

*Е. С. Бочкарев**¹, *А. Н. Гайдадин*¹, *Р. Я. Дебердеев*², *Д. А. Нилидин*¹
*Шейх Осман Амани*¹, *Е. В. Кондратьев*¹, *И. Д. Иванов*¹

ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ СЕРЫ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЗИН*

¹ Волгоградский государственный технический университет

² Казанский национальный исследовательский технологический университет

*E-mail: w_tovn@mail.ru

В работе исследовано влияние экспериментальных образцов полимерной серы на изменение динамических показателей вулканизатов в сравнении с ромбической серой и промышленно выпускаемой полимерной серой ОТ-20. Для вулканизатов получены диаграммы типа «Коула-Коула» и значения густоты сшивок сетки поперечных связей, определена плотность химических связей. Отмечено различие типа диаграмм «Коула-Коула» для малонаполненных образцов эластомерных материалов, вулканизованных полимерной и ромбической серой. Показано, что экспериментальные образцы полимерной серы, исследуемые в резинах на основе полиизопренового каучука, по комплексу динамических показателей соответствовали промышленно производимой полимерной сере марки ОТ-20.

Ключевые слова: эластомеры, полимерная сера, динамические испытания, плотность сшивания, энергия активации

Введение

В последнее время основными тенденциями развития и совершенствования рецептурной базы современных резин, направленных на обеспечение конкурентных преимуществ изделий, стали поиск новых добавок [1–5] и совершенствование форм известных [6; 7]. Вулканизирующие агенты, наиболее распространенным из которых является сера, определяют значительную часть свойств материала. По данным информационно-аналитического центра RUPEC объемы добываемой серы в 2023 году на территории РФ составили порядка 7 млн тонн, небольшая часть из которых закрывает потребности рези-

новой промышленности. Одной из форм данного продукта является полимерная сера, обладающая улучшенной диспергируемостью и повышенной устойчивостью к выцветанию, что способствует росту долговечности и устойчивости к термическому старению [8–10], а также улучшению механических свойств резины [10–12]. В работе [13] представлены данные по кинетике вулканизации резин с использованием полимерной серы, что подтверждает интерес к этому ингредиенту. Как следствие, интерес к разработке новых способов получения [14–16] и стабилизации полимерной серы [17] со стороны потребителей постоянно нарастает.

© Бочкарев Е. С., Гайдадин А. Н., Дебердеев Р. Я., Нилидин Д. А., Шейх Осман Амани, Кондратьев Е. В., Иванов И. Д., 2025.

* Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение научных исследований межрегионального научно-образовательного центра Юга России при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (FZUS-2024-0001).

Несмотря на большой объем информации, представленной в вышеприведенных публикациях, авторами отмечено недостаточное количество исследований, посвященных влиянию полимерной серы на динамические и релаксационные свойства резин. В результате установление взаимосвязи между динамическими свойствами и параметрами сетки поперечных связей, сформированной с участием полимерной серы является актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование влияния полимерной серы на технологические и технические свойства резин на основе полиизопренового каучука. Объектами исследований являются молотая сера, традиционно используемая для вулканизации каучуков, полимерная сера, уже нашедшая применение в производстве эластомерных изделий, и опытные образцы полимерной серы, полученные в результате поисковых работ. Ключевым моментом является оценка зависимостей кинетики вулканизации, деформационно-прочностных показателей и динамических характеристик вулканизатов от типа используемой серы.

Экспериментальная часть

В роли объектов исследования выступали образцы серы молотой (температура плавления 112,5 °С, содержание нерастворимой в сероводороде серы 0 %), традиционно используемой в производстве эластомерных композиций [18] и полимерная сера ОТ-20 (температура плавления 121,5 °С, содержание нерастворимой в сероводороде серы 80 %) [19], производства Российской Федерации, экспериментальные образцы полимерной серы, получены в КНИТУ (Казань) и предоставлены для испытаний в ВолгГТУ.

Экспериментальные образцы полимерной серы, использованные в ходе исследований, представляют собой порошки желтого и желто-серого цвета: сера полимерная образец № 1 (температура плавления 118,7 °С, содержание нерастворимой в сероводороде серы 27 %); сера полимерная образец № 2 (температура плавления 118,8 °С, содержание нерастворимой в сероводороде серы 39 %).

Рецептуры исследованных резиновых смесей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рецептура исследуемых резиновых смесей

Ингредиент	Шифры исследуемых смесей			
	СКИ-0	СКИ-А1	СКИ-А2	СКИ-20
Каучук СКИ-3	100,00	100,00	100,00	100,00
Оксид цинка	5,00	5,00	5,00	5,00
Стеариновая кислота	2,00	2,00	2,00	2,00
Техуглерод П-324 (N330)	35,00	35,00	35,00	35,00
Сульфенамид Ц	0,70	0,70	0,70	0,70
Сера молотая	2,5	0,50	0,50	0,50
Сера полимерная образец № 1	0,00	2,5	0,00	0,00
Сера полимерная образец № 2	0,00	0,00	2,5	0,00
Сера полимерная ОТ-20	0,00	0,00	0,00	2,5
ИТОГО	144,95	145,7	145,7	145,7

Резиновые смеси изготавливали на лабораторных вальцах ЛБ 320/150/150 в соответствии с ГОСТ Р 54554-2011. Вулканизационные характеристики изучали с помощью реометра MonTech MDR 3000 Professional в соответствии с ГОСТ 34751-2021.

