



УДК 629.4.028.86

Расчетно-экспериментальная оценка характеристик полимерных элементов

С. А. Кравцов, А. П. Болдырев, Ф. Ю. Лозбинев

Брянский государственный технический университет, Российская Федерация, 241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

Для цитирования: Кравцов С. А., Болдырев А. П., Лозбинев Ф. Ю. Расчетно-экспериментальная оценка характеристик полимерных элементов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 7–16. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-7-16

Аннотация

Цель: Изучить работу полимерных элементов поглощающего аппарата автосцепного устройства. Разработать модели полимерных элементов подпорного комплекта поглощающего аппарата с учетом применения в полимерном элементе частей, теряющих устойчивость в процессе работы. Получить силовые характеристики разработанных моделей полимерных элементов с помощью компьютерного моделирования. Сравнить параметры полученных силовых характеристик с экспериментальными данными немодернизированного полимерного элемента. В качестве объекта исследований использовать опорный полимерный элемент поглощающего аппарата ПМКП-110. **Методы:** Для определения оптимального варианта геометрии полимерного элемента использовалось компьютерное моделирование, основанное на методе конечных элементов (МКЭ). Поскольку работа полимерных элементов предполагает значительные деформации самих элементов, то моделирование проводилось в программном пакете, специализирующемся на решении высоконелинейных задач. Для сравнения эффективности разработанных моделей было проведено экспериментальное исследование полимерного элемента. **Результаты:** Показана необходимость исследования и модернизации полимерных комплектов поглощающих аппаратов автосцепного устройства. Рассмотрено одно из направлений модернизации полимерных элементов, и представлено несколько вариантов моделей полимерных элементов, спроектированных в рамках исследуемого направления. Из возможных моделей выбран наиболее перспективный вариант. Даны рекомендации для дальнейших исследований. **Практическая значимость:** Рассмотренный подход в изучении и модернизации полимерных элементов позволяет получить полимерный комплект с улучшенными параметрами силовой характеристики — энергоемкостью и коэффициентами полноты. Подобные полимерные комплекты, установленные в поглощающие аппараты, могут повысить их надежность, увеличить эффективность, что в целом может сказаться на сохранности вагонов и перевозимых ими грузов.

Ключевые слова: Полимерный элемент, поглощающий аппарат автосцепного устройства, метод конечных элементов, силовая характеристика, коэффициент полноты, энергоемкость, гиперупругий материал.

В настоящее время железнодорожный транспорт является одним из самых значимых и востребованных для экономики Российской Федерации, его доля в общем грузообороте страны, по данным Федеральной службы государственной статистики, постоянно увеличивается [1] (рис. 1).

За январь — май 2022 года он был равен 1 110 292 млн тонно-км, что составило 46,86 % от общего объема грузооборота в стране.

При таких объемах перевозок обеспечение сохранности перевозимого груза всегда будет актуально, а также являться одним из важнейших направлений в исследовании и модернизации подвижного состава железных дорог. Особую актуальность оно получает ввиду возможного увеличения вероятности соударения с повышенными скоростями из-за роста числа механизированных горок и вагонов на роликовых подшипниках [2]. Кроме того, не стоит забывать, что нарушение сохранности груза может повлечь за собой не только материальный ущерб, но и обернуться экологической катастрофой или человеческими жертвами.

Из всех возможных эксплуатационных нагрузок, действующих на вагон, наиболее опасными являются продольные нагрузки, возникающие во время экстренных режимов движения или при соударении вагонов на сортировочных станциях. Для снижения продольных нагрузок, а также для поглощения энергии соударения в конструкции автосцепного устройства вагона предусмотрено использование межвагонного амортизатора удара — поглощающего аппарата [3]. Для нормальной работы в реальных условиях эксплуатации поглощающие аппараты как основной элемент снижения продольной нагруженности вагонов должны обладать достаточными надежностью и прочностью, большей энергоемкостью, необходимой поглощающей способностью и оптимальной формой силовой характеристики [4].

По эксплуатационным техническим показателям поглощающие аппараты разделяются на классы в соответствии с ГОСТ 32913. Наиболее распространенными являются поглощающие аппараты класса Т1, предназначенные для ваго-

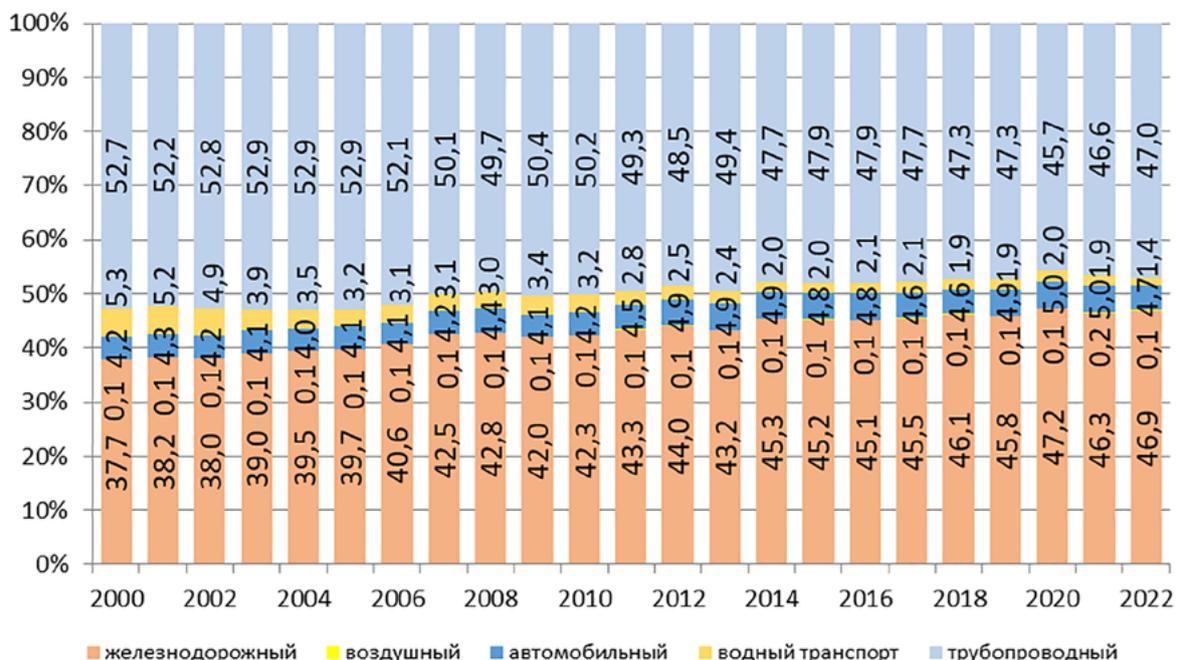


Рис. 1. Структура грузооборота по видам транспорта по Российской Федерации



Рис. 2. Модели фрикционно-полимерных поглощающих аппаратов:
a — поглощающий аппарат ПМКП-110; *б* — поглощающий аппарат РТ-120

нов, перевозящих все виды грузов (кроме опасных грузов), а также маневровых локомотивов массой до 100 т включительно [5, 6]. Большинство моделей этого класса по принципу действия относятся к фрикционно-полимерным аппаратам, где в качестве основного компонента, поглощающего энергию, используется фрикционный узел, а блок полимерных элементов играет роль подпорно-возвратного устройства, удерживающего фрикционный узел в рабочем положении и возвращающего его в исходное состояние после нагрузки [7]. Примеры моделей фрикционно-полимерных поглощающих аппаратов представлены на рис. 2.

Роль полимерного комплекта в поглощающих аппаратах, несомненно, велика. Помимо указанных функций, он также поглощает часть введенной энергии, а его конструкция из последовательно установленных полимерных элементов за счет снижения начальной затяжки позволяет продолжить работу поглощающего аппарата в случае поломки одного из этих элементов, что повышает сохранность подвижного состава и перевозимых грузов в аварийных ситуациях. Таким образом, улучшение характеристик полимерного ком-

плекта может существенно сказаться на характеристиках поглощающего аппарата в целом и, как следствие, на сохранности подвижного состава и перевозимых грузов [8, 9].

Но проектирование новых полимерных элементов имеет свои проблемы. Из-за дороговизны материала, существенного времени изготовления, технологических трудностей при производстве проведение широких экспериментальных исследований может потребовать существенных ресурсов. Самым простым выходом из этой ситуации является использование компьютерного моделирования, основанного на методе конечных элементов (МКЭ). При расчете подобных объектов надо понимать, что придется иметь дело с расчетом высоконелинейной задачи, и выбор программного пакета для реализации подобных решений должен это учитывать [10].

Для расчетов конструкций, содержащих элементы из гиперупругих материалов, какими полимеры и являются, крайне важно знать свойства этих материалов, полученные экспериментальным путем. По результатам эксперимента опытных образцов получают математическую модель материала. В дальнейшем эту модель применяют

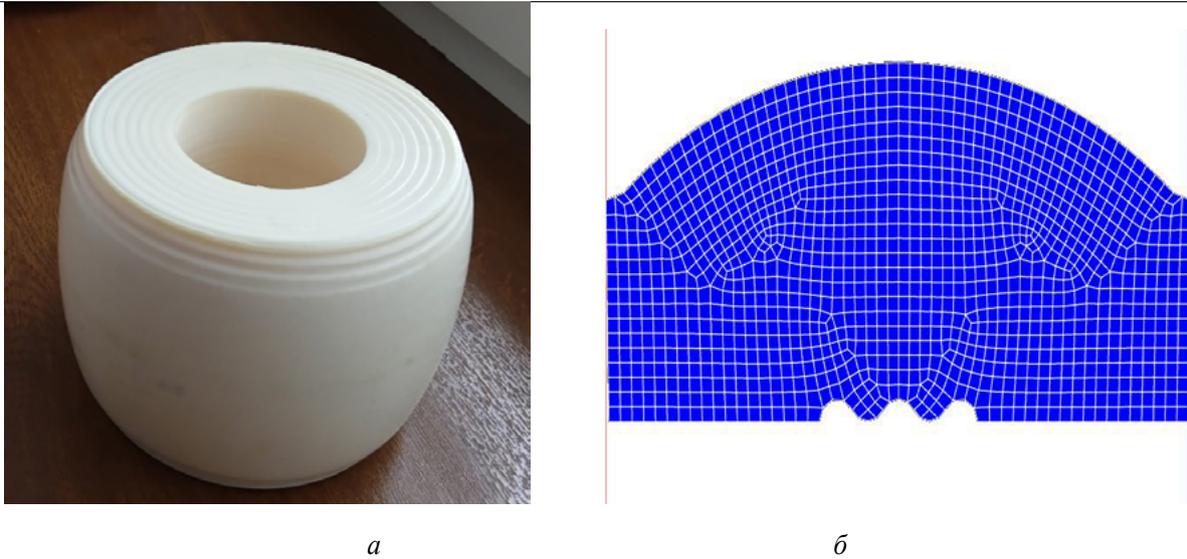


Рис. 3. Опорный полимерный элемент поглощающего аппарата ПМКП-110:
a — фотография опорного элемента;
б — конечно-элементная модель в осесимметричной постановке

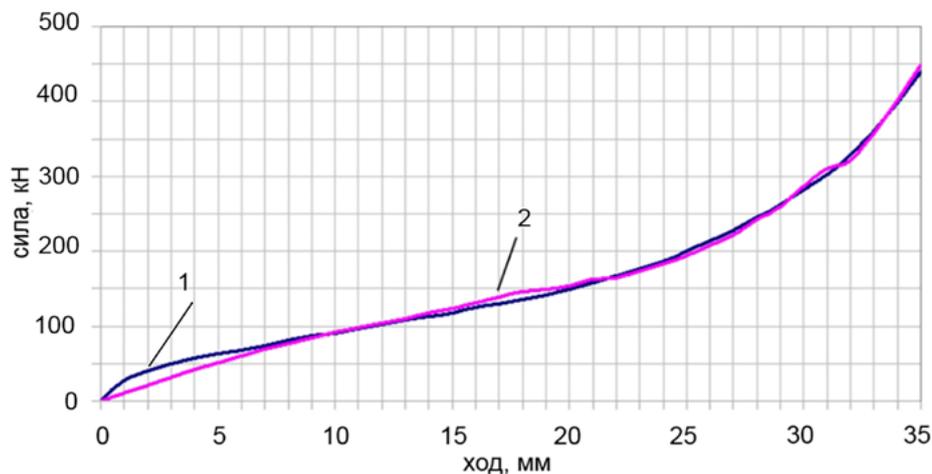


Рис. 4. Экспериментальная (график 1) и расчетная (график 2) силовые характеристики опорного элемента поглощающего аппарата ПМКП-110

к реальному объекту и сверяют с экспериментальными данными уже самого объекта, проверяя тем самым ее адекватность. В нашем случае объектом, на котором проверялась адекватность созданной математической модели материала, выступил полимерный элемент поглощающего аппарата ПМКП-110 (рис. 3).

Силовые характеристики экспериментального образца и конечно-элементной модели полимерного элемента показаны на рис. 4.

Силовые характеристики реального и смоделированного полимерного элемента практически совпали: погрешность составила 3,2 % по полноте, 1,2 % по энергоемкости.

Следующим шагом был непосредственно поиск более эффективной геометрии полимерного элемента, где в качестве критерия эффективности было выбрано значение энергоемкости и полноты силовой характеристики при максимальном значении сжимающей силы около 400 кН —

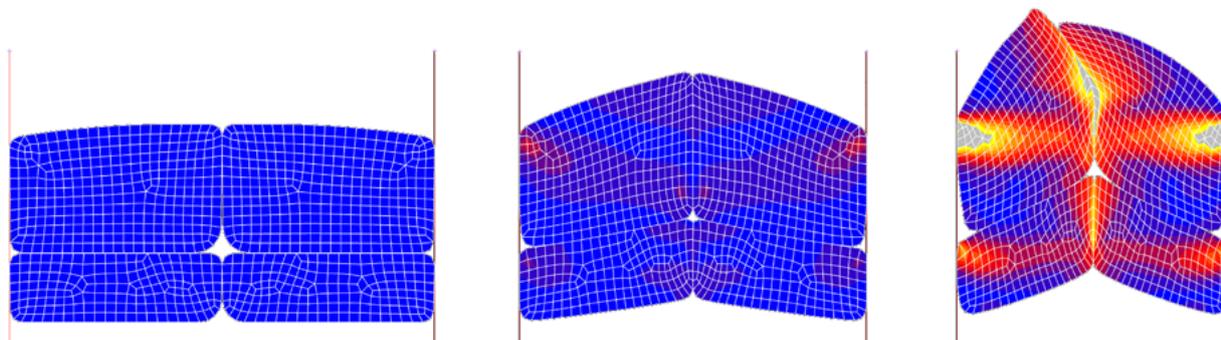


Рис. 5. Деформация элемента из четырех составных цилиндров

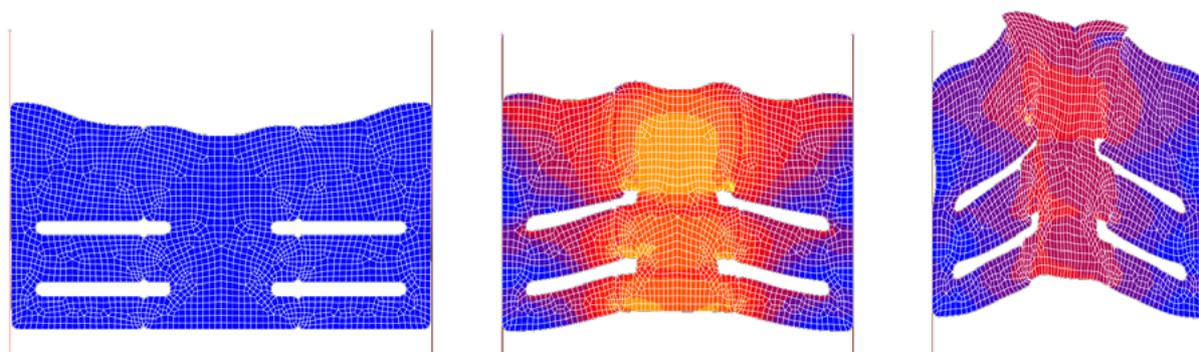


Рис. 6. Деформация трехсоставного полимерного элемента

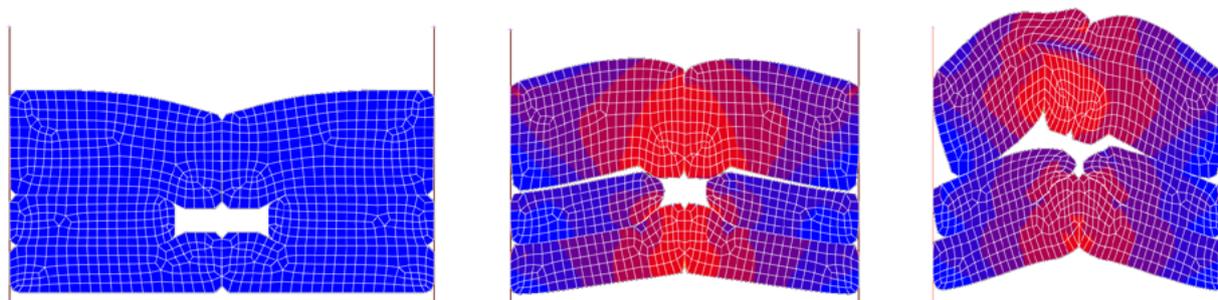


Рис. 7. Деформация элемента с выходящими из зацепления средними кольцами

чем выше энергоемкость и полнота характеристики, тем лучшей она считается.

Хорошие результаты показала идея уменьшения силы сопротивления сжатию вследствие потери устойчивости частей элемента. Примеры расчета элементов, реализующих данную идею, приведены на рис. 5–7.

Для увеличения полноты силовой характеристики был проведен ряд расчетов, где параметры силовой характеристики улучшались за счет при-

менения «пар устойчивости» — конструктивных частей элемента, находящихся во взаимном распоре и способных к прогнозируемой потере устойчивости. При малых перемещениях они, благодаря своему количеству, создают достаточную силу реакции на сжатие, при последующей же потере устойчивости «смягчают» силовую характеристику. Пример подобной конструкции приведен на рис. 8, где в одном элементе реализовано три «пары устойчивости».

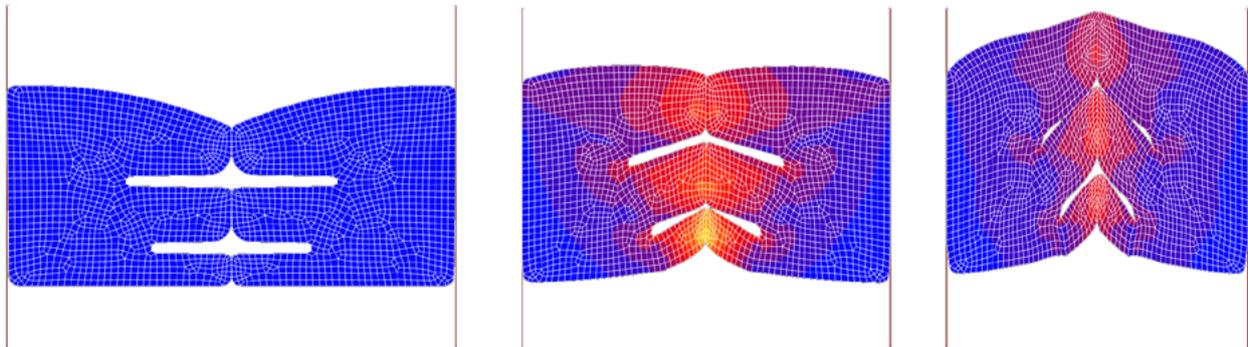


Рис. 8. Деформация элемента с тремя парами устойчивости

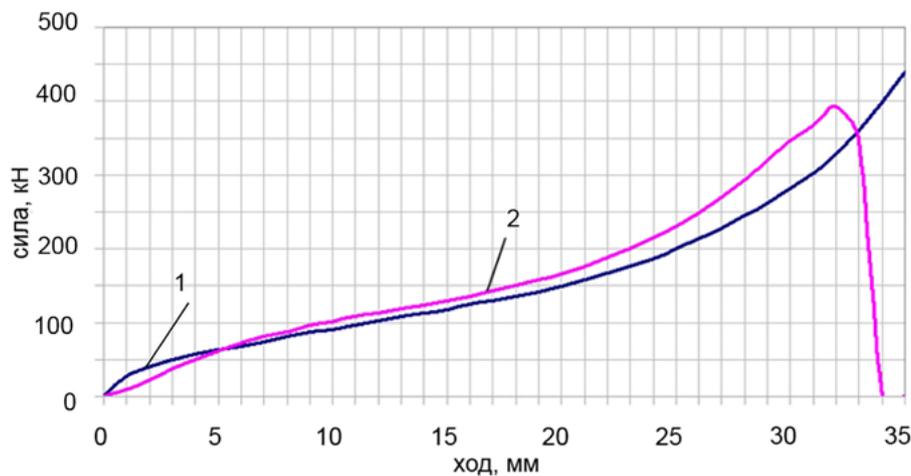


Рис. 9. Силовые характеристики элементов:
 график 1 — экспериментальная, опорного элемента аппарата ПМКП-110;
 график 2 — расчетная, элемента с тремя парами устойчивости

Расчет показал, что элемент «разрушается» в основании ближней к оси симметрