

УДК 620.17

## Экспериментальное исследование гистерезисных свойств протекторных резин в условиях циклического нагружения, характерного для автомобильных шин

**В.К. Семенов, А.Е. Белкин**

*Приведены результаты исследования рассеяния энергии в образцах двух различных по составу протекторных резин при циклическом пульсационном сжатии. Рассмотрены гармонический и трапецеидальный циклы. Исследовано влияние амплитуды, частоты и формы цикла нагружения на удельную рассеянную энергию и относительный гистерезис. Подтверждено, что протекторная резина, содержащая добавки белой сажи, имеет улучшенные характеристики по гистерезису.*

**Ключевые слова:** резина протектора, испытания, циклическое пульсационное сжатие, относительный гистерезис.

## Experimental Study of Tread Rubbers Hysteresis Properties under Cyclic Loading Typical for Tires

**V.K. Semenov, A.E. Belkin**

*The investigation results of energy dissipation in the specimens of two tread rubbers having different compositions under cycle pulse compression are presented. The harmonic and trapezoidal cycles are considered. The influence of amplitude, frequency and cycle form on the dissipated energy per unit volume and relative hysteresis are investigated. It has been confirmed that the tread rubber with silica filler has better hysteresis characteristics, then the tread rubber with carbon black.*

**Keywords:** tread rubber, tests, cycle pulse compression, relative hysteresis.

Основная доля гистерезисных потерь энергии при качении автомобильной шины приходится на протектор. Величина этих потерь определяется гистерезисными свойствами протекторной резины и условиями эксплуатации шины.

Для расчетного анализа рассеяния энергии в протекторе часто используется вязкоупругая модель поведения резины при циклическом нагружении [1–3]. Параметры этой модели должны определяться на основе испытаний образцов резины в условиях, близких к эксплуатационным.

При качении шины элементы протектора испытывают циклическое действие контактного давления, которое можно характеризовать условным графиком на рис. 1. Отмеченные на этом рисунке проме-



**СЕМЕНОВ**  
Владимир Константинович  
ассистент  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**SEMENOV**  
Vladimir Konstantinovich  
Assistant  
(MSTU named  
after N.E. Bauman)



**БЕЛКИН**  
Александр Ефимович  
доктор технических наук,  
профессор  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**BELKIN**  
Alexander Efimovich  
Dr. Sc. Techn., Professor  
(MSTU named  
after N.E. Bauman)

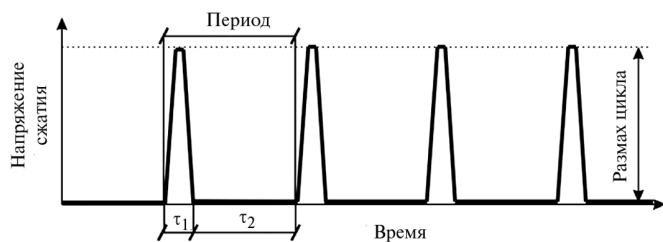


Рис. 1. Примерный вид цикла нагружения элементов протектора

жутки времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  соответствуют движению элементов протектора под нагрузкой и без нее, т. е. в пределах зоны контакта шины с опорной поверхностью и за ее пределами.

В предлагаемой статье представлены результаты экспериментального исследования зависимости величины потерь энергии в протекторной резине от амплитуды цикла нагружения, частоты цикла и его формы. Результаты получены при испытаниях на сжатие цилиндрических резиновых образцов при синусоидальном и трапецеидальном (см. рис. 1) пульсационных воздействиях. Синусоидальный цикл нагружения выбран как наиболее простой для отработки методики проведения эксперимента и анализа результатов, трапецеидальный цикл — как приближение к реальному циклу действующих на протектор напряжений сжатия.

Испытывались две партии образцов, изготовленных из протекторных резиновых смесей, предназначенных для летних легковых шин. Первая партия включала образцы из резиновой смеси марки 644, содержащей 65 массовых частей технического углерода; вторая партия — образцы из усовершенствованной резиновой смеси марки 102, содержащей 50 массовых частей белой сажи (осажденного кремне-кислотного наполнителя) и 15 массовых частей технического углерода. Образцы соответствовали ГОСТ 266—67 и имели высоту  $H = (38 \pm 1)$  мм, диаметр  $D = (32 \pm 1)$  мм.

Работа проводилась в лаборатории кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана на электродинамическом стенде ElectroPuls E1000 фирмы Instron.

При испытании задаваемым параметром нагружения являлось усилие, прикладываемое к образцу, при этом отслеживалось перемещение активного штока. Число циклов по на-

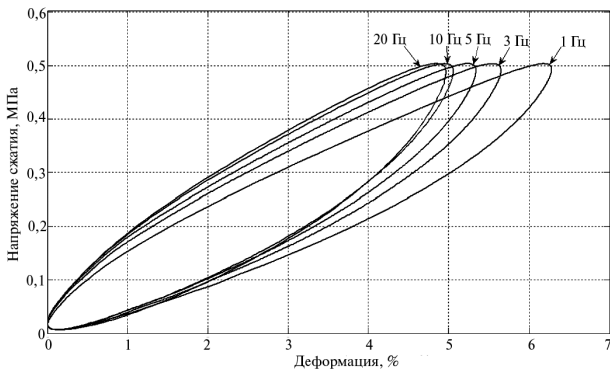
грузке выбиралось таким, чтобы выйти на стационарный режим работы, при котором получаемая диаграмма деформирования образца не изменялась во времени. С целью снижения трения в контакте образца со штоком использовалась смазка ОКБ-122-7. Испытания проводились при комнатной температуре без контроля изменения температуры образцов в процессе испытаний.

Ниже представлены результаты испытаний с указанием режимов нагружения. В качестве величин, характеризующих процесс деформирования образца, выбраны четыре параметра: частота процесса  $\nu$ , размах продольной деформации  $\varepsilon_R$ , рассеянная за один цикл нагружения удельная энергия  $q$ , коэффициент поглощения (относительный гистерезис)  $\psi$ . Величина  $\varepsilon_R$  определялась как отношение перемещения активного штока, отсчитываемого от ненапряженного состояния образца, к высоте недеформированного образца. Коэффициент поглощения  $\psi$  вычислялся как отношение рассеянной энергии  $q$  к работе, совершенной над образцом во время прямого хода активного штока.

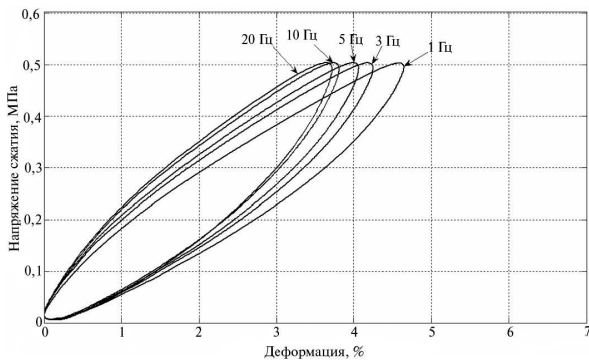
**Испытания при пульсационном гармоническом воздействии с размахом силы  $f_R = 400$  Н.** В этом цикле размах напряжения составляет 0,497 МПа. На рисунке 2 показаны петли гистерезиса, полученные для образцов первой и второй резины, при различных частотах нагружения. На рисунке видно, что для режима заданных напряжений с повышением частоты в диапазоне 1...10 Гц наблюдается некоторое уменьшение деформации образцов, свидетельствующее о росте модуля упругости резины. Площадь гистерезисной петли практически остается неизменной.

В таблице 1 приведены полученные при испытаниях значения  $\varepsilon_R$ ,  $q$ ,  $\psi$ . Сравнивая характеристики испытанных резин, констатируем, что резина с белой сажой является более жесткой и для ее образцов наблюдается снижение рассеянной удельной энергии примерно на 25%. Коэффициенты поглощения  $\psi$  различаются в меньшей мере, однако следует признать, что на всех изученных частотах этот коэффициент ниже для резины с белой сажой.

Окончание табл. 1



а



б

Рис. 2. Гистерезисные петли для резины при гармоническом воздействии с размахом напряжения  $\sigma_R = 0,497$  МПа:

а — резина марки 644; б — резина марки 102 (с белой сажей)

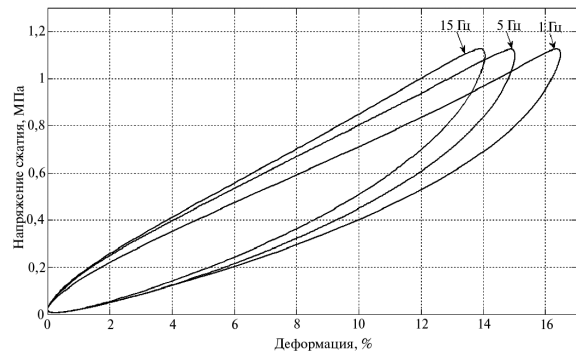
Таблица 1

Результаты экспериментов при гармоническом воздействии с размахом напряжения  $\sigma_R = 0,497$  МПа

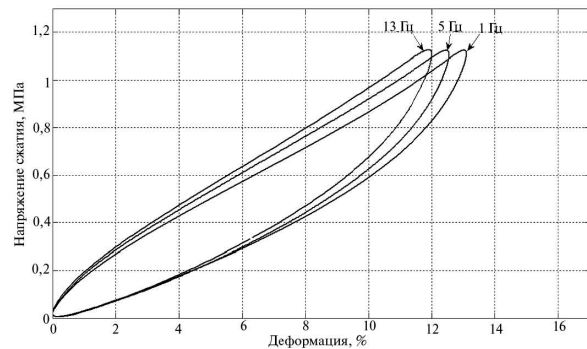
v, Гц	Резина 644			Резина 102 (с белой сажей)		
	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$
1	6,3	0,0086	0,53	4,6	0,0060	0,50
2	5,9	0,0084	0,56	4,4	0,0059	0,53
3	5,7	0,0083	0,58	4,3	0,0059	0,54
4	5,5	0,0081	0,59	4,2	0,0059	0,56
5	5,3	0,0078	0,58	4,2	0,0060	0,58
6	5,2	0,0079	0,59	4,0	0,0057	0,56
7	5,2	0,0079	0,60	3,9	0,0057	0,58
8	5,1	0,0079	0,61	3,9	0,0056	0,57
9	5,1	0,0079	0,62	3,9	0,0056	0,57
10	5,1	0,0079	0,62	3,8	0,0056	0,58
11	5,0	0,0079	0,62	3,8	0,0056	0,58
12	5,1	0,0079	0,62	3,8	0,0056	0,59
13	5,0	0,0079	0,63	3,8	0,0056	0,59

v, Гц	Резина 644			Резина 102 (с белой сажей)		
	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$
14	5,0	0,0079	0,63	3,7	0,0056	0,60
15	5,0	0,0079	0,64	3,7	0,0056	0,60
16	5,0	0,0079	0,64	3,7	0,0056	0,60
17	5,0	0,0080	0,64	3,7	0,0056	0,60
18	5,0	0,0081	0,65	3,7	0,0057	0,61
19	5,0	0,0081	0,66	3,7	0,0057	0,60
20	5,0	0,0082	0,66	3,7	0,0057	0,61
25	4,9	0,0083	0,67	3,7	0,0058	0,62
30	5,0	0,0086	0,70	3,7	0,0060	0,64

Испытания при пульсационном гармоническом воздействии с размахом силы  $f_R = 900$  Н. В этом цикле размах напряжения составляет 1,119 МПа. Наблюдаемые петли гистерезиса показаны на рис. 3. При увеличении напряжения наблюдается снижение коэффициента поглощения (табл. 2). Значения энергии  $q$ , рассеянной



а



б

Рис. 3. Гистерезисные петли для резины при гармоническом воздействии с размахом напряжения  $\sigma_R = 1,119$  МПа:

а — резина марки 644; б — резина марки 102 (с белой сажей)

в единице объема, как и прежде не зависят от частоты.

Таблица 2

Результаты экспериментов при гармоническом воздействии с размахом напряжения  $\sigma_R = 1,119$  МПа

v, Гц	Резина 644			Резина 102 (с белой сажей)		
	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$
1	16,4	0,043	0,44	13,1	0,032	0,42
2	15,8	0,044	0,47	12,8	0,033	0,44
3	15,4	0,043	0,48	12,6	0,034	0,46
4	15,1	0,044	0,50	12,5	0,034	0,46
5	15,0	0,044	0,50	12,6	0,034	0,46
6	14,9	0,044	0,51	12,5	0,034	0,47
7	14,8	0,045	0,52	12,5	0,034	0,47
8	14,7	0,045	0,53	12,6	0,035	0,48
9	14,4	0,043	0,52	12,3	0,036	0,50
10	14,4	0,043	0,51	12,2	0,036	0,50
11	14,3	0,044	0,50	12,2	0,033	0,47
12	14,3	0,043	0,50	12,3	0,033	0,45
13	14,4	0,044	0,49	12,0	0,033	0,48
14	14,0	0,044	0,51	12,3	0,033	0,46
15	14,0	0,044	0,49	12,5	0,033	0,45
16	14,5	0,045	0,47	12,3	0,034	0,48
18	14,2	0,044	0,46	12,9	0,034	0,47

Испытания при трапецидальном пульсационном воздействии (см. рис. 1) с размахом усилия  $f_R = 400$  Н. В этих циклах отношение фазы нагружения к фазе отдыха  $\tau_1 / \tau_2$  выбиралось из

диапазона, характерного для автомобильных шин. Задавалось значение  $\tau_1 / \tau_2 = 1/10$ .

Отметим, что технически реализация этих испытаний оказывается более сложной. Из-за краткости фазы нагружения и, как следствие, высокой скорости нагружения не удалось провести испытания при таких же частотах, как в случае гармонических режимов. Испытания проведены при более низких частотах.

Полученные результаты приведены на рис. 4 и в табл. 3.

Таблица 3

Результаты экспериментов при трапецидальном пульсационном воздействии с размахом напряжения  $\sigma_R = 0,497$  МПа

v, Гц	Резина 644			Резина 102 (с белой сажей)		
	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$
0,100	7,6	0,0114	0,59	4,8	0,0070	0,57
0,111	7,2	0,0108	0,59	4,8	0,0070	0,57
0,125	7,2	0,0108	0,59	4,8	0,0070	0,58
0,143	7,1	0,0107	0,59	4,8	0,0070	0,58
0,167	7,0	0,0106	0,60	4,7	0,0070	0,59
0,200	7,1	0,0110	0,62	4,7	0,0071	0,59
0,250	6,9	0,0108	0,61	4,7	0,0071	0,60
0,333	6,8	0,0109	0,63	4,6	0,0071	0,62
0,500	6,6	0,0109	0,65	4,4	0,0070	0,64
1,000	6,4	0,0110	0,69	4,4	0,0072	0,66
2,000	6,0	0,0105	0,70	4,2	0,0072	0,66
3,000	5,9	0,0102	0,68	4,0	0,0068	0,67
4,000	5,6	0,0099	0,69	3,9	0,0066	0,66

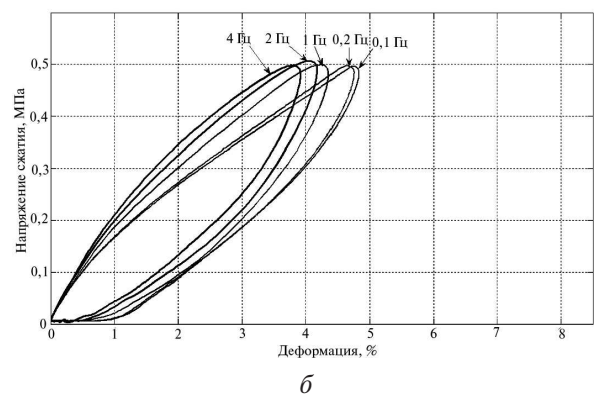
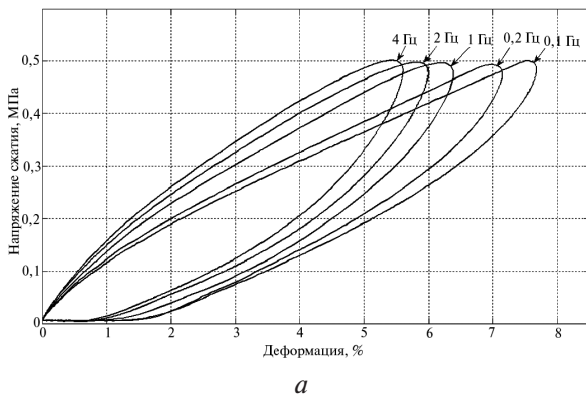


Рис. 4. Гистерезисные петли для резины при трапецидальном воздействии с размахом напряжения  $\sigma_R = 0,497$  МПа:

a — резина марки 644; б — резина марки 102 (с белой сажей)

Как и при гармонических режимах, частота практически не влияет на значение удельной рассеянной энергии.