Физико-механические свойства образцов определяли на разрывной машине ZwickRoell 5,0 kN (ГОСТ 270-75). Твердость вулканизатов измеряли твердомером ТН200 Шор А (ГОСТ 263-75).

Исследование динамических характеристик эластомеров и оценку эффектов Пейна и Маллинза проводили на реометре MonTech MDR 3000 Professional в режиме работы DMDR в соответствии с АСТМ Д6601-02. Определение релаксации напряжений осуществляли по ISO 13145:2012.

Значение плотности химической сшивки ν_{ch} определялось по данным равновесного набухания образцов в толуоле. Расчет проводили с использованием уравнения Флори – Ренера [20]:

$$v_{ch} = \frac{V_{r0}}{V_s} \cdot \frac{\ln(1-V_r) + V_r + \chi V_r^2}{V_r^{1/3} V_{r0}^{2/3} - 0.5 V_r} \quad (1)$$

где v_{ch} – плотность химической сшивки, моль/см³, V_{r0} – объемная доля каучука в равновесном набухшем образце ненаполненного вулканизата, V_r – объемная доля каучука в равновесном набухшем образце наполненного вулканизата, V_s – молярный объем растворителя, χ – параметр взаимодействия Хаггинса.

Одновременно общую плотность сшивки v_t определяли по изменению сдвиговых деформаций. В этом случае определяют взаимосвязь показателя v_t с равновесным динамическим модулем в соответствии с кинетической теорией эластичности резины [21] по уравнению (2):

$$v_t = \frac{G_\infty}{3RT} \quad (2)$$

где v_t – полная плотность сшивки, моль/см³; G_∞ – равновесный динамический модуль, Па; R – абсо-

лютная газовая постоянная ($R = 8,314$ Дж/К·моль), T – температура испытания (373,15 К).

Обсуждение результатов

Для определения оптимального времени вулканизации базовой смеси, содержащей серу молотую, выбраны температуры 140, 150 и 160 °С (рис. 1). По полученным реокинетическим зависимостям был проведен расчет энергии активации вулканизации. Для определения показателей использован хорошо себя зарекомендовавший способ [22]:

$$\ln(M_H - M_t) = \ln B - k_2(t - t_0) \quad (3)$$

где M_H и M_t – максимальное и текущее значение момента сдвига, B – константа модели; k_2 – константа скорости вулканизации основного периода, мин⁻¹.

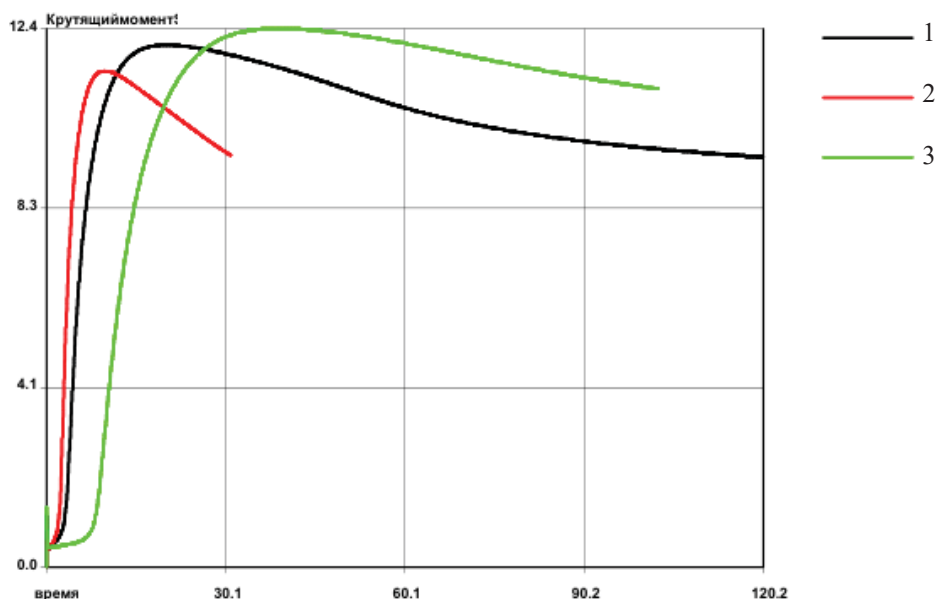


Рис. 1. Определение вулканизационных характеристик резиновой смеси СКИ-3 вулканизованной молотой серой: 1 – 150 °С; 2 – 160 °С; 3 – 140 °С

Энергия активации вулканизации рассчитывалась по уравнению Аррениуса и константам скорости, полученных при выбранных температурах:

$$\ln k = \ln k_0 - E/RT \quad (4)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель, E – энергия активации, кДж/моль, R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К), T – температура, К.

Полученное значение энергии активации

составило 98607 кДж/моль. По результатам расчета оптимальный режим вулканизации базовой смеси составил 140 °С в течение 20 минут. Для изготовления всех остальных композиций, исследуемых в работе, авторы придерживались обоснованного для базовой смеси режима.

Вулканизационные характеристики резиновых смесей, содержащих полимерную серу, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вулканизационные характеристики резиновых смесей при 140 °С в течение 20 минут

Обозначение показателей	Шифры исследуемых смесей			
	СКИ-0	СКИ-А1	СКИ-А2	СКИ-20
M_L , дН*м	0,45	0,68	0,46	0,72
M_H , дН*м	12,41	14,51	14,16	14,36
ΔM , дН*м	11,96	13,83	13,7	13,64
t_{s1} , мин	8,58	7,45	7,73	7,2
t'_{90} , мин	21,97	21,5	21,41	20,14
R_v , мин ⁻¹	7,47	7,12	7,31	7,73

Из табл. 2 следует, что эластомеры, содержащие полимерную серу, характеризуются некоторым снижением индукционного периода (t_{s1}) по сравнению с базовым образцом, использование полимерной серы увеличивает значения максимального крутящего момента (M_L). Однако время достижения оптимума вулканизации (t'_{90}) материалов очень близки. Как следствие, влияние образцов полимерной серы аналогично молотой, и можно предполагать близ-

кую структуру сетки поперечных связей для всех образцов. Однако кинетических параметров вулканизации для обоснованного утверждения недостаточно и следует рассмотреть другие показатели композиций.

Прочностные свойства образцов эластомеров и характеристики вулканизационной сетки в зависимости от типа используемой серы приведены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические свойства образцов и характеристики сетки эластомерных материалов

Показатель	Шифры исследуемых смесей			
	СКИ-0	СКИ-А1	СКИ-А2	СКИ-20
σ , МПа	24,2	27,6	27,1	26,6
ϵ , %	590	500	490	510
E 100 %, МПа	1,47	2,3	2,41	2,12
E 300 %, МПа	4,58	4,79	4,94	4,47
Молекулярная масса цепей сетки	5194,57	1237,968	1232,262	1239,793
Плотность поперечного сшивания ν_{ch} , моль/см ³ 10 ⁻⁴	1,77	7,593	7,628	7,582
Общая плотность сшивки ν_t , моль/см ³ 10 ⁻⁴	26,5	33,8	34,7	33,8
Эффект Пейна, кПа	253,2	318,8	343,0	353,2
Эффект Маллинса, кПа	19,9	9,2	31,7	24,3

Из табл. 3 следует, что использование полимерной серы ОТ-20 и полученных экспериментальных образцов позволяет добиться близких значений химической плотности сшивки, так как вулканизаты обладают практически одинаковым значением ν_{ch} и существенно отличаются от показателей вулканизатов с молотой серой. Это определяет более высокие значения условной прочности при растяжении и снижение относительного удлинения при разрыве.

Динамические свойства эластомеров хорошо описываются изменением модуля накопления G' и модуля потерь G'' вулканизатов в зави-

симости от деформации сдвига ($\epsilon_{сдвиг}$). На рис. 2 приведены результаты зависимости G' от деформации сдвига.

Как видно из рисунка, параметры материалов, включающих полимерную серу ОТ-20 и экспериментальные образцы, консолидируются в семейство зависимостей, несущественно отличающихся по значениям модуля G' . Все вулканизаты, содержащие полимерную серу, обладают большим значением модуля по сравнению с базовым (с использованием серы молотой) составом. Полученные данные напрямую подтверждают различия в параметрах вулканиза-

ционной сетки поперечных связей вулканизатов. Можно предположить, что в условиях малой деформации это обусловлено особенностями взаимодействия каучука с частицами технического углерода. В пользу этого свидетельствуют значения эффекта Пейна (разница на кривых рис. 2 между значениями G' при 1 и 100 % деформации сдвига) и эффекта Маллинса (раз-

ница между значениями G' при 1 % деформации сдвига на I и II циклах испытания). Особенно выделяются образцы эластомерных материалов, вулканизованных полимерной серой под шифром СКИ-А1, которые за минуту отдыха практически полностью восстанавливают свою исходную эластичность, демонстрируя минимальное отличие эффекта Маллинса [23].

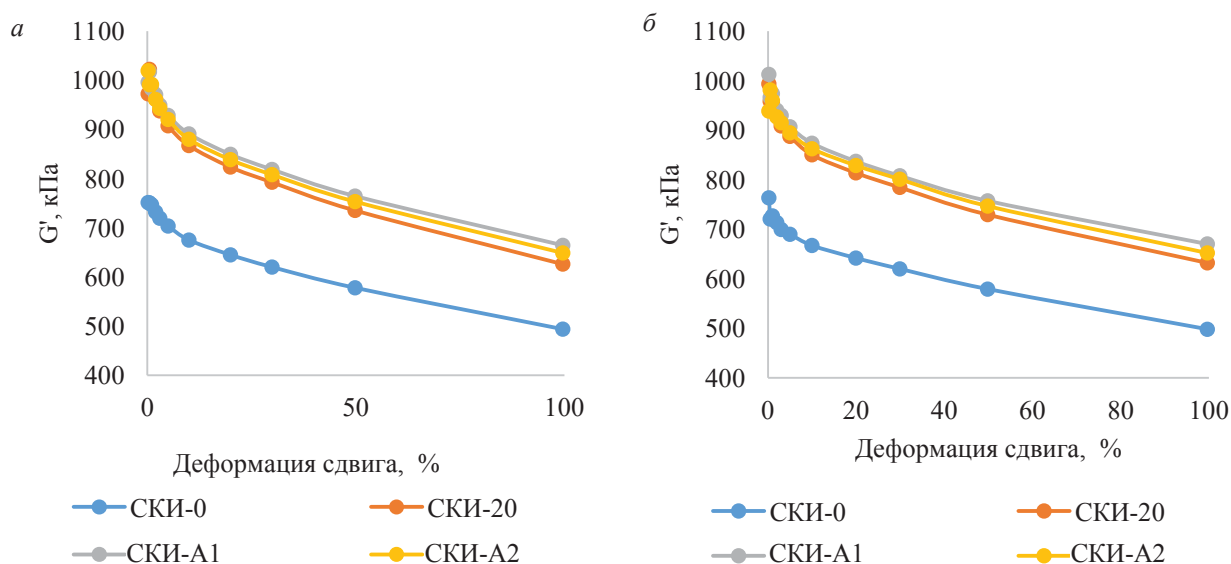


Рис. 2. Зависимость модуля накопления G' от деформации сдвига при динамических испытаниях эластомеров, вулканизованных молотой и полимерной серой:
а – первый цикл испытаний; б – второй цикл испытаний

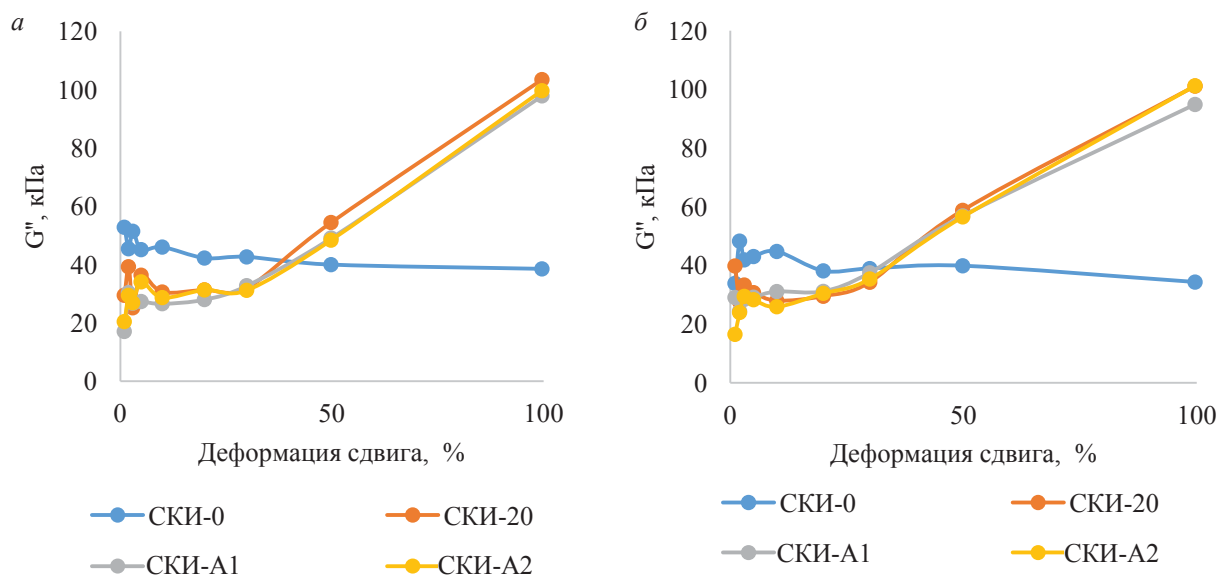


Рис. 3. Изменение модуля потерь G'' от деформации сдвига при динамических испытаниях образцов эластомеров, вулканизованных молотой и полимерной серой:
а – первый цикл испытаний; б – второй цикл испытаний

На рис. 3 приведены результаты исследований по влиянию вулканизирующей системы на изменение модуля потерь G'' .

С точки зрения динамических свойств, если судить по зависимостям модуля потерь, вязкостной составляющей, от деформации сдвига,

преимущество имеют образцы эластомеров, вулканизационных стандартной молотой серой при значительных удлинениях (более 50 %). Однако при невысоких деформациях до 50 % образцы эластомеров, полученных с использованием полимерной серы, демонстрируют бо-

лее низкие значения проявления пластической составляющей.

Баланс между пластической и эластической составляющей можно оценить с использованием диаграмм типа «Коула-Коула», которые для полученных образцов представлены на рис. 4.

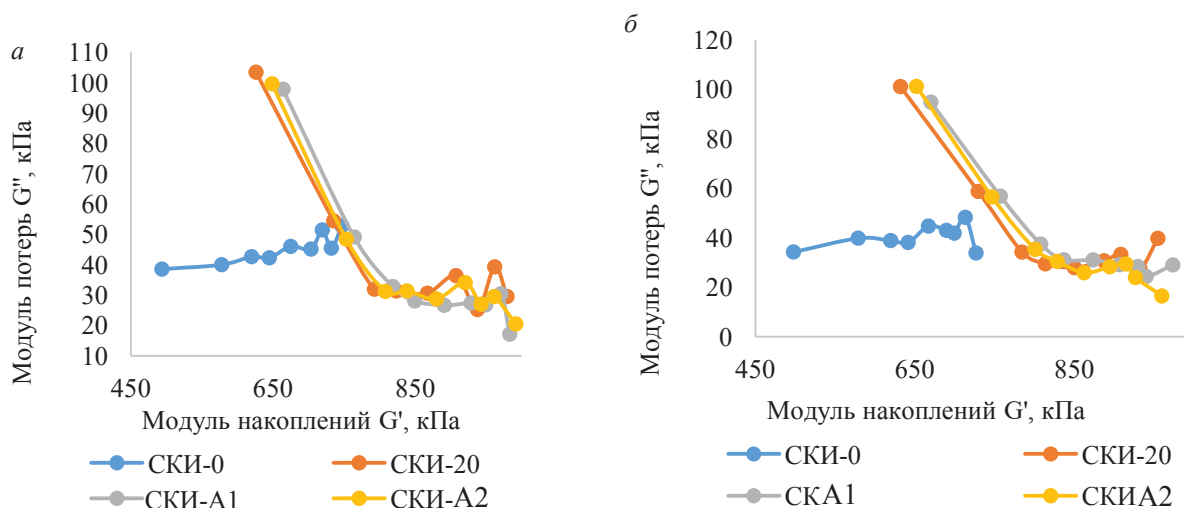


Рис. 4. Диаграммы типа «Коула-Коула» для образцов эластомеров, вулканизованных молотой и полимерной серой:
а – первый цикл испытаний; б – второй цикл испытаний

Диаграммы на рис. 4 подтверждают отличия структур эластомерных материалов, вулканизированных с использованием исследуемых образцов серы.

Для молотой серы при небольшой доле активного наполнителя (35 масс.ч.) создается прочная структура, которая обеспечивает относительно высокие значения модуля при небольших деформациях, разрушение данной структуры при увеличении сдвиговой деформации приводит к проскальзыванию макромолекул каучука друг относительно друга, что на рис. 4 выражается одновременным снижением значений модуля накоплений и значений модуля потерь, характеризующих динамические свойства вулканизатов. В случае полимерной серы механизм изменяется, вероятно, более сшитый эластомерный материал (табл. 3) при растяжении характеризуется большим количеством разрушений химических сшивок, что и приводит к росту пластической составляющей модуля потерь. Дополнить полученные данные будет возможно с проведением дополнительных испытаний по определению сульфидности образующихся сшивок тиол-аминным методом.

Релаксационные характеристики эластомеров

определены с помощью реометра путем приложения сдвиговой деформации 150 % при температуре 100 °С и с последующей фиксацией изменения крутящего момента с течением времени. Полученные результаты представлены на рис. 5.

Значительное снижение начального максимального крутящего момента по истечении 1 секунды наблюдается для эластомеров, вулканизованных различными полимерными и молотой серами. При этом более существенное снижение демонстрируют эластомеры, вулканизованные полимерной серой. Вероятно, это связано с тем, что они (табл. 3) обладают более высокой химической плотностью сшивки и модулем материала. Полученные данные хорошо согласуются со значениями, приведенными в табл. 4.

В качестве дополнительного комментария данных следует отметить, что по истечении 20 секунд релаксации изменение величины крутящего момента для эластомеров имеет достаточно близкие значения не более 26 %. Однако для образцов эластомерных материалов, вулканизованных полимерной серой, вероятно, будут иметь место более высокие напряжения в образце.

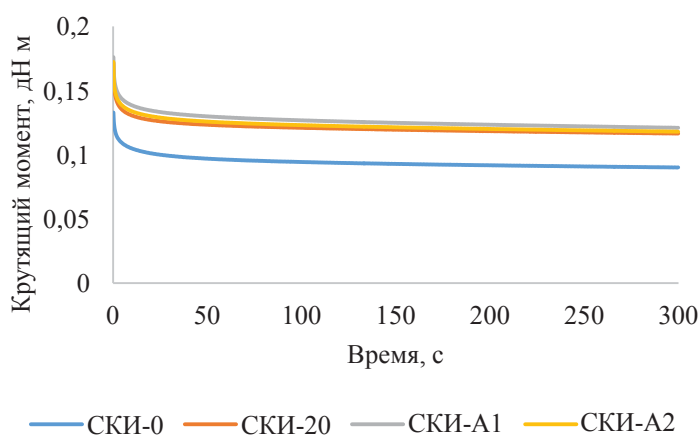


Рис. 5. Изменение крутящего момента в зависимости от времени для эластомеров, вулканизированных молотой и полимерной серой

Таблица 4

Численные значения обработки начальных участков релаксационных кривых

Параметр \ Шифр смеси	СКИ-0	СКИ-20	СКИ-A1	СКИ-A2
Максимальный крутящий момент, дНм	0,13	0,17	0,18	0,17
Крутящий момент через 1 с, дНм	0,12	0,14	0,15	0,15
Изменение крутящего момента через 1 с, %	12,9	16,5	13,8	15,2
Крутящий момент через 20 с, дНм	0,10	0,13	0,13	0,13
Изменение крутящего момента через 20 с, %	24,0	26,0	23,6	24,6

Таким образом, на основании проведенных исследований можно отметить значительное влияние полимерной серы на формируемую при вулканизации структуру эластомеров и ее значительное влияние прежде всего на изменение динамических характеристик эластомерных материалов и их релаксационные свойства. Отмечено изменение типа диаграмм «Коула-Коула» для малонаполненных образцов эластомеров, вулканизированных полимерной и ромбической серой, что, вероятно, обусловлено отличием в формировании количества и типа сшивок.

