

УДК 678.046:547.565.2

Е. П. Усс¹, Ж. С. Шашок¹, Н. Р. Прокопчук¹, О. А. Кротова¹, О. И. Шадыро², Г. А. Ксендзова²¹Белорусский государственный технологический университет²Учреждение Белорусского государственного университета

«Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»

**ВЛИЯНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ДОБАВОК
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Исследована эффективность применения новых производных пространственно-затрудненных пирокатехинов в качестве противостарителей в рецептурах наполненных эластомерных композиций на основе комбинации синтетических полиизопренового и полибутадиенового каучуков. Установлено влияние производных пирокатехинов на упруго-прочностные свойства вулканизатов, стойкость резин к термическому старению в среде воздуха, а также их сопротивление разрастанию трещин при многократном изгибе. Исследуемые стабилизаторы различаются типом, количеством и пространственным расположением заместителей в бензольном кольце. Данные ингредиенты вводились в резиновые смеси в дозировках 1,0 и 2,0 мас. ч. на 100,0 мас. ч. каучука. В качестве образца сравнения использовались эластомерные композиции, содержащие промышленный стабилизатор 2,6-ди-*tert*-бутил-4-метилфенол (ионол, ВНТ). Определено, что опытные противостарители имеют более низкую летучесть по сравнению с наиболее известным и эффективным промышленным стабилизатором ионолом. Выявлено, что характер изменения упруго-прочностных свойств эластомерных композиций, содержащих синтезированные противостарители, определяется природой и дозировкой стабилизаторов. Показано, что применение в резиновых смесях новых стабилизирующих добавок приводит к получению вулканизатов, обладающих повышенной стойкостью к воздействию повышенных температур и к разрастанию трещин при продольном изгибе.

Ключевые слова: эластомерная композиция, стабилизирующая добавка, пространственно-затрудненные дифенолы, прочность, теплостойкость, динамическая выносливость.

Для цитирования: Усс Е. П., Шашок Ж. С., Прокопчук Н. Р., Кротова О. А., Шадыро О. И., Ксендзова Г. А. Влияние стабилизирующих добавок на эксплуатационные свойства эластомерных композиций // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 1 (241). С. 101–107.

E. P. Uss¹, Zh. S. Shashok¹, N. R. Prokopchuk¹, O. A. Krotova¹, O. I. Shadyro², G. A. Ksendzova²¹Belarusian State Technological University²Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University**THE EFFECT OF STABILIZING ADDITIVES ON THE OPERATIONAL
PROPERTIES OF ELASTOMERIC COMPOSITIONS**

The effectiveness of using new derivatives of hindered pyrocatechols as antioxidants in the formulations of filled elastomeric compositions based on a combination of synthetic polyisoprene and polybutadiene rubbers was investigated. The effect of pyrocatechol derivatives on the elastic-strength properties of vulcanizates, the resistance of rubbers to thermal aging in air, as well as their resistance to crack growth under repeated bending was established. The investigated stabilizers differ in the type, number, and spatial arrangement of substituents in the benzene ring. These ingredients were introduced into rubber mixtures in dosages of 1.0 and 2.0 phr. Elastomeric compositions containing industrial stabilizer 2,6-di-*tert*-butyl-4-methylphenol (ionol, BHT) were used as a comparison sample. It was determined that the experienced antioxidants have a lower volatility in comparison with the most well-known and effective industrial stabilizer ionol. It was found that the nature of the change in the elastic-strength properties of elastomeric compositions containing synthesized antioxidants was determined by nature and dosage of stabilizers. It was shown that the use of new stabilizing additives in rubber mixes leads to the production of vulcanizates with increased resistance to high temperatures and crack growth during buckling.

Key words: elastomeric composition, stabilizing additive, spatially hindered diphenols, strength, heat resistance, dynamic endurance.

For citation: Uss E. P., Shashok Zh. S., Prokopchuk N. R., Krotova O. A., Shadyro O. I., Ksendzova G. A. The effect of stabilizing additives on the operational properties of elastomeric compositions. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 1 (241), pp. 101–107 (In Russian).

