**СИНТЕЗ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ
И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**
**SYNTHESIS AND PROCESSING OF POLYMERS
AND POLYMERIC COMPOSITES**

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-5-46-53>

УДК 678

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние железорудного концентрата (магнетита) на кинетику вулканизации резиновых смесей на основе бутадиен-стирольного каучука в присутствии различных ускорителей

А.А. Хачатуров[@], Е.Э. Потапов, С.В. Резниченко, А.Н. Ковалева

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: ха4арам@mail.ru

Цели. Изучить возможность применения в рецептурах резиновых смесей на основе бутадиен-стирольного каучука более дешевого ингредиента – магнетита путем оценки его влияния на процесс серной вулканизации бутадиен-стирольного каучука в присутствии различных ускорителей.

Методы. Влияние магнетита на кинетику вулканизации исследовали с помощью безроторного реометра AlphaTechnologies PRPA 2000. Методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) оценили влияние магнетита на процесс окисления вулканизатов на основе бутадиен-стирольного каучука на приборе Mettler Toledo TGA/DSC 2.

Результаты. Показано, что магнетит влияет на кинетику серной вулканизации бутадиен-стирольного каучука SBR-1500 в присутствии ускорителей тиазолового ряда (дибензотиазолдисульфид, 2-меркаптобензотиазол), в то время как в случае с 1,3-дифенилгуанидином, сульфенамидом Т (N-трет-бутил-2-бензтиазолсульфенамид) и тирамом (тетраметилтиурамдисульфид) магнетит малоактивен. Данные, полученные с ТГА/ДСК, демонстрируют, что магнетит незначительно влияет на окисление, а также на термодеструкцию вулканизатов на основе бутадиен-стирольного каучука.

Выводы. Исследовано влияние магнетита на кинетику процесса серной вулканизации бутадиен-стирольного каучука в присутствии различных ускорителей. Наибольший эффект наблюдается в присутствии ускорителей тиазолового ряда.

Ключевые слова: железорудный концентрат, магнетит, бутадиен-стирольный каучук, активатор вулканизации, кинетика вулканизации, термогравиметрический анализ, дифференциально-сканирующая калориметрия

Для цитирования: Хачатуров А.А., Потапов Е.Э., Резниченко С.В., Ковалева А.Н. Влияние железорудного концентрата (магнетита) на кинетику вулканизации резиновых смесей на основе бутадиен-стирольного каучука в присутствии различных ускорителей. *Тонкие химические технологии.* 2020;15(5):46-53.
<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-5-46-53>

RESEARCH ARTICLE

Influence of iron ore concentrate (magnetite) on the kinetics of butadiene–styrene rubber-based blend curing in the presence of different accelerators

Aram A. Khachaturov[@], Evgeniy E. Potapov, Sergei V. Reznichenko, Anna N. Kovaleva

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@]Corresponding author, e-mail: xa4aram@mail.ru

Objectives. To investigate the possibility of using a cheaper ingredient, such as magnetite, in the synthesis of rubber compounds based on butadiene–styrene rubber by examining its effect on the process of sulfuric vulcanization of butadiene–styrene rubber in the presence of various accelerators.

Methods. The influence of magnetite on the vulcanization kinetics was studied using an Alpha Technologies PRPA 2000 rotorless rheometer. Thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC) were performed using a Mettler Toledo TGA/DSC 2 device to evaluate the effect of magnetite on the butadiene–styrene rubber-based vulcanizates' oxidation.

Results. Magnetite was found to affect the kinetics of SBR-1500 butadiene–styrene rubber sulfuric vulcanization in the presence of thiazole-type accelerators (2-MBT, 2-MBS); in contrast, magnetite was inactive in the case of diphenylguanidine, sulfenamide T, and tetramethylthiuram disulfide. The obtained TGA/DSC data showed that magnetite has no significant effect on the butadiene–styrene rubber-based vulcanizates' oxidation and thermal destruction.

Conclusions. The obtained data confirmed magnetite's capability to act as a butadiene–styrene rubber sulfuric vulcanization activator in the presence of various accelerators. The most significant effect was observed in the presence of thiazole-type accelerators.

