

Н.Ю. Любимова, А.С. Ермилов, Э.М. Нуруллаев, Е.А. Быкова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ТРЕХМЕРНО СШИТОГО ЭЛАСТОМЕРА ПО ЭНЕРГИИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

На основе разработанной компьютерной программы исследовано влияние эффективной концентрации поперечных связей, включающих постоянные химические и переменные межмолекулярные («физические»). Также исследовано влияние объемного соотношения полимера и пластификатора на изменение энергии механического разрушения трехмерно сшитого (3D) эластомера как сополимера поли-1,4-*цис*-бутадиена марки СКД и поли-1,4-*цис*-изопрена марки СКИ при различных температурах. Впервые теоретически обосновано вычисление зависимости энергии (работы) механического разрушения трехмерно сшитых эластомеров на основе поли-1,4-*цис*-бутадиена и поли-1,4-*цис*-изопрена от эффективной мольной концентрации поперечных связей и температуры испытания. Наибольшее значение энергии механического разрушения достигается при повышенных значениях v_{eff} . Методом численного моделирования – варьированием структурных параметров высокомолекулярного эластомера – найдено максимальное значение энергии разрушения (прямая задача); по заданному значению энергии механического разрушения получены требуемые параметры состава (обратная задача). Впервые построены огибающие значений энергии механического разрушения применительно к инженерной проблеме создания связующих при разработке перспективных автомобильных и авиационных шин, применяемых в широком температурном диапазоне эксплуатации. Дана рекомендация по оптимизации молекулярной структуры полимерной основы соответствующих композитов.

Ключевые слова: эластомер, структурные параметры, разрывные напряжение и деформация, энергия механического разрушения, огибающие точек энергий разрушения, оптимизация состава.

N.Yu. Lyubimova, A.S. Ermilov, E.M. Nurullaev, E.A. Bykova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

OPTIMIZATION OF 3D CROSSLINKED ELASTOMERS BASED ON ENERGY OF MECHANICAL DESTRUCTION

Based on a computer program designed it is studied the effect of concentration of effective crosslinks that include chemical constant and variable intermolecular (“natural”) crosslinks. It is also studied the influence of volume ratio of polymer and plasticizer on change of mechanical fracture energy of three-dimensionally crosslinked (3D) elastomer as a copolymer of poly-1,4-*cis*-butadiene and BR grade poly-1,4-*cis*-isoprene-*cis* IR grade at different temperatures. For the first time, it was justified in a theoretical way the calculation of the energy (work) of mechanical destruction of three-dimensionally crosslinked elastomers based on poly-1,4-*cis*-butadiene and poly-1,4-*cis*-isoprene depending on effective molar concentration of crosslinking and the test temperature. The greatest value of the energy of mechanical destruction is achieved at higher values of v_{eff} . The maximum fracture energy (direct problem) was found by variation of structural parameters of high molecular elastomer using numerical simulation. For a given value of the energy of mechanical destruction, the required parameters of the composition were obtained (inverse problem). For the first time, the envelopes of the energy of mechanical destruction were constructed applied to engineering problems of creating binders for development of advanced automobile and aircraft tires used in a wide temperature operating range. The recommendation on optimization of the molecular structure of the polymer base corresponding composites was made.

Keywords: elastomer, structural parameters, rupturing stress and strain, energy of mechanical destruction, envelopes of points of fracture energies, structure optimization.

Введение

Эластомерные композитные материалы на основе 3D-сшитых высокомолекулярных непредельных каучуков как сополимеров поли-1,4-*цис*-бутадиена и поли-1,4-*цис*-изопрена, наполненных сажей, широко применяются при создании автомобильных и авиационных шин [1–3]. Для ускорения разработки перспективных материалов необходимо проводить исследование взаимосвязи состава композиции и механических свойств ее полимерной основы [4–7]. Ранее нами было показано, что эффективная мольная концентрация поперечных химических

и межмолекулярных связей является важнейшим структурным параметром 3D-сшитых пластифицированных эластомеров на основе низкомолекулярных каучуков с концевыми функциональными группами, наполненных твердыми частицами [8–10].

Целями настоящей работы стали:

– исследование численным методом влияния эффективной мольной концентрации поперечных химических и межмолекулярных («физических») связей на энергию механического разрушения 3D-сшитого пластифицированного высокомолекулярного сополимера (эластомера) в диапазоне температур от 223 до 323 К;

– определение максимального значения энергии механического разрушения в условиях одноосного растяжения путем варьирования состава композиции (прямая задача);

– определение требуемых параметров состава по заданному значению энергии механического разрушения (обратная задача);

– на примере исследованной высокомолекулярной композиции построение впервые огибающих значений энергий механического разрушения, которые комплексно определяют эксплуатационный ресурс, например авиационных и автомобильных шин.

Объект численного эксперимента – трехмерно сшитый пластифицированный сополимер на основе поли-1,4-*цис*-бутадиена и поли-1,4-*цис*-изопрена. Сшивающий агент – сера; ускоритель вулканизации – тетраалкилтиурамдисульфид («тиурам-Д»); активатор 3D-сшивания – оксид цинка [1]. В качестве пластификатора использовано масло пластификаторное марки МПА.

Ниже приведены исходные данные для проведения численного эксперимента.

Исходные данные для проведения численного эксперимента

Температуры опыта, К	223, 273, 323
Температура стеклования полимера 1 (полибутадиен марки СКД), К	178
Температура стеклования полимера 2 (полиизопрен марки СКИ), К	200
Молекулярная масса полимера 1	198 775
Молекулярная масса полимера 2	372 802
Плотность полимера 1, кг/м ³	890
Плотность полимера 2, кг/м ³	900
Объемная доля полимера 1	0,7; 0,65; 0,5
Объемная доля полимера 2	0,25; 0,25; 0,2
Объемная доля пластификатора	0,05; 0,10; 0,30
Эффективная мольная концентрация поперечных связей, моль/м ³	1, 5, 10, 50
Молекулярная масса пластификатора (масло пластификаторное марки МПА)	1010
Температура стеклования пластификатора, К	169
Плотность пластификатора, кг/см ³	890

Теоретическая часть

Ранее авторами на теоретической основе получено уравнение для расчета энергии механического разрушения наполненного эластомера в условиях одноосного растяжения [11]:

$$W = v_{ch} \phi_r^{1/3} RT_\infty \left(1 + 1,25 \frac{\phi/\phi_m}{1 - \phi/\phi_m} \right)^2 \times \left\{ \left(\frac{\alpha_b^3 - 3\alpha_b + 2}{2\alpha_b} \right) + 29 \exp \left[-0,225 \cdot 10^{-3} (T - T_g)^2 \right] \times a_{\dot{\alpha}}^{-1} \left(\frac{2\alpha_b^3 - 3\alpha_b^2 - 1}{2\alpha_b^2} \right) \right\}. \quad (1)$$

Здесь v_{ch} – мольная концентрация поперечных химических связей в полимерной основе связующего композиции; φ_r – объемная доля полимера в связующем при объемной доле пластификатора φ_{sw} так, что $(\varphi_r + \varphi_{sw}) = 1$; R – универсальная газовая постоянная; T_∞ – равновесная температура, при которой мольная концентрация межмолекулярных связей $\rightarrow 0$; φ – объемная доля наполнителя; φ_m – максимальная объемная доля наполнителя, зависящая от формы и фракционного состава частиц наполнителя; T – температура испытания; T_g – температура структурного стеклования полимерного связующего; α_b – разрывное относительное удлинение при интегрировании в пределах от $\alpha = 1$ (начало диаграммы растяжения) до $\alpha = \alpha_b$ (точка разрыва образца); $a_{\dot{\alpha}}^{-1}$ – коэффициент скоростного смещения, равный 1 при стандартной (в резиновой технической отрасли промышленности) скорости деформирования $\dot{\alpha} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$.

Если в уравнении (1) положить $\varphi/\varphi_m = 0$, то указанные формулы можно использовать для расчета энергии механического разрушения сетчатых пластифицированных высокомолекулярных эластомеров:

$$W = \varphi_r^{1/3} v_{ch} R T_\infty \left\{ \left(\frac{\alpha_b^3 - 3\alpha_b + 2}{2\alpha_b} \right) + 29 \exp \left[-0,225 \cdot 10^{-3} (T - T_g)^2 \right] a_{\dot{\alpha}}^{-1} \left(\frac{2\alpha_b^3 - 3\alpha_b^2 + 1}{2\alpha_b^2} \right) \right\}, \quad (2)$$

где значения предельного (разрывного) относительного удлинения α_b или разрывной деформации ε_b определяются эмпирически обобщенной зависимостью [6]

$$\varepsilon_b = 100 \% (\alpha_b - 1) = 10^{3,1-40\sqrt{v_{eff}}}. \quad (3)$$

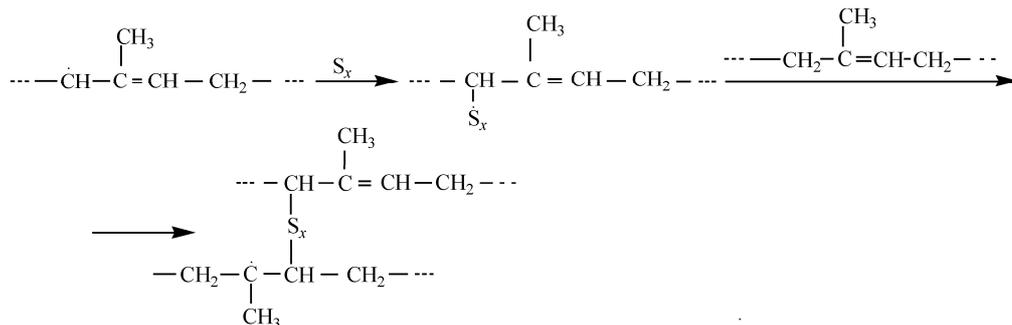
Здесь величина эффективной мольной концентрации поперечных связей [6]

$$v_{eff} = v_{ch} (1 + v_{ph}) = v_{ch} \left\{ 1 + 29 \exp \left[-0,225 \cdot 10^{-3} (T - T_g)^2 \right] \right\}, \quad (4)$$

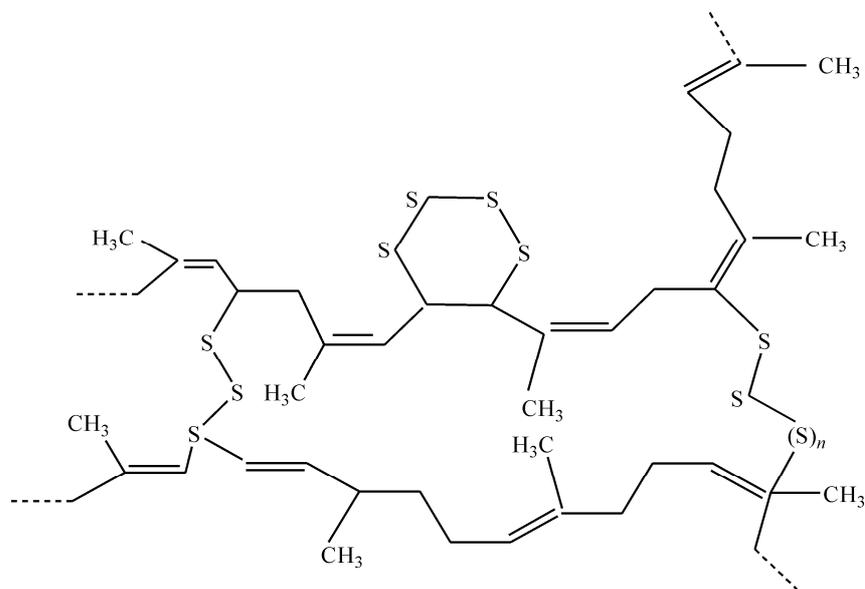
где v_{ph} – мольная концентрация межмолекулярных («физических») поперечных связей.

