

# Расчет и конструирование машин

УДК 539.3; 62-754

DOI 10.18698/0536-1044-2017-5-4-13

## Анализ работы полиуретанового амортизатора тоннельного типа в условиях ударного нагружения

**В.И. Алашеев<sup>1</sup>, А.Е. Белкин<sup>2</sup>, А.В. Бобров<sup>1</sup>, Н.В. Ярошевич<sup>2</sup>**<sup>1</sup> АО «ВПК «НПО машиностроения», 143966, Реутов, Московская область, Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 33<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## The Analysis of a Polyurethane Tunnel-Type Shock Absorber Operating Under Shock Loading

**V.I. Alasheev<sup>1</sup>, A.E. Belkin<sup>2</sup>, A.V. Bobrov<sup>1</sup>, N.V. Yaroshevich<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Military and Industrial Corporation AO NPO Mashinostroyeniya, 143966, Reutov, Moscow region, Russian Federation, Gagarin St., Bldg. 33<sup>2</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: alasheev41@mail.ru, aefbelkin@gmail.com, nikitanev@mail.ru



Представлены результаты стендовых ударных испытаний полиуретанового амортизатора тоннельного типа, предназначенного для применения в сложных динамических системах. По показаниям датчиков перегрузки и перемещений определены ударные силовые характеристики амортизатора, по которому наносился вертикальный удар падающей тяжелой плитой на стенде специальной конструкции. Процесс деформирования амортизатора фиксировался с помощью высокоскоростной киносъемки. Приведены кадры, дающие наглядное представление о его деформировании. Для разработки достоверной математической модели амортизатора выполнены его расчеты при ударном нагружении методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS с использованием экспериментально полученных характеристик полиуретана. Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов проведено по нагрузочным характеристикам амортизатора, а также по значениям энергии, накопленной и поглощенной амортизатором при ударе. Показано, что разработанная математическая модель позволяет рассчитывать ударные характеристики амортизатора в рассмотренном диапазоне скоростей деформаций. Модель может быть использована при проектировании для поиска геометрических параметров амортизаторов, обеспечивающих требуемые нагрузочные характеристики.

**Ключевые слова:** литьевой полиуретан, амортизатор тоннельного типа, ударные испытания, силовая характеристика, математическая модель амортизатора.



This paper presents the results of bench shock tests of a polyurethane tunnel-type shock absorber designed for use in complex dynamic systems. Using overload and displacement sensors readings, shock power characteristics of the shock absorber were determined. The shock absorber was subjected to a vertical impact by a heavy falling plate on a specially designed testing stand. The process of the shock absorber deformation was recorded using a high-speed camera. Images illustrating the deformation were presented. To develop a reliable mathematical model of the shock absorber, shock loading calculations were performed

using the finite element method in the ANSYS environment and applying the characteristics of polyurethane obtained through experiments. The calculated and the experimental results were compared with regards to the loading characteristics of the shock absorber as well as the values of energy accumulated and absorbed by the shock absorber at impact. It was shown that the developed mathematical model could be used to calculate shock characteristics of the shock absorber in the analysed range of the rate of deformation. The model can be used at the design stage when selecting geometrical parameters of the shock absorbers guaranteeing the required load characteristics.

**Keywords:** cast polyurethane, tunnel-type shock absorber, shock tests, power characteristic, mathematical model of the shock absorber.

Амортизаторы из литьевого полиуретана, имеющие высокие показатели эластичности, прочности и долговечности, находят применение в объектах ракетной техники, где предъявляются строгие требования не только к рабочим характеристикам, но и к габаритным размерам вследствие ограниченного конструкционного пространства. При одинаковых габаритах полиуретановые амортизаторы по сравнению с резиновыми аналогами обладают намного большей жесткостью. Благодаря этому их можно использовать для защиты объектов, испытывающих значительные динамические нагрузки. Кроме того, полиуретан не подвержен старению.

Для поперечной амортизации ракеты в пусковом контейнере предполагается применять амортизаторы тоннельного типа (рис. 1), изготовленные из полиуретана СКУ-ПФЛ-100. Вследствие сравнительно короткого опыта эксплуатации таких амортизаторов их рабочие характеристики изучены недостаточно.

Цель работы — описание результатов стендовых ударных испытаний тоннельного амортизатора и их математическое моделирование методом конечных элементов.

**Экспериментальное определение ударной силовой характеристики амортизатора.** В АО «ВПК «НПО машиностроения» проведены динамические испытания полиуретанового амортизатора тоннельного типа по определению его характеристики при ударе. Объектом

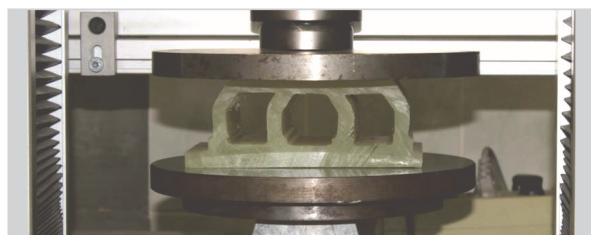


Рис. 1. Полиуретановый амортизатор тоннельного типа

исследования являлся амортизатор с размерами 70×170×200 мм, по которому наносился удар стальной плитой массой 1 240 кг, свободно падающей с заданной высоты. Высота сброса плиты  $h$  варьировалась в пределах 50...204 мм, при этом скорость удара изменялась от 0,99 до 2,00 м/с.

В экспериментах проводилась запись показаний датчика перемещений плиты и двух датчиков перегрузки — правого и левого, симметрично установленных на ней. Показания двух датчиков позволяют оценить наличие перекосов в системе плита–амортизатор. Процесс деформирования амортизатора фиксировался с помощью высокоскоростной киносъемки.