Keywords: iron ore concentrate, magnetite, butadiene–styrene rubber, vulcanization activator, kinetics of curing, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry

For citation: Khachaturov A.A., Potapov E.E., Reznichenko S.V., Kovaleva A.N. Influence of iron ore concentrate (magnetite) on the kinetics of butadiene–styrene rubber-based blend curing in the presence of different accelerators. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2020;15(5):46-53 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-5-46-53>

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей в производстве серийных эластомерных изделий является выбор компонентов рецептуры резиновых смесей. В процессе разработки нового изделия необходимо учитывать три основных составляющих рецептуростроения: свойства, технологичность и цену эластомерного материала [1]. При этом для производственной сферы все вышеперечисленные составляющие являются чрезвычайно важными. Например, некоторые ингредиенты могут значительно улучшать параметры вулканизации и свойства конечного продукта, однако ввиду многократного увеличения стоимости таких изделий они становятся неконкурентоспособными на рынке. Другими словами, перед разра-

ботчиком рецептуры стоит задача улучшить качество изделия, придать ему комплекс новых свойств, уменьшить концентрацию дорогостоящих ингредиентов системы, снизить стоимость без ухудшения технологических характеристик смесей и снижения эксплуатационных свойств готового изделия. Поэтому поиск новых ингредиентов резиновых смесей является актуальной задачей [2–5].

В ходе предыдущих работ [6, 7] было исследовано влияние магнетита на кинетику вулканизации бутадиен-стирольного каучука СК-30 АРК в отсутствие оксида цинка и показано, что магнетит способен проявлять себя в качестве активатора серной вулканизации. Характеристики вулканизатов, полученных с его использованием, незначительно уступают свойствам стандартных резин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основная задача данной работы заключалась в исследовании кинетики вулканизации саженнаполненных эластомерных материалов на основе бутадиен-стирольного каучука SBR-1500 в присутствии классической вулканизирующей группы, а также других ускорителей серной вулканизации с целью показать возможность применения магнетита в составе серной вулканизирующей системы в качестве активного компонента, улучшающего вулканизационные параметры резиновых смесей. Кроме того, характер изменения кривых термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) вулканизатов на основе SBR-1500 позволил оценить влияние различного содержания магнетита на процесс старения.

В качестве объекта исследования в данной работе использовали железорудный концентрат с массовой долей железа более 69.5%, ТУ 0712-030-001186803-99 (АО «Лебединский горно-обогатительный комбинат», Россия).

Дисперсность порошка железорудного концентрата исследовали на лазерном дифрактометре Analysette 22 MicroTec Plus производства *Fritsch GmbH*, Германия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение частиц по размеру (рис. 1) унимодалное (от 0.1 до 100 мкм). Максимум дифференциального распределения объемной доли частиц dQ приходится на частицы размером около 20 мкм. Интегральная зависимость объемной доли частиц Q от размеров показывает, что 50% частиц железорудного концентрата имеют размер меньше 15 мкм, а 90% менее 40 мкм.

Рис. 1. Дифференциальная dQ (1) и интегральная Q (2) кривые распределения частиц железорудного концентрата по размерам (Analysette 22 MicroTec Plus, *Fritsch GmbH*, Германия).

Fig. 1. Differential dQ (1) and integral Q (2) curves of iron ore concentrate powder particle distribution (obtained using Analysette 22 MicroTec Plus, *Fritsch GmbH*, Germany).

На рис. 2 приведена дифрактограмма порошка железорудного концентрата, полученная на рентгеновском дифрактометре HZG-4 (*Helmholtz-Zentrum Geesthacht*, Германия) (Ni – фильтр): $\text{CuK}\alpha = 1.54051 \text{ \AA}$ на дифрагированном пучке в пошаговом режиме со временем набора импульсов 10 с и величиной шага 0.02° в интервале углов $2\Theta = 2^\circ - 80^\circ$.

