

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛАСТОМЕРНОГО АМОРТИЗАТОРА УДАРА

М.Г. Войновский

Рассматривается построение статической характеристики для эластомерного амортизатора удара. Приводится сравнение экспериментальной и расчетной характеристик. Сопоставляются ламинарные и турбулентные схемы для моделирования статической характеристики в динамической постановке.

Ключевые слова: эластомер, поглощающий аппарат, статические испытания, турбулентная модель, ламинарная модель

Введение

Амортизаторы удара находят широкое применение в различных технических областях. Их используют в авиации и оборонной технике, в различных повседневных устройствах и на железнодорожном транспорте. В последние годы идет развитие противоударных устройств на вагонах и локомотивах. Для этого используют амортизаторы, называемые поглощающими аппаратами автосцепки, предназначенные для защиты подвижного состава при соударении вагонов, возникающих при формировании поездов на сортировочных горках, во время маневров и при движении поезда.

Согласно [1] одним из видов испытаний поглощающих аппаратов является их статическое нагружение. При этом существуют нормируемые показатели для таких испытаний, благодаря которым амортизирующее устройство относится к определенному классу. Оценивают статическое нагружение зависимостью силы от перемещения (статической характеристикой), особенностью такого нагружения является низкая скорость перемещения (не более 0,05 м/с). В условиях эксплуатации нагружение такого типа схоже с поездными режимами движения как при пуске поезда в ход, так и при его торможении.

При разработке новых конструкций поглощающих аппаратов создается математическая модель [2–4], позволяющая описать поведение аппарата при различных условиях эксплуатации. Однако существующие математические модели [5–7] не могут описать поведение эластомера при малых скоростях нагружения, учитывая характеристики полимера. Появляется задача математического моделирования работы поглощающего аппарата при подобных режимах, опираясь на экспериментальным образом полученные статические характеристики.

Целью статьи является доказательство возможности моделирования статического нагружения эластомерных поглощающих аппаратов.

Объект исследования

В качестве объекта исследования используется эластомерный поглощающий аппарат ЭПА-110, представленный на рис. 1. Основными конструктивными отличиями данного поглощающего аппарата от аппаратов поглощающих эластомерных (АПЭ) класса Т2 от ОАО «НПК УралВагонЗавода» (УВЗ), ОАО «Авиаагрегат» и ООО «ЛЛМЗ-КАМАХ» (АПЭ-90-А.800 и АПЭ-95-УВЗ и 73ZW) являются увеличенный ход в 110 мм и корпус, выполненный с тяговым хомутом, а от аппарата ЭПА-120 класс Т3 – из-

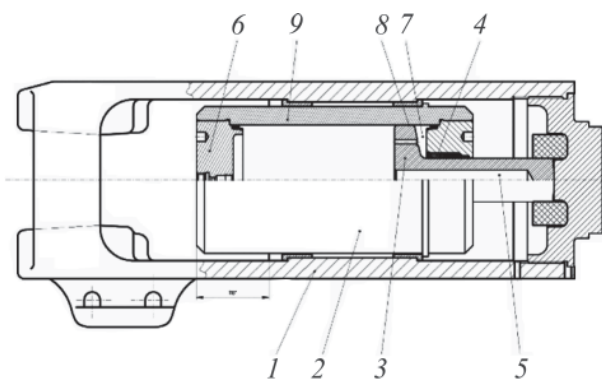


Рис. 1. Поглощающий аппарат ЭПА-110

менным калибровочным зазором и количеством камер, заполненных эластомером. Такие особенности аппарата приводят к высоким давлениям, возникающим в камерах сжатия и расширения, что требует уделять внимание качеству стали, погрешностям при обработке деталей и дополнительным мерам, предотвращающим вытекание эластомера через зазоры в соединениях.