Вторым важным аспектом явилось то, что экспериментальные образцы полимерной серы, исследуемые в эластомерах на основе полиизопренового каучука, по комплексу динамических показателей соответствовали промышленно производимой сере марки ОТ-20.

Выводы

Оценено влияние молотой и полимерной серы на технологические и технические свойства вулканизатов. В результате установлены различия показателей образцов, полученных с использованием полимерной и молотой форм

серы. Для промышленного образца полимерной серы ОТ-20 параметры вулканизационной сетки соответствуют экспериментальным образцам и консолидируются в одну группу, значения которой существенно превосходят показатели вулканизатов с серой молотой. Образцы, вулканизированные полимерной серой, имеют более высокие динамические критерии и, как следствие, способны в большей устойчивости к знакопеременным нагрузкам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хоанг, В. К. Исследование усиливающего действия диоксида кремния из рисовой шелухи Вьетнама в эластомерных материалах на основе неполярных каучуков / В. К. Хоанг, С. В. Резниченко, С. В. Емельянов [и др.] // Каучук и резина. – 2022. – Т. 81, № 4. – С. 178–183. – DOI 10.47664/0022-9466-2022-81-4-178-183.
2. Потапов, Е. Э. Использование маточных смесей шунгита в рецептурах протекторных и каркасных шинных резин / Е. Э. Потапов, Ю. П. Мирошников, А. П. Бобров, В. А. Смаль // Каучук и резина. – 2017. – Т. 76, № 1. – С. 22–27.
3. Литвинова, И. А. Исследование влияния фуллеренсодержащего наполнителя для резин на основе пылевидных отходов металлургического производства на упруго-прочностные и гистерезисные свойства резин разного состава / И. А. Литвинова, И. В. Веселов, Ю. А. Гамлицкий,

- А. В. Чичварин // Резиновая промышленность: сырье, материалы, технологии : доклады XXII научно-практической конференции, Москва, 29 мая – 02 июня 2017 года. – Москва: ООО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР "НИИШП"», 2017. – С. 62–64.
4. *Земский, Д. Н.* Новые ингредиенты резиновых смесей / Д. Н. Земский, Ю. Н. Чиркова // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 12. – С. 143–145.
5. *Каблов, В. Ф.* Огнетеплозащитные полимерные материалы и покрытия с функционально активными фосфорбозосодержащими компонентами / В. Ф. Каблов, Н. А. Кейбал, В. Г. Кочетков // Высокомолекулярные соединения. Серия С. – 2024. – Т. 66, № 1. – С. 49–66. – DOI 10.31857/S2308114724010057.
6. *Титова, Т. В.* Разработка и исследование протекторных резин для ЦМК шин с применением нового отечественного наноструктурного углеродного наполнителя типа N121 / Т. В. Титова, А. М. Пичугин, А. Е. Золкина, Г. И. Раздьяконова // Каучук и резина. – 2010. – № 2. – С. 23–26.
7. *Карманова, О. В.* Исследование свойств резин, полученных в присутствии комплексных активаторов вулканизации и ускорителей разных классов / О. В. Карманова, А. А. Голякевич, Е. А. Меренкова, А. Б. Благина // Инженерные технологии. – 2024. – № 2(6). – С. 93–99.
8. *Motavalizadehkakhky, A.* Влияние вулканизации полимерной и ромбической серой на физические и термические свойства бутадиен-стирольного каучука / A. Motavalizadehkakhky, N. Shahrampour // Нефтехимия. – 2017. – Т. 57, № 4. – С. 438–442. – DOI 10.7868/S002824211704013X.
9. *Shahrampour, H.* Влияние типа вулканизирующего агента на физические и термические свойства полимерной матрицы бутадиен-стирольного и натурального каучука / H. Shahrampour // Нефтехимия. – 2018. – Т. 58, № 4. – С. 515–521. – DOI 10.1134/S002824211804024X.
10. *Motavalizadehkakhky, A.* Определение формы серы для использования в качестве вулканизирующего агента натурального каучука путем сравнения физических и термических свойств полученной резины / A. Motavalizadehkakhky, N. Shahrampour // Нефтехимия. – 2018. – Т. 58, № 1. – С. 95–99. – DOI 10.7868/S0028242118010136.
11. *Маннанова, Ф. Г.* Исследование влияния полимерной серы в качестве модифицирующей добавки на физико-механические показатели бреккерных резин / Ф. Г. Маннанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 12. – С. 238–240.
12. Модифицированная полимерная сера в процессе вулканизации / Г. К. Бишимбаева, Д. С. Жумабаева, С. А. Сакибаева [и др.] // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаем будущее : сборник статей XI Международной научно-практической конференции, Пенза, 05 сентября 2017 года. – Пенза : "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г. Ю.), 2017. – С. 23–28.
13. *Дорожкин, В. П.* Кинетика серной вулканизации изопренового каучука полимерной серой / В. П. Дорожкин, Е. Г. Мохнаткина, И. Г. Ахметов, А. Д. Валиев // Каучук и резина. – 2022. – Т. 81, № 6. – С. 276–280. – DOI 10.47664/0022-9466-2022-81-6-276-280.
14. *Титова, Л. М.* Технологические приемы получения полимерной серы высокого качества: обзор патентов / Л. М. Титова, Ю. А. Максименко, Д. В. Ерес // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 5(39). – С. 72–90. – DOI 10.25699/SSSB.2021.39.5.017.
15. *Титова, Л. М.* Промышленные способы получения полимерной серы / Л. М. Титова, Ю. А. Максименко, Д. В. Ерес, Э. Р. Теличкина // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 4(38). – С. 81–91. – DOI 10.25699/SSSB.2021.38.4.007.
16. *Пятко, Ю. Н.* Влияние ультразвуковой обработки на свойства серного расплава / Ю. Н. Пятко, Р. Т. Ахметова, Л. А. Зенитова [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 12. – С. 84–86.
17. *Резниченко, С. А.* О механизме стабилизации полимерной серы / С. А. Резниченко, В. В. Марков, Л. В. Соколова // Каучук и резина. – 2007. – № 4. – С. 25–29.
18. Большой справочник резинщика [Текст] : [в 2 ч.] / под ред. С. В. Резниченко, Ю. Л. Морозова. – М.: Техинформ, 2012. – 735 с.
19. Сера полимерная (нерастворимая) [Электронная ссылка] // ООО "РоссПолимер." 2022. – Режим доступа: URL: <https://rosspolimer.ru/produktsiya/himicheskoe-syre/syre-dlya-proizvodstva-rezinotekhnicheskikh-izdelij-rti/sera-polimernaya-nerastvorimaya/> (accessed: 12.03.2025).
20. *Kraus, G.* Swelling of filler-reinforced vulcanizates // Journal of Applied Polymer Science. – 1963. – Vol. 7, № 3. – P. 861–871.
21. *Sperling, L. H.* Introduction to Physical polymer Science / L. H. Sperling. – Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons Inc., 2006. – 504 p.
22. *Хунг, Ву Мань.* Влияние характеристик стеклянных микросфер на процесс вулканизации эластомерных композиций, используемых в качестве огне- и теплозащитных материалов / Ву Мань Хунг, А. Н. Гайдадин, В. Ф. Каблов [и др.] // Каучук и резина. – 2024. – № 1. – С. 34–39. – (Наполнители).
23. *Mullins, L.* Softening of Rubber by Deformation / L. Mullins // Rubber Chemistry and Technology. – 1969. – Vol. 42, № 1. – P. 339–362.

REFERENCES

1. Investigation of the reinforcing action of silicon dioxide from vietnamese rice hulls in elastomeric materials based on non-polar rubbers / V. K. Hoang, S. V. Reznichenko, S. V. Emelyanov [and others] // Kauchuk I Rezina. – 2022. – Vol. 81, No. 4. – P. 178–183. – DOI 10.47664/0022-9466-2022-81-4-178-183.
2. The use of master batches of shungite in the tread and carcass tire rubber compounds / E. E. Potapov, Y. P. Miroshnikov, A.P. Bobrov, V.A. Smal // Kauchuk I Rezina. – 2017. – Vol. 76, No. 1. – P. 22–27.
3. Issledovanie vliyaniya fullerensoderzhashhego napolnitelya dlya rezin na osnove pylevidnyh othodov metallurgicheskogo proizvodstva na uprugo-prochnostnye i gisterezisnye svoystva rezin raznogo sostava / I. A. Litvinova, I. V. Veselov, Yu. A. Gamlickij, A. V. Chichvarin. // Rezinovaya promyshlennost': syr'e, materialy, tekhnologii : doklady XXII nauchno-prakticheskoy konferencii, Moskva, 29 maya – 02 2017 goda. – Moskva: ООО "NAUCHNO-ISSLEDOVATEL'SKIJ CENTR "NIISHP", 2017. – S. 62–64.
4. *Zemskij, D. N.* Novye ingredienty rezinovykh smesey / D. N. Zemskij, Ju. N. Chirkova // Herald of Technological University. – 2013. – Vol. 16, No. 12. – P. 143–145.
5. *Kablov, V. F.* Ogneteplazashhitnye polimernye materialy i pokrytija s funkcionalno aktivnymi fosforbrazosoderzhashhimi komponentami / V. F. Kablov, N. A. Kejbal, V. G. Kochetkov // Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seria C. – 2024. – Vol. 66, No. 1. – P. 49–66. – DOI 10.31857/S2308114724010057.
6. Razrabotka i issledovanie protekturnykh rezin dlja CMK shin s primeneniem novogo otechestvennogo nanostruktur-

nogo ugleodorodnogo napolnitelja tipa N121 / T. V. Titova, A. M. Pichugin, A. E. Zolkina, G. I. Razdyakonova // *Kauchuk i Rezina*. – 2010. – No. 2. – P. 23–26.

7. Issledovanie svojstv rezin, poluchennyh v prisutstvie kompleksnyh aktivatorov vulkanizacii i uskoritelej raznyh klassov / O. V. Karmanova, A. A. Golyakevich, E. A. Merenkova, A. B. Blagina // *Engineering Technologies and Systems*. – 2024. – No. 2(6). – P. 93–99.

8. *Motavalizadehkakhky*, A. Vliyanie vulkanizacii polimernoj i rombicheskoj seroj na fizicheskie i termicheskie svojstva butadien-stirolnogo kauchuka / A. Motavalizadehkakhky, H. Shahrapour // *Neftekhimiya*. – 2017. – Vol. 57, No. 4. – P. 438–442. – DOI 10.7868/S002824211704013X.

9. *Shahrapour*, H. Vliyanie tipa vulkanizirujushhego agenta na fizicheskie i termicheskie svojstva polimernoj matricy butadien-stirolnogo i naturalnogo kauchuka / H. Shahrapour // *Neftekhimiya*. – 2018. – Vol. 58, No. 4. – P. 515–521. – DOI 10.1134/S002824211804024X.

10. *Motavalizadehkakhky* A., *Shahrapour* H. Determination of the most efficient form of sulfur for use as a natural rubber curing agent by comparison of physical and thermal attributes of cured rubber. *Petroleum chemistry*. – 2018. – V. 58, N 1. – P. 89–93.

11. *Mannanova*, F. G. Issledovanie vlijaniya polimernoj sery v kachestve modifizirujushhej dobavki na fiziko-mechanicheskie pokazateli brekernyh rezin / F. G. Mannanova // *Herald of Technological University*. – 2011. – No. 12. – P. 238–240.

12. Modificirovannaya polimernaya sera v processe vulkanizacii / G. K. Bishimbaeva, D. S. Zhumabaeva, S. A. Sakibaeva [i dr.]. // *Nauka i obrazovanie: sohranyaya proshloe, sozdayom budushchee : sbornik statej XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Penza, 05 sentyabrya 2017 goda*. – Penza : "Nauka i Prosveshchenie" (IP Gulyaev G.Yu.), 2017. – S. 23–28.

13. Kinetics of sulfur vulcanization of isoprene rubber with polymer sulfur / V.P. Dorozhkin, E.G. Mokhnatkina, .G. Akhmetov, A.D. Valiev // *Kauchuk i Rezina*. – 2022. –

Vol. 81, No. 6. – P. 276–280. – DOI 10.47664/0022-9466-2022-81-6-276-280.

14. *Titova*, L. M. High quality polymer sulfur production techniques: patent review / L. M. Titova, Y. A. Maksimenko, D. V. Eres // *South-Siberian Scientific Bulletin*. – 2021. – No. 5(39). – P. 72–90. – DOI 10.25699/SSSB.2021.39.5.017.

15. Industrial methods of polymer sulfur production / L. M. Titova, Y. A. Maksimenko, D. V. Eres, E. R. Telichkina // *South-Siberian Scientific Bulletin*. – 2021. – No. 4(38). – P. 81–91. – DOI 10.25699/SSSB.2021.38.4.007.

16. Vliyanie ultrazvukovoj obrabotki na svojstva sernogo rasplava / Y. N. Pyatko, R. T. Akhmetova, L. A. Zenitova [and others] // *Herald of Technological University*. – 2015. – Vol. 18, No. 12. – C. 84–86.

17. *Reznichenko*, S. A. O mehanizme stabilizacii polimernoj sery / S. A. Reznichenko, V. V. Markov, L. V. Sokolova // *Kauchuk i Rezina*. – 2007. – No. 4. – P. 25–29.

18. Bol'shoj spravocnik rezinshchika [Tekst] : [v 2 ch.] / pod red. S. V. Reznichenko, Yu. L. Morozova. – M.: Tekhniform, 2012. – 735 s.

19. Sera polimernaya (nerastvorimaya) [Elektronnaya ssylka] // *OOO "RossPolimer."* 2022. URL: <https://rosspolimer.ru/produktsiya/himicheskoe-syre/syre-dlya-proizvodstva-rezinotekhnicheskikh-izdelij-rti/sera-polimernaya-nerastvorimaya/> (accessed: 12.03.2025).

20. *Kraus*, G. Swelling of filler-reinforced vulcanizates // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1963. – Vol. 7, № 3. – P. 861–871.

21. *Sperling*, L. H. Introduction to Physical polymer Science / Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons Inc., 2006. – 504 p.

22. Influence of characteristics of glass microspheres on the vulcanization process of rubber composites used as heat protective materials / M.H. Vu, Gaidadin A.N., Kablov V.F. [and others] // *Kauchuk i Rezina*. – 2024. – No. 1. – P. 34–39. – (Napolniteli).

23. *Mullins*, L. Softening of Rubber by Deformation // *Rubber Chemistry and Technology*. – 1969. – Vol. 42, № 1. – P. 339–362.

*E. S. Bochkarev¹, A. N. Gaidadin¹, R. Ya. Deberdeev², D. A. Nilidin¹
Sheikh Osman Amani¹, E. V. Kondratev¹, I. D. Ivanov¹*

INFLUENCE OF POLYSULFUR ON THE RHEOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RUBBERS

¹ Volgograd State Technical University

² Kazan National Research Technological University

Abstract: This work investigates the influence of experimental samples of polysulfur on the changes in the dynamic properties of vulcanizates compared to rhombic sulfur and the industrially produced polysulfur OT-20. For the vulcanizates, "Cole-Cole" diagrams, total and cross-link chemical density were obtained. A difference in the types of "Cole-Cole" diagrams was noted for low-filled samples of elastomeric materials vulcanized with polymer and rhombic sulfur. It was shown that the experimental samples of polymer sulfur studied in rubbers based on polyisoprene corresponded in terms of dynamic properties to the industrially produced polymer sulfur of grade OT-20.

Keywords: elastomers, polysulfur, dynamic testing, cross-link density, activation energy