Железорудный концентрат представляет собой магнетит, о чем свидетельствуют дифракционные отражения при $2\Theta \sim 36^\circ, \sim 57^\circ, \sim 63^\circ$. Полученный спектр хорошо согласуется со спектром из международной базы данных дифракционных стандартов Crystallography Open Database¹. В интервале углов $2\Theta \sim 16^\circ - 26^\circ$ наблюдается аморфное гало и дифракционные отражения при $2\Theta \sim 27^\circ, \sim 41^\circ$, характерные для кварца [8]. Содержание диоксида кремния, определенное из дифрактограмм методом полуколичественного анализа (с использованием программного комплекса Match! (*CRYSTAL IMPACT GbR*, Германия)², составляет около 5–6%.

Рис. 2. Дифрактограмма железорудного концентрата АО «Лебединский горно-обогатительный комбинат»: фаза Fe_3O_4 (1); фаза SiO_2 (2).

Fig. 2. Diffraction pattern of iron ore concentrate obtained from the Lebedinsky Mining and Processing Plant: (1) Fe_3O_4 phase; (2) SiO_2 phase.

Резиновые смеси были приготовлены в лабораторном резиносмесителе Brabender (*Brabender GmbH & Co KG*, Германия) при температуре камеры $T = 60^\circ\text{C}$ и угловой скорости вращения роторов $\omega = 60 - 63$ об/мин, общее время смешения $t < 10$ мин. Смешение происходило в 2 стадии. На первой стадии вводили каучук, оксид цинка ZnO , стеариновую кислоту и наполнители: магнетит, либо технический углерод (ТУ) N339, либо их смеси различного состава. После этого смесь ох-

¹ Crystallography Open Database.

URL: <http://www.crystallography.net>.

² URL: <http://www.crystalimpact.com/match/Default.htm>.

лаждали. На второй стадии вводили вулканизующую систему. Полученные смеси дорабатывали на вальцах.

Количество магнетита в смесях на основе SBR-1500 изменялось в ряду 0, 25, 50 мас.ч. при неизменной концентрации ТУ N339 50 мас.ч. (табл. 1). В случае альтакса (2-MBS) и сульфенамида Т (TBBS) использовали рецептуру, соответствующую ГОСТ 15627-79³ и ГОСТ ISO 2322-2013⁴. Для остальных ускорителей в соответствии с ISO 2322:2009 заменяли ускорители TBBS на эквимольное количество ускорителей тетраметилтиурамдисульфида (TMTD), дифенилгуанидина (DPG) и каптакса (2-MBT). Для смесей, содержащих в качестве ускорителей DPG и 2-MBT, пришлось увеличить их содержание до 3.0 мас.ч., так как при меньших концентрациях (условия: температура вулканизации $T_B = 160$ °С, длительность процесса $\tau = 60$ мин) кривая зависимости крутящего момента от времени не достигала плато вулканизации.

Вулканизационные параметры определяли с помощью безроторного реометра RPA 2000 (Alpha Technologies, США). Реометрические кривые снимали при температуре $T_B = 160$ °С в течение $\tau = 60$ мин.

ТГА/ДСК-исследования проводили на образцах на основе SBR-1500, изготовленных по ISO 2322:2009, с постоянным суммарным содержанием наполнителей 50 мас.ч. Дозировка магнетита увеличивалась от 0 до

50 мас.ч. с шагом 10 мас.ч., а дозировка ТУ N339 убывала в таком же порядке. Измерения на приборе TGA/DSC 2 (Mettler Toledo, США) проводили в атмосфере азота N_2 и кислорода O_2 в температурном диапазоне 25–250 °С и скорости нагрева 10 °С/мин.

На основании кинетических кривых были определены следующие параметры: оптимальное время вулканизации (t'_{90}), время подвулканизации (t_s1), минимальный (M_L) и максимальный (M_H) крутящий момент. В табл. 2 приведены зависимости указанных параметров от содержания магнетита в резиновых смесях на основе SBR-1500.