Поглощающий аппарат ЭПА-110 (см. рис. 1) состоит из корпуса 1, выполненного за одно целое с тяговым хомутом автосцепки. В корпусе 1 располагаются поршень 3 с полым штоком и полый плунжер 9, между которыми имеется калиброванный зазор 8 постоянной величины, являющийся каналом дросселирования. Полости 2 и 7 внутри плунжера 9, внутри штока 5, поршня 3 и крышки 6 заполнены объемно-сжимаемым и текучим телом – эластомерной композицией. Уплотнения 4 обеспечивают герметичность подвижного соединения штока и плунжера.

Поглощающий аппарат работает следующим образом. Под действием сжимающей нагрузки, передаваемой упорной плитой автосцепного устройства, плунжер 9 перемещается внутрь корпуса 1, сжимая эластомер в полостях плунжера 9 и штока поршня 3, одновременно заставляя перетекать эластомер через калиброванный зазор 8 между плунжером 9 и поршнем 3 в увеличивающуюся полость за поршнем 7. Восстановление аппарата после удара происходит под действием давления на плунжер 9 объемно сжатого в камере 7 эластомера.

Проведение статических испытаний

Статические испытания проводились на гидравлическом прессе механическом модифицированном ПММ-250 при температурах +20...+25°C. Скорость нагружения составляла

не более 5 мм/с. Статическая характеристика фиксировалась с помощью измерительного комплекса МИС-026 (НПП «Мера», РФ). В ходе испытаний осуществлялся непрерывный контроль силы сжатия. Измерение сил проводилось тензометрическим цилиндрическим динамометром с максимальной измеряемой силой 1000 кН с погрешностью, не превышающей 0,5% от верхнего предела измерений. Ход измерялся с помощью датчика перемещений реохордного типа, обеспечивающего в диапазоне 0...130 мм точность не менее ± 1 мм. Регистрация значений сил и перемещений осуществлялись путем аналого-цифрового преобразования их сигналов с последующей записью в память ЭВМ. Методика испытаний включала в себя нагружения испытываемых узлов до сжатия на величину конструктивного хода при работе в аппарате.

Схема проведения испытаний приведена на рис. 2. Поглощающий аппарат 1 размещался на столе пресса 2. В верхней части аппарата устанавливался цилиндр 3 с тензометрическим датчиком 4. На цилиндр 3 опускалась верхняя траверса пресса 5. При помощи нагружающего устройства пресса стол 2 поднимался вверх, чем обеспечивалось статическое сжатие. Ход регистрировался реохордным датчиком перемещений 6.

В результате испытаний была получена статическая характеристика, представленная на рис. 3.

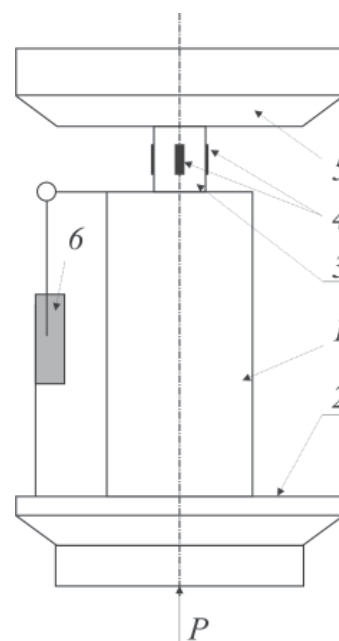


Рис. 2. Схема статических испытаний

Уточнение параметров статической характеристики

Для построения статической характеристики использовалось уравнение [8]:

$$q = \frac{E_0}{a} [\exp(\alpha a \bar{x}) - 1], \quad (1)$$

$$\alpha = S_{\text{ш}} / W_{\text{сум}}; \quad \bar{x} = x + \frac{W_3}{W_{\text{сум}}} = x + x_3,$$

где q – давление в камере; E_0 – модуль упругости эластомера при относительно малых давлениях; a – эмпирический коэффициент; $\bar{x}$ – ход аппарата; $W_{\text{сум}}$ – общий объем находящегося в камерах эластомера, включает дополнительный объем эластомерного материала W_3 , который позволяет создать начальное давление в камерах в исходном состоянии; $S_{\text{ш}}$ – площадь сечения штока; x_3 – начальная затяжка аппарата; x – перемещение штока.