Следует отметить, что по результатам всех испытаний повреждений амортизатора не наблюдалось. В процессе эксперимента можно выделить несколько характерных моментов (рис. 2): 0 — начало падения плиты ( $s_0, t_0$ ); 1 — касание плитой амортизатора ( $s_1, t_1$ ); 2 — мгновенная остановка плиты ( $s_2, t_2$ ), деформации амортизатора максимальны; 3 — мгновенная остановка плиты при первом отскоке ( $s_3, t_3$ ), в амортизаторе наблюдаются лишь незначительные остаточные деформации, которые через некоторое время исчезают.

Кратко опишем обработку результатов испытаний. В качестве примера на рис. 3, а приведен

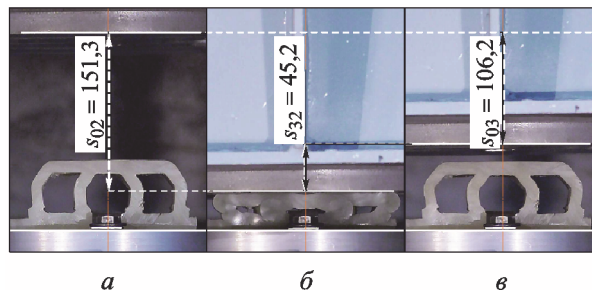


Рис. 2. Кадры видеосъемки характерных моментов испытаний амортизатора при сбросе плиты с высоты  $h = 115$  мм:  
а — 0; б — 2; в — 3

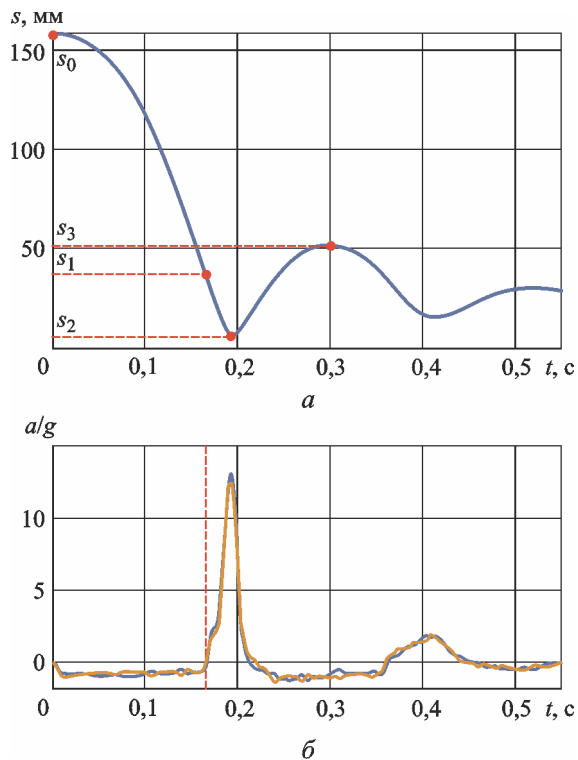


Рис. 3. Зависимости параметров движения плиты при ее сбросе с высоты  $h = 115$  мм (скорость удара  $v_{уд} = 1,5$  м/с) от времени  $t$ :  
 $a$  — перемещения  $s$ ;  $b$  — отношения  $a/g$  по показаниям левого (—) и правого (---) датчиков перегрузки

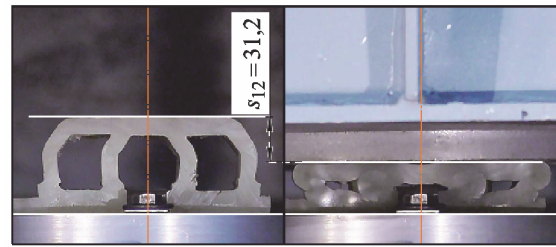


Рис. 4. Определение максимальной осадки амортизатора с использованием видеофиксации испытания при  $h = 115$  мм

график движения плиты, построенный по данным датчика перемещений, а на рис. 3, б — зависимости, полученные по показаниям левого и правого датчиков перегрузки.

Из рис. 3, б видно, что показания левого и правого датчиков перегрузки практически не различаются.

Время  $t_1$  касания плитой амортизатора (время начала его деформирования) определяется как момент резкого изменения показаний датчиков перегрузки (см. рис. 3, б, штриховая линия). Другой способ определения этого параметра состоит в использовании материалов видеофиксации испытания. По кадрам видеосъемки, представленным на рис. 4, можно найти максимальную осадку амортизатора  $s_{12} = s_1 - s_2$ ,

Таблица 1

Данные датчика перемещения плиты и видеосъемки при различных значениях высоты сброса плиты

Разность перемещений плиты, мм	Высота сброса, мм								
	50			115			204		
	Датчик	Видеосъемка	$\Delta_1, \%$	Датчик	Видеосъемка	$\Delta_1, \%$	Датчик	Видеосъемка	$\Delta_1, \%$
$s_{02}$	81,9	80,4	1,9	152,6	151,3	0,8	244,5	—	—
$s_{03}$	54,6	53,3	2,3	106,9	106,2	0,7	177,0	—	—
$s_{32}$	27,3	27,0	1,0	45,7	45,2	1,2	67,4	67,7	-0,4
$s_{12}$	—	26,7	—	—	31,2	—	—	35,7	—

Таблица 2

Данные датчика перемещения плиты и видеосъемки при высоте сброса  $h = 150$  мм, полученные в трех последовательных испытаниях