Сопоставляя результаты для трапецеидального и гармонического пульсационных циклов с одинаковым размахом напряжения (см. данные, приведенные в табл. 1 и 3), можно утверждать, что значения размахов деформаций практически совпадают. Однако удельная рассеянная энергия в случае трапецеидального цикла больше, чем для гармонической нагрузки, что свидетельствует о влиянии формы цикла. При сравнении резин вновь отмечаем большую жесткость резины с белой сажей и меньшее рассеяние энергии в ней.

Для исследования влияния размаха напряжений (деформаций) на относительный гистерезис проведены дополнительные испытания.

**Испытания при пульсационном гармоническом воздействии на частоте 5 Гц с различными размахами напряжения.** В таблице 4 представлены значения размахов деформаций, удельных механических потерь и коэффициентов потерь в зависимости от размахов нагрузки.

Таблица 4

Результаты экспериментов при гармоническом воздействии с частотой 5 Гц

$f_R, \text{ Н}$	Резина 644			Резина 102 (с белой сажей)		
	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$	$\varepsilon_R, \%$	$q, \text{ Дж/см}^3$	$\psi$
200	2,0	0,0014	0,56	1,5	0,0010	0,52
300	3,6	0,0040	0,58	2,8	0,0030	0,57
400	5,3	0,0078	0,58	4,2	0,0060	0,58
500	7,1	0,0130	0,57	5,7	0,0101	0,55
600	9,0	0,0194	0,57	7,3	0,0150	0,54
700	11,0	0,0265	0,54	8,9	0,0207	0,52
800	12,8	0,0343	0,53	10,3	0,0263	0,50
900	15,0	0,0440	0,50	12,6	0,0339	0,46

Из данных, представленных в табл. 4, следует, что в режиме заданных напряжений, удельные механические потери в образцах резины с белой сажей ниже. Однако, если рассматривать зависимость потерь от размаха деформаций (рис. 5), то ранжирование резин по критерию потерь изменяется. Что касается коэффициен-

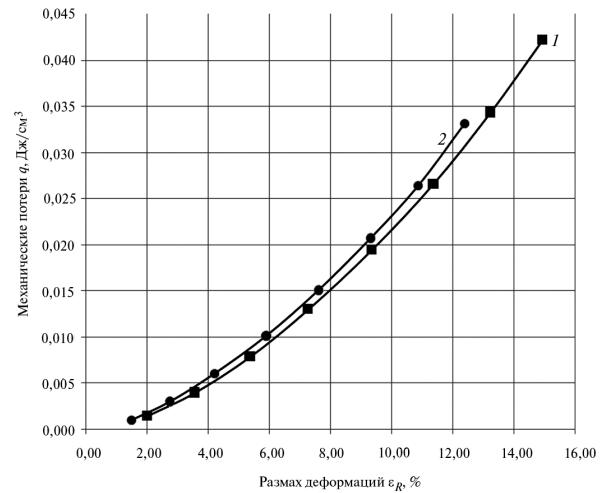


Рис. 5. Зависимость удельных механических потерь от размаха деформации при гармоническом пульсационном цикле нагружения с частотой 5 Гц:

1 — резина марки 644; 2 — резина марки 102

тов поглощения, то для обеих резин с ростом нагрузки они меняются весьма мало. Зависимость размахов напряжений от размахов деформаций (рис. 6) в рассматриваемом диапазоне близка к линейной.

Для теоретического анализа потерь целесообразно аппроксимировать полученные экспериментальные характеристики как функции размаха деформаций.

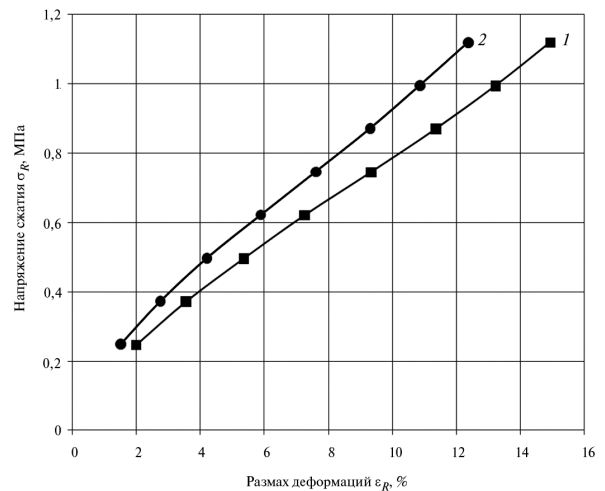


Рис. 6. Зависимость размаха напряжения сжатия от размаха деформации при гармоническом пульсационном режиме:

1 — резина марки 644; 2 — резина марки 102

Зависимость удельных механических потерь в образце от размаха деформации (см. рис. 5) можно представить в следующем виде:

$$q = \Gamma(\varepsilon_R)^{1,75},$$

где коэффициент  $\Gamma = 1,3 \text{ Дж / см}^3 = 1,3 \text{ МПа}$  — для резины марки 644;  $\Gamma = 1,5 \text{ Дж / см}^3 = 1,5 \text{ МПа}$  — для резины марки 102.

В соответствии с рис. 6 зависимость размаха напряжения от размаха деформации имеет вид

$$\sigma_R = H_R(\varepsilon_R)^{0,75},$$

где  $H_R = 4,7 \text{ МПа}$  — для резины марки 644;  $H_R = 5,5 \text{ МПа}$  — для резины марки 102.

Тогда коэффициент поглощения можно приближенно определить по формуле

$$\psi = 2 \frac{\Gamma(\varepsilon_R)^{1,75}}{H_R(\varepsilon_R)^{0,75} \varepsilon_R} = 2 \frac{\Gamma}{H_R}$$

и считать его постоянным, не зависящим от деформации.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что для протекторов шин, работающих в режиме заданных напряжений, целесообразно применение резин с белой сажей, обеспечивающих снижение гистерезисных потерь. Величина потерь в резиновом массиве оказывается чувствительной к форме цикла нагружения, но прак-

тически не зависит от частоты (в рассмотренном диапазоне частот). Наоборот, размахи деформаций слабо зависят от формы цикла нагружения, и заметно убывают при повышении частоты от 1 до 10 Гц.

## Литература

1. Oden J.T., Lin T.L. On the general rolling contact problem for finite deformations of a viscoelastic cylinder // Computer methods in applied mechanics and engineering. 1986. N 57. P. 297—367.
2. Белкин А.Е., Нарская Н.Л. Динамический контакт шины как вязкоупругой оболочки с опорной поверхностью при стационарном качении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1997. № 1. С. 62—73.
3. Kaliske M., Zheng D., Andre M. Formulation of Inelastic Effects in Steady-State Rolling Tire Simulation // Fifth World Congress on Computational Mechanics, July 7—12, 2002. Vienna, Austria.

## References

1. Oden J.T., Lin T.L. *On the general rolling contact problem for finite deformations of a viscoelastic cylinder*. Computer methods in applied mechanics and engineering. no 57 (1986), North—Holland, pp. 297—367.
2. Belkin A.E., Narskaia N.L. Dinamicheskii kontakt shiny kak viazkouprugoi оболочки s opornoj poverkhnost pri stacionarnom kachenii [Dynamic contact tires as viscoelastic shell with the bearing surface in steady rolling]. *Vestnik MGTU imini N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie*. 1997, no. 1, pp. 62—73.
3. Kaliske M., Zheng D., Andre M. *Formulation of Inelastic Effects in Steady-State Rolling Tire Simulation*. Fifth World Congress on Computational Mechanics, Vienna, Austria, July 7—12, 2002.

Статья поступила в редакцию 15.10.2012

## Информация об авторах

**СЕМЕНОВ Владимир Константинович** (Москва) — ассистент кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Россия, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: semenov0811@gmail.com).

**БЕЛКИН Александр Ефимович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Россия, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: a\_belkin@newmail.ru).

## Information about the authors

**SEMENOV Vladimir Konstantinovich** (Moscow) — Assistant of «Applied Mechanics» Department, MSTU named after N.E. Bauman. (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia, e-mail: semenov0811@gmail.com).

**BELKIN Alexander Efimovich** (Moscow) — Dr. Sc. Techn., Professor of «Applied Mechanics» Department. MSTU named after N.E. Bauman. (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia, e-mail: a\_belkin@newmail.ru).