



РАЗДЕЛ 3. МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья
05.16.09 – Материаловедение (по отраслям) (технические науки)
УДК 678
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.026

ВЛИЯНИЕ ТИПА ВУЛКАНИЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ И УСКОРИТЕЛЯ ВУЛКАНИЗАЦИИ НА СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ РЕЗИН

Кымбат Сагидуллоевна Жансакова

Омский государственный технический университет, Омск, Россия
chemistbox@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6057-2153>

Аннотация. Данная работа посвящена определению влияния типа серной вулканизирующей системы для пористых резин, были изготовлены и исследованы резиновые смеси и вулканизаты с добавлением трех различных ускорителей вулканизации. В результате исследований были получены вулканизационные характеристики резиновых смесей, в том числе продемонстрированы кривые вулканизации. Определены показатели коэффициента теплопроводности, кажущейся плотности, сопротивления сжатию и степени равновесного набухания изготовленных пористых резин. Установлено, что полученные образцы пористых резин стали легче (кажущаяся плотность) на 8–40 % относительно эталона. Выявлено, что для пористых резин в качестве ускорителя вулканизации следует выбирать *N*-Циклогексил-2-бензтиазолилсульфенамид, так как он проявляет замедленную скорость во время индукционного периода и большую активность в дальнейшем процессе вулканизации. В качестве подходящей вулканизирующей системы для пористых резин стоит выделить полужффективную вулканизирующую систему, потому что в данном типе кажущаяся плотность заметно меньше относительно образцов обычной вулканизирующей системы и незначительно больше относительно образцов эфффективной вулканизирующей системы.

Ключевые слова: порофор, вулканизат, ускоритель вулканизации, *N*-Циклогексил-2-бензтиазолилсульфенамид (CBS), 2-меркаптобензотиазол (МВТ), *N*-трет-Бутил-2-бензтиазолилсульфенамид (ТВВВ), кривая вулканизации, кажущаяся плотность.

Для цитирования: Жансакова, К. С. Влияние типа вулканизирующей системы и ускорителя вулканизации на свойства пористых резин // Ползуновский вестник. 2021. № 3. С. 201–207. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.026.

INFLUENCE OF TYPE OF VULCANIZATION SYSTEM AND VULCANIZATION ACCELERATOR ON PROPERTIES OF POROUS RUBBERS

Kymbat S. Zhansakova

Omsk State Technical University, Omsk, Russia
chemistbox@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6057-2153>

Abstract. *The objective of this work is to determine the influence of the type of sulfur vulcanizing system for porous rubbers, for which purpose we have produced and examined rubber compounds and vulcanizates with the addition of three different vulcanization accelerators. According to the results of our study, we were able to obtain vulcanization characteristics of the rubber compounds and demonstrate vulcanization curves. In addition, we have determined such indicators, as the thermal conductivity coefficient, apparent density, compression resistance, and the degree of equilibrium swelling of the produced porous rubbers. It was found out that the obtained samples of porous rubbers became lighter (apparent density) by 8-40 % compared to the reference sample. It was revealed that N-cyclohexyl-2-benzothiazolsulfenamide should be chosen as a vulcanization accelerator for porous rubbers, since it shows a slower rate during the induction period and a greater activity in the further vulcanization process. It is worth highlighting the semi-efficient vulcanization system as a suitable vulcanizing system for porous rubbers, since the apparent density of the sample produced according to this method would be both noticeably lower compared to that of a sample obtained with the use of the conventional vulcanizing system and only slightly higher relative to a sample obtained with the use of an efficient vulcanizing system.*

Keywords: *porophore, vulcanizate, vulcanization accelerator, N-cyclohexyl-2-benzothiazolsulfenamide (CBS), N-tert-butyl-2 benzothiazolsulfenamide (TBBS), 2-mercaptobenzothiazole (MBT), vulcanization curve, apparent density.*

For citation: Zhansakova, K. S. (2021). Influence of type of vulcanization system and vulcanization accelerator on properties of porous rubbers. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 201-207. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.026.

ВВЕДЕНИЕ

Пористая резина – эластомерный материал, структура которого содержит множество пор, распределенных в массе [1]. В зависимости от сферы применения, к пористым резинам предъявляются различные требования. Для изготовления изделий изоляции трубопроводов, коллекторов, инженерных сетей и оборудования при строительстве зданий и сооружений различного назначения важно, чтобы материалы обладали высокими тепло-, пароизоляционными свойствами, использовались в широком диапазоне температур, обладали высокими физико-механическими свойствами, были устойчивыми к УФ-воздействию и агрессивным средам.

Пористость резин во многом зависит от полимерной матрицы и состава резиновой смеси. На стадии определения вулканизационных свойств можно спрогнозировать, будет ли готовый образец эластичным. Известно,

что чем выше максимальный крутящий момент, тем больше жесткость вулканизата [2, 3]. Соответственно, разность крутящих моментов косвенно характеризует степень поперечного сшивания вулканизата [4–6].

Донором серы для сшивки полимера являются вулканизирующий агент и ускорители вулканизации класса тиурамов [7]. Кроме того, вулканизирующей способностью обладают такие порофоры, как диазоаминобензол и азодикарбонамид [8]. Во время вулканизации резин происходит образование углерод-углеродных (-C-C-), моно- (-S-) и ди- (-S-S-) и полисульфидных (-Sn-) связей, имеющих различные энергии связи [2, 9, 10]. Их количество зависит от природы ускорителя вулканизации, активаторов и наполнителей.

Существует классификация вулканизирующих систем, в которой предусмотрены пропорции ускорителя вулканизации и серы (таблица 1) [11, 12].

ВЛИЯНИЕ ТИПА ВУЛКАНИЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ И УСКОРИТЕЛЯ ВУЛКАНИЗАЦИИ НА СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ РЕЗИН

Таблица 1 – Классификация вулканизирующих систем

Table 1 – Classification of vulcanization systems

Тип системы	Сера, масс.ч.	Ускоритель, масс.ч.	Ускоритель / Сера
Обычный	2,0–3,5	1,2–0,4	0,1–0,6
Полуэффективный	1,0–1,7	2,4–1,2	0,7–2,5
Эффективный	0,4–0,8	5,0–2,0	2,5–12,0

С технологической точки зрения важно подобрать рецептуру так, чтобы процессы порообразования и вулканизации были согласованными [13]. Для изготовления пористых резин используют различные ускорители вулканизации, тиазолы [14, 15] и сульфенамиды [16, 17]. Поэтому целью данной работы является определение оптимальной вулканизирующей системы для пористых резин. В задачи исследования входило: изготовление и изучение резиновых смесей и вулканизатов с добавлением распространенных ускорителей вулканизации.

МЕТОДЫ

Объектами исследования являются резиновые смеси и вулканизаты обычной (ОВС), полуэффективной (ПЭВС) и эффективной (ЭВС) вулканизирующих систем с различными ускорителями вулканизации. В качестве эталона был взят рецепт изготовления резиновой смеси на основе бутадиенстирольного каучука [18]. Исследуемые рецептуры приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Рецептуры исследуемых пористых резин

Table 2 – Formulas of the studied porous rubbers

Ингредиенты	Эталон	Масс. ч., на 100 масс. ч. каучука							
		1	2	3	4	5	6	7	8
СКМС-30АРКПН					100,0				
Технический углерод П803					40,0				
Оксид цинка					3,0				
Хлорпарафин 470А					40,0				
Диафен					2,0				
ОBSH					6,5				
Тип вулканизирующей системы	ОВС	ПЭВС	ЭВС	ОВС	ПЭВС	ЭВС	ОВС	ПЭВС	ЭВС
CBS	1,5	2,0	2,5						
MBT				1,5	2,0	2,5			
TBBS							1,5	2,0	2,5
Сера	2,5	1,0	0,5	2,5	1,0	0,5	2,5	1,0	0,5
Ускоритель/Сера	0,6	2,0	5,0	0,6	2,0	5,0	0,6	2,0	5,0
Всего:	195,5	194,5	195,5	195,5	194,5	195,5	195,5	194,5	195,5

* Примечание: OBSH – порофор, 4,4 – оксисибс (бензолсульфонилгидразид); CBS – ускоритель вулканизации N-Циклогексил-2-бензтиазолилсульфенамид; MBT – ускоритель вулканизации 2-меркаптобензотиазол; TBBS – ускоритель вулканизации N-трет-Бутил-2-бензтиазолилсульфенамид