Различное содержание магнетита (табл. 2) влияет на время достижения оптимума вулканизации, время подвулканизации, а также на минимальный и максимальный крутящий момент в присутствии разных ускорителей. При $T_B = 160$ °С в присутствии ускорителей TBBS, 2-MBS, DPG и 2-MBT при увеличении содержания магнетита время достижения оптимума вулканизации t'_{90} уменьшается. При этом максимальный эффект проявляется в случае 2-MBT (t'_{90} снижается с 36 до 19 мин, при введении 50 мас.ч. магнетита). В случае TMTD изменение содержания магнетита практически не влияет на время достижения оптимума вулканизации. Время подвулканизации в присутствии ускорителей TBBS и 2-MBT уменьшается с увеличением концентрации магнетита. В случае, DPG и TMTD при изменении содержания магнетита зависимость

Таблица 1. Рецептуры эластомерных смесей на основе бутадиен-стирольного каучука SBR-1500 и магнетита с разными ускорителями
Table 1. Formulations of elastomeric mixtures based on butadiene–styrene rubber SBR-1500 and magnetite with different accelerators

Компонент Component	Содержание компонента, мас.ч. Component content, phr														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SBR-1500	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ZnO	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Сера / Sulfur	1.75	1.75	1.75	2.00	2.00	2.00	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
Стеариновая кислота / Stearic acid	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50	1.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
TBBS	1.00	1.00	1.00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2-MBS	–	–	–	3.00	3.00	3.00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
TMTD	–	–	–	–	–	–	1.00	1.00	1.00	–	–	–	–	–	–
DPG	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3.00	3.00	3.00	–	–	–
2-MBT	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3.00	3.00	3.00
ТУ N339 / CBN339	50.0	50.0	50.0	40.0	40.0	40.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Магнетит / Magnetite	0.0	25.0	50.0	0.0	25.0	50.0	0.0	25.0	50.0	0.0	25.0	50.0	0.0	25.0	50.0

³ ГОСТ 15627-79 Каучуки синтетические бутадиен-метилстирольный СКМС-30АРК и бутадиен-стирольный СКС-30АРК. Технические условия. М. ИПК Издательство стандартов; 2003. 39 с. [GOST 15927-79. State Standard. Synthetic rubbers butadiene-methylstyrene СКМС-30 АРК and butadiene-styrene СКС-30 АРК. Specifications. Moscow: IPK Izd. Stand.; 2003.]

⁴ ГОСТ ISO 2322-2013 Каучук бутадиен-стирольный (SBR) эмульсионной и растворной полимеризации. Методы оценки. М.: Стандартиформ; 2014. 34 с. [GOST ISO 2322-2013. State Standard. Styrene-butadiene rubber (SBR) of emulsion- and solution-polymerized types. Evaluation methods. Moscow: Standartinform; 2014.]

Таблица 2. Зависимость вулканизационных характеристик от концентрации магнетита в саже-наполненных смесях на основе SBR-1500 в присутствии различных ускорителей
Table 2. Dependence of vulcanization characteristics on magnetite concentration in black-extended mixtures based on SBR-1500 in the presence of various accelerators

Тип ускорителя Accelerator type	Содержание ускорителя, мас.ч. Accelerator content, phr	Содержание ТУ N339, мас.ч. CB N339 content, phr	Содержание магнетита, мас.ч. Magnetite content, phr	Вулканизационные характеристики Vulcanization characteristics			
				t'_{90} , мин t'_{90} , min	t_{s1} , мин t_{s1} , min	M_L , дН·м M_L , dyn·m	M_H , дН·м M_H , dyn·m
TBBS	1.00	50.0	0.0	15.84	5.32	2.8	22.41
	1.00	50.0	25.0	14.88	4.81	2.74	24.63
	1.00	50.0	50.0	12.54	4.55	3.42	26.31
2-MBS	3.00	40.0	0.0	14.62	2.5	1.87	19.65
	3.00	40.0	25.0	12.54	2.06	2.06	21.22
	3.00	40.0	50.0	11.59	2.41	2.4	23.41
TMTD	1.00	50.0	0.0	6.85	1.1	2.95	29.63
	1.00	50.0	25.0	6.26	1.26	3.16	31.67
	1.00	50.0	50.0	6.57	1.28	3.58	34.69
DPG	3.00	50.0	0.0	32.86	2.45	2.58	18.73
	3.00	50.0	25.0	31.93	2.71	2.64	19.48
	3.00	50.0	50.0	31.23	2.49	2.82	20.07
2-MBT	3.00	50.0	0.0	36.29	1.83	2.7	16.99
	3.00	50.0	25.0	23.97	1.33	2.93	20.69
		50.0	50.0	19.22	1.3	2.98	23.09

