

УДК 51.74, 629.4.028.86

DOI: 10.12737/17070

А. П. Болдырев, А. С. Васильев

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННЫХ АМОРТИЗАТОРОВ УДАРА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДЕКВАТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Построены уточненные математические модели современных амортизаторов удара. Параметры моделей идентифицированы на основе экспериментальных исследований натуральных образцов. Рассчитаны характеристики современных амортизаторов удара. Проверена и подтверждена

адекватность построенных математических моделей.

Ключевые слова: амортизаторы удара, поглощающие аппараты, математические модели, статистические критерии, проверка адекватности.

A.P. Boldyrev, A.S. Vasiliev

CHARACTERISTICS COMPUTATION FOR MODERN SHOCK ISOLATORS OF ROLLING-STOCK USING APPROPRIATE SIMULATORS

The adequacy of a real physical object simulator is particularly significant in the problems of operation when there is a possibility for the immediate comparison and analysis of computational and actual values of model parameters. Modern absorbing devices for rolling-stock automatic coupling are described thoroughly with the aid of various simulators, but the adequacy results of these simulators insufficient. In the course of investigations there were created specified simulators of modern shock isolators. The simulator parameters are identified on basis of experimental researches of full-scale samples. The experiments were carried out simultaneously with mathematical modeling and included static tests on hydraulic press PMM-250 and

dynamic tests on shock table-incline BSTU-BS3. For the computation of identifiable parameters there was used a criterion function which defined the rate of divergence in an experiment and computed model on a travel and force. As a criterion function the criterion of a root-mean-square deviation of force and travel from experimental behavior was used. According to the investigations carried out there were computed the characteristics of modern shock isolators, and also the adequacy of created simulators on basis of Fischer criterion and verified.

Key words: shock isolators, shock absorbing devices, simulators, statistic criteria, adequacy test.

Основными целями исследований поглощающих аппаратов автосцепки (амортизаторов удара) являются повышение эффективности их работы, поиск новых конструктивных решений, не уступающих по основным показателям существующим моделям.

Для определения оптимальных значений параметров поглощающих аппаратов и их компонентов необходимы многочисленные экспериментальные исследования. Их проведение, как правило, связано с высокими расходами и требует больших затрат времени на планирование, изготовление опытных образцов и подготовку персонала.

Метод математического моделирования позволяет значительно сократить объемы экспериментов. Корректно созданная расчетная модель дает адекватное представление о характеристиках моделируемого объекта, позволяет выявить наиболее

перспективные технические решения и отбросить малоэффективные и тупиковые на начальном этапе разработки.

Адекватность математической модели реального объекта имеет большой смысл и особенно важна в задачах эксплуатации, когда есть возможность непосредственно сравнить и проанализировать расчетные и фактические значения параметров модели. Но в процессе построения математической модели при недостаточной степени ее адекватности или в условиях ограниченности информации об объекте появляется необходимость уточнения модели. Задача определения недостающих или неточно известных параметров или функциональных соотношений модели с помощью результатов вычислительного эксперимента носит название идентификации этих параметров. Поэтому любой алгоритм разработки математической модели объекта должен включать в себя 2

обязательных этапа: идентификацию неизвестных параметров модели на основе поставленных экспериментальных исследований и проверку адекватности разработанной модели с применением эффективных статистических критериев оценки расогласованности экспериментальных данных и результатов математического моделирования.

Современные поглощающие аппараты автосцепки подвижного состава железных дорог подробно описаны с помощью

разнообразных математических моделей [1;2]. Однако недостаточно внимания уделено адекватности этих моделей, что подтверждает актуальность исследований в данном направлении.

В настоящее время большой интерес представляет изучение работы таких поглощающих аппаратов, как ПМКП-110 (рис. 1 а), ПМКЭ-110 (рис. 1 б), ЭПА-120 (рис. 1 в), а также перспективного аппарата АВК-120П (рис. 1 г).

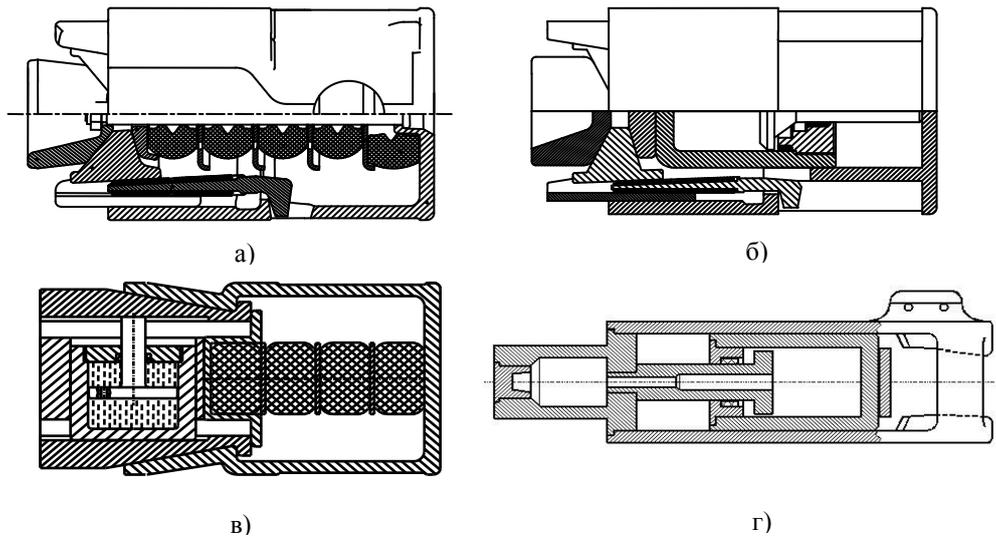


Рис. 1. Современные поглощающие аппараты: а – ПМКП-110; б – ПМКЭ-110; в – АВК-120П; г – ЭПА-120

Амортизаторы относятся к разным классам, но имеют схожие по принципу действия и способу поглощения энергии узлы, которые требуется подробно описать математически [3]: фрикционную часть, состоящую из контактирующих металло-керамических пластин, подпорно-возвратный комплект полимерных блоков

и эластомерную вставку, содержащую цилиндр, заполненный эластомерным материалом, внутри которого перемещается шток с поршнем. Силы, возникающие в этих узлах при ударном сжатии, применяются в математических моделях аппаратов и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Силы P в узлах поглощающих аппаратов

Тип узла	Выражение P
Фрикционная часть	$P(x) = \begin{cases} \psi_1 i_1 c(x+x_0) & \text{при } x < a; \\ \psi_2 i_1 c(x+x_0) & \text{при } x \geq a; \end{cases}$ $\psi_1 = \frac{1 + \operatorname{tg}(\beta + \rho_3) \operatorname{tg}(\gamma + \rho_1)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \rho_2) \operatorname{tg}(\gamma + \rho_1)}$ $\psi_2 = \psi_1 + (\psi_1 - 1) \frac{f_4 + f_5}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho_1)}$
Комплект упругих блоков	$P(x, \dot{x}) = [1 - \eta_{cm} \sigma_0(-\dot{x})] [c_n(x+x_0) + \beta_1(x+x_0)^3 + \dots \rightarrow \dots \rightarrow + \beta_2(x+x_0)^5] + c_n \mu_n \dot{x}$

Окончание табл. 1

<p>Эластомерная вставка</p>	$\begin{cases} P(x, \dot{x}) = q_C S_C - q_P S_P; \\ \frac{dq_C}{dt} = \frac{E_0 + a q_C}{V_{C0} - x S_C} [P_C + \dot{x} S_C]; \\ \frac{dq_P}{dt} = \frac{E_0 + a q_P}{V_{P0} + x S_P} [P_P - \dot{x} S_P]; \\ Q_C = -Q_{CP}; \\ Q_P = Q_{CP} \end{cases}$
-----------------------------	--

Математическое описание данных узлов и математическое моделирование работы аппаратов в целом детально представлено в многочисленных работах авторов [4-7]. Однако расчёты всегда ослож-



Рис. 2. Статические испытания на прессе ПММ-250

няются неопределенностью некоторых физических параметров современных материалов, из которых изготовлены эти узлы. К ним относятся показатели трения фрикционных поверхностей метал-

локерамических пластин $\rho_1, \rho_2, \rho_3, a$

$$Q = k_1 \int_0^{t_{max}} (P(t)_{\text{э}} - P(t)_M)^2 dt + k_2 \int_0^{t_{max}} (x(t)_{\text{э}} - x(t)_M)^2 dt,$$



Рис. 3. Статические испытания на стенде БСЗ

также характеристики полимерного и эластомерного материалов $c_n, \beta_1, \beta_2, \mu_n, \eta_{cm}, E_0, a$.

Эти параметры были идентифицированы по результатам проведенных экспериментальных исследований аппаратов и их узлов [8]. Эксперименты проводились параллельно с математическим моделированием и включали в себя статические испытания на гидравлическом прессе ПММ-250 (рис. 2) и динамические испытания на ударном стенде-горке БГТУ-БСЗ (рис. 3). С помощью измерительного комплекса МИС-026 (НПП «Мера», РФ) фиксировались статическая и динамическая силовые характеристики.

Для расчета идентифицируемых параметров использовалась целевая функция, которая определяла степень расхождения эксперимента и расчетной модели по перемещению и силе. В качестве целевой функции использовался критерий среднеквадратических отклонений силы и перемещения от экспериментальных характеристик:

где k_1, k_2 – весовые коэффициенты, позволяющие устанавливать степень значимости слагаемых целевой функции; $P(t)_{\text{э}}$ – экспериментальное значение силы; $P(t)_M$ – расчётная величина силы; $x(t)_{\text{э}}$ – экспериментальное значение перемещения; $x(t)_M$ – расчётная величина перемещения. Минимизация критерия методом Хука-Дживса позволила определить параметры

математических моделей поглощающих аппаратов.

По результатам статических испытаний были идентифицированы параметры математических моделей: $c_n = 1,32 \cdot 10^5$ Н/м; $\beta_1 = -4,89 \cdot 10^6$ Н/м³; $\beta_2 = 8,62 \cdot 10^8$ Н/м⁵; $\eta_{cm} = 0,13$; $E_0 = 1,28 \cdot 10^9$ МПа; $a = 7,14$; по результатам динамических – $\mu_n = 2,928 \cdot 10^{-2}$. На этапе динамических испытаний аппаратов также иденти-

фицировались коэффициенты трения f_0 и b : $b = 0,1 \dots 0,11$; для аппаратов ПМКП-110 и ПМКЭ-110 $f_0 = 0,31 \dots 0,33$; для аппарата АВК-120П $f_0 = 0,48 \dots 0,52$.

С учетом полученных результатов идентификации параметров математических моделей были построены силовые характеристики исследуемых аппаратов (рис. 4-7).

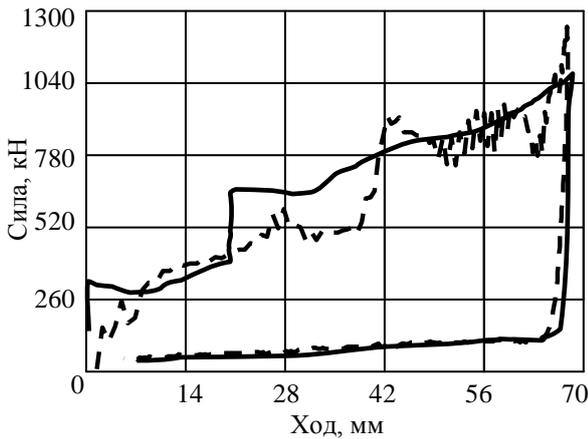


Рис. 4. Силовые характеристики аппарата ПМКЭ-110 для скорости удара $V_0 = 1,3$ м/с, полученные: ----- - экспериментально; ——— - при помощи моделирования

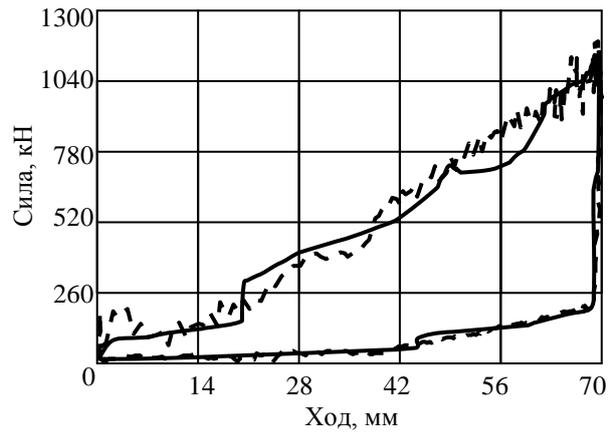


Рис. 5. Силовые характеристики аппарата ПМКП-110 для скорости удара $V_0 = 1,13$ м/с, полученные: ----- - экспериментально; ——— - при помощи моделирования

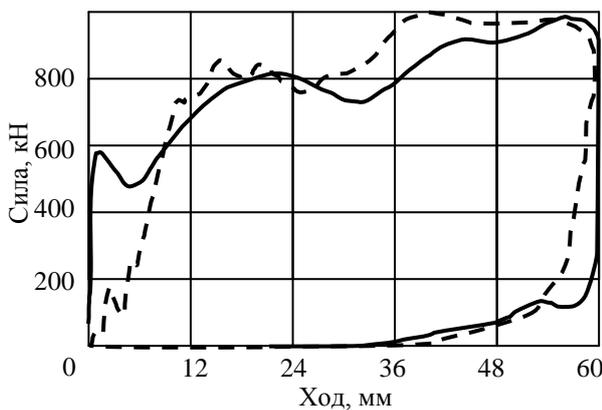


Рис. 6. Силовые характеристики аппарата ЭПА-120 для скорости удара $V_0 = 1,56$ м/с, полученные: ----- - экспериментально; ——— - при помощи моделирования

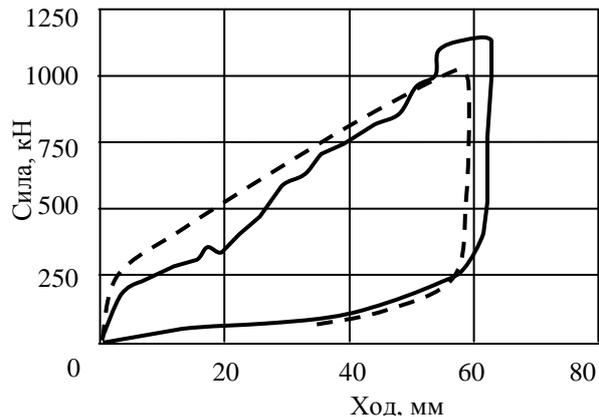


Рис. 7. Силовые характеристики аппарата АВК-120П для скорости удара $V_0 = 1,05$ м/с, полученные: ----- - экспериментально; ——— - при помощи моделирования

Алгоритм проверки адекватности математических моделей включал в себя:

- вычисление средних значений отклика \bar{y}_i в каждой точке плана экспери-

- мента по результатам параллельных опытов ($i = 1 \dots N$, N - число опытов в плане эксперимента);

- вычисление дисперсии воспроизводимости в виде

$$S_i^2 = \frac{\sum_{q=1}^{n_i} (y_{iq} - \bar{y}_i)^2}{n_i - 1},$$

где y_{iq} - значение отклика в q -м параллельном опыте; $i = 1 \dots n_i$, n_i - число параллельных опытов в i -й точке плана;

- проверку однородности дисперсий воспроизводимости с помощью G – критерия и вычисление средней дисперсии;

- проверку адекватности математической модели, состоящую в определении и анализе дисперсии адекватности

$$S_{ad}^2 = \frac{\tilde{S}_{ad}}{f_{ad}},$$

где f_{ad} - число степеней свободы дисперсии адекватности; \tilde{S}_{ad} - сумма квадратов отклонений средних значений откликов от значений по результатам моделирования.

Для адекватной модели оценки дисперсий адекватности и воспроизводимости должны быть однородны. Гипотеза об однородности дисперсий адекватности и воспроизводимости проверялась с помощью F -критерия (критерия Фишера):

$$F_{\phi} = \frac{S_{ad}^2}{\bar{S}_y^2} \quad \text{при} \quad S_{ad}^2 > \bar{S}_y^2.$$

Результаты проверки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты проверки адекватности различных моделей аппаратов

Показатель	ПМКП-110	ПМКЭ-110	АВК-120П	ЭПА-120
Дисперсия адекватности \bar{S}_{ad}^2 , МН	0,412	0,455	0,489	0,612
Средняя дисперсия воспроизводимости \bar{S}_y^2 , МН	0,278	0,291	0,308	0,507
Расчетное значение критерия Фишера F_{ϕ}	1,48	1,56	1,58	1,21
Табличное значение критерия Фишера $F_{табл}$	2,79	2,95	3,23	3,07

Из табл. 2 видно, что дисперсии адекватности \bar{S}_{ad}^2 больше средних дисперсий воспроизводимости \bar{S}_y^2 , расчетные значения F_{ϕ} меньше табличных $F_{табл}$. Следовательно, математические модели аппаратов прошли проверку адекватности по F -критерию для уровня значимости $q = 5\%$. Погрешность по максимальной силе не превышает 8%, погрешность хода аппарата – 6%.

Выводы по результатам исследований:

1. Разработаны уточненные математические модели поглощающих аппаратов, параметры которых идентифицированы на

основе экспериментальных данных. Расхождения по максимальной силе и максимальному ходу не превысили 8%.

2. Математические модели прошли проверку адекватности по F -критерию Фишера.

3. Проведены экспериментальные исследования аппаратов и их основных узлов с использованием современного испытательного оборудования и средств обработки результатов.

4. С учетом полученных результатов идентификации параметров математических моделей рассчитаны силовые характеристики исследуемых аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев, А. П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава /А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 199 с.
2. Болдырев, А. П. Научные основы совершенствования поглощающих аппаратов автосцепки: дис.... д-ра техн. наук / А. П. Болдырев. – Брянск, 2006.– 360 с.
3. Васильев, А. С. Повышение эффективности фрикционных поглощающих аппаратов автосцепки за счет применения эластомерных распорных узлов: дис.... канд. техн. наук / А. С. Васильев. – Брянск, 2013.– 142 с.
4. Васильев, А. С. Исследование работы поглощающих аппаратов с объемными распорными блоками / А. С. Васильев, Э. А. Фатьков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – №1. – С. 57-62.
5. Васильев, А. С. Разработка и исследование фрикционного амортизатора удара с упругим распорным узлом / А. С. Васильев, Б. Г. Кеглин, А. П. Болдырев, А. П. Шлющенко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – №1. – С. 25-31.
6. Болдырев, А. П. Перспективные конструкции поглощающих аппаратов автосцепки /А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин// Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 6. – С. 41-45.
7. Болдырев, А. П. Разработка и внедрение перспективных поглощающих аппаратов автосцепки для грузовых вагонов /А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин// Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 12. – С. 20-24.
8. Васильев, А. С. Экспериментальные исследования современных фрикционных амортизаторов удара подвижного состава железных дорог /А. С. Васильев, А. П. Болдырев// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – №4(2). – С. 507-510.
1. Boldyrev, A.P., Computation and Design of Shock Isolators for Rolling Stock/ A.P. Boldyrev, B.G. Keglin.- Mechanical Engineering-1, 2004, - pp. 199.
2. Boldyrev, A.P., Scientific Fundamentals for Updating Shock Absorbing Devices of Automatic Coupling: Thesis of D.Eng. / A.P. Boldyrev.- Bryansk, 2006.- pp. 360.
3. Vasiliev, A.S., Effectiveness Increase in Friction Shock Absorbing Devices of Automatic Coupling at Expense of Elastomer Stay Units: Thesis of Can.Eng. / A.S. Vasiliev.- Bryansk, 2013.- pp. 142.
4. Vasiliev, A.S., Investigation of shock absorbing devices with volumetric stay units / A.S. Vasiliev, E.A. Fatkov // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2013. – No 1.- pp. 57-62.
5. Development and investigation of friction shock isolator with elastic stay unit / A.S. Vasiliev, B.G. Keglin, A.P. Boldyrev, A.P. Shlyushenkov // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2012.- No 1.- pp. 25-31.
6. Boldyrev, A.P., Prospective designs of shock absorbing devices for automatic coupling / A.P. Boldyrev, B.G. Keglin// Railway Transport.- 2005. – No 6. – pp. 41-45.
7. Boldyrev, A.P., Development and introduction of prospective shock absorbing devices of automatic coupling for freight cars / A.P. Boldyrev, B.G. Keglin// Heavy Engineering. – 2005.- No 12. – pp. 20-24.
8. Vasiliev, A.S., Experimental Investigations of modern friction shock isolators for rolling-stock / A.S. Vasiliev, A.P. Boldyrev// Proceedings of Samara Scientific Center of Russian Academy of Sciences. – 2013. – Vol. 15.- No 4(2). – pp. 507-510.

*Материал поступил в редколлегию
15.06.15.*

*Рецензент: д.т.н., профессор
Брянского государственного технического
университета Б.Г. Кеглин*

Сведения об авторах:

Болдырев Алексей Петрович, д.т.н., профессор кафедры «Механика, динамика и прочность машин» БГТУ, тел.: (4832) 56-08-10.

Boldyrev Alexey Petrovich, D.Eng., Prof. of the Dep. «Mechanics, Dynamics & Machine Strength» BSTU, Phone: (4832) 56-08-10.

Васильев Алексей Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры «Высшая математика» БГТУ, тел.: 8(4832) 56-08-10.

Vasiliev Alexey Sergeevich, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Higher Mathematics”, BSTU, Phone: 8(4832) 56-08-10.