Введение. Повышение долговечности и работоспособности изделий из эластомеров – достаточно сложная задача, поскольку при хранении и эксплуатации резиновые изделия подвергаются действию кислорода, озона, света, температуры и излучений, статических и динамических нагрузок либо совместному действию этих факторов, которые инициируют процессы окисления, приводящие к деструкции резин и преждевременному выходу из строя деталей и конструкций. Эффективным способом решения этой проблемы является стабилизация эластомерных композиций путем введения противостарителей (стабилизаторов) на основе замещенных аминов и фенолов.

В промышленности пространственно-затрудненные фенолы (ПЗФ) находят достаточно широкое применение в качестве противостарителей эластомерных композиций, прежде всего благодаря их низкой токсичности и достаточно высокой эффективности антиокислительного действия. Однако для фенольных противостарителей характерна высокая летучесть в процессах переработки резиновых смесей, что снижает их срок действия, а следовательно, и срок службы резиновых изделий. Кроме того, высокая диффузионная активность некоторых фенольных стабилизаторов приводит к их миграции на поверхность резины, что также ведет к неэффективному их расходованию [1–8].

Перспективные разработки в области синтеза стабилизаторов на основе производных пространственно-затрудненных дифенолов в Республике Беларусь проводятся в лаборатории химии свободнорадикальных процессов учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (НИИ ФХП БГУ). В работах [9–11] было показано, что производные пространственно-затрудненных дифенолов способны эффективно регулировать радиационно-индуцированные свободнорадикальные процессы с участием кислород- и углеродцентрированных радикалов. В связи с этим актуальным представлялось исследование антиокислительного действия новых соединений класса замещенных фенолов в качестве стабилизаторов эластомерных материалов, что позволит расширить ассортимент стабилизирующих добавок, получить резинотехнические изделия с улучшенными эксплуатационными свойствами, продлить их срок службы, сократить импорт стабилизаторов, а значит, повысить экономическую и экологическую эффективность производства резинотехнических изделий.

Основная часть. Целью работы являлось исследование влияния стабилизирующих добавок на основе пространственно-затрудненных

дифенолов на стойкость наполненных эластомерных композиций к воздействию температурно-силовых полей.

Объектами исследования являлись наполненные эластомерные композиции на основе комбинации синтетических полиизопренового и полибутадиенового каучуков, применяемые для производства формовых резинотехнических изделий. В качестве стабилизирующих добавок исследовались следующие производные пространственно-затрудненных пирокатехинов: 3-морфолино-метил-5-*трет*-бутил-1,2-дигидроксисбензол (стабилизатор 1), 3-пиперидинометил-5-*трет*-бутил-1,2-дигидроксисбензол (стабилизатор 2), 3-(1-азепанилметил)-5-*трет*-бутил-1,2-дигидроксисбензол (стабилизатор 3), 4,6-ди-*трет*-бутил-3-(4-гидроксифенилиминометил)-1,2-дигидроксисбензол (стабилизатор 4). Данные добавки вводились в наполненные резиновые смеси в дозировках 1,0 и 2,0 мас. ч. На 100 мас. ч. каучука. Оценка эффективности стабилизирующего действия исследуемых добавок проводилась в сравнении с наиболее часто применяемым в промышленности фенольным противостарителем 2,6-ди-*трет*-бутил-4-метилфенолом (ионол, ВНТ), который вводился в резиновые смеси в равнозначных дозировках.

Упруго-прочностные характеристики образцов определяли на разрывной машине Тензометр Т 220 DC в соответствии с ГОСТ 270–75. Стойкость образцов к термическому старению в среде воздуха оценивали по изменению относительного удлинения при разрыве и условной прочности при растяжении после выдержки их в термостате при температуре 100°C в течение 72 ч, испытание проводили в соответствии с ГОСТ 9.024–74. Определение сопротивления резин разрастанию трещин при испытании на многократный изгиб проводили на образцах с проколом при температуре 70°C на машине De Mattia Flex Testing по ГОСТ 9983–74 (метод Б). Относительную летучесть исследуемых противостарителей определяли при температуре 120°C по потере массы образца в течение 60 мин.