времени подвулканизации проходит через максимум, а в случае 2-MBS через минимум. Стоит отметить, что изменение абсолютного значения времени подвулканизации во всех случаях незначительное. Максимальный крутящий момент в присутствии всех ускорителей линейно растет (с разной скоростью) с увеличением содержания магнетита при постоянном содержании ТУ.

Исходя из представленных выше данных можно предположить, что магнетит проявляет себя в качестве активатора процесса серной вулканизации. На основании того, что максимальный эффект от введения магнетита наблюдается в присутствии ускорителей тиазолового ряда можно предположить, что ионы Fe^{+2} и Fe^{+3} на поверхности частиц магнетита, каталитически ускоряют распад дисульфидных связей по механизму (схема), аналогичному для инициирования радикальной полимеризации окислительно-восстановительными системами на основе солей двух- и трехвалентного железа [9, 10]. Образующиеся в результате распада дисульфидных связей ускорителя радикалы активируют процесс серной вулканизации.

Термограммы ТГА вулканизатов (рис. 3 и 4) показывают, что при введении магнетита в резиновую смесь на основе SBR-1500 в количестве, эквивалентном концентрации ТУ N339 в стандартной смеси (50 мас.ч.), наблюдаются меньшие потери массы, чем для образцов, содержащих только ТУ N339, во всем диапазоне температур при измерении в атмосфере

Схема. Предполагаемое взаимодействие частиц магнетита и макромолекул бутадиен-стирольного каучука в присутствии ускорителей, содержащих дисульфидные связи.

Scheme. Supposed interaction between magnetite particles and butadiene–styrene rubber macromolecules in the presence of accelerators containing disulfide bonds.

азота N_2 . В атмосфере кислорода O_2 наблюдается аналогичный эффект, при этом кривые характеризуются увеличением массы в диапазоне температур до 100°C , что вероятнее всего связано с накоплением продуктов окисления.

Данные ДСК, представленные на рис. 5 (в инертной среде N_2), свидетельствуют о том, что магнетит практически не ускоряет процессы термодеструкции

вулканизатов (эндотермический процесс), незначительные различия наблюдаются лишь в области температур более 150 °С.

Рис. 3. Термограммы ТГА вулканизатов на основе SBR-1500, содержащих разное количество магнетита и ТУ N339 (в атмосфере азота N_2): 50 мас.ч. ТУ N339 + 0 мас.ч. магнетита (1); 30 мас.ч. ТУ N339 + 20 мас.ч. магнетита (2); 10 мас.ч. ТУ N339 + 40 мас.ч. магнетита (3); 0 мас.ч. ТУ N339 + 50 мас.ч. магнетита (4).

Fig. 3. TGA patterns for vulcanizates based on SBR-1500 with different magnetite and CB N339 (in nitrogen atmosphere) contents: (1) 50 phr of N339 + 0 phr of magnetite; (2) 30 phr of N339 + 20 phr of magnetite; (3) 10 phr of N339 + 40 phr of magnetite; and (4) 0 phr of N339 + 50 phr of magnetite.

Рис. 5. Термограммы ДСК вулканизатов на основе SBR-1500, содержащих разное количество магнетита и ТУ N339 (в атмосфере азота N_2): 50 мас.ч. ТУ N339 + 0 мас.ч. магнетита (1); 30 мас.ч. ТУ N339 + 20 мас.ч. магнетита (2); 10 мас.ч. ТУ N339 + 40 мас.ч. магнетита (3); 0 мас.ч. ТУ N339 + 50 мас.ч. магнетита (4).

Fig. 5. DSC pattern for vulcanizates based on SBR-1500 with different magnetite and CB N339 (in nitrogen atmosphere) contents: (1) 50 phr of N339 + 0 phr of magnetite; (2) 30 phr of N339 + 20 phr of magnetite; (3) 10 phr of N339 + 40 phr of magnetite; and (4) 0 phr of N339 + 50 phr of magnetite.

Аналогичные результаты получены и при изучении процессов термоокислительной деструкции в среде O_2 (рис. 6). В этом случае термоокисление

Рис. 4. Термограммы ТГА вулканизатов на основе SBR-1500, содержащих разное количество магнетита и ТУ N339 (в атмосфере кислорода O_2): 50 мас.ч. ТУ N339 + 0 мас.ч. магнетита (1); 30 мас.ч. ТУ N339 + 20 мас.ч. магнетита (2); 10 мас.ч. ТУ N339 + 40 мас.ч. магнетита (3); 0 мас.ч. ТУ N339 + 50 мас.ч. магнетита (4).

Fig. 4. TGA patterns for vulcanizates based on SBR-1500 with different magnetite and CB N339 (in oxygen atmosphere) contents: (1) 50 phr of N339 + 0 phr of magnetite; (2) 30 phr of N339 + 20 phr of magnetite; (3) 10 phr of N339 + 40 phr of magnetite; and (4) 0 phr of N339 + 50 phr of magnetite.

Рис. 6. Термограммы ДСК вулканизатов на основе SBR-1500, содержащих разное количество магнетита и ТУ N339 (в атмосфере кислорода O_2): 50 мас.ч. ТУ N339 + 0 мас.ч. магнетита (1); 30 мас.ч. ТУ N339 + 20 мас.ч. магнетита (2); 10 мас.ч. ТУ N339 + 40 мас.ч. магнетита (3); 0 мас.ч. ТУ N339 + 50 мас.ч. магнетита (4).

Fig. 6. DSC pattern for vulcanizates based on SBR-1500 with different magnetite and CB N339 (in oxygen atmosphere) contents: (1) 50 phr of N339 + 0 phr of magnetite; (2) 30 phr of N339 + 20 phr of magnetite; (3) 10 phr of N339 + 40 phr of magnetite; and (4) 0 phr of N339 + 50 phr of magnetite.

вулканизатов начинается при температурах 190–220 °С. Появляется экзотермический пик в области температур 210–230 °С, который смещается в область более низких температур с увеличением концентрации магнетита. Какого-либо заметно-выраженного активирующего действия магнетита на эти процессы не обнаружено.

Однако известно [11], что катионы железа переменной валентности в полимерной фазе многократно ускоряют окислительные процессы. Это справедливо только в тех случаях, когда соли железа хотя бы частично растворены в фазе полимера. В случае магнетита, способные вызвать окисление катионы железа переменной валентности доступны только на поверхности частиц, что существенно затрудняет катализ окислительных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные выше данные подтверждают способность магнетита выступать в качестве активного агента в процессе серной вулканизации бутадиен-стирольного каучука в присутствии различных ускорителей. При этом наибольший эффект магнетита, как активного компонента вулканизирующей системы, проявляется в присутствии ускорителей тиазолового ряда (2-MBS, 2-MBT). Кроме того, присутствие магнетита в вулканизатах на основе SBR-1500 практически не влияет на процесс окисления в области температур эксплуатации большинства эластомерных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дик Дж.С. Технология резины: Рецептуростроение и испытания. Под ред. Дика Дж.С. Пер. с англ. Котовой С.В., Глаголева В.А., Люсовой Л.Р. под ред. Шершнева В.А. СПб.: Научные основы и технологии; 2010. 620 с.
2. Heideman G., Datta R.N., Noordermeer J.W.M. Activators in accelerated sulfur vulcanization. *Rubber Chemistry and Technology*. 2004;77(3):512-541. <https://doi.org/10.5254/1.3547834>
3. Heideman G., Noordermeer J.W.M., Datta R.N. Zinc loaded clay as activator in sulfur vulcanization: a new route for zinc oxide reduction in rubber compounds. *Rubber Chemistry and Technology*. 2004;77(2):336-355. <https://doi.org/10.5254/1.3547827>
4. Mostoni S., Milana P., Di Credico B. Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process. *Catalysts*. 2019;9(8):664. <https://doi.org/10.3390/catal9080664>
5. Zanchet A., Demori R., de Sousa F.D.B. Sugar cane as an alternative green activator to conventional vulcanization additives in natural rubber compounds: Thermal degradation study. *Journal of Cleaner Production*. 2019;207:248-260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.203>