Определение максимального значения энергии разрушения эластомера (прямая задача)

В зависимости от количества вводимой серы, являющейся короткоцепным полимером, в процессе вулканизации получается различная частота 3D-сетки сополимера двух каучуков соответственно. При введении 1–5 % образуется редкая сетка и эластомер получается высокоэластичным, деформационно устойчивым в условиях эксплуатации авиационных и автомобильных шин. С увеличением содержания серы частота сетки растет. Присоединение серы, например в случае поли-1,4-*цис*-изопрена, происходит или по атому, соседнему с двойной связью, или по двойной связи как по ионному, так и по свободнорадикальному механизму:



После процесса вулканизации смеси вышеуказанных каучуков с помощью 3D-сшивающего агента получается эластомер с химической структурой сополимера:



Для решения инженерной задачи повышения эксплуатационного ресурса авиационных и автомобильных шин необходимо применение высокоэластичного материала, для чего сера вводилась в количестве 0,01 об. долей. Для анализа расчетной энергии механического разрушения, согласно формуле (1), необходимо задавать значения мольной концентрации поперечных химических связей. С этой целью экспериментально исследована при температуре 273 К зависимость разрывной деформации вулканизатов от содержания в них связанной серы и значения мольной концентрации поперечных химических связей (табл. 1). Из данных видно, что для обеспечения высокой разрывной деформации необходимо дозировать серу на уровне 0,01 об. долей, соответствующем концентрации химических поперечных связей около 1 моль/м³. Указанное согласуется с многочисленными экспериментальными данными (рис. 1), включающими низкомолекулярные каучуки с концевыми функциональными группами и высокомолекулярный полибутилизопрен [9].

Таблица 1

Зависимость разрывной деформации вулканизатов от содержания в них связанной серы и значения мольной концентрации поперечных химических связей, $T_{exp} = 273$ К

Содержание серы в вулканизатах, об. долей	Разрывная деформация ϵ_b , %	Мольная концентрация поперечных химических связей ν_{ch} , моль/м ³
0,01	900	1
0,02	700	5
0,03	500	10
0,05	300	50

В табл. 2 приведены расчетные зависимости энергии механического разрушения W в условиях одноосного растяжения трехмерно сшитого эластомера от разрывной деформации ϵ_b при температурах 223, 273, 323 К для образцов с различной эффективной мольной концентрацией химических поперечных связей и отношения объемных долей сополимера к пластификатору.

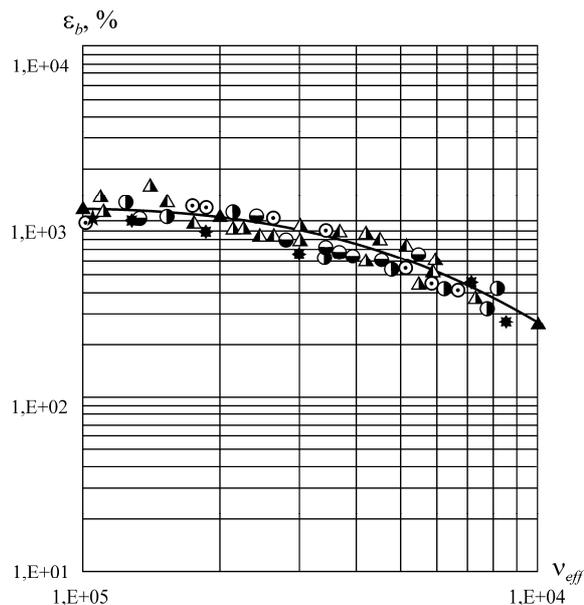


Рис. 1. Экспериментальная зависимость $\varepsilon_b^0(\%) = f(v_{eff}, \text{моль} \cdot \text{см}^{-3})$ для различных полимерных связующих на основе: ▲ – полисульфида; ★ – полиэфируретана; △ – полиизопрендивинила; ⊙ – полибутадиена; ● – полибутилизопрена; ⊖ – полидиенэпоксидуретана; ★ – полибутадиена; + – полиизопрена при $T = 293 \text{ К}$ и $\dot{\alpha} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

Таблица 2

Расчетные зависимости энергии механического разрушения

Варьируемые параметры молекулярной структуры эластомера		Результаты численного эксперимента	
$\varphi_r/\varphi_{sw} = 0,95/0,05$		–	
$T, \text{ К}$	$v_{eff}, \text{ моль/м}^3$	$W, \text{ кДж}$	$\varepsilon_b, \%$
223	1	618,26	877,92
	5	1647,8	182,53
	10	2055,73	182,53
	50	1119,18	65,01
273	1	328,24	1014,28
	5	1101,13	776,53
	10	1646,1	635,68
	50	2524,85	273,16
323	1	244,51	1132,54
	5	962,99	993,7
	10	1612,76	900,95
	50	3862,76	595,8
$\varphi_r/\varphi_{sw} = 0,9/0,1$		–	
223	1	606, 21	832,53
	5	1628,18	499,35
	10	2043,94	340,45
	50	1155,77	67,6

Окончание табл. 2

Варьируемые параметры молекулярной структуры эластомера		Результаты численного эксперимента	
273	1	321,03	1018,05
	5	1082,94	783
	10	1625,3	643,19
	50	2534,84	280,43
323	1	240,08	1134,08
	5	948,28	996,74
	10	1591,49	904,84
	50	3844,53	601,04
$\varphi_r/\varphi_{sw} = 0,7/0,3$		–	
223	1	590	870
	5	1526,79	530,98
	10	1975,3	371,35
	50	1338,85	82,11
273	1	286,97	1037,16
	5	994,96	816,26
	10	1522,69	682,15
	50	2575,8	319,85
323	1	219,94	1141,43
	5	880,67	1011,25
	10	1492,93	923,52
	50	3755,42	629,7

Исходя из термодинамической совместимости и технологических свойств эластомера соотношения объемных долей сополимер/пластификатор (φ_r/φ_{sw}) выбраны равными 0,95/0,05; 0,9/0,1; 0,7/0,3 соответственно. С учетом требуемых механических характеристик и технологических возможностей мольная концентрация химических поперечных связей варьировалась в диапазоне от 1 до 50 моль/м³.

Сравнение табличных данных показывает, что обнаруженная экстремальная зависимость при температуре 223 К постепенно «вырождается» с повышением температуры испытания и может быть объяснена конкуренцией энергий межатомных и межмолекулярных поперечных связей. Так, в соответствии с формулой (4) концентрация межмолекулярных связей с понижением температуры увеличивается до 30 раз. При этом с повышением мольной концентрации химических поперечных связей от 1 до 50 моль/м³ играет роль разница в энергиях межатомных связей в трехмерной сетке: для C–C → 90 ккал/моль; для C–S → 67 ккал/моль; S–S → 62 ккал/моль;

Наиболее полно влияние исследованных факторов проявилось в построенных нами впервые огибающих значений энергий механического разрушения исследованного эластомера при различных температурах и механических характеристиках полимерного материала.

На рис. 2 видна область (при $v_{eff} \approx 10$ моль/м³), в которой имеет место необходимое сочетание молекулярной структуры, температуры применения и эксплуатационного ресурса связующих при разработке перспективных автомобильных и авиационных шин, применяемых в широком температурном диапазоне эксплуатации.

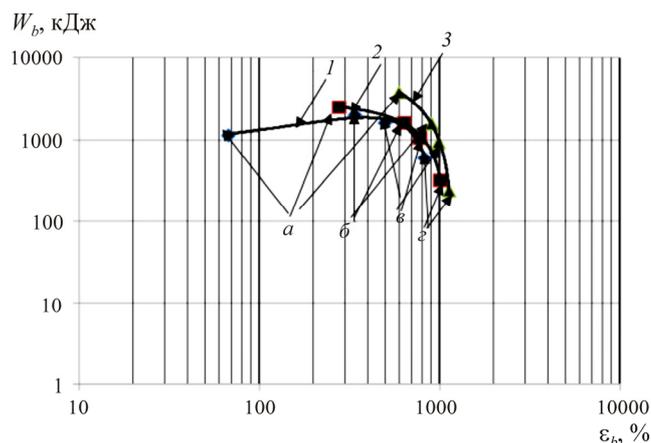


Рис. 2. Огибающие значений энергий механического разрушения для трехмерно сшитого высокомолекулярного эластомера: 1 – $T_{exp} = 223$ К; 2 – $T_{exp} = 273$ К; 3 – $T_{exp} = 323$ К; $a - v_{eff} = 1$ моль/м³; $б - v_{eff} = 5$ моль/м³; $в - v_{eff} = 10$ моль/м³; $г - v_{eff} = 50$ моль/м³

Расчет параметров молекулярной структуры эластомера по заданному значению энергии разрушения (обратная задача)

Расчет необходимых параметров молекулярной структуры исследованного эластомера как сополимера двух высокомолекулярных каучуков марок СКД и СКИ, обеспечивающего, как показывает практика эксплуатации авиационных и автомобильных шин, необходимое значение энергии механического разрушения и, соответственно, разрывной деформации (обратная задача), осуществлялся при следующих условиях: $W = 1100 \dots 1700$ кДж; $\epsilon_b = 70 \dots 20 \%$ соответственно (табл. 3). Численный эксперимент проведен при условии отсутствия нарушения сплошности композитного материала вплоть до его разрыва. Использовался раздел теории исследования операций – математическое нелинейное программирование [12–14], а также современные практические методы оптимизации [15].

Из приведенных данных следует, что необходимые параметры молекулярной структуры эластомера выбираются в зависимости от требуемого сочетания энергии механического разрушения и разрывной деформации.

Полученные результаты рекомендуются для инженерного использования при разработке материалов авиационных и автомобильных шин, эксплуатируемых в температурном диапазоне 223–323 К.

Таблица 3

Обратная задача при разных значениях W и ϵ_b

Требуемые параметры эластомера			Расчетные параметры молекулярной структуры	
$\phi_{sw} = 0,05$ об. долей				
T, K	$W, кДж$	$\epsilon_b, \%$	T_g, K	$v_{ch}, моль/м^3$
223	2000	180	130,8	85,9
273	1700	650	176,5	11,5
323	1650	900	180,6	10,4
$\phi_{sw} = 0,1$ об. долей				
223	2100	340	140,9	28,3
273	1700	650	176,5	11,7
323	1650	900	180,6	10,6
$\phi_{sw} = 0,3$ об. долей				
223	2100	370	136,4	31,3
273	1700	700	167,3	13,7
323	1500	900	189,2	9,9

Заключение

1. Впервые теоретически обосновано вычисление зависимости энергии (работы) механического разрушения трехмерно сшитых эластомеров на основе поли-1,4-*цис*-бутадиена и поли-1,4-*цис*-изопрена от эффективной мольной концентрации поперечных связей и температуры испытания. Наибольшее значение энергии механического разрушения достигается при повышенных значениях v_{eff} .

2. Построение впервые огибающих значений энергий механического разрушения эластомера обнаружило их более высокую «чувствительность» к количественной оценке эксплуатационного ресурса авиационных и автомобильных шин.

Объяснен механизм обнаруженной экстремальной зависимости энергии механического разрушения от v_{eff} при температуре 223 К.

Библиографический список

1. Догадкин Б.А., Донцов А.А., Шершнева В.А. Химия эластомеров. – М.: Химия, 1981. – 374 с.
2. Марк Дж., Эрман Б., Эйрич Ф. Каучук и резина. Наука и технология. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 767 с.
3. Дик Дж.С. Технология резины: Рецептуростроение и испытания. – СПб.: Научные основы технологии, 2010. – 620 с.
4. Smith T.L. Symposium on stress-strain-time-temperature relationships in materials // Amer. Soc. Test. Mat. Spec. Publ. – 1962. – № 325. – P. 60–89.
5. Smith T.L. Marginal mechanical characteristics of three dimensional cross-linked elastomers // J. Appl. Phys. – 1964. – Vol. 35. – P. 27–31.
6. Смит Т.Л. Связь между строением эластомеров и их прочностью при растяжении // Механические свойства новых материалов. – М.: Мир, 1966. – С. 174–190.
7. Кревелен Д.В. ван. Химическая структура и свойства полимеров. – М.: Химия, 1976. – 415 с.
8. Нильсен Л.Е. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. – М.: Химия, 1978. – 311 с.
9. Ermilov A.S., Nurullaev E.M. Mechanical properties of elastomers filled with solid particle // Mechanics of Composite Materials. – 2012. – Vol. 48, № 3. – P. 243–252.
10. Ermilov A.S., Nurullaev E.M. Numerical simulation and derivation of an equation for calculation of the mechanical fracture energy of elastomer filled with multifractional Silica // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol. 87, № 4. – P. 500–508.
11. Ermilov A.S., Nurullaev E.M. Influence of physicochemical parameters on the energy of mechanical failure of an elastomer filled with polyfractional silicon dioxide // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2015. – Vol. 88, № 1. – P. 154–163.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – С. 575–576.
13. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
14. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
15. Таха Хемди А. Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 903 с.

References

1. Dogadkin B.A., Dontsov A.A., Shershnev V.A. Khimiya elastomerov [Chemistry of elastomers]. Moscow, Khimiya, 1981, 374 p.
2. Mark Dzh., Erman B., Eyrich F. Kauchuk i rezina. Nauka i tekhnologiya [Rubber. Science and technology]. Dolgoprudnyy, Izdatelskiy dom “Intellekt”, 2011, 767 p.
3. Dik Dzh.S. Tekhnologiya reziny: Retsepturostroenie i ispytaniya [Rubber technology: formulation and tests]. St. Petersburg, Nauchnye osnovy tekhnologii, 2010, 620 p.
4. Smith T.L. Symposium on stress-strain-time-temperature relationships in materials. Amer. Soc. Test. Mat. Spec. Publ, 1962, no. 325, pp. 60-89.
5. Smith T.L. Marginal mechanical characteristics of three dimensional cross-linked elastomers. J. Appl. Phys, 1964, vol. 35, pp. 27-31.

6. Smith T.L. Svyaz mezhdru stroeniem elastomerov i ikh prochnostyu pri rastyazhenii. V knige: Mekhanicheskie svoystva novykh materialov [Relationship between the structure of elastomers and their tensile strength. In book: Mechanical properties of new materials]. Moscow, Mir, 1966, pp. 174-190.
7. Krevelen D.V. van. Khimicheskaya struktura i svoystva polimerov [Chemical structure and properties of the polymers]. Moscow, Khimiya, 1976, 415 p.
8. Nilsen L.E. Mekhanicheskie svoystva polimerov i polimernykh kompozitsiy [Mechanical properties of polymers and polymer compositions]. Moscow, Khimiya, 1978, 311 p.
9. Ermilov A.S., Nurullaev E.M. Mechanical properties of elastomers filled with solid particle. *Mechanics of Composite Materials*, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 243-252.
10. Ermilov A.S., Nurullaev E.M. Numerical simulation and derivation of an equation for calculation of the mechanical fracture energy of elastomer filled with multifractional Silica. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, vol. 87, no. 4, pp. 500-508.
11. Ermilov A.S., Nurullaev E.M. Influence of physicochemical parameters on the energy of mechanical failure of an elastomer filled with polyfractional silicon dioxide. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2015, vol. 88, no. 1, pp. 154-163.
12. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Handbook of mathematics for scientific workers and engineers]. Moscow, Nauka, 1970, pp. 575-576.
13. Khimmelblau D. Prikladnoe nelineynoe programmirovaniye [Applied nonlinear programming]. Moscow, Mir, 1975, 536 p.
14. Gill F., Murray U., Rayt M. Prakticheskaya optimizatsiya [Practical optimization]. Moscow, Mir, 1985, 509 p.
15. Takha Khemdi A. Vvedeniye v issledovaniye operatsiy [Introduction to operation analysis]. Moscow, Vilyams, 2005, 903 p.

Об авторах

Любимова Нина Юрьевна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Прикладная физика» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: ninalubimova@ya.ru).

Ермилов Александр Сергеевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология полимерных материалов и порохов» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: ermilov@ttmp.perm.ru).

Нуруллаев Эргаш Масеевич (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная физика» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990 г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: ergnur@mail.ru).

Быкова Елизавета Александровна (Пермь, Россия) – студентка ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: liza-bykova@mail.ru).

About the authors

Nina Yu. Lyubimova (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Applied Physics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ninalubimova@ya.ru).

Alexander S. Ermilov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technology of Polymer Materials and Powders, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ermilov@ttmp.perm.ru).

Ergash M. Nurullaev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Physics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ergnur@mail.ru).

Elizaveta A. Bykova (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: liza-bykova@mail.ru).