Изготовление резиновых смесей проводили на лабораторных вальцах типа LRMR-SC-150/O с фрикцией валков 1:1,14, при температуре 50 °С. Вулканизацию проводили в 2 этапа. На первом этапе проводили «подпрессовку» при давлении 0,25 МПа и температуре 160 °С в течение 5 минут. Второй этап – дальнейшее изготовление в прессе, без приложения давления, температура 160 °С время вулканизации подбиралось индивидуально для каждого образца с учетом оптимального времени вулканизации (90 %). Для изготовления вулканизатов использовали гидравлический пресс марки Joos-Quality-Press, *POLZUNOVSKIY VESTNIK № 3 2021*

нагрев плит электрический, программирование циклов нагрева / охлаждения и давления задается с помощью компьютера, оборудованного тактильным монитором.

Технологические свойства определяли с помощью безроторного виброреометра D-RPA 3000 при температуре 160 °С в течение 60 минут, в соответствии с методикой ASTM D 5289-19a. Теплофизические свойства измеряли с применением прибора ИТС-1 в соответствии с методикой ГОСТ 7076-99. Сопротивление сжатию образцов определяли в соответствии с методикой ГОСТ 20014-83, для этого использовали разрывную машину

марки Zwick/Roell. Степень сжатия от максимальной высоты образца составляла 50 %, время выдержки образца в сжатом состоянии 60 +/- 6 секунд. Кажущуюся плотность определяли в соответствии с методикой ГОСТ 409-2017.

Степень равновесного набухания определяли с помощью фиксирования усреднённого изменения массы, серии образцов вулканизаторов объёмом от 1 до 3 см³ в толуоле при 25 °С в течение 7 суток, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 1817-2009. Набухшие образцы извлекались из растворителя, избыток кото-

рого удалялся с поверхности фильтровальной бумагой, после чего проводилось взвешивание образца. Изменение массы образца вычисляли по формуле:

$$\Delta m_{100} = \frac{m_i - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты влияния типа вулканизирующей системы и ускорителей вулканизации представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты влияния типа вулканизирующей системы и ускорителей вулканизации

Table 3 – Effect of the type of vulcanization system and vulcanization accelerators

№	Эталон	1	2	3	4	5	6	7	8
Вулканизационные характеристики									
Min ML, дН·м	0,43	0,42	0,41	0,44	0,44	0,48	0,45	0,45	0,44
Max MH, дН·м	9,03	4,49	2,76	8,37	5,01	3,22	8,78	4,99	3,04
ΔM, дН·м	8,60	4,07	2,35	7,93	4,57	2,74	8,33	4,54	2,60
Нач. в, ts, мин	2,29	3,24	5,46	3,14	6,01	18,31	2,26	3,00	4,52
T10, мин	2,22	2,16	2,24	2,51	3,07	4,17	2,17	2,09	2,19
T30, мин	3,43	3,52	4,09	5,58	8,25	13,49	3,39	3,37	3,57
T50, мин	5,20	6,09	7,12	9,57	17,28	31,17	5,16	5,56	6,41
T90, мин	13,21	26,29	37,55	42,04	52,06	54,53	13,04	30,23	37,45
R _v , мин ⁻¹	9,158	4,338	3,116	2,571	2,172	2,761	9,276	3,672	3,037
Физические свойства									
λ, Вт/м·К	0,0786	0,0958	0,1039	0,0238	0,0488	0,0669	0,0415	0,0513	0,0767
ρ, кг/м ³	630,494	506,055	467,860	377,218	478,791	491,911	578,605	557,372	516,213
σ _{сж} , МПа	0,404	0,190	0,118	0,174	0,171	0,184	0,253	0,179	0,154
α, %	369,220	494,056	611,620	275,726	322,333	366,994	415,561	510,140	573,850

* Примечание: Min ML – минимальный крутящий момент; Max MH – максимальный крутящий момент; ΔM – разность крутящих моментов; Нач. в, ts – время начала вулканизации; T10, T30, T50 и T90 – время достижения заданной степени (%) вулканизации; R_v – показатель (индекс) скорости вулканизации; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – кажущаяся плотность; σ_{сж} – сопротивление сжатию; α – степень равновесного набухания

Исходя из полученных результатов (таблица 3 и рисунок 1), можно отметить, что природа ускорителя вулканизации и вулканизирующая система влияют на пористость полученных резин.

Разность крутящих моментов имеет самые высокие значения в ОВС вне зависимости от природы ускорителя вулканизации. Соответственно, ЭВС имеет самые низкие значения разности крутящих моментов. Из чего можно предположить, что в ЭВС происходит низкое связывание серы с каучуком.

Значения времени начала вулканизации характеризуют способность полученных резиновых смесей к преждевременной вулканизации [19]. Наиболее оптимальными показателями обладают смеси с ПЭВС, при этом самые высокие значения имеют ЭВС, но, с точки зрения технологии вулканизационного процесса, последние являются экономически нецелесообразными и времязатратными.

Соответственно, в зависимости от уменьшения элементарной серы и увеличения концентрации ускорителя вулканизации, наблюдается постепенное увеличение оптимального времени вулканизации (T90).

Показатель скорости вулканизации снижается с уменьшением концентрации вулканизирующего агента (серы). Особенно наглядно это заметно в резиновых смесях с ускорителями вулканизации N-Циклогексил-2-бензтиазолилсульфенамид (CBS) и N-трет-Бутил-2-бензтиазолилсульфенамид (TBBS). В образцах, содержащих 2-меркапто-бензотиазол (МВТ), показатель скорости вулканизации изменяется незначительно. Это связано с тем, что, несмотря на высокую концентрацию МВТ, его скорость присоединения к каучуку резко замедляется после полного присоединения серы, так как количество поперечных связей в системах с таким ускорителем.

ВЛИЯНИЕ ТИПА ВУЛКАНИЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ И УСКОРИТЕЛЯ ВУЛКАНИЗАЦИИ НА СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ РЕЗИН

телем зависит от количества вулканизирующего агента и оксида цинка, входящих в состав резиновой смеси [20].

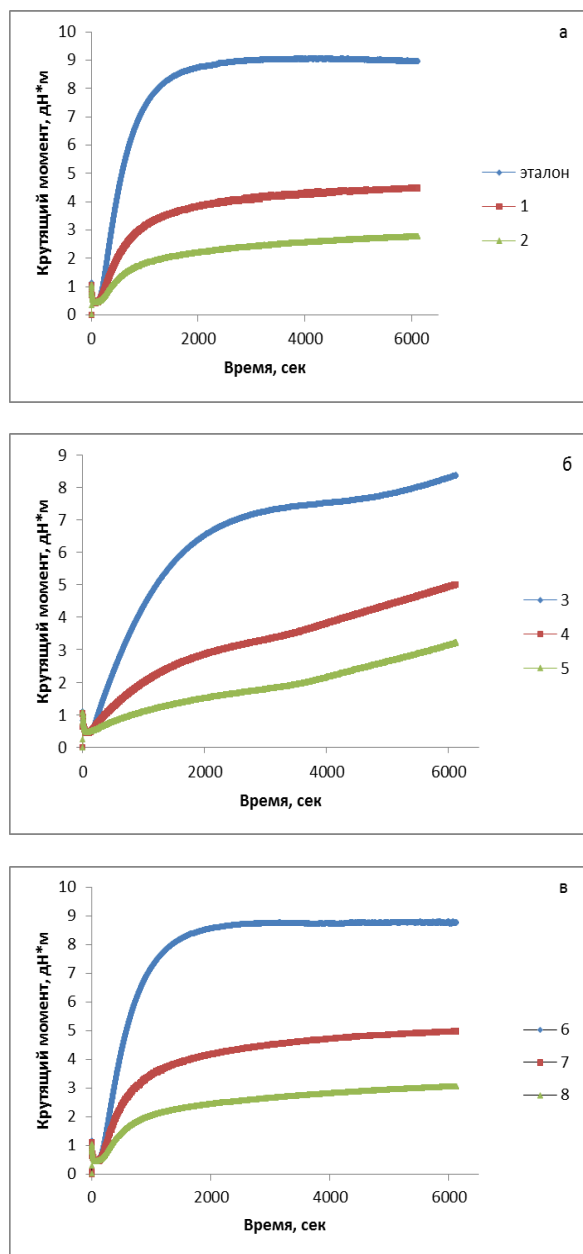


Рисунок 1 – Кривые вулканизации резиновых смесей: а – CBS; б – MBT; в – TBBS

Figure 1 – Vulcanization curves of rubber compounds: а – CBS; б – MBT; в – TBBS

Теплопроводность пористых резин вне зависимости от типа ускорителя вулканизации повышается в системах от ОВС < ПЭВС < ЭВС. Из чего можно предположить, что данное свойство напрямую зависит от количества связанной серы. В подтверждение данного

высказывания можно привести работу [21], в которой автор доказывает, что теплопроводность меняется в зависимости от состава смеси и тепловой эффект увеличивается по мере присоединения серы.

Стоит учитывать: чем выше пористость, тем меньше кажущаяся плотность. Кроме того, значения сопротивления резин при сжатии характеризуют пористость изготовленных образцов. Меньшей сжимаемостью обладают образцы с высоким сопротивлением деформации. Исходя из полученного комплекса результатов, можно сделать вывод, что тип вулканизирующей системы оказывает непосредственное влияние на пористость вулканизатов. С уменьшением количества элементарной серы порообразование повышается. Наиболее наглядно данный процесс наблюдается в образцах с добавлением сульфенамидов (CBS и TBBS), в образцах с добавлением MBT данный эффект не наблюдается.

Из проведенных испытаний установлено, что степень равновесного набухания полученных образцов зависит от природы ускорителя вулканизации. Во всех изготовленных образцах данный показатель повышается с уменьшением доли элементарной серы и увеличением доли ускорителя вулканизации.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных испытаний показывают, что характеристики опытных образцов имеют лучшие значения относительно эталона. А именно, образцы стали легче (кажущаяся плотность) на 8–40 %.

Исходя из проведенного цикла испытаний, можно сделать вывод, что для пористых резин в качестве ускорителя вулканизации следует выбирать CBS, так как он проявляет замедленную скорость во время индукционного периода и большую активность в дальнейшем процессе вулканизации.

В качестве оптимальной вулканизирующей системы, для CBS стоит выделить ПЭВС, потому что в данном типе кажущаяся плотность заметно меньше относительно образцов ОВС и незначительно больше относительно образцов ЭВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология резины: рецептуростроение и испытания / Под общ. ред. Дж.С. Дик. Санкт-Петербург. : Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
2. Ghorai S., Jalan A.K., Roy M. [et al.]. Turing of accelerator and curing system in devulcanized green natural rubber compounds // Journal Polymer

testing. 2018. V. 69. P. 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.015>.

3. Aprem A.S., Joseph K., Mathew T. [et al.]. Studies on accelerated sulfur vulcanization of natural rubber using 1-phenyl-2,4-dithiobiuret/tertiary butyl benzothiazole sulphonamide // *European Polymer Journal*. 2003. V. 39. Is. 7. P. 1451–1460. DOI:10.1016/S0014-3057(02)00382-8.

4. Компоненты из вторичного сырья в составе эластомерных композиций / Н.Р. Прокопчук [и др.] // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 19. С. 194–198.

5. Исследование влияния наполнения резин микроуглеродными волокнами с целью улучшения теплозащитных свойств / В.Ф. Каблов [и др.] // *Известия ВолгГТУ*. 2016. № 12 (191). С. 88–91.

6. Исследование влияния нефтеполимерных смол на упругопрочностные свойства шинных резин / Ж.С. Шашок [и др.] // *Труды БГТУ*. 2020. № 1 (229). С.190–197.

7. Новаков И.А., Вольфсон С.И., Новопольцева О.М. Реологические и вулканизационные свойства эластомерных композиций. Москва. : ИКЦ «Академкнига», 2006. 332 с.

8. Гришин Б.С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития : монография. Казань. : КНИТУ, 2016. 420 с.

9. Исследование влияния эффективных вулканизирующих систем на свойства резин на основе бутадиен-нитрильного каучука / Д.С. Востриков [и др.] // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2019. № 12 (235). С. 126–131.

10. Пичугин А.М. Материаловедческие аспекты создания шинных резин : монография. Москва : НТЦ «НИИШП», 2008. 383 с.

11. Кузьминский А.С., Кавун С.М., Кирпичев В.П. Физико-химические основы получения, переработки и применения эластомеров. Москва : Химия, 1976. 368 с.

12. Datta R.N. Rubber curing systems. *Rapra Rev. Rep.* V.12. 2002. P. 160.

13. Реометрические исследования процессов вулканизации и порообразования вспененных эластомерных материалов / А.В. Шуваева [и др.] // *Каучук и резина*. 2017. Т. 76. № 3. С. 180–184.

14. Vahidifar A., Khorasani S.N., Park C.B. [et al.]. Fabrication and Characterization of Closed-Cell Rubber Foams Based on Natural Rubber/Carbon Black by One-Step Foam Processing // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2016. V. 55. Is. 8. – P. 2407–2416. DOI:10.1021/acs.iecr.5b04448.

15. Yamsaengsung W., Sombatsompop N. Effect of chemical blowing agent on cell structure and mechanical properties of EPDM foam, and peel strength and thermal conductivity of wood / NR composite – EPDM foam laminates // *Journal Composites Part B: Engineering*. 2009. V. 40. Is. 7. P. 594-600. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.003>.

16. Najib N.N., Ariff Z.M., Manan N.A. [et al.]. Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural rubber foam // *Journal of Physical Science*. 2009. V. 20. Is.1. P. 13–25.

17. Charoeythornkhajhornchai, P.,

Samthong Ch., Boonkerd K., Somwangthanaroj A. Effect of azodicarbonamide on microstructure, cure kinetics and physical properties of natural rubber foam // *Journal of Cellular Plastics*. 2017. V. 53. Is. 3. P. 287–303. <https://doi.org/10.1177/0021955X16652101>.

18. Берлин А.А. Основы производства газонаполненных пластмасс и эластомеров. Москва : Госхимиздат, 1954. 194 с.

19. Surya I., Muniyadi M., Hanafi I. A review on clay-reinforced ethylene propylene diene terpolymer composites // *Journal Polymer Composites*. 2021. V. 42. Is. 4. P. 1–14. DOI: 10.1002/pc.25956.

20. Блох Г.А. Органические ускорители вулканизации каучуков / Под ред. П.И. Захарченко. Москва : Химия, 1964. 545 с.

21. Маслов А.А. Разработка системы принятия решений для определения оптимального режима процесса неизотермической вулканизации : дис ... канд. техн. наук. Воронеж, 2019. 175 с.

Информация об авторах

К. С. Жансакова – аспирант кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета.

REFERENCES

1. Dick, J.S. (2001). *Rubber technology. Compounding and testing for performance*. Munich: Carl Hanser Verlag.

2. Ghorai, S., Jalan, A.K., Roy, M., Das, A. & De, D. (2018). Turing of accelerator and curing system in devulcanized green natural rubber compounds. *Journal Polymer testing*. (69) 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.015>.

3. Aprem, A.S., Joseph, K., Mathew, T., Altstaedt, V. & Thomas, S. (2003) Studies on accelerated sulfur vulcanization of natural rubber using 1-phenyl-2,4-dithiobiuret/tertiary butyl benzothiazole sulphonamide. *European Polymer Journal*. 39(7). 1451–1460. DOI:10.1016/S0014-3057(02)00382-8.

4. Prokopchuk, N.R., Kayushnikov, S.N., Kasperovich, A.V., Gurin, P.D. & Shkodich, V.F. (2015). Components from secondary raw materials in the composition of elastomeric compositions. *Bulletin of the Technological University*. 18(19). 194-198. (In Russ.).

5. Kablov, V.F., Keybal, N.A., Novopoltseva, O.M., Rudenko, K.Y., Motchenko, A.O. & Malaho, A.P. (2016). Study of influence of filling rubbers microcarbon fiber with the aim of improving physical-mechanical and heat-shielding properties. *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 12(191). 88-91. (In Russ.).

6. Shashok, Zh.S., Perfilieva, S.A., Prokopchuk, N.R. & Uss, E.P. (2020). Research of influence of petroleum polymer resins on elastic strength properties of tire rubbers. *Works of the Belarusian State Technical University*. 1(229). 190-197. (In Russ.).

7. Novakov, I.A., Wolfson, S.I. & Novopoltseva, O.M. (2006). Rheological and vulcanization

ВЛИЯНИЕ ТИПА ВУЛКАНИЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ И УСКОРИТЕЛЯ ВУЛКАНИЗАЦИИ НА СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ РЕЗИН

- properties of elastomeric compositions. Moscow: ICC "Akademkniga". (In Russ.).
8. Grishin, B.S. (2016). *Theory and practice of strengthening elastomers. Condition and directions of development. Monograph*, Kazan: KNITU. (In Russ.).
9. Vostrikov, D.S., Bochkarev, E.S., Dimitrov, P.V. & Vaniev, M.A. (2019). Study of the effect of effective vulcanizing systems on the properties of rubbers based on nitrile butadiene rubber. *Journal Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 12(235). 126-131. (In Russ.).
10. Pichugin, A.M. (2008). *Material science aspects of creating tire rubbers. Monograph*, Moscow: STC "NIISHP". (In Russ.).
11. Kuzminsky, A.S., Kavun, S.M., Kirpichev, V.P. (1976). *Physico-chemical bases of production, processing and application of elastomers*. Moscow: Chemistry. (In Russ.).
12. Datta, R.N. (2002). Rubber curing systems. *Rapra Rev. Rep.*, (12).
13. Shuvaeva, A.V., Gordenko, D.R., Lyusova, L.R. & Naumova, Yu.A. (2017). Rheometric Study of Vulcanization and Pore Formation of Foaming Elastomer Materials. *Kauchuk i rezina / Sponge rubbers*, 76(3) 180-184. (In Russ.).
14. Vahidifar, A., Khorasani, S.N., Park, C.B., Naguib, H.E. & Khonakdar, H.A. (2016). Fabrication and Characterization of Closed-Cell Rubber Foams Based on Natural Rubber/Carbon Black by One-Step Foam Processing. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 55(8). 2407-2416. DOI:10.1021/acs.iecr.5b04448.
15. Yamsaengsung, W., Sombatsompop, N. (2009). Effect of chemical blowing agent on cell structure and mechanical properties of EPDM foam, and peel strength and thermal conductivity of wood / NR composite - EPDM foam laminates. *Journal Composites Part B: Engineering*. 40(7). 594-600. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.003>
16. Najib, N.N., Ariff, Z.M., Manan, N.A. Bakar, A.A. & Sipaut, C.S. (2009). Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural rubber foam. *Journal of Physical Science*. 20(1). 13-25.
17. Charoeythornkhajhornchai, P., Samthong, Ch., Boonkerd, K. & Somwangthanaroj, A. (2017). Effect of azodicarbonamide on microstructure, cure kinetics and physical properties of natural rubber foam. *Journal of Cellular Plastics*. 53(3). 287-303. <https://doi.org/10.1177/0021955X16652101>.
18. Berlin, A.A. (1954). *Fundamentals of the production of gas-filled plastics and elastomers*. Moscow: Goskhimizdat. (In Russ.).
19. Surya, I., Muniyadi, M. & Hanafi, I. (2021). A review on clay-reinforced ethylene propylene diene terpolymer composites. *Journal Polymer Composites*. 42(4). 1-14. DOI: 10.1002/pc.25956.
20. Blokh, G.A. (1964). *Organic accelerators of rubber vulcanization*. Moscow: Chemistry. (In Russ.).
21. Maslov, A.A. (2019). Development of a decision-making system for determining the optimal mode of the non-isothermal vulcanization process. Ph.D. thesis. Voronezh. (In Russ.).

Information about the author

K. S. Zhansakova – post-graduate student of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science of Omsk State Technical University.

Статья поступила в редакцию 28.07.2021; одобрена после рецензирования 15.09.2021; принята к публикации 17.09.2021.

The article was received by the editorial board on 28 July 21; approved after reviewing on 15 Sep 21; accepted for publication on 17 Sep 21.