Разность перемещений плиты, мм	Испытание 1			Испытание 2			Испытание 3		
	Датчик	Видеосъемка	$\Delta_1, \%$	Датчик	Видеосъемка	$\Delta_1, \%$	Датчик	Видеосъемка	$\Delta_1, \%$
$s_{02}$	186,1	183,2	1,6	185,9	183,6	1,2	186,38	183,6	1,5
$s_{03}$	135,9	133,3	1,9	131,2	128,9	1,7	129,35	127,1	1,8
$s_{32}$	50,2	49,9	0,7	54,8	54,7	0,0	57,03	56,5	0,9
$s_{12}$	—	32,3	—	—	33,7	—	—	33,6	—

а затем при известном значении максимального перемещения плиты  $s_2$  — положение  $s_1$  (см. рис. 3, а). Таким образом, определяется начало стадии удара ( $s_1, t_1$ ) для различных высот сброса плиты.

Для проверки достоверности данных о максимальной осадке амортизатора проведено сравнение перемещений плиты по датчику и кадрам видеосъемки (табл. 1, 2). При этом для разностей перемещений плиты использованы обозначения  $s_{02} = s_0 - s_2, s_{03} = s_0 - s_3$  и  $s_{32} = s_3 - s_2$ , а для разности значений, полученных с помощью датчика и видеосъемки, —  $\Delta_1$ .

Из табл. 1, 2 следует, что при различных значениях высоты сброса плиты на амортизатор разность значений перемещений составляет менее 3%. При расчете в качестве момента касания наиболее просто использовать результаты видеофиксации. Согласно показаниям дат-

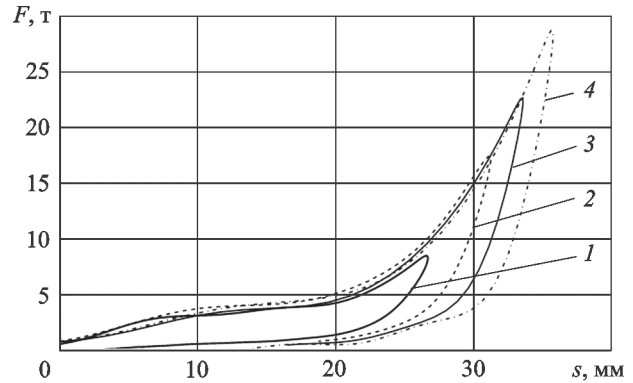


Рис. 5. Экспериментальные ударные характеристики амортизатора при различных значениях высоты сброса плиты:  
1 —  $h = 50$  мм; 2 —  $h = 115$ ; 3 —  $h = 150$ ; 4 —  $h = 204$  мм

чиков перегрузки, получаемый описанным образом момент совпадает с резким изменением значения  $alg$  (см. рис. 3, б).

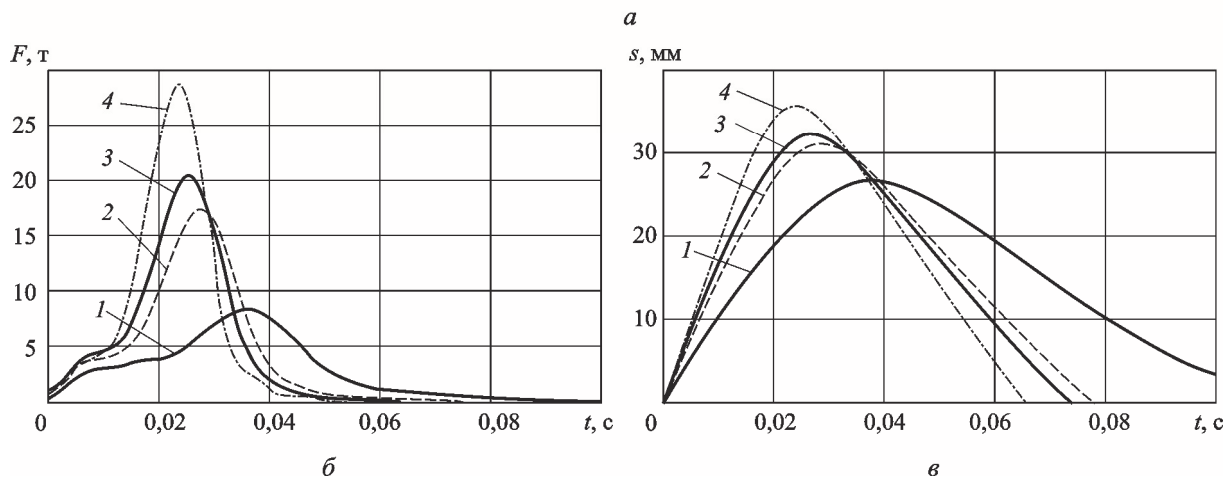
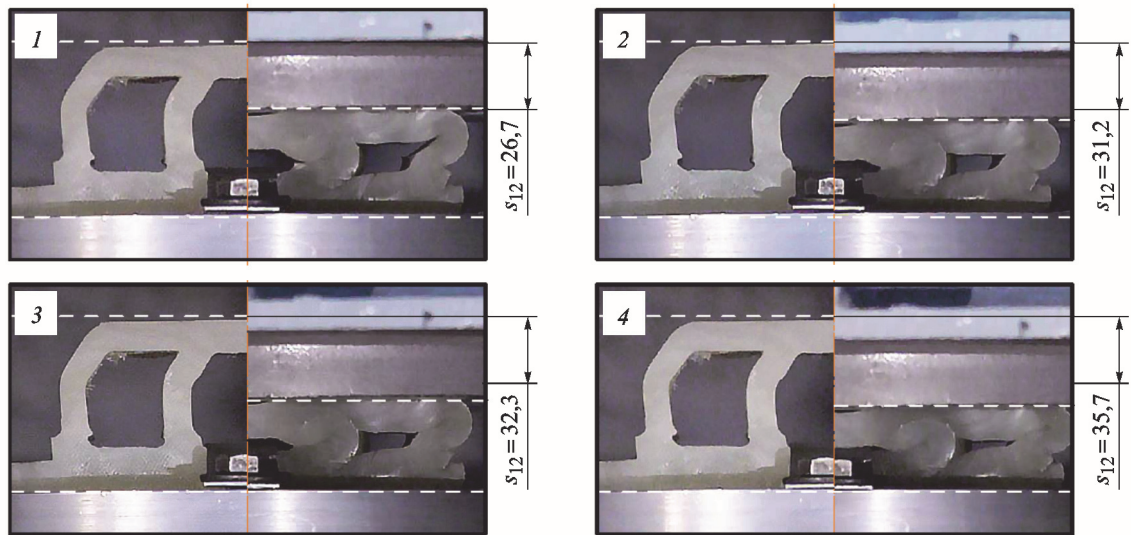


Рис. 6. Результаты испытаний амортизатора при высоте сброса плиты  $h = 50$  (1), 115 (2), 150 (3), 204 (4) мм:  
а — кадры видеосъемки деформирования амортизатора; б — изменение во времени силы  $F$  обжатия амортизатора;  
в — изменение во времени осадки  $s$  амортизатора



Окончательные результаты обработки экспериментальных данных в виде ударных силовых характеристик амортизатора, полученных путем осреднения по нескольким испытаниям, приведены на рис. 5, где  $F$  — сила обжатия амортизатора.

На рис. 6 показаны результаты некоторых испытаний амортизатора.

**Численное моделирование ударных испытаний амортизатора** проведено в конечно-элементном комплексе ANSYS. Использована модель (рис. 7) плоского деформированного состояния, а также параметризованная геометрическая модель, которая при необходимости позволяет менять размеры для достижения требуемых характеристик амортизатора.

Вязкоупругое поведение полиуретана при быстром деформировании описано с помощью модели Бергстрёма–Бойс [1–5], числовые параметры которой установлены по результатам испытаний образцов на сжатие [6, 7].

Согласно работе [1], по поведению вязкоупругий материал подобен условной механической системе (рис. 8), состоящей из двух параллельно соединенных звеньев  $A$  и  $B$  разной природы. Упругое звено  $A$  определяет поведение при медленном статическом нагружении, когда демпфер вязкоупругого звена  $B$  не сопротивляется деформации и не воспринимает напряжения. В случае конечной скорости деформации работают оба звена системы, причем сопротивление демпфера зависит от этого параметра. При очень быстром динамическом (мгновенном)

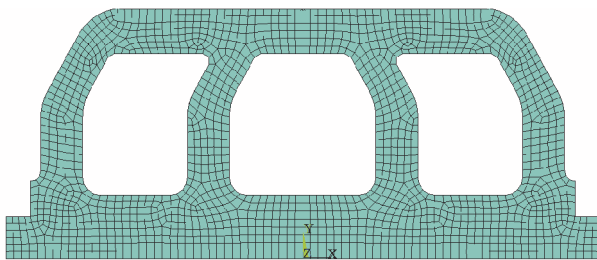


Рис. 7. Конечно-элементная модель для расчета плоской деформации амортизатора

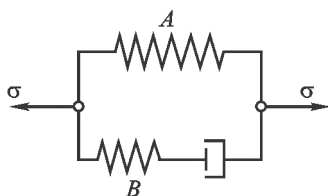


Рис. 8. Условная модель вязкоупругого материала

нагружении демпфер «запирается», в нем не происходит деформации, и напряжение распределяется между упругими элементами звеньев  $A$  и  $B$ . В этом случае реакция системы является упругой, однако жесткость повышается по сравнению с медленным упругим деформированием. Выбор потенциала для упругих элементов звеньев, а также закона изменения вязких деформаций демпфера определяет поведение модели.

При параллельном соединении структур (звеньев) их деформации одинаковы:

$$\mathbf{F}^A = \mathbf{F}^B = \mathbf{F},$$

где  $\mathbf{F}$  — градиент вектора места (градиент деформации).

Напряжения в материале складываются из откликов звеньев:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^A + \boldsymbol{\sigma}^B.$$

Статическая составляющая напряжения  $\boldsymbol{\sigma}^A$  определяется соотношениями упругости Арруды–Бойс [8]:

$$\boldsymbol{\sigma}^A = k(J-1)\mathbf{I} + \frac{G^A}{J\lambda_{chain}} \frac{L^{-1}(\lambda_{chain}/\lambda_{lock}^A)}{L^{-1}(1/\lambda_{lock}^A)} \text{dev } \bar{\mathbf{B}}, \quad (1)$$

где  $k$  — модуль объемного сжатия;  $J = \det \mathbf{F}$  — мера объемной деформации;  $\mathbf{I}$  — единичный тензор;  $G^A$  — постоянная материала, имеющая значение начального модуля сдвига;  $L^{-1}(x)$  — обратная к функции Ланжевена [10],  $x = \lambda_{chain}/\lambda_{lock}^A$ ;  $\lambda_{chain}$  — кратность усредненного удлинения макромолекулярной цепи эластомера;  $\lambda_{lock}^A$  — предельное удлинение молекулярной цепи;  $\bar{\mathbf{B}} = J^{-2/3} \mathbf{F}\mathbf{F}^T$  — тензор меры Фингера для изохорической деформации [9], символ  $\text{dev}$  обозначает девиатор тензора.

