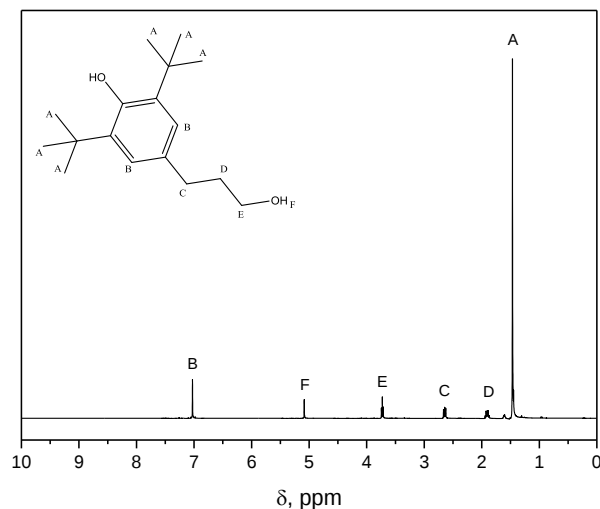


Рис. 3 – ЯМР ¹H-спектр 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола (CDCl₃)

Fig. 3 – NMR ¹H spectrum of 2,6-di-tert-butyl-4-(3-hydroxypropyl)phenol (CDCl₃)

В ЯМР ¹³C-спектре (Рис. 4) зафиксирован химический сдвиг при 30.38 ppm, соответствующий атомам углерода метильных групп (A), при 32.15, 34.33 и 62.72 ppm зафиксированы пики атомов углерода метиленовых групп (G, H, I). Углерод, соединенный с тремя метильными группами (B), резонирует при 34.79 ppm. Сигналы при 124.88, 132.40, 135.87 и 151.90 ppm соответствуют углеродам ароматического кольца (C, D, E, F). Данные ЯМР ¹³C-спектроскопии также соответствуют структуре 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола.

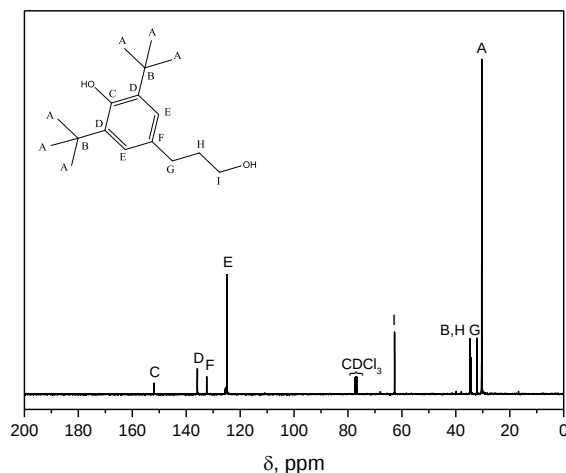


Рис. 4 – ЯМР ¹³C-спектр 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола (CDCl₃)

Fig. 4 – NMR ¹³C spectrum of 2,6-di-tert-butyl-4-(3-hydroxypropyl)phenol (CDCl₃)

Далее была изучена антирадикальная активность синтезированного 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола в модельной реакции с ДФПГ. Установлено, что реакция подчиняется уравнению первого порядка по ДФПГ (Рис. 5). Константа скорости реакции НР-1 с ДФПГ (k_2) составляет $3,672 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, тогда как константа скорости исходного соединения 2,6-ДТБФ с ДФПГ (k_1) была на порядок ниже и составляла $8,676 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Это указывает на то, что введение в пара-положение гидроксиалкильного заместителя позволяет повысить антирадикальную активность активностью ПЗФ. Реперный ингибитор Ирганокс 1010 проявил сравнимую с НР-1 активность: константа скорости (k_3) составила $3,029 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Проведено исследование термоокислительной стабильности промышленного масла марки И-20А в присутствии 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола. В качестве реперного антиоксиданта использован промышленно применяемый Ирганокс 1010.

Таблица 1 - Результаты испытаний образцов масла И-20А на стабильность против окисления

Table 1 - Results of tests on I-20A oil samples for stability against oxidation

АО	Количество АО, % мас.	Содержание осадка, %	Кислотное число, мг КОН/ 1 г масла	Содержание летучих низкомолекулярных кислот, мг КОН/1 г масла
Контроль	-	0,190	1,476	0,874
Ирганокс-1010	1,00	0,117	0,633	0,081
НР-1	0,25	0,094	1,090	0,417
	1,00	0,075	0,797	0,424

Из экспериментальных данных (табл.1) следует, что 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенол обеспечивает снижение количества осадка при термоокислительном старении промышленного масла на уровне Ирганокса-1010. Однако количество низкомолекулярных кислот и кислотное число в присутствии НР-1 выше, чем при стабилизации масла Ирганоксом-1010.

Заключение

Проведен синтез 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола при атмосферном и повышенном давлении с использованием 2,6-ДТБФ и аллилового спирта. Показано, что проведение синтеза при повышенном давлении позволяет снизить избыточное количество аллилового спирта в сравнении с процессом, проводимом при атмосферном давлении в несколько раз.

Структура 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола подтверждена методами ИК, ЯМР ^1H , ^{13}C спектроскопии.

Впервые проведено исследование кинетики модельной реакции акцептирования радикалов ДФПГ 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)-фенолом. Экспериментально определено, что реакция подчиняется уравнению первого порядка с константой скорости $3,672 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

Исследовано влияние 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенола на стабильность промышленного

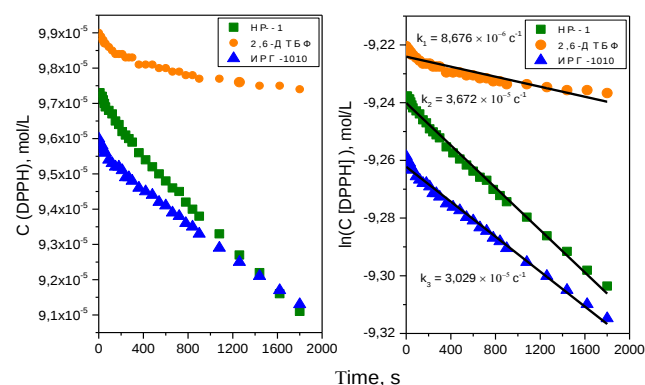


Рис. 5 – Кинетические кривые взаимодействия ДФПГ с 2,6-ДТБФ, НР-1 и Ирганоксом-1010

Fig. 5 – Kinetic curves of interaction between DFPN and 2,6-DTBP, NR-1, and Irganox-1010

ного масла И-20А при термоокислении. Установлено, что 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенол обеспечивает снижение количества осадка при термоокислительном старении промышленного масла на уровне Ирганокса-1010. Однако количество низкомолекулярных кислот и кислотное число в присутствии синтезированного полупродукта выше, чем при стабилизации масла Ирганоксом-1010.

Наличие гидроксиалкильной функциональной группы позволит получать на базе синтезированного 2,6-ди-третбутил-4-(3-гидроксипропил)фенол би- и полифункциональные антиоксиданты.

Литература

1. Э.Ф. Фаизова, Инновации и инвестиции, 10, 382-386, (2019)
2. А.П. Крысин, В.П. Фадеева, О.Н. Никуличева, А.А. Нефедов, Химия в интересах устойчивого развития, 26, 2,149-155, (2018)
3. D.P. Shalymova, E.N. Cherezova, A.G. Liakumovich, Russian Journal of Applied Chemistry, 82, 5, 875-879, (2009)
4. R.M. Akhmadullin, I.A. Karimov, I.F. Akhmetshin, E.A. Kotyrev, D.V. Alimanov, and K.L. Nadelyaev, International Polymer Science and Technology, 7, 45, 303-306, (2018)
5. А.Н. Дорофеев, С.К. Курлянд, Д.Н. Земский, Вестник Технологического университета, 18, 4, 128-129, (2015)
6. С.Ш. Сайгитбадалова, Е.Н. Черезова, А.А. Стародубова, Вестник Технол. ун-та, 25, 8, 158-163, (2022)
7. С.В. Хольшин, В.П. Чеблуква, С.Е. Ягунов, А.С. Олейник, Н.В. Кандалинцева, А.Е. Просенко, Вестник Новосибирского госуд. пед. ун-та, 25, 112-121, (2015)
8. R.M. Akhmadullin, D.R. Gatiyatullin, L.A. Vasil'ev, A.G. Akhmadullina, N.A. Mukmeneva, E.N. Cherezova, Mingshu Yang, Russ. J. Appl. Chem. 88, 833-838, (2015)
9. J. Kruk, B. H. Aboul-Enein, E. Duchnik, M. Marchlewicz, J. Physiol. Sci., 72, 19, (2022)

10. И.А. Новаков, Ю.Д. Соловьева, О.М. Новопольцева, А.В. Кучин, И.Ю. Чукичева, Химическая промышленность сегодня, 12, 25-33, (2012)
11. Старение и стабилизация полимеров, Черезова Е.Н., Нугуманова Г.Н., Карасева Ю.С. изд-во КНОРУС: Москва, (2024)
12. Y. Zhu, X. Liu, Y. Tang, K. Xu, X. Tang, L. Zhu, B. Xiong, ChemistryOpen, 3, 14, (2025)
- 13 Н.А. Мукменева, С.В. Бухаров, Е.Н. Черезова, Г.Н. Нугуманова, Фосфорорганические антиоксиданты и цветостабилизаторы полимеров, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, 2010. 296 с.
14. S.E. Mitrofanova, E.N. Girfanova, I.Yu. Averko-Antonovich, E.N. Cherezova, Russian Journal of Applied Chemistry, 79, 1, 137-141, (2006)
15. A.P. Krysin, N.U. Khalikova, T.B. Khlebnikova, N.I. Nogina, V.I. Mamatyuk, Russian Journal of General Chemistry, 80, 11, 1826-1833, (2010)
16. Пат. РФ 1814807, (1995)
17. I.S. Belostotskaya, V.V. Ershov, Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Khim., 4, 765, (1964)
18. В. С. Кобрин, А. П. Крысин, Н. У. Халикова, В. И. Малявка, В. П. Дунаев, Химия в интересах устойчивого развития, 2, 361-363, (2003)
19. G. Litwinienko, K. U. Ingold, J. Org. Chem., 69, 5888-5896, (2004)
20. R. M. Akhmadullin, M. F. Galiev, G. N. Nugumanova, E. N. Cherezova, A. S. Gazizov, L. V. Verizhnikov, A. G. Akhmadullina, and I. M. Diachkov, Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements, 7, 196, 643-646, (2021)
21. ГОСТ 981-75
22. A.A. Voldkin, A.S. Zaitsev, V.L. Rubyailo, V.A. Belyakov, G.E. Zaikov, Polymer Degradation and Stability, 26, 1, 89-100, (1989)
5. A.N. Dorofeev, S.K. Kurland, D.N. Zemsky, Herald of Technological University, 18, 4, 128-129, (2015)
6. S.Sh. Saygitbatalova, E.N. Cherezova, A.A. Starodubova, Herald of Technological University, 25, 8, 158-163, (2022)
7. S.V. Kholshin, V.P. Cheblukova, S.E. Yagunov, A.S. Oleynik, N.V. Kandalintseva, A.E. Prosenko, Bulletin of the Novosibirsk State Pedagogical University, 25, 112-121, (2015)
8. R.M. Akhmadullin, D.R. Gatiyatullin, L.A. Vasil'ev, A.G. Akhmadullina, N.A. Mukmeneva, E.N. Cherezova, Mingshu Yang, Russ. J. Appl. Chem. 88, 833-838, (2015)
9. J. Kruk, B. H. Aboul-Enein, E. Duchnik, M. Marchlewicz, J. Physiol. Sci., 72, 19, (2022)
10. I.A. Novakov, Yu.D. Solovyeva, O.M. Novopoltseva, A.V. Kuchin, I.Yu. Chukicheva, Chemical Industry Today, 12, 25-33, (2012)
11. Polymer Aging and Stabilization, Cherezova E.N., Nugumanova G.N., Karaseva Yu.S., KNORUS Publishing, Moscow, (2024)
12. Y. Zhu, X. Liu, Y. Tang, K. Xu, X. Tang, L. Zhu, B. Xiong, ChemistryOpen, 3, 14, (2025)
13. N.A. Mukmeneva, S.V. Bukharov, E.N. Cherezova, G.N. Nugumanova, Organophosphorus Antioxidants and Color Stabilizers for Polymers, Kazan National Research Technological University, Kazan, 2010. 296 p.
14. S.E. Mitrofanova, E.N. Girfanova, I.Yu. Averko-Antonovich, E.N. Cherezova, Russian Journal of Applied Chemistry, 79, 1, 137-141, (2006)
15. A.P. Krysin, N.U. Khalikova, T.B. Khlebnikova, N.I. Nogina, V.I. Mamatyuk, Russian Journal of General Chemistry, 80, 11, 1826-1833, (2010)
16. Пат. RU 1814807, (1995)
17. I.S. Belostotskaya, V.V. Ershov, Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Khim., 4, 765, (1964)
18. V.S. Kobrin, A.P. Krysin, N.U. Khalikova, V.I. Malyavka, V.P. Dunayev, Chemistry for Sustainable Development, 2, 361-363, (2003)
19. G. Litwinienko, K. U. Ingold, J. Org. Chem., 69, 5888-5896, (2004)
20. R. M. Akhmadullin, M. F. Galiev, G. N. Nugumanova, E. N. Cherezova, A. S. Gazizov, L. V. Verizhnikov, A. G. Akhmadullina, and I. M. Diachkov, Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements, 7, 196, 643-646, (2021)
21. GOST 981-75
22. A.A. Voldkin, A.S. Zaitsev, V.L. Rubyailo, V.A. Belyakov, G.E. Zaikov, Polymer Degradation and Stability, 26, 1, 89-100, (1989)

References

1. E.F. Faizova, Innovations and Investments, 10, 382-386, (2019)
2. A.P. Krysin, V.P. Fadeeva, O.N. Nikulicheva, A.A. Nefedov, Chemistry for Sustainable Development, 26, 2, 149-155, (2018)
3. D.P. Shalyminova, E.N. Cherezova, A.G. Liakumovich, Russian Journal of Applied Chemistry, 82, 5, 875-879, (2009)
4. R.M. Akhmadullin, I.A. Karimov, I.F. Akhmetshin, E.A. Kotyrev, D.V. Alimanov, and K.L. Nadelyaev, International Polymer Science and Technology, 7, 45, 303-306, (2018)

© **Аль-Базили Навар Махди Халед** – Аспирант, кафедра Технологии синтетического каучука (ТСК), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, nawar1993@mail.ru; **А. М. Багавеев** – Бакалавр, кафедра Химии и технологии переработки эластомеров (ХТПЭ), КНИТУ, bagaveevartur1@gmail.com; **К. Р. Гизутдинов** – Специалист, Химический институт им. Бутлерова, Казанский Федеральный Университет, karim01112006@gmail.com; **Я. А. Жукова** – Бакалавр, кафедра ТСК, КНИТУ, irinasovina6@gmail.com; **М. Р. Морьякова** – Бакалавр, кафедра ТСК, КНИТУ, maryanamor2005@gmail.com; **Э. А. Качаева** – магистр, кафедра Общей химической технологии, КНИТУ, kachaeva.elana@gmail.com; **Л. Г. Утивленова** – Инженер бренда «ЛАМИТТА», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, u.liliya.g@gmail.com; **И. З. Файзуллин** – Кандидат технических наук, кафедра ХТПЭ, КНИТУ, ilnur-fz@mail.ru; **Е. Н. Черезова** – Доктор химических наук, кафедра ТСК, КНИТУ, cherezova59@mail.ru; **С. И. Вольфсон** – Доктор технических наук, кафедра ХТПЭ, КНИТУ, svolfson@kstu.ru; **Р. М. Ахмадуллин** – Кандидат химических наук, Генеральный директор, ООО НТЦ «Ахмадуллины», Казань, Россия, ahmadullins@gmail.com

© **Al-Basili Navar Mahdi Khaled** – PhD-Student, Department of Synthetic Rubber Technology (SRT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, nawar1993@mail.ru; **A. M. Bagaveev** – Bachelor-student, department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing (CTEP), KNRTU, bagaveevartur1@gmail.com; **K. R. Gizutdinov** – Specialist, Butlerov Institute of Chemistry, Kazan Federal University, karim01112006@gmail.com; **Ya. A. Zhukova** – Bachelor-student, the SRT department, KNRTU, irinasovina6@gmail.com; **M. R. Moryakova** – Bachelor-student, the SRT department, KNRTU, maryanamor2005@gmail.com; **E. A. Kachaeva** – Master-student, Department of General Chemical Technology, KNRTU, kachaeva.elana@gmail.com; **L. G. Utivenova** – Engineer of the "LAMITTA" brand, Kazan National Research Technical University named after Tupolev, u.liliya.g@gmail.com; **I. Z. Fayzullin** – PhD (Technical Sci.), the CTEP department, KNRTU, ilnur-fz@mail.ru; **E. N. Cherezova** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), the SRT department, KNRTU, cherezova59@mail.ru; **S. I. Wolfson** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), the CTEP department, KNRTU, svolfson@kstu.ru; **R. M. Akhmadullin** – PhD (Chemical Sci.), General Director, LLC STC "Akhmadullins", Kazan, Russia, ahmadullins@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 29.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 21.05.25.