Летучесть веществ зависит от молекулярной массы, межмолекулярного взаимодействия, степени кристалличности, дефектности кристаллов, полярности молекулы, агрегатного и фазового состояния вещества, его удельной поверхности, а также от ряда внешних условий: температуры, давления, присутствия другого компонента, влажности воздуха и др. [12].

Известно [12], что среди фенольных стабилизаторов наибольшей летучестью обладают такие, как 4-метил-2,6-ди-*трет*-бутилфенол (ионол) и 2,4,6-три-*трет*-бутилфенол (П-23). Имеющиеся в молекуле фенола экранирующие заместители в *орто*-положении к гидроксилу

создают препятствия к образованию водородных связей, способствуя возрастанию летучести соединения, так как при этом уменьшается возможность межмолекулярного взаимодействия в стабилизаторах. В связи с этим сильная летучесть стабилизаторов ограничивает сферу их применения, особенно тогда, когда возможно воздействие высоких температур, и при наличии циркуляции воздуха на поверхности полимерного изделия. Кроме того, нежелательно применение сильно летучих противостарителей и в тех случаях, когда важно сохранение их в материале на весь период эксплуатации изделий [12].

Для уменьшения летучести фенольных стабилизаторов в их молекулу в *para*-положение к гидроксильной группе целесообразно вводить относительно «тяжелый» заместитель или применять бис- или трисфенолы, механизм действия которых в принципе не отличается от механизма действия монофенолов [12].

Оценка относительной летучести исследуемых стабилизаторов показала, что все опытные стабилизаторы обладают более низкой летучестью по сравнению с наиболее известным и эффективным промышленным противостарителем – ионолом. В данном случае показатель относительной летучести для опытных образцов изменяется в пределах от 3,1 до 7,9 мас. %, а для ионола он составляет 43,3 мас. %. Изменение летучести может быть связано с более высокими значениями температур плавления соединений класса ПЗФ и величинами их молекулярных масс, а также с расположением заместителя в бензольном кольце.

При эксплуатации изделий резина, как правило, не подвергается большим деформациям, приближающимся к разрывным, но в лабораторной практике испытания резины на разрыв применяются очень широко, так как в этих условиях наиболее наглядно проявляются ее специфические свойства. Для определения прочности при растяжении и относительного удлинения стандартизован метод, заключающийся в растяжении образцов с постоянной скоростью при заданной температуре до разрыва. Прочностные свойства резин зависят от типа каучука, состава резиновой смеси, степени вулканизации, распределения и типа поперечных связей и других факторов [13, 14]. Результаты исследования упруго-прочностных показателей резин со стабилизаторами представлены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, с увеличением дозировки от 1,0 до 2,0 мас. ч. промышленного стабилизатора в составе эластомерной композиции наибольшее изменение (увеличение на 34,3%) выявлено для показателя «условное напряжение при 300%-ном удлинении». Определено, что введение в различных дозировках производных 4-*трет*-бутил-1,2-дигидроксibenзола,

различающихся циклоаминометильным заместителем (стабилизаторы 1, 2 и 3), оказывает схожий характер на изменение упруго-прочностных характеристик исследуемых эластомерных композиций. При этом в отличие от промышленного стабилизатора ионола применение указанных добавок при увеличении их дозировки до 2,0 мас. ч. приводит к снижению модуля 300% на 16,2–34,2%, за исключением образца со стабилизатором 1 (в данном случае дозировка не оказывает влияния на изменение показателя f_e). При этом относительное удлинение при разрыве резин с данными стабилизаторами увеличивается до 12,5%, а условная прочность при растяжении изменяется в пределах погрешности ГОСТ 270–75, исключение составляет образец со стабилизатором 2 в дозировке 2,0 мас. ч. (прочность при растяжении уменьшается на 11,8%).

Таблица 1

Упруго-прочностные показатели резин с исследуемыми стабилизаторами

Наименование стабилизатора	Дозировка стабилизатора на 100 мас. ч. каучука, мас. ч.	f_e , МПа	f_p , МПа	ϵ_p , %
Ионол	1,0	3,5	12,9	735
	2,0	4,7	13,6	760
Стабилизатор 1	1,0	3,9	13,2	735
	2,0	3,9	13,0	815
Стабилизатор 2	1,0	3,7	12,9	710
	2,0	3,2	12,0	850
Стабилизатор 3	1,0	3,5	12,4	750
	2,0	3,1	12,4	855
Стабилизатор 4	1,0	4,7	12,9	635
	2,0	5,3	14,0	705

Примечание: f_e – условное напряжение при 300%-ном удлинении (модуль 300%), МПа; f_p – условная прочность при растяжении, МПа; ϵ_p – относительное удлинение при разрыве, %.

При использовании иминосодержащего фенольного стабилизатора 4 в дозировке 1,0 мас. ч. в составе исследуемой эластомерной композиции установлено увеличение модуля 300% резины на 35,5%, причем с повышением содержания стабилизатора 1 данный показатель практически не изменяется. В то же время в присутствии стабилизатора 4 эластичность резины снижается до 13,6% в зависимости от дозировки, а значения условной прочности при растяжении находятся на уровне образца сравнения. Такой характер изменения упруго-прочностных показателей резин на основе каучуков общего назначения при введении в них опытных фенольных стабилизаторов, вероятно, обусловлен особенностями

их молекулярного строения и количественным содержанием, их совместимостью с эластомерной матрицей и диспергирующей способностью в ней, а также возможным их влиянием на процесс формирования пространственной структуры вулканизатов и природу образующихся в них поперечных связей.

Одной из основных характеристик действия противостарителей является сохранение прочностных характеристик после воздействия повышенных температур и агрессивных сред. В процессе эксплуатации при воздействии указанных факторов возможна быстрая потеря противостарителя, что может вызвать разрушение изделия [13]. При действии повышенных температур в каучуках происходит разрыв углерод-углеродных связей в цепи или отрыв водорода от СН-группы, что сопровождается образованием свободных радикалов. В результате этих процессов протекает деструкция макромолекул, происходит выделение жидких и газообразных продуктов, мономеров, циклических структур, олигомеров. Возможно также беспорядочное сшивание макромолекул за счет взаимодействия полимерных радикалов и образование разветвленных и сшитых структур [15]. Характер и скорость этих процессов зависят от типа каучука, состава резиновой смеси, температуры, механического воздействия, окружающей среды [13]. Воздействие температуры и кислорода воздуха приводит к распаду полисульфидных связей, при этом данный процесс происходит несоизмеримо быстрее окислительного распада макромолекул каучука. Термический распад полисульфидных связей сопровождается снижением степени их полисульфидности и выделением серы, которая может в дальнейшем участвовать в образовании новых связей [16].

Для установления влияния исследуемых компонентов на структуру поперечных связей было определено изменение относительного удлинения при разрыве исследуемых резин после теплового старения (рисунок).



Изменение относительного удлинения при разрыве после теплового старения

Из представленных данных видно, что введение всех опытных стабилизаторов в дозировке 1,0 мас. ч. в наполненные эластомерные композиции позволяет получать резины, не уступающие или превосходящие по термоокислительной стойкости образец с промышленным стабилизатором. Так, изменение относительного удлинения при разрыве для резин с исследуемыми стабилизаторами составляют $\Delta\epsilon = -59,2 \dots -40,2\%$, а для образца сравнения $\Delta\epsilon = -61,9\%$. Наибольшей стойкостью к тепловому старению обладает образец с иминосодержащим стабилизатором 4 в дозировке 1,0 мас. ч. При этом с увеличением количественного содержания стабилизаторов в резиновых смесях их защитное действие сохраняется на уровне образца сравнения, что может быть связано с растворимостью данных добавок в каучуке. Установлено, что применение в составе резиновых смесей стабилизаторов 1–4 в дозировке 2,0 мас. ч. приводит к получению резин, характеризующихся более высокой стойкостью к воздействию повышенной температуры по сравнению с другими исследуемыми вулканизатами. Следует отметить, что для образца, содержащего стабилизатор 4, наибольший защитный эффект проявляется в дозировке 1,0 мас. ч. Таким образом, эффективность защитного действия исследуемых стабилизирующих добавок в составе наполненных эластомерных композиций на основе комбинации синтетических полиизопренового и полибутадиенового каучуков в процессе теплового старения прежде всего связана с их химическим строением. Наличие в структуре добавок различных функциональных групп и различного количества *трет*-бутильных групп способствует предотвращению структурирования или деструкции полимерных цепей и сохранению механических свойств резин под действием термоокислительных процессов.

Разрушение резин при многократных деформациях является более сложным процессом, чем простое механическое разрушение. Под динамической усталостью (или утомлением) резины понимается процесс изменения свойств материалов и его структуры, происходящий под воздействием многократных периодических нагрузок или деформаций. Усталостная выносливость при динамическом утомлении оценивается числом циклов нагружения, которое может выдержать до разрушения образец материала в регламентированных условиях испытания. Утомление резин при циклическом нагружении является результатом сложного комплекса физических и химических процессов, активированных механическим напряжением [15]. В табл. 2 представлены результаты исследований резин по сопротивлению разрастанию трещин при

многократном изгибе при температуре 70°C. В качестве образца сравнения использовали также широко распространенный противооутомитель аминного типа – N-(1,3-диметилбутил)-N'-фенил-*n*-фенилендиамин (6PPD).

Таблица 2

Сопротивление резин разрастанию трещин при многократном изгибе

Наименование стабилизатора	Дозировка стабилизатора на 100 мас. ч. каучука, мас. ч.	Сопротивление разрастанию трещин, тыс. циклов
Ионол	1,0	67,5
	2,0	82,5
6PPD	1,0	655,7
	2,0	Более 1225,0
Стабилизатор 1	1,0	172,3
	2,0	222,0
Стабилизатор 2	1,0	320,5
	2,0	559,0
Стабилизатор 3	1,0	642,3
	2,0	Более 1225,0
Стабилизатор 4	1,0	258,9
	2,0	219,8

Анализ полученных данных показал, что в условиях воздействия многократных циклических деформаций резины, содержащие опытные стабилизаторы во всех исследуемых дозировках, обеспечивают повышенную стойкость вулканизатов к разрастанию трещин при продольном изгибе при действии повышенной температуры 70°C по сравнению с промышленным противостарителем ионолом. Так, сопротивление многократному изгибу для резин с ионолом составляет 67,5–82,5 тыс. циклов в зависимости от дозировки, а для резин с опытными стабилизаторами выявлено увеличение показателя более чем в 2,6 раза. Следует отметить, что

с увеличением дозировки исследуемых стабилизаторов 1–3 сопротивление росту трещин резин при многократном изгибе возрастает. Наибольшая изгибоустойчивость определена для резин с 3-(1-азепанилметил)-5-*трет*-бутил-1,2-дигидроксibenзолом (стабилизатор 3). При этом резина с указанной добавкой по сопротивлению многократному изгибу при повышенной температуре не уступает резине с известным аминным противооутомителем 6PPD. Такой характер изменения скорости разрастания трещин при повышенной температуре исследуемых резин при использовании новых стабилизирующих добавок может быть обусловлен их меньшей летучестью с поверхности резинового образца по сравнению с ионолом. Кроме того, существенное влияние на динамическую выносливость может оказывать плотность вулканизационной сетки резин, определяющая в значительной мере механические потери резин при различных режимах нагружения [15].

Заключение. Проведенные исследования показали возможность использования новых производных пирокатехинов в качестве противостарителей наполненных эластомерных композиций на основе комбинации синтетических полиизопренового и полибутадиенового каучуков, не уступающих по антиокислительной активности широко применяемому в резиновой промышленности ионолу и существенно превосходящих последний по относительной летучести при повышенной температуре. При этом эффективность действия новых стабилизаторов зависит от строения объемных заместителей, их количества и взаимного расположения в молекуле стабилизатора, а также от дозировки вводимого стабилизатора. Установлено, что 3-(1-азепанилметил)-5-*трет*-бутил-1,2-дигидроксibenзол может являться комплексным стабилизатором, эффективно защищающим резины на основе непредельных каучуков от теплового старения и многократных циклических деформаций.

Список литературы

1. Заиков Г. Е. Старение и стабилизация полимеров (кому и зачем это надо? Исторический аспект) // Каучук и резина. 2008. № 4. С. 10–13.
2. Модификация свойств эластомерных композиций: монография / Н. Р. Прокопчук [и др.]. Минск: БГТУ, 2012. 218 с.
3. Кочнев А. М., Галибеев С. С. Модификация полимеров: монография. Казань: КГТУ, 2008. 533 с.
4. Пиотровский К. Б., Тарасова З. Н. Старение и стабилизация синтетических каучуков и вулканизатов. М.: Химия, 1980. 264 с.
5. Экологические аспекты модификации ингредиентов и технологии производства шин: учебник / А. А. Мухутдинов [и др.]. Казань: ФЭН, 1999. 400 с.
6. Загоскина Н. В., Бурлакова Е. Б. Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты: монография. М.: Научный мир, 2010. 399 с.
7. Thermo-oxidative aging resistance and mechanism of a macromolecular hindered phenol antioxidant for natural rubber / W. Wu [et al.] // Journal of Elastomers & Plastics, 2017. Vol. 50, issue 4. P. 372–387.

8. Thermal antioxidation behavior of a new hindered phenol with branched structure for nitrile rubber / L. Zhang [et al.] // *International Journal of Modern Physics*. 2019. Vol. 33, No. 01n03. DOI: 10.1142/S0217979219400587.

9. Синтез и антиокислительные свойства некоторых производных алкилированного пирокатехина / Л. А. Масловская [и др.] // *Журнал общей химии*. 1996. Т. 66, № 11. С. 1893–1898.

10. Effects of phenolic compounds on reactions involving various organic radicals / O. I. Shadyro [et al.] // *Free Rad. Res.* 2003. Vol. 37. P. 1087–1097.

11. Синтез производных 3,5-ди-трет-бутил-1,2-дигидроксibenзола и их влияние на свободнорадикальное окисление гексана и кислородоактивирующую способность нейтрофилов / Г. А. Ксендзова [и др.] // *Журнал общей химии*. 2019. Т. 89, № 3. С. 357–365.

12. Основы экологизации процессов применения фенол- и аминсодержащих ингибиторов старения шинных резин: монография / А. А. Мухутдинов [и др.]. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. 116 с.

13. Федюкин Д. Л., Махлис Ф. А. Технические и технологические свойства резин. М.: Химия, 1985. 240 с.

14. Бергштейн Л. А. Лабораторный практикум по технологии резины. Л.: Химия, 1989. 248 с.

15. Жовнер Н. А., Чиркова Н. В., Хлебов Г. А. Структура и свойства материалов на основе эластомеров. Омск: Филиал РосЗИТЛП, 2003. 276 с.

16. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов: учеб. для вузов. М.: Истек, 2009. 502 с.

References

1. Zaikov G. E. Aging and stabilization of polymers (who needs it and why? Historical aspect). *Kauchuk i rezina* [Kauchuk and rubber], 2008, no. 4, pp. 10–13 (In Russian).

2. Prokopchuk N. R., Shashok Zh. S., Kasperovich A. V., Tashlykov I. S. *Modifikatsiya svoystv elastomernykh kompozitsiy: monografiya* [Modification of the properties of elastomeric compositions]. Minsk, BGTU Publ., 2012. 218 p.

3. Kochnev A. M., Galibeev S. S. *Modifikatsiya polimerov: monografiya* [Polymer modification]. Kazan', KGTU Publ., 2008. 533 p.

4. Piotrovskiy K. B., Tarasova Z. N. *Starenie i stabilizatsiya sinteticheskikh kauchukov i vulkanizatov* [Aging and stabilization of synthetic rubbers and vulcanizates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 264 p.

5. Mukhutdinov A. A., Nelyubin A. A., Il'yasov R. S., Ishchenko G. M., Zelenova V. N. *Ekologicheskie aspekty modifikatsii ingredientov i tekhnologii proizvodstva shin: uchebnik* [Environmental aspects of ingredient modification and tire manufacturing technology: textbook]. Kazan', Fen Publ., 1999. 400 p.

6. Zagoskina N. V., Burlakova E. B. *Fenol'nye soedineniya: fundamental'nye i prikladnye aspekty: monografiya* [Phenolic compounds: fundamental and applied aspects: monograph]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2010. 399 p.

7. Wu W., Yang S., Lai X., Li H. Thermo-oxidative aging resistance and mechanism of a macromolecular hindered phenol antioxidant for natural rubber. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2017, vol. 50, issue 4, pp. 372–387.

8. Zhang L., Fan X., Cai Z., Liu J. Thermal antioxidation behavior of a new hindered phenol with branched structure for nitrile rubber. *International Journal of Modern Physics*, 2019, vol. 33, no. 01n03. DOI: 10.1142/S0217979219400587.

9. Maslovskaya L. A., Petrikevich D. K., Timoshchuk V. A., Shadyro O. I. Synthesis and antioxidant properties of certain derivatives of alkylated pyrocatechol. *Zhurnal obshchey khimii* [Journal of General Chemistry], 1996, vol. 66, no. 11, pp. 1893–1898 (In Russian).

10. Shadyro O. I., Edimecheva I. P., Glushonok G. K., Ostrovskaya N. I., Polozov G. I., Murase H., Kagiya T. Effects of phenolic compounds on reactions involving various organic radicals. *Free Rad. Res.*, 2003, vol. 37, pp. 1087–1097.

11. Ksendzova G. A., Ostrovskaya N. I., Semenkova G. N., Sorokin V. L., Shishkanova P. A., Shadyro O. I. Synthesis of 3,5-di-tert-butyl-1,2-dihydroxybenzene derivatives and their effect on free radical oxidation of hexane and oxygen activation ability of neutrophils. *Russian Journal of General Chemistry*, 2019, vol. 89, no. 3, pp. 391–398.

12. Muhutdinov A. A., Muhutdinov Je. A., Sol'yashinova O. A., Karimova L. H. *Osnovy ekologizatsii protsessov primeneniya fenol- i aminsoderzhashchikh ingibitorov stareniya shinnykh rezin: monografiya* [Fundamentals of greening the processes of using phenol- and amine-containing inhibitors of tire rubber aging: monograph]. Kazan', KNITU Publ., 2012. 116 p.

13. Feduykin D. L., Makhlis F. A. *Tekhnicheskie i tekhnologicheskie svoystva rezin* [Technical and technological properties of rubbers]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p.

14. Bergshteyn L. A. *Laboratornyy praktikum po tehnologii reziny* [Laboratory workshop on rubber technology]. Leningrad, Khimiya Publ., 1989. 248 p.
15. Zhovner N. A., Chirkova N. V., Khlebov G. A. *Struktura i svoystva materialov na osnove elastomerov* [Structure and properties of materials based on elastomers]. Omsk, Filial RosZITLP Publ., 2003. 276 p.
16. Kornev A. E., Bukanov A. M., Sheverdyayev O. N. *Tekhnologiya elastomernykh materialov: ucheb. dlya vuzov* [Elastomeric material technology: textbook]. Moscow, Istek Publ., 2009. 502 p.

Информация об авторах

Усс Елена Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: uss@belstu.by

Шашок Жанна Станиславовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shashok@belstu.by

Прокопчук Николай Романович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nprok@gmail.com

Кротова Ольга Александровна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: o.krotova@belstu.by

Шадыро Олег Иосифович – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией химии свободнорадикальных процессов. Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (220050, г. Минск, ул. Ленинградская, 14, Республика Беларусь). E-mail: shadyro@tut.by

Ксендзова Галина Анатольевна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии свободнорадикальных процессов. Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (220050, г. Минск, ул. Ленинградская, 14, Республика Беларусь). E-mail: ksja-bn@tut.by

Information about the authors

Uss Elena Petrovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: uss@belstu.by

Shashok Zhanna Stanislavovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shashok@belstu.by

Prokopchuk Nikolay Romanovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor of the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus) E-mail: nrprok@gmail.com

Krotova Olga Aleksandrovna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.krotova@belstu.by

Shadyro Oleg Iosifovich – DSc (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory of Chemistry of Free Radical Processes. Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shadyro@tut.by

Ksendzova Galina Anatolievna – PhD (Chemistry), Leading Researcher of the Laboratory of Chemistry of Free Radical Processes. Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ksja-bn@tut.by

Поступила 11.11.2020