

УДК 629.4.028; 62–754.

Д-р техн. наук, проф. Б. Г. КЕГЛИН, инж. М. Г. ВОЙНОВСКИЙ,
д-р техн. наук, проф. А. П. БОЛДЫРЕВ

Экспериментальное исследование функционирования эластомерного поглощающего аппарата автосцепки

Аннотация. Эластомерные поглощающие аппараты автосцепки — в настоящее время единственные амортизаторы удара при соударении вагонов, отвечающие за надежность и безопасность транспортировки опасных и ценных грузов. В ранних работах изучались силы при сжатии и при ударе, но убедительного описания картины давлений в камерах аппарата не было, что затрудняло математическое моделирование этого сложного устройства.

В статье рассматриваются вопросы функционирования эластомерного поглощающего аппарата. Приводятся результаты экспериментальных исследований и расчетных значений давлений в камерах поглощающего аппарата при различных вариантах дросселирующих отверстий для квазистатических и динамических испытаний. Вводятся новые зависимости для расчета силы, действующей на поглощающий аппарат.

Даны рекомендации при корректировке конструкции и в доработке математического моделирования.

Ключевые слова: эластомер; поглощающий аппарат; испытания; силовая характеристика; гистерезис; трение

Эластомерные поглощающие аппараты — в настоящее время единственные амортизаторы удара вагона, отвечающие за надежность и безопасность нефтебензиновых цистерн, специализированных платформ, крытых вагонов, транспортирующих ценные или опасные грузы классов 3, 4, 5, 8, 9 по ГОСТ 18433. Они не требуют приработки и удовлетворяют требованиям ОСТ 32.175–2001 по классам Т2 и Т3. В настоящее время этим требованиям отвечают отечественные аппараты АПЭ-120И и АПЭ-95; в ближайшее время войдут в эксплуатацию аппараты ЭПА-110.

Эластомерные амортизаторы используются уже более 40 лет, однако анализ механики их работы и математическое моделирование до сего времени не завершены [1]. В работах [2–8] предлагались модели, опирающиеся на экспериментальные данные: скорости, силы и величины хода в процессе удара, но убедительное описание картины давлений в камерах эластомерного аппарата отсутствовало. В данной статье содержится экспериментальное исследование, устраняющее этот недостаток. При различных режимах — квазистатических и динамических регистрировались и анализировались не только силовые характеристики, но и зависимости давлений в разных камерах от хода.

В качестве объекта использовался эластомерный аппарат ЭПА-110 (рис. 1).

Аппарат состоит из корпуса 1, выполненного заодно с тяговым хомутом автосцепки. В корпусе располагается плунжер 2, в котором есть поршень 3 со штоком 4, а также крышки 5 и 6 с уплотнительными кольцами 7. Полости плунжера 8 и 9 заполнены объемно-сжимаемым и текучим телом — эластомерной композицией. В данном исследовании использовалась композиция АДК, разработанная ООО «Астрохим». Она представляет собой кремнийорганический материал, обладающий высокой объемной сжимаемостью (до 15%) и высокой вязкостью — до 3000 Па·с. Высокая вязкость позволяет существенно снизить требования к уплотнениям по сравнению с низкомолекулярными маслами, а наличие объемной сжимаемости дает возможность эластомеру пружинить, обеспечивая возврат аппарата в исходное состояние.

Между плунжером 2 и поршнем 3 есть калиброванный зазор 10; кроме того, есть калиброванные отверстия 11 в поршне 3. Последние могут быть переменными конструктивными параметрами.

Поглощающий эластомерный аппарат работает следующим образом (рис. 2). Автосцепка через упорную плиту действует внешней силой P на плунжер 3 аппарата, который перемещается в корпусе 4 и сжимает эластомер в полостях 1 и 2, одновременно заставляя перетекать эластомер из уменьшающейся камеры 1 в увеличивающуюся камеру 2 через упомянутые калиброванные отверстия и калиброванный зазор. Восстановление аппарата в исходное состояние происходит под действием давления, объемно-сжатого в камере 2 эластомера.

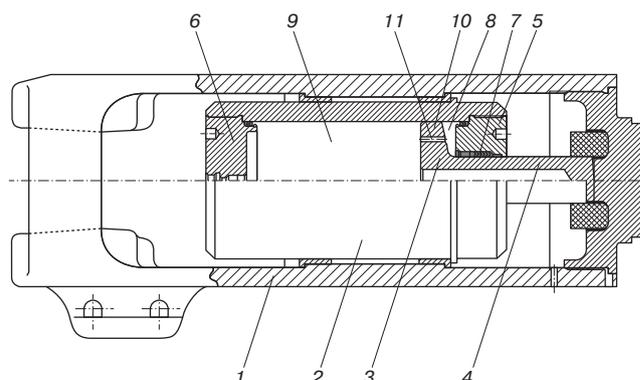


Рис. 1. Эластомерный поглощающий аппарат ЭПА-110

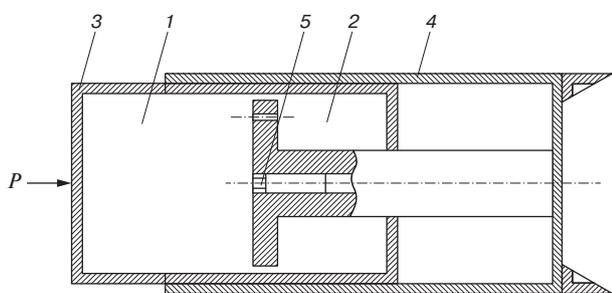


Рис. 2. Схема работы эластомерного аппарата



Рис. 3. Датчик давления Gefran

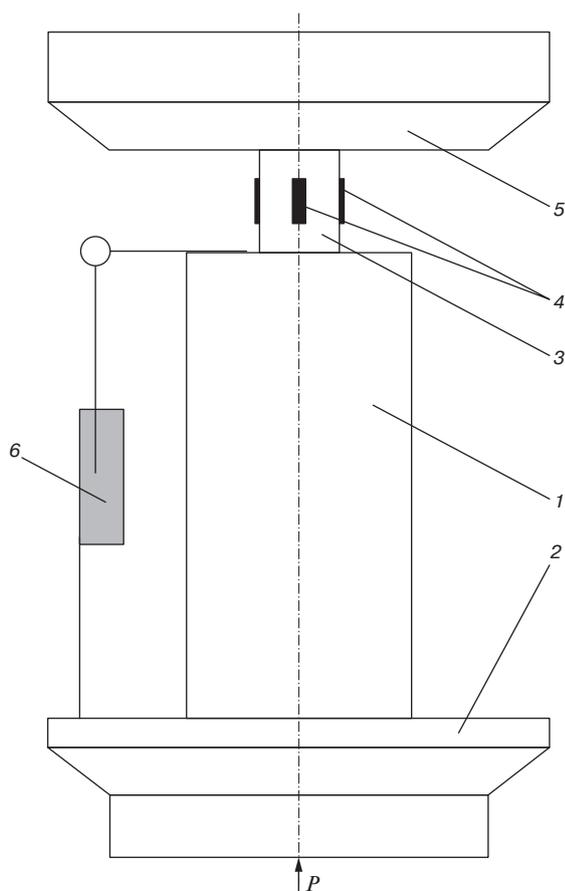


Рис. 4. Схема статических испытаний эластомерного аппарата ЭПА-110

Для измерения давления использовался датчик Gefran TPHE-V-B35C-T (рис. 3), располагавшийся в штоке 5 (рис. 2); таким образом, измерялось давление q_1 в полости 1. Погрешность такого датчика не превышает 0,3% в диапазоне 0–3500 бар. Датчик устанавливался на оси штока 5 (см. рис. 2). Во избежание проникновения эластомера в шток и кабель использовалось специальное уплотнение, посаженное на клей. Установка датчика в камере 2 (давление q_2) очень усложнена; позже будет показано, что давление q_2 с достаточной точностью может быть определено по давлению q_1 .

Квазистатические испытания. Квазистатические, в дальнейшем будем называть — статические, испытания проводились с помощью гидравлического пресса ПММ-250 (рис. 4). Поглощающий аппарат 1 размещался на столе пресса. В верхней части аппарата устанавливался цилиндр 3 с тензометрическим датчиком 4, фиксирующим силу сжатия аппарата. На цилиндр 3 опускалась верхняя траверса пресса 5. При помощи нагружающего устройства пресса стол 2 поднимался вверх, чем обеспечивалось статическое сжатие, скорость нагружения составляла 1 мм/с. Ход регистрировался реохордным датчиком перемещений 6. Температура воздуха была 20–25 °С. В ходе испытаний непрерывно измерялась сила, перемещение цилиндра и давление q_1 с помощью измерительного комплекса МС-026 (НПП «Мера», РФ).

Для статических испытаний были подготовлены три варианта дросселирования. Первый, когда дросселирование обеспечивало только калиброванный зазор с площадью сечения 1,33 см²; второй — наряду с зазором были три дополнительных отверстия диаметром 7 мм, общая площадь сечения — 2,48 см²; третий — наряду с зазором были три отверстия диаметром 10 мм, общая площадь сечения — 3,68 см².

Начальная сила сжатия эластомера (сила зарядки) находилась в диапазоне 280–310 кН.

На рис. 5, а, б приведены силовые характеристики аппарата $P(x)$ и зависимости давления в камере 1 от хода — $q_1(x)$. На графиках показаны знаки скорости перемещения плунжера v .

Зависимости давления от хода $q_1(x)$ показали крайне малый гистерезис, необратимое поглощение энергии менее 2% во всех вариантах дросселирования. Отсюда следует вывод о минимальном внутреннем трении при нагружении и деформировании эластомера. В то же время силовая характеристика $P(x)$ свидетельствует о значительном гистерезисе — коэффициенте необратимого поглощения энергии η при медленном квазистатическом цикле «сжатие — восстановление». Наибольшее необратимое поглощение энергии имеет место при наименьшей площади дросселирования, а наименьшее — при наибольшей площади дросселирования (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость коэффициента η от варианта дросселирования

Параметр	Диаметр отверстий, мм		
	0	7	10
Коэффициент поглощения энергии	0,78	0,41	0,32

Таблица 2

Параметры давления q_1 и силы трения F в зависимости от варианта дросселирования

Диаметр отверстий поршня, мм	F_0 , кН	F_{max} , кН	q_{10} , МПа	q_{1max} , МПа	a , кН/МПа
0	142	157	32,6	152	0,1254
7	72	140	57,4	201	0,4735
10	65	110	62,4	210	0,3045

Здесь $q_{1max} = q_1(x_{max})$; $F_{max} = F(x_{max})$; $x_{max} = 100$ мм.

Необратимое поглощение энергии при отсутствии гистерезиса у давления приводит к единственному выводу: при медленном сжатии причиной является внешнее трение. Оно возникает при продавливании эластомера через зазор между плунжером и поршнем и через дополнительные отверстия в поршне; ранее это отмечал Д. А. Ступин [3].

Анализ эксперимента (см. рис. 5) показывает, что сила трения возрастает с повышением давления q_1 .

В первом приближении силу трения F можно представить формулой

$$F = [F_0 + a(q_1 - q_{10})] \text{sign}(\dot{x}), \quad (1)$$

где F_0 и q_{10} — начальные значения силы трения и давления в камере 1.

В табл. 2 приведены параметры давления q_1 и силы трения F в зависимости от варианта дросселирования по данным статических испытаний.

Из табл. 2 следует, что чем меньше площадь дросселирования, тем больше растет диссипация и сила внешнего трения.

Оценка силы трения позволяет найти давление q_2 в камере 2. На рис. 6 приведена расчетная схема работы поглощающего эластомерного аппарата в случае статических испытаний.

Уравнение равновесия штока принимает вид

$$q_1 S_1 - q_2 S_2 - P + F \text{sign}(v) = 0, \quad (2)$$

где S_1 — поперечная площадь камеры 1; S_2 — поперечная площадь камеры 2; v — скорость движения плунжера.

Здесь P — сила сжатия (или сила удара) и q_1 — давление в камере регистрируются аппаратурой во времени; F — сила трения, зависящая от q_1 , времени и перемещения. Тогда давление q_2 определяется следующими уравнениями:

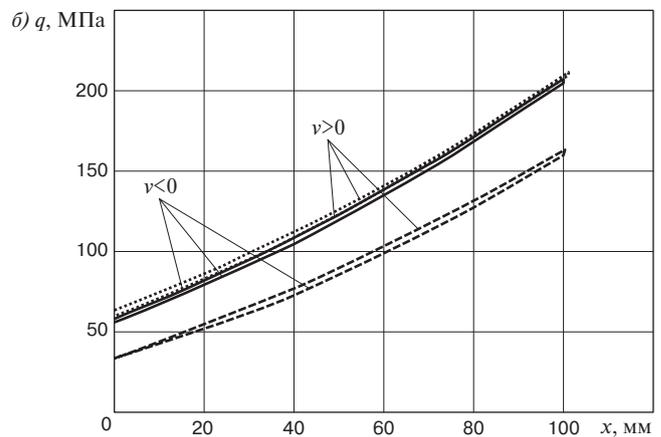
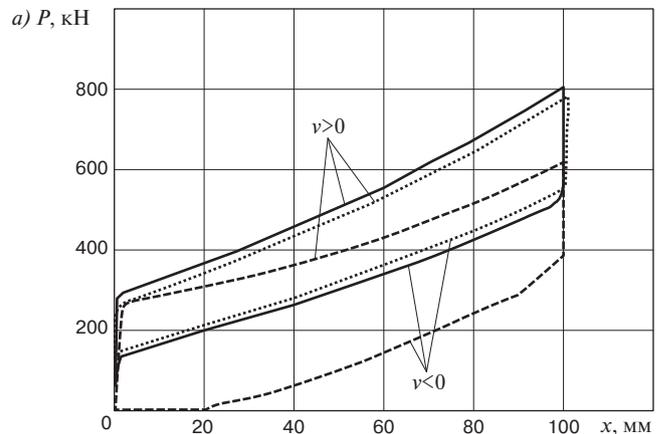


Рис. 5. Силовые характеристики $P(x)$ и зависимости давления $q_1(x)$ в камере 1 от хода

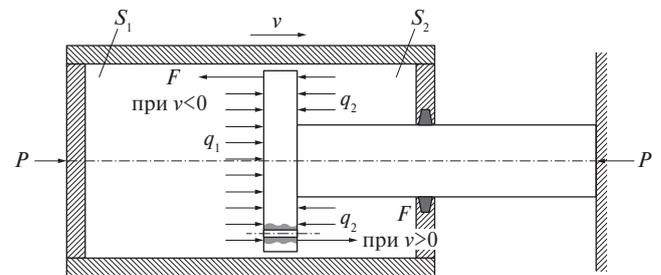


Рис. 6. Расчетная схема эластомерного аппарата

$$q_2 = \begin{cases} \frac{1}{S_2}(q_1 S_1 - P + F) & \text{при } v > 0; \\ \frac{1}{S_2}(q_1 S_1 - P - F) & \text{при } v < 0. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 7 показаны зависимости давлений q_1 и q_2 от хода при различных вариантах дросселирования.

Судя по рис. 7, величины давления в обеих камерах при статическом испытании практически одинаковы. В целом можно отметить, что при равных условиях, например при одинаковых силах, увеличение площади дросселирования приводит к увеличению величин

давления q_1 и q_2 (в данных вариантах дросселирования — на 10–12%).

Стендовые ударные испытания. Ударные испытания эластомерного поглощающего аппарата ЭПА-110 проводились на стенде-горке БСЗ-БГТУ (рис. 8). Стенд состоит из упора 2, ударной тележки 1 массой 44 т, горки 3 и лебедки 4. Лебедкой 4 с помощью сцепной тележки 5 ударная тележка 1 поднимается на горку 3, далее происходит отцеп, и тележка с необходимой скоростью

ударяется в испытуемый поглощающий аппарат. В ходе испытаний с помощью измерительно-вычислительного комплекса МИС-026 регистрировались во времени сила удара P , ход аппарата x и давление q_1 при различных скоростях накатывания тележки. Регистрация силы осуществлялась с помощью динамометрической автосцепки посредством тензорезисторных датчиков, соединенных по безызгибной схеме для измерения продольных сил. Ход измерялся с помощью реохордного датчика больших перемещений. Испытания проводились при температуре окружающей среды 1–5 °С.

Для ударных испытаний аппарат ЭПА-110 был подготовлен в двух исполнениях: с отверстиями в поршне штока диаметром 7 и 10 мм. Скорость удара изменялась от 0,73 до 2,05 м/с с максимальной энергоемкостью до 100 кДж. На рис. 9, а, б и рис. 10, а, б приведены силовые характеристики к зависимости давления в камере 1 от хода при трех скоростях — 1,05; 1,75 и 2,05 м/с для дросселирования с отверстиями диаметром 7 и 10 мм. На графиках стрелками показаны направления перемещения плунжера. Далее в табл. 3 показано, как изменяется необратимость энергии при ударе.

Как видно из силовых характеристик (см. рис. 9, 10) и табл. 3, гистерезис значительно увеличивается при ударе; коэффициент необратимого поглощения энергии η увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с квазистатическим сжатием. Это естественно, так как наряду с внешним трением здесь имеет место гидродинамическое сопротивление, а его влияние существенно выше скорости перемещения. Во-первых, в отличие от статического испытания величины давления $q_1(x)$ при ударе значительно различаются. Во-вторых, на основной части хода давление $q_1(x)$ при восстановлении ($v < 0$) существенно больше, чем при сжатии: этому явлению можно дать термин «отрицательный гистерезис». В-третьих, характер зависимости $q_1(x)$ при сжатии и восстановлении отличается: при сжатии он — колебательный, при восстановлении — монотонно спокойный и почти линейный.

Для нахождения давления q_2 в камере 2 можно воспользоваться расчетной схемой эластомерного аппарата (см. рис. 5). При ударе возможна инерционная составляющая, которая зависит от массы ударяющей тележки (44 000 кг) и ударяемого плунжера, которые жестко связаны. Таким образом, инерционную составляющую можно считать входящей в силу сжатия P .

Таблица 3

Зависимость необратимого поглощения энергии от скорости удара и варианта дросселирования

Диаметр отверстий в поршне, мм	Коэффициент необратимого поглощения энергии η			
	Скорость удара, м/с			
	1,05	1,75	2,05	0,01
7	0,902	0,875	0,818	0,41
10	0,782	0,801	0,822	0,32

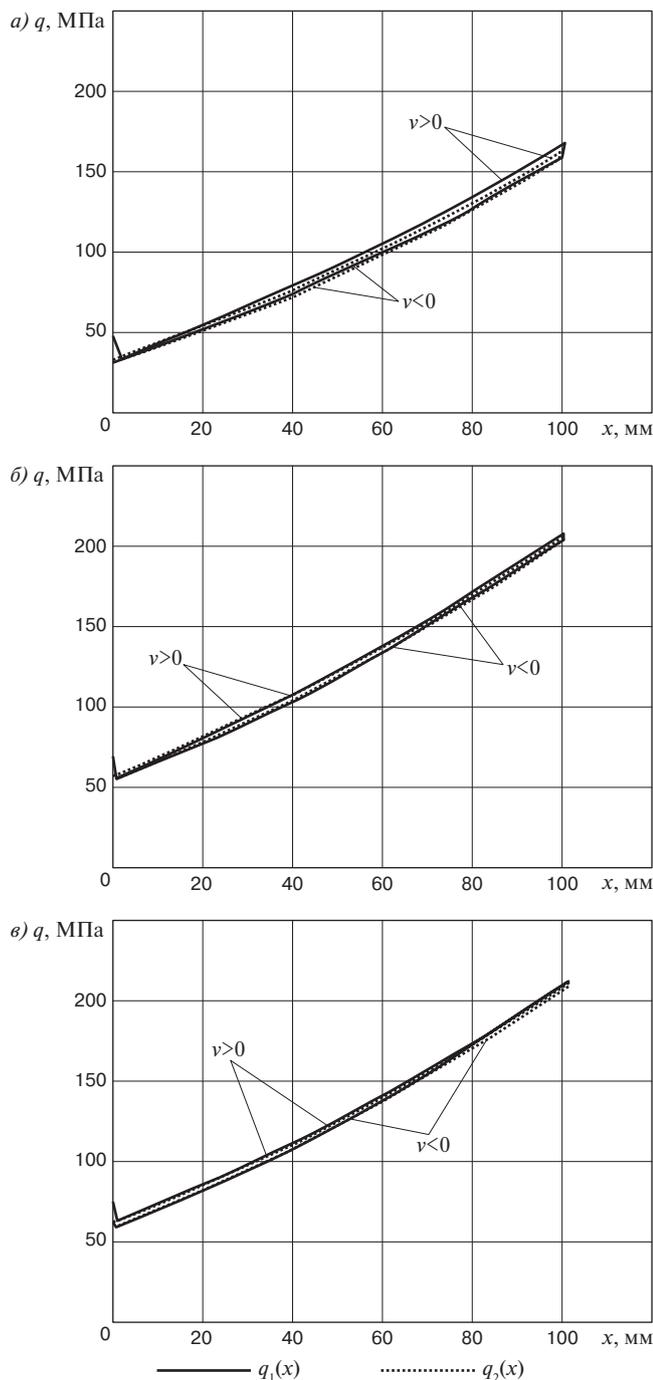


Рис. 7. Зависимости давлений q_1 и q_2 от хода: а — $d = 0$ мм; б — $d = 7$ мм; в — $d = 10$ мм

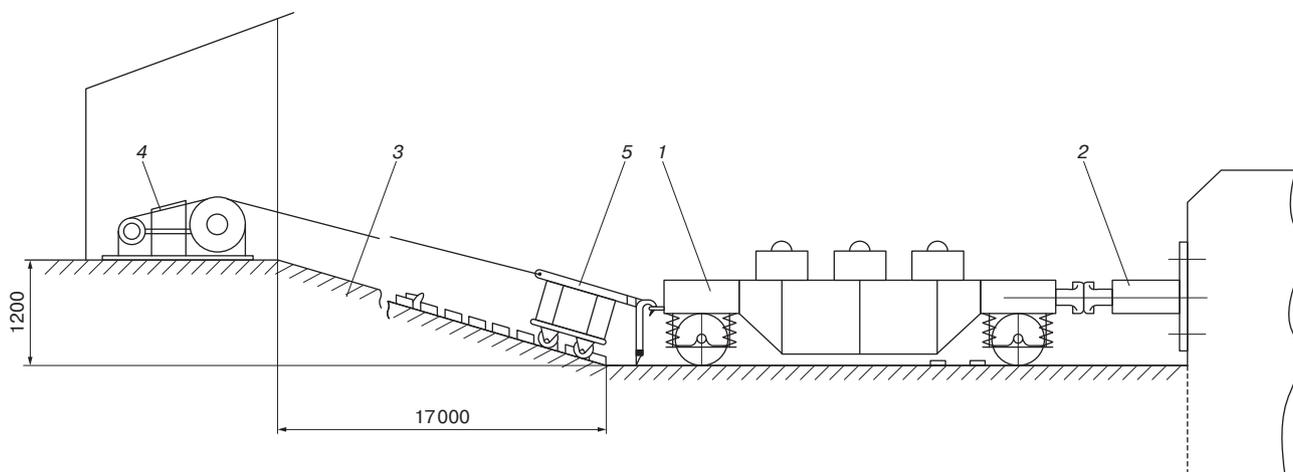


Рис. 8. Стенд-горка БСЗ-БГТУ

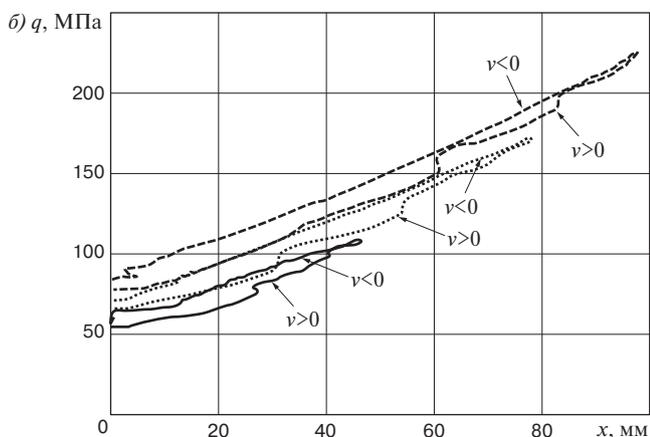
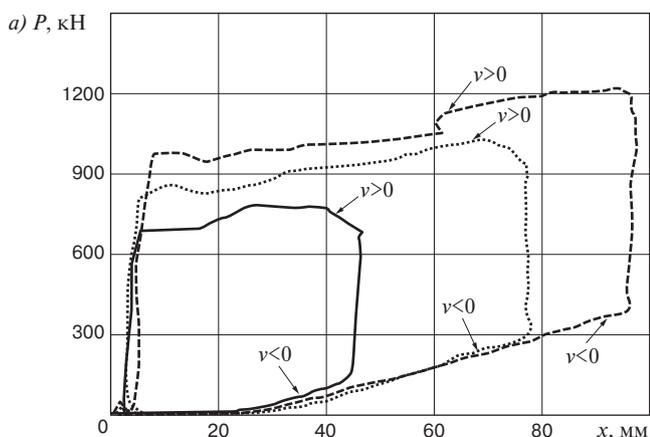


Рис. 9. Силовые характеристики и зависимости давления q_1 в камере 1 от хода аппарата ЭПА-110 при отверстиях в поршне диаметром 7 мм

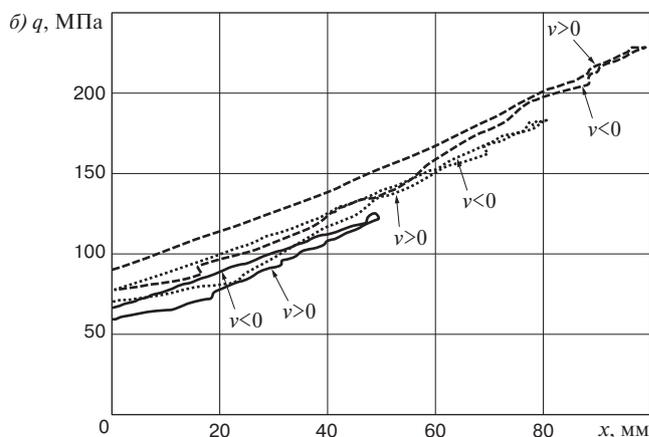
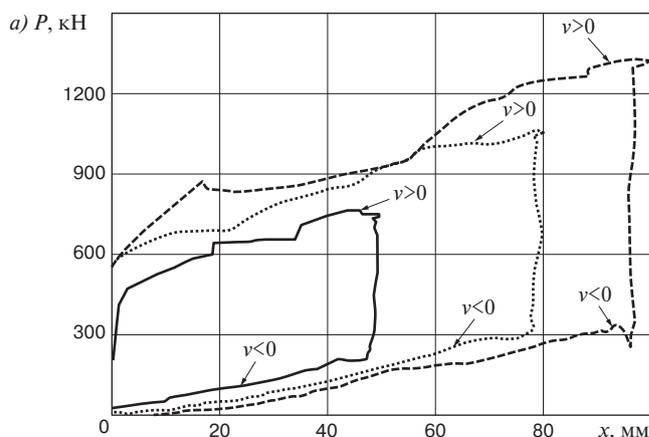


Рис. 10. Силовые характеристики и зависимости давления q_1 в камере 1 от хода аппарата ЭПА-110 при отверстиях в поршне диаметром 10 мм

Используя формулы (2) и (3), были получены зависимости давления в камере 2 от хода, т. е. $q_2(x)$, при сжатии и восстановлении аппарата (рис. 11, 12), различных скоростях удара и с двумя вариантами дросселирования.

В момент начала возврата аппарата сила P резко падает, что приводит к резкому росту давления q_2 в камере 2 (см. формулу (3)). При возврате скорость мала, что приводит к малому различию давлений в камерах 1 и 2, т. е. имеет место упомянутый эффект «отрицательного

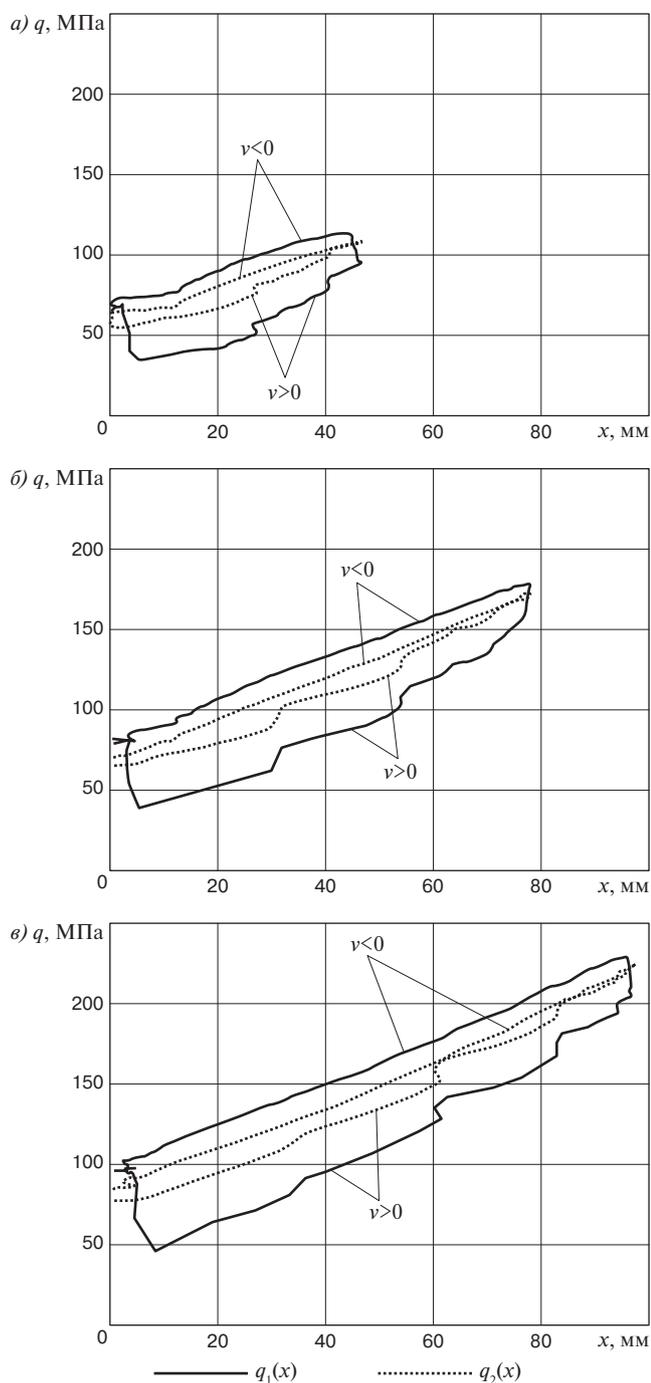


Рис. 11. Зависимости давлений от хода в камерах аппарата ЭПА-110 при различных скоростях удара при отверстиях в поршне диаметром 7 мм:
 $a - v_0 = 1,05 \text{ м/с}$; $б - v_0 = 1,75 \text{ м/с}$; $в - v_0 = 2,05 \text{ м/с}$