Финансовая поддержка

Данное исследование не имело какой-либо финансовой поддержки от сторонних организаций.

Financial support

This study did not have any financial support from outside organizations.

Вклад авторов

А.А. Хачатуров – анализ литературы, написание статьи, планирование исследования, проведение всех этапов исследования, формализация списка литературы;

Е.Э. Потапов – идея, разработка дизайна исследования, консультация по вопросам проведения всех этапов исследования;

С.В. Резниченко – консультация по вопросам планирования, методологии и реализации исследования;

А.Н. Ковалева – научное редактирование, техническое редактирование, оформление библиографии.

Authors' contribution

A.A. Khachaturov – literature analysis, article writing, research planning; carrying out all the stages of the study, formalization of the list of references;

E.E. Potapov – idea, development of the research design, consultation on the problems of carrying out all the stages of the study;

S.V. Reznichenko – consultation on the problems of planning, methodology and implementation of the study;

A.N. Kovaleva – scientific editing, technical editing, formalizing the bibliography.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

1. Dick J.S. *Tekhnologiya reziny: Retsepturostroenie i ispytaniya* (Rubber technology. Compounding and testing for performance). Translated from English by Shershnev V.A. Sankt Peterburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii; 2010, 620 p. (in Russ.).
2. Heideman G., Datta R.N., Noordermeer J.W.M. Activators in accelerated sulfur vulcanization. *Rubber Chemistry and Technology*. 2004;77(3):512-541. <https://doi.org/10.5254/1.3547834>
3. Heideman G., Noordermeer J.W.M., Datta R.N. Zinc loaded clay as activator in sulfur vulcanization: a new route for zinc oxide reduction in rubber compounds. *Rubber Chemistry and Technology*. 2004;77(2):336-355. <https://doi.org/10.5254/1.3547827>
4. Mostoni S., Milana P., Di Credico B. Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process. *Catalysts*. 2019;9(8):664. <https://doi.org/10.3390/catal9080664>
5. Zanchet A., Demori R., de Sousa F.D.B. Sugar cane as an alternative green activator to conventional vulcanization additives in natural rubber compounds: Thermal degradation study. *Journal of Cleaner Production*. 2019;207:248-260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.203>

6. Хачатуров А.А., Потапов Е.Э., Монахова Т.В. Влияние магнетита на кинетику окисления и структурирования эластомерных материалов на основе бутадиен-стирольного каучука. XVII Ежегодная молодежная конференция с международным участием ИБХФ РАН-ВУЗы «Биохимическая физика»-2017: сб. тр. конф. (13–15 ноября 2017 г., г. Москва). Москва: Изд-во РУДН; 2018, с. 71-75.

7. Хачатуров А.А. Функциональные эластомерные композиционные материалы на основе бутадиен-стирольного каучука и магнетита. XXVIII Менделеевская конференция молодых ученых: сб. тез. и докл. конф. (13–18 мая 2018 г., г. Новосибирск). Новосибирск: Изд-во НГУ; 2018, с.111.

8. Борисов Л.А., Гришин Ю.М., Козлов Н.П. и др. Способ прямого получения поликристаллического кремния из природного кварца и из его особо чистых концентратов: РФ Пат. 2516512, МПК7 С 30 В 30/02, С 30 В 29/06. N 2012128656/05; заявл. 09.07.12; опублик. 20.05.14, Бюл. N 14.

9. Догадкин Б.А., Донцов А.А., Шершнева В.А. Химия эластомеров. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Химия; 1981; 376 с.