Для увеличения точности построения кривой восстановления амортизатора проведем идентификацию параметров модели на обратном ходе. Для этого разложим уравнение (1) в степенной ряд, оставляя четыре члена ряда:

$$q = E_0 \left[\alpha \bar{x} + \frac{a}{2} (\alpha \bar{x})^2 + \frac{a^2}{6} (\alpha \bar{x})^3 + \frac{a^3}{24} (\alpha \bar{x})^4 \right]. \quad (2)$$

По двум известным из эксперимента точкам, например с координатами (x_3, q_0) и $(x_3 + x_{\text{max}}, q_{\text{max}})$, можно найти параметры статической характеристики E_0 и a для обратного хода.

По данным испытаний, разрабатываемый в ООО «НПП Дипром» аппарат ЭПА-110 имеет такие параметры [8]: общий объем камер в начальном положении $W_0 = 5,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $W_3 = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $x_3 = 0,07 \text{ м}$, $S_{\text{ш}} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, максимальный ход $x_{\text{max}} = 100 \text{ мм}$, начальное давление в камерах $q_0 = 90,9 \text{ МПа}$, максимальное давление в камерах $q_{\text{max}} = 276 \text{ МПа}$, начальные значения параметров при прямом ходе $E_{0\text{пр}} = 1634 \text{ МПа}$, $a_{\text{пр}} = 8,48$, начальные значения параметров на обратном ходе $E_{0\text{об}} = 687 \text{ МПа}$, $a_{\text{об}} = 14,48$.

Для описания модуля упругости $\bar{E}$, эмпирического коэффициента a и давлений в камерах сжатия $\bar{q}_c$ и растяжения $\bar{q}_p$ при прямом и обратном ходе с учетом скорости движения штока предлагаются формулы:

$$\bar{E} = \begin{cases} E_{0\text{пр}}, & \text{если } \dot{x} \geq 0; \\ E_{0\text{об}}, & \text{если } \dot{x} < 0; \end{cases} \quad (3)$$

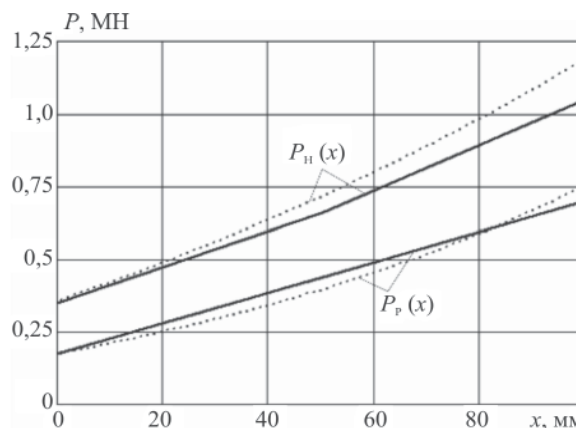


Рис. 3. Статические характеристики эластомерного аппарата:

$P_H(x)$ – кривая нагрузки; $P_P(x)$ – кривая разгрузки
— экспериментальная; расчетная

$$\bar{a} = \begin{cases} a_{\text{пр}}, & \text{если } \dot{x} \geq 0; \\ a_{\text{об}}, & \text{если } \dot{x} < 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{q}_c = q_c [1 - 0,35\sigma_0(-\dot{x})]; \quad (5)$$

$$\bar{q}_p = q_p [1 - 0,35\sigma_0(-\dot{x})], \quad (6)$$

где $\dot{x}$ – скорость движения штока; σ_0 – единичная функция Хевисайда, которая в данном случае равна 0 при $\dot{x} \geq 0$ и равна 1 при $\dot{x} < 0$.

На рисунке 3 сопоставлены расчетная и экспериментальная статические характеристики: погрешность при прямом ходе не превышает 3%; при обратном – 8%, в основном при малом ходе.

Моделирование статической характеристики при различных режимах перетекания жидкости

Построение статической характеристики с учетом гидравлической составляющей вызывает больший интерес, так как эта математическая модель должна описывать реальное поведение аппарата. Для моделирования статического нагружения будем использовать расчетную схему, представленную на рис. 4, при этом масса ударяемого тела M будет большой, а скорость движения малой.

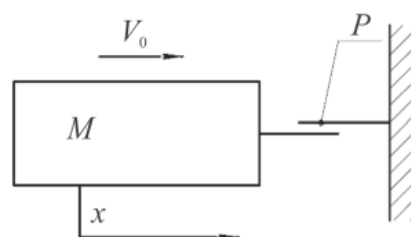


Рис. 4. Расчетная схема эластомерной вставки

Дифференциальные уравнения, описывающие сжатие эластомерного поглощающего аппарата, имеют вид:

$$\begin{cases} M\ddot{x} + P = 0; \\ P = \bar{q}_p S_p - \bar{q} S_c; \\ \frac{dq_c}{dt} = \frac{\bar{E} + a\bar{q}_c}{W_c - xS_c} (\dot{x}S_c - Q_c); \\ \frac{dq_p}{dt} = \frac{\bar{E} + a\bar{q}_p}{W_p - xS_p} (Q_c - \dot{x}S_c), \end{cases} \quad (7)$$

где W_c , W_p – объемы эластомера в камерах сжатия и расширения с учетом начальной закачки; S_c , S_p – площади камер сжатия и расширения; P – сила сжатия; M – условная масса, давящая на поглощающий аппарат; $\ddot{x}$ – ускорение сжатия; $\dot{x}$ – скорость сжатия; x – ход аппарата; Q_c – расход эластомера при перетекании.

Дальнейший расчет зависит от принятой гипотезы: турбулентного, ламинарного или какого-либо другого эмпирического потока при ударе [2, 3].

Для ламинарного потока

$$Q_p = \frac{\pi r a_0^3}{6 \rho l v} (\bar{q}_c - \bar{q}); \quad (8)$$

для турбулентного потока

$$Q_c = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho} |\bar{q}_c - \bar{q}_p|} \text{sign}(\bar{q}_c - \bar{q}_p), \quad (9)$$

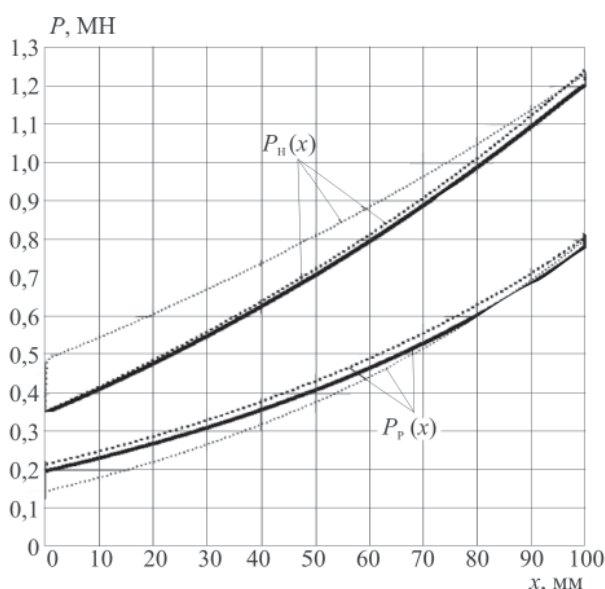


Рис. 5. Статическая характеристика при турбулентном течении жидкости:
 $P_H(x)$ – кривая нагрузки; $P_P(x)$ – кривая разгрузки;
 — $V_0 = 0,01$ м/с; - - - $V_0 = 0,1$ м/с;
 $V_0 = 1$ м/с

где r – радиус поршня; l – длина поршня; v – кинематическая вязкость эластомера; ρ – плотность эластомера; μ – коэффициент гидравлических потерь; a_0 – радиальный зазор между плунжером и поршнем; f – суммарная площадь истечения эластомера.

Радиальный зазор в первом приближении возможно найти по формуле

$$a_0 = \frac{f}{2\pi r}.$$

Для идентификации математических моделей, как и ранее, использовался поглощающий аппарат ЭПА-110 с такими параметрами [8]: $W_{\text{сум}} = 56,59 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; $W_c = 51,19 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; $W_p = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; $S_c = 0,021 \text{ м}^2$; $S_p = 0,018 \text{ м}^2$; $\rho = 1060 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $f = 0,000249 \text{ м}^2$; $r = 0,0825 \text{ м}$; $a_0 = 4,73 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $l = 0,03 \text{ м}$.

Дифференциальные уравнения (7) решались методом Рунге-Кутты 4-го порядка при фиксированном шаге по ходу (x) в программном комплексе Mathcad. Расчеты проводились при начальных условиях

$$t = 0; x = 0; \dot{x} = v_0; q_{c0} = q_{p0} = q_0$$

с заданными параметрами:

– для турбулентной модели: $v_0 = 0,01$ м/с, $M = 147 \cdot 10^7$ кг; $v_0 = 0,1$ м/с, $M = 148 \cdot 10^5$ кг; $v_0 = 1$ м/с, $M = 165 \cdot 10^3$ кг; $\mu = 0,6$;

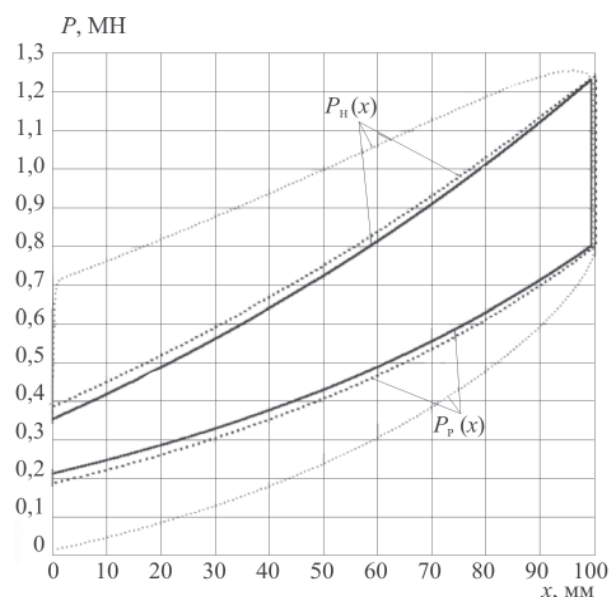


Рис. 6. Статическая характеристика при ламинарном течении жидкости:
 $P_H(x)$ – кривая нагрузки; $P_P(x)$ – кривая разгрузки;
 — $V_0 = 0,01$ м/с; - - - $V_0 = 0,1$ м/с;
 $V_0 = 1$ м/с

Таблица 1

Необратимо поглощенная энергия амортизатором

Скорость сжатия, м/с	Режим течения жидкости		Экспериментальное значение
	ламинарный	турбулентный	
0,01	28940 Дж	29660 Дж	24250 Дж
0,1	33880 Дж	28970 Дж	
1	71560 Дж	41780 Дж	

– для ламинарной модели: $v_0 = 0,01$ м/с, $M = 148 \cdot 10^7$ кг; $v_0 = 0,1$ м/с, $M = 155 \cdot 10^5$ кг; $v_0 = 1$ м/с, $M = 199 \cdot 10^3$ кг; $v = 1,6 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

Результатом решения системы (7) являются давления в камере сжатия ($\bar{q}_c$) и камере расширения ($\bar{q}_p$). Величина силы сжатия аппарата определяется по второму уравнению из (7).

На рисунках 5 и 6 представлены статические характеристики для разных скоростей сжатия.

Определение необратимо поглощенной энергии

Для статических характеристик, приведенных на рис. 5 и 6, определим необратимо поглощенную амортизатором энергию, представленную на рис. 7, как разность энергии, воспринятой амортизатором (площадь, ограниченная кривой нагрузки), и энергии, возвращаемой амортизатором внешней системе (площадь, ограниченная кривой разгрузки) [7]

$$E_H = \int_0^{x_{\max}} P_H(x) dx - \int_0^{x_{\max}} P_P(x) dx, \quad (10)$$

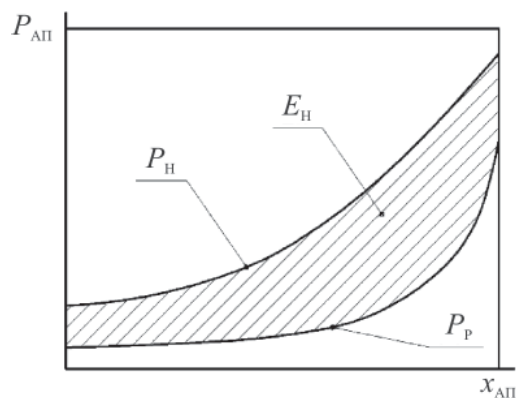


Рис. 7. Силовая характеристика амортизатора удара

где E_H – необратимо поглощенная амортизатором энергия; $P_H(x)$ – кривая нагрузки; $P_P(x)$ – кривая разгрузки; $x_{\max}$ – максимальный ход аппарата.

Результаты представлены в таблице 1.

Приведенные результаты показывают, что использование уравнений с гидравлической составляющей дает хорошую точность при определении необратимо поглощенной энергии на малых скоростях, приближающихся к статическим. При этом малая разница для различных режимов течения жидкости показывает возможность использования любой из моделей, потому что такой режим нагружения исключает влияние динамической части уравнения.

При увеличении скорости продавливания начинает сказываться влияние динамической составляющей: происходит резкое увеличение силы, что хорошо видно на графиках. Для ламинарного режима перетекания жидкости максимальные погрешности по силе при скорости сжатия 0,01 м/с составляют: при прямом ходе – 12%, на обратном ходе – 14%. Для турбулентного режима: при прямом ходе – 14%, на обратном ходе – 10%.

Заключение

В работе представлены различные математические модели для построения статической характеристики. Результаты, полученные в ходе проведенных испытаний, показывают, что представленные модели можно использовать для моделирования статического нагружения различных эластомерных аппаратов при различных условиях эксплуатации. Но кроме геометрических параметров аппарата, следует учитывать характеристики эластомера. Более точные результаты можно получить, проведя экспериментальные исследования для получения распределения давлений в камерах сжатия и расширения.

Список литературы

1. ОСТ 32.175–2001. Аппараты поглощающие автосцепного устройства грузовых вагонов и локомотивов. Общие технические требования. – М.: МПС России, 2001.
2. Горячев С.А. Разработка методики проектирования и выбор параметров эластомерного поглощающего аппарата грузовых вагонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Е., 1999. – 26 с.
3. Ступин Д.А. Определение рациональных параметров эластомерных поглощающих аппаратов автосцепного устройства грузовых вагонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2001. – 22 с.
4. Васильев А.С. Повышение эффективности фрикционных поглощающих аппаратов автосцепки за счет применения эластомерных распорных узлов: дис. ... канд. техн. наук. – Б., 2013. – 142 с.
5. Гуров А.М. Оценка влияния параметров современных амортизаторов удара на продольную динамику поезда: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Б., 2007 – 20 с.
6. Фатков Э.А. Математическое моделирование работы современных поглощающих аппаратов автосцепки и разработка программного комплекса для расчета их характеристик: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Б., 2009. – 20 с.
7. Болдырев А.П., Кеглин Б.Г. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава. – М.: Машиностроение, 2004. – 198 с.
8. Кеглин Б.Г., Войновский М.Г. Совершенствование математической модели эластомерного амортизатора удара // Вестник БГТУ. 2013. № 1. С. 27–35.

Материал поступил в редакцию 15.06.14

**ВОЙНОВСКИЙ
Максим Геннадиевич**

E-mail: mak3989@yandex.ru
Тел.: +7 (915) 537-77-07

Аспирант кафедры «Динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета. Сфера научных интересов: моделирование динамики подвижного состава, изучение эластомерных поглощающих аппаратов. Автор одной статьи.