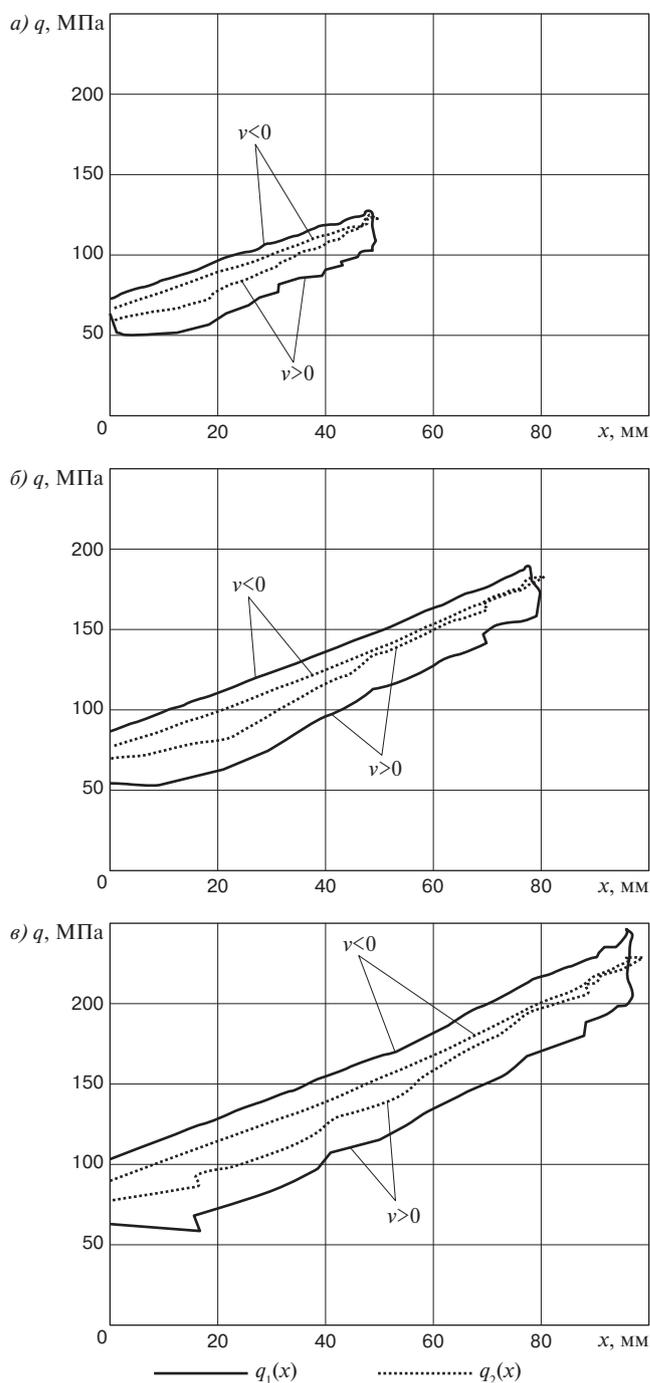


Рис. 12. Зависимости давлений от хода в камерах аппарата ЭПА-110 при различных скоростях удара при отверстиях в поршне диаметром 10 мм:
 $a - v_0 = 1,05 \text{ м/с}$; $б - v_0 = 1,75 \text{ м/с}$; $в - v_0 = 2,05 \text{ м/с}$

гистерезиса». В обеих камерах максимальные давления возникают в процессе возврата аппарата к исходному состоянию.

Вывод. В эластомерном поглощающем аппарате наибольшее давление имеет место в камере 2, в которой находится шток. Этот факт необходимо учитывать при проектировании крышки и уплотнений в камере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Iwnicki S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics // Boca Raton, FL.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. 552 p.
2. Горячев С.А. Математическое моделирование работы эластомерного поглощающего аппарата // Перспективы и состояние автотормозов подвижного состава: научно-практ. сб. Екатеринбург: УрГАПС, 1998. С. 96 – 105.

3. Ступин Д.А., Беляев В.И. Разработка российского эластомерного поглощающего аппарата для автосцепного устройства грузовых вагонов // Вестник ВНИИЖТ. 1998. №6. С. 29 – 31.

4. Болдырев А.П., Кеглин Б.Г. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава. М.: Машиностроение-1, 2004. 198 с.

5. Кеглин Б.Г., Войновский М.Г. Совершенствование математической модели эластомерного амортизатора удара // Вестник БГТУ. 2013. №1. С. 27 – 35.

6. Манашкин Л.А., Мямлин С.В., Приходько В.И. Гасители колебаний и амортизаторы ударов рельсовых экипажей (математические модели): монография. Днепропетровск: Арт-Пресс, 2007. 196 с.

7. К вопросу усовершенствования эластомерных поглощающих аппаратов ж/д вагонов // Г.В. Артюх [и др.] / Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. / ПДТУ. Маріуполь, 2006. Вип. 9. С. 145 – 147.

8. Васильев А.С. Новая методика расчета эластомерных амортизаторов удара // XXXVIII Гагаринские чтения: научные труды Международной научной конференции. М.: МАТИ, 2012. С. 134 – 135.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЕГЛИН Борис Григорьевич,

профессор кафедры «Механика, динамика и прочность машин», Брянский государственный технический университет. 241035, Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7. Тел.: (910) 339-46-38. e-mail: keglin@mail.ru

ВОЙНОВСКИЙ Максим Геннадиевич,

аспирант кафедры «Механика, динамика и прочность машин», Брянский государственный технический университет, 241035, Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7. Тел.: (915) 537-77-07. e-mail: mak3989@yandex.ru

БОЛДЫРЕВ Алексей Петрович,

профессор кафедры «Механика, динамика и прочность машин», Брянский государственный технический университет. 241035, Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7. Тел.: (910) 331-20-00. e-mail: apb.tubryansk@gmail.com

Experimental Investigation of Operational Behaviour of Elastomeric Center-Coupler Draft Gear

Boris G. Keglın, Dr. of Technical Science, Professor, Chair of Mechanics Dynamics and Strength of Machines, Bryansk State Technical University, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Honorary Railwayman of JSC RZD. 7, Boulevard of the 50-th Anniversary of October, 241035 Bryansk, Russian Federation. Tel.: +7 (910) 3394638. E-mail: keglin@mail.ru

Maxim G. Voinovskiy, Postgraduate Student, Chair of Mechanics Dynamics and Strength of Machines, Bryansk State Technical University. 7, Boulevard of the 50-th Anniversary of October, 241035 Bryansk, Russian Federation. Tel.: +7 (915) 5377707. E-mail: mak3989@yandex.ru

Alexey P. Boldyrev, Dr. of Technical Science, Professor, Chair of Mechanics Dynamics and Strength of Machines, Bryansk State Technical University. 7, Boulevard of the 50-th Anniversary of October, 241035 Bryansk, Russian Federation. Tel.: +7 (910) 3312000. E-mail: apb.tubryansk@gmail.com

Abstract. The paper tackles functioning aspects of elastomeric center-coupler draft gears. For the time being such draft gears are the only shock absorbers responsible for safe and secure transportation of hazardous materials and high-value car-goes.

The predecessor research works dealing with force pattern intrinsic to impact and compression failed to present the clean-cut description of pressure field structure within the draft gear chambers, thus making difficult mathematical modeling of such a complicated device. The authors of the described research managed to fill the indicated gap through use of up-to-date high-quality sensors capable of tracing pressure values up to 300 MPa. The center-coupler draft gear EPA-110 with crucial component in the form of double-chamber plunger assembly with a partition piston group was selected as a full-scale object of research.

There are presented outcomes produced by experimental research and computations of the pressure values in the draft gear chambers in terms of different patterns of orifice holes used for quasi-static and dynamic testing. Also there are introduced new dependences to be used in calculations of force acting upon the draft gear and are provided rec-ommendations concerning introduction of amendments to the draft gear design and modification of its mathematical model.

Keywords: elastomer; draft gear; tests; force characteristic; hysteresis; friction

References

1. Iwnicki S. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Boca Raton, FL, CRC Press Publ., 2006. 552 p.

2. Goryachev S.A. *Matematicheskoe modelirovanie raboty elastomernogo pogloshchayushchego apparata* [Mathematical modeling of the elastomeric draft gear]. Perspektivy i sostoyanie

avtortomozov podvizhnogo sostava [Perspectives and the state of rolling stock auto-brakes]. Ekaterinburg, Ural State Univ. of Railway Transport, 1998, pp. 96 – 105.

3. Stupin D.A., Belyaev V.I. *Razrabotka rossiyskogo elastomernogo pogloshchayushchego apparata dlya avtostsepnogo ustroystva gruzovykh vagonov* [Development of the Russian elastomeric draft gear for automatic coupler of freight cars]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1998, no. 6, pp. 29 – 31.

4. Boldyrev A. P., Keglın B. G. *Raschet i proektirovanie amortizatorov udara podvizhnogo sostava* [Calculation and design of rolling stock shock absorbers]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004. 198 p.

5. Keglın B. G., Voinovskiy M. G. *Sovershenstvovanie matematicheskoy modeli elastomernogo amortizatora udara* [Mathematical model of perfecting elastomeric shock absorbers]. Vestnik BGTU [Bulletin of the Bryansk State Technical Univ.], 2013, no. 1, pp. 27 – 35.

6. Manashkin L. A., Myamlin S. V., Prihod'ko V. I. *Gasiteli kolebaniy i amortizatory udarov rel'sovykh ekipazhey (matematicheskie modeli)* [Dampers and shock absorbers of railway vehicles (mathematical models)]. Dnepropetrovsk, Art-Press Publ., 2007. 196 p.

7. Artyukh G. V. et al. *K voprosu usovershenstvovaniya elastomernykh pogloshchayushchikh apparatov zh/d vagonov* [On the issue of improvement of elastomeric absorbing devices of railway cars]. Zakhist metalurgiy-nikh mashin vid polomok: zb. nauk. pr., 2006, no. 9, pp. 145 – 147.

8. Vasil'ev A. S. *Novaya metodika rascheta elastomernykh amortizatorov udara* [The new method of calculating the elastomeric shock absorbers]. XXXVIII Гагаринские чтения: науч. тр. Mezhdunar. nauch. konf. [38th Гагарин readings: Proc. int. sci. conf.]. Moscow, MATI Publ., 2012, pp. 134 – 135.