10. Al-Ghamdi A.A., Al-Hartomy O.A., Al-Solamy F.R. Preparation and characterisation of natural rubber composites comprising hybrid fillers of activated carbon / *in situ* synthesised magnetite. *Journal of Rubber Research*. 2018;21(2):94-118. <https://doi.org/10.1007/bf03449164>

11. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. Пер. с англ. М.: Мир; 1988, 446 с.

6. Khachaturov A.A., Potapov E.E., Monahova T.V. Effect of magnetite on the kinetics of oxidation and structuring of elastomeric materials based on styrene-butadiene rubber. XVII *Ezhegodnaya molodezhnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem IBKhF RAN-VUZy "Biokhimicheskaya fizika"*-2017: sb. tr. konf. (The 17th Annual Youth Conference with international participation of the Institute of Biochemical Physics RAS-Universities "Biochemical Physics" -2017: collection of abstracts). Moscow: RUDN; 2017, p. 71-75 (in Russ.).

7. Khachaturov A.A. Functional and elastomeric materials on the basis of butadiene-styrene rubber and magnetite. XXVIII *Mendelevskaya konferentsiya molodykh uchenykh: sb. tez. i dokl. konf.* (The 28th Mendelev Conference of Young Scientists: a collection of abstracts and conference reports). Novosibirsk: 2018, p. 111 (in Russ.).

8. Borisov L.A., Grishin Yu.M., Kozlov N.P., et al. A method for the direct production of polycrystalline silicon from natural quartz and from its especially pure concentrates: RF Pat. 2516512, 2012. RU2516512C2 (in Russ.).

9. Dogadkin B.A., Doncov A.A., Shershnev V.A. *Khimiya elastomerov* (Chemistry of Elastomers). 2nd ed. reslave. and add. Moscow: Khimiya; 1981. 376 p. (in Russ.).

10. Al-Ghamdi A.A., Al-Hartomy O.A., Al-Solamy F.R. Preparation and characterisation of natural rubber composites comprising hybrid fillers of activated carbon / *in situ* synthesised magnetite. *Journal of Rubber Research*. 2018;21(2):94-118. <https://doi.org/10.1007/bf03449164>

11. Grassie N., Skott G. *Destruktsiya i stabilizatsiya polimerov* (Polymer degradation and stabilisation). Translated from English. Moscow: Mir; 1988, 446 p. (in Russ.).

Об авторах:

Хачатуров Арам Арнольдович, аспирант кафедры Физики и химии материалов им. Б.А. Догадкина Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: xa4aram@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3852-581X>

Потапов Евгений Эдуардович, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры Физики и химии материалов им. Б.А. Догадкина Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: svitar@yandex.ru. Scopus Author ID 7006238695.

Резниченко Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой Физики и химии материалов им. Б.А. Догадкина Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: svrezn@gmail.com. Scopus Author ID 6603145791.

Ковалева Анна Николаевна, кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: kovaleva_anna79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6389-3833>

About the authors:

Aram A. Khachaturov, Postgraduate Student, B.A. Dogadkin Department of Physics and Chemistry of Materials, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: xa4aram@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3852-581X>

Evgeniy E. Potapov, Dr. of Sci. (Chemistry), Professor, B.A. Dogadkin Department of Physics and Chemistry of Materials, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: svitar@yandex.ru. Scopus Author ID 7006238695.

Sergei V. Reznichenko, Dr. of Sci. (Technology), Professor, Head of the B.A. Dogadkin Department of Physics and Chemistry of Materials, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: svrezn@gmail.com, Scopus Author ID 6603145791.

Anna N. Kovaleva, Cand. of Sci. (Chemistry), Assistant Professor, Department of Chemistry and Technology for Processing Plastics and Polymer Composites, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: kovaleva_anna79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6389-3833>

Поступила: 30.12.2019; получена после доработки: 05.06.2020; принята к опубликованию: 05.08.2020.
The article was submitted: December 30, 2020; approved after reviewed: June 05, 2020; accepted for publication: August 05, 2020.