Закон упругости Арруды–Бойс (1) содержит три параметра  $G^A$ ,  $\lambda_{lock}^A$  и  $k$ , определяемые экспериментально.

Вычисление динамической составляющей напряжения  $\boldsymbol{\sigma}^B$  основано на принципе мультипликативного разложения градиента полной деформации на упругую  $\mathbf{F}_e$  и вязкую  $\mathbf{F}_v$  части

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_v \quad (2)$$

с последующей формулировкой закона течения для скоростей вязких деформаций.

С помощью представления (2) можно получить следующее кинетическое уравнение [9]:

$$\dot{\mathbf{F}}\mathbf{F}^{-1} = \dot{\mathbf{F}}_e \mathbf{F}_e^{-1} + \mathbf{F}_e \mathbf{D}_v \mathbf{F}_e^{-1}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{D}_v$  — тензор скоростей вязких деформаций.

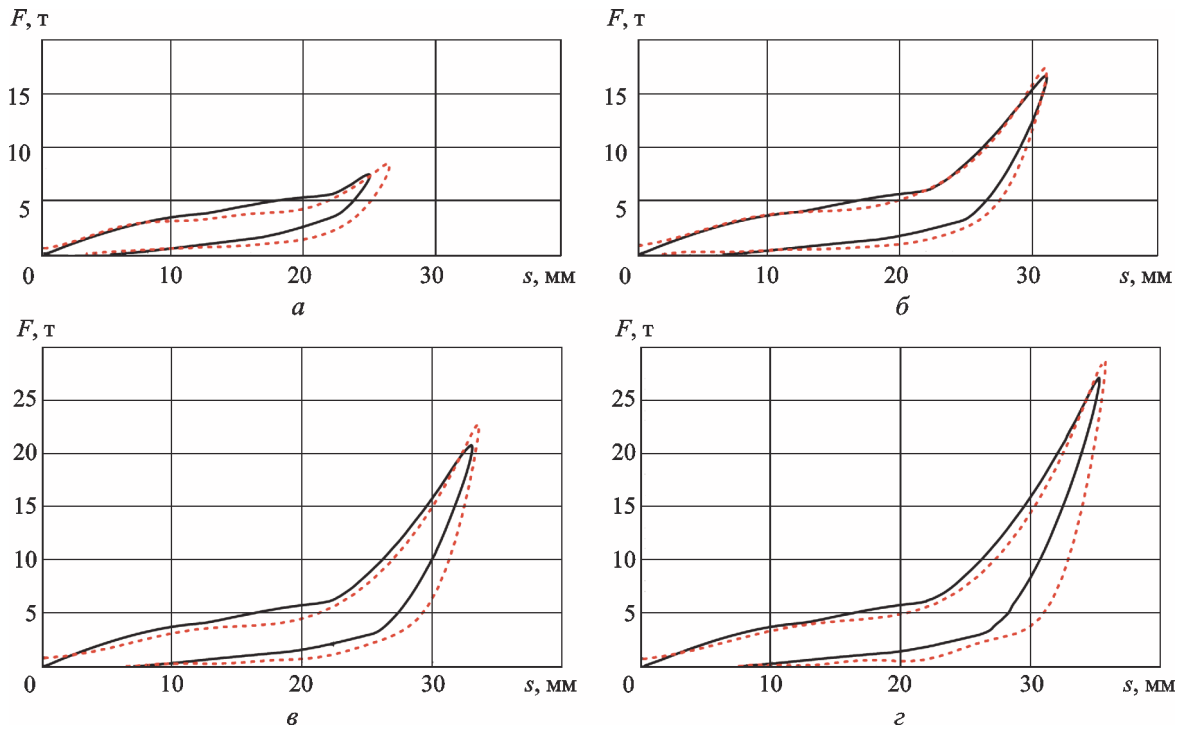


Рис. 9. Расчетные (—) и экспериментальные (---) зависимости силы  $F$  обжатия амортизатора от его осадки  $s$  при различных значениях высоты сброса плиты:  
 $a - h = 50$  мм;  $b - h = 115$  мм;  $v - h = 150$  мм;  $z - h = 204$  мм

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные энергетические характеристики амортизатора при различных значениях высоты сброса плиты

Параметр	Высота сброса, мм								
	50			115			204		
	Эксперимент	Расчет	$\Delta_2, \%$	Эксперимент	Расчет	$\Delta_2, \%$	Эксперимент	Расчет	$\Delta_2, \%$
$U_1, \text{Дж}$	952	940	1	1 701	1 733	-2	2 592	2 697	-4
$U_2, \text{Дж}$	324	357	-10	576	734	-28	849	1 533	-81
$\Delta U, \text{Дж}$	628	583	7	1 125	999	11	1 744	1 164	33
$\psi$	0,66	0,62	6	0,66	0,58	13	0,67	0,43	36

Таблица 4

Расчетные и экспериментальные энергетические характеристики амортизатора при высоте сброса плиты  $h = 150$ , полученные в трех последовательных испытаниях

Параметр	Расчет	Испытание 1		Испытание 2		Испытание 3	
		Эксперимент	$\Delta_2, \%$	Эксперимент	$\Delta_2, \%$	Эксперимент	$\Delta_2, \%$
$U_1, \text{Дж}$	2 137	2 026	-5	2 008	-6	2 018	-6
$U_2, \text{Дж}$	927	604	-53	672	-38	698	-33
$\Delta U, \text{Дж}$	1 210	1 422	15	1 336	9	1 321	8
$\psi$	0,57	0,70	19	0,67	15	0,65	13

Согласно реологической модели Бергстрёма–Бойса [1], тензор скоростей вязких деформаций  $\mathbf{D}_v$  выражается по закону течения через девиатор напряжений  $\text{dev } \boldsymbol{\sigma}_v$  в вязкой структуре материала:

$$\mathbf{D}_v = \frac{3}{2} \frac{A(\sigma_i)^{m-1}}{(\lambda_{chain} - 1 + \delta_0)^n} \text{dev } \boldsymbol{\sigma}_v, \quad (4)$$

где  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений;  $A$ ,  $m$ ,  $\delta_0$ ,  $n$  — параметры закона деформирования, определяемые экспериментально.

Из кинетического уравнения (3) с учетом закона течения (4) определяется скорость упругой деформации

$$\dot{\mathbf{F}}_e = \dot{\mathbf{F}} \mathbf{F}^{-1} \mathbf{F}_e - \frac{3}{2} \frac{A(\sigma_v^B)^{m-1}}{(\lambda_{vchain}^B - 1 + \delta_0)^n} \mathbf{F}_e \text{dev } \boldsymbol{\sigma}^B.$$

Далее динамическая составляющая напряжения  $\boldsymbol{\sigma}^B$  выражается через тензор  $\mathbf{F}_e$  по тому же закону упругости Арруды–Бойса, что и напряжение  $\boldsymbol{\sigma}^A$  равновесного состояния:

$$\boldsymbol{\sigma}^B = k(J_e - 1)\mathbf{I} + \frac{G^B}{J_e \lambda_{e chain}^B} \times \frac{L^{-1}(\lambda_{e chain}^B / \lambda_{lock}^B)}{L^{-1}(1 / \lambda_{lock}^B)} \text{dev } \bar{\mathbf{B}}_e. \quad (5)$$

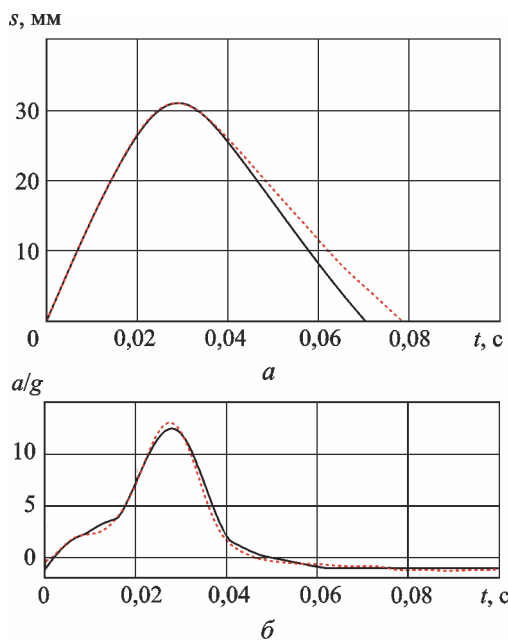


Рис. 10. Расчетные (—) и экспериментальные (---) зависимости осадки амортизатора  $s$  (а) и его перегрузки  $a/g$  (б) от времени  $t$  при высоте сброса плиты  $h = 115$  мм

Однако параметры упругости имеют новые значения —  $G^B$  и  $\lambda_{lock}^B$ .

Таким образом, напряжение в вязкоупругом материале Бергстрёма–Бойса вычисляется как сумма тензоров (1) и (5).

В качестве исходных данных для расчета были приняты следующие параметры:

$$G^A = 6,2 \text{ МПа}; \quad \lambda_{lock}^A = 3; \quad G^B = 12 \text{ МПа}; \\ \lambda_{lock}^B = 7; \quad A = 0,1 \text{ МПа}^{-m} \cdot \text{с}^{-1}; \quad m = 2; \\ n = 0,3; \quad \delta_0 = 10^{-6}.$$

На рис. 9 сопоставлены расчетные и экспериментальные ударные силовые характеристики амортизатора, соответствующие различным высотам сброса плиты. Близость результатов расчета и эксперимента свидетельствует о правильном выборе модели материала и ее параметров.

В табл. 3, 4 приведены результаты сравнения энергетических характеристик амортизатора по данным расчета и эксперимента, где  $U_1$  — накопленная энергия;  $U_2$  — возвращенная энергия;  $\Delta U$  — поглощенная энергия;  $\psi$  — коэффициент поглощения энергии;  $\Delta_2$  — разность экспериментальных и расчетных значений.

Из представленных результатов следует, что модель материала Бергстрёма–Бойса при заданных параметрах удовлетворительно описывает поведение полиуретана на первоначальной стадии нагрузки амортизатора. Однако на стадии разгрузки в реальных условиях полиуретан ведет себя несколько иначе, что приводит к погрешностям расчета как ударных, так и энергетических характеристик. Следует отметить, что разница между экспериментальными и расчетными значениями перемещений и перегрузок на стадии разгрузки не столь существенна, как для энергетических характеристик (рис. 10).

На рис. 11 представлено распределение эквивалентных, а также первых и третьих главных логарифмических деформаций материала в амортизаторе при максимальной осадке и высоте сброса плиты  $h = 115$  мм.

Форма деформированного амортизатора, полученная расчетным путем, весьма близка к реальной (рис. 12).

## Выводы

1. Разработанная математическая модель деформации полиуретанового амортизатора,

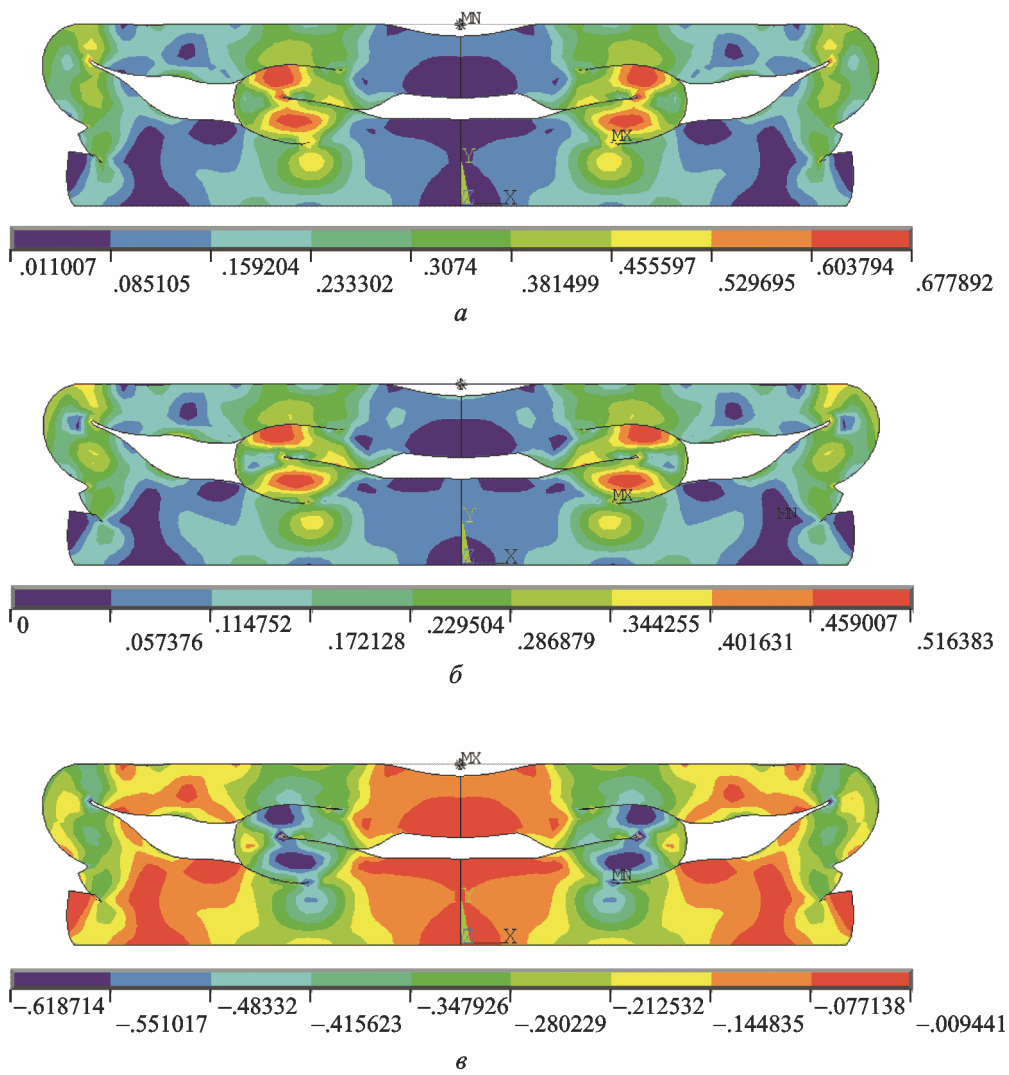


Рис. 11. Распределение эквивалентных (а), первых (б) и третьих главных (в) логарифмических деформаций в амортизаторе при максимальной осадке и высоте сброса плиты  $h = 115$  мм

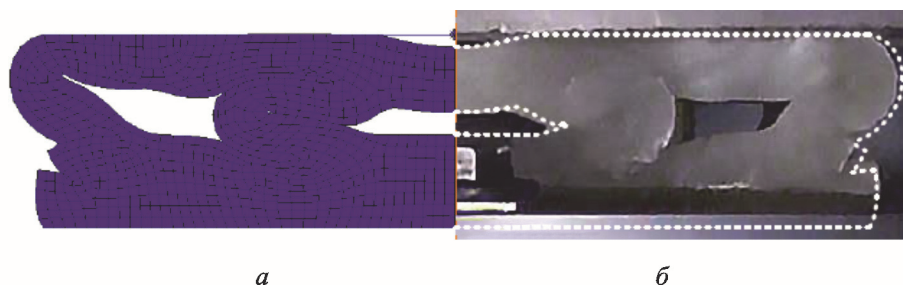


Рис. 12. Форма деформированного амортизатора, полученная расчетным (а) и экспериментальным (б) путем при высоте сброса плиты  $h = 115$  мм

основанная на применении закона вязкоупругости Бергстрёма–Бойса, позволяет рассчитывать его ударные характеристики в рассмотренном диапазоне скоростей деформаций.

2. Предложенная модель может быть использована при проектировании амортизаторов для поиска геометрических параметров, обеспечивающих требуемые нагрузочные характеристики.



## Литература

- [1] Bergström J.S., Boyce M.C. Constitutive Modeling of the Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomers. *Journal of Mechanic Physics Solids*, 1998, vol. 46, is. 5, pp. 931–954.
- [2] Bergström J.S., Boyce M.C. Mechanical behavior of particle filled elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*, 1999, vol. 72, is. 4, pp. 633–656.
- [3] Bergström J. *Mechanics of Solid Polymers. Theory and Computational Modeling*. Elsevier, 2015. 509 p.
- [4] Quintavalla S.J., Johnson S.H. Extension of the Bergström-Boyce model to high strain rates. *Rubber Chemistry and Technology*, 2004, vol. 77, is. 5, pp. 972–981.
- [5] Qi H.J., Boyce M.C. Stress-Strain Behavior of Thermoplastic Polyurethane. *Mechanics of Materials*, 2005, vol. 37, is. 8, pp. 817–839.
- [6] Белкин А.Е., Даштиев И.З., Семенов В.К. Математическая модель вязкоупругого поведения полиуретана при сжатии с умеренно высокими скоростями деформирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 6, с. 44–58.
- [7] Белкин А.Е., Даштиев И.З., Лонкин Б.В. Моделирование вязкоупругости полиуретана при умеренно высоких скоростях деформирования. *Математическое моделирование и численные методы*, 2014, № 3, с. 39–54.
- [8] Arruda E.M., Boyce M.C. A Three-dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials. *Journal of Mechanic Physics Solids*, 1993, vol. 41, is. 2, pp. 389–412.
- [9] Голованов А.И., Султанов Л.У. *Математические модели вычислительной нелинейной механики деформируемых тел*. Казань, Изд-во Казанского государственного университета, 2009. 465 с.
- [10] Cohen A. A Padé approximant to the inverse Langevin function. *Rheologica Acta*, 1991, vol. 30, is. 3, pp. 270–273.

## References

- [1] Bergström J.S., Boyce M.C. Constitutive Modeling of the Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomers. *Journal of Mechanic Physics Solids*, 1998, vol. 46, is. 5, pp. 931–954.
- [2] Bergström J.S., Boyce M.C. Mechanical behavior of particle filled elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*, 1999, vol. 72, is. 4, pp. 633–656.
- [3] Bergström J. *Mechanics of Solid Polymers. Theory and Computational Modeling*. Elsevier, 2015. 509 p.
- [4] Quintavalla S.J., Johnson S.H. Extension of the Bergström-Boyce model to high strain rates. *Rubber Chemistry and Technology*, 2004, vol. 77, is. 5, pp. 972–981.
- [5] Qi H.J., Boyce M.C. Stress-Strain Behavior of Thermoplastic Polyurethane. *Mechanics of Materials*, 2005, vol. 37, is. 8, pp. 817–839.
- [6] Belkin A.E., Dashtiev I.Z., Semenov V.K. Matematicheskaya model' viazkoupругogo povedeniia poliuretana pri szhatii s umerenno vysokimi skorostiami deformirovaniia [Mathematical Model of Viscoelastic Behavior of Polyurethane under Compression with Moderately High Strain Rates]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2014, no. 6, pp. 44–58.
- [7] Belkin A.E., Dashtiev I.Z., Lonkin B.V. Modelirovanie viazkoupругosti poliuretana pri umerenno vysokikh skorostiakh deformirovaniia [Modeling polyurethane viscoelasticity at moderately high strain rates]. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody* [Mathematical Modeling and Computational Methods]. 2014, no. 3, pp. 39–54.
- [8] Arruda E.M., Boyce M.C. A Three-dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials. *Journal of Mechanic Physics Solids*, 1993, vol. 41, is. 2, pp. 389–412.

- [9] Golovanov A.I., Sultanov L.U. *Matematicheskie modeli vychislitel'noi nelineinoi mekhaniki deformiruemyykh tel* [Mathematical models of computational nonlinear mechanics of deformable bodies]. Kazan, Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta publ., 2009. 465 p.
- [10] Cohen A. A Padé approximant to the inverse Langevin function. *Rheologica Acta*, 1991, vol. 30, is. 3, pp. 270–273.

Статья поступила в редакцию 23.01.2017

## Информация об авторах

**АЛАШЕЕВ Владимир Ильич** (Реутов) — ведущий научный сотрудник. АО «ВПК «НПО машиностроения» (143966, Реутов, Московская область, Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 33, e-mail: alasheev41@mail.ru).

**БЕЛКИН Александр Ефимович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aefbelkin@gmail.com).

**БОБРОВ Александр Викторович** (Реутов) — заслуженный машиностроитель РФ, заместитель начальника ЦКБМ, начальник отделения тепловибропрочности. АО «ВПК «НПО машиностроения» (143966, Реутов, Московская область, Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 33).

**ЯРОШЕВИЧ Никита Валерьевич** (Москва) — аспирант кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: nikitanev@mail.ru).

## Information about the authors

**ALASHEEV Vladimir Ilyich** (Reutov) — Leading Researcher. Military and Industrial Corporation AO NPO Mashinostroyeniya (143966, Reutov, Moscow region, Russian Federation, Gagarin St., Bldg. 33, e-mail: alasheev41@mail.ru).

**BELKIN Aleksandr Efimovich** (Moscow) — Doctor of Science, Professor, Department of Applied Mechanics. Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aefbelkin@gmail.com).

**BOBROV Aleksandr Viktorovich** (Reutov) — Deputy Head of Central Design Bureau of Mechanical Engineering, Head of Thermal Vibrational Strength Section, Honoured Machine Builder of the Russian Federation. Military and Industrial Corporation AO NPO Mashinostroyeniya (143966, Reutov, Moscow region, Russian Federation, Gagarin St., Bldg. 33).

**YAROSHEVICH Nikita Valerievich** (Moscow) — Postgraduate, Department of Applied Mechanics. Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: nikitanev@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие  
**Ю.Е. Алексеева, А.В. Курова**

### «Введение в визуальное программирование на языке C в среде VS C++»

Рассмотрена работа непосредственно в среде визуального программирования в режиме Common Language Runtime (CLR). Изложены основные понятия и принципы объектно-ориентированного программирования. Описаны порядок создания приложения, основные инструменты, используемые при разработке программы, правила создания событий, обработчики событий, простейшие компоненты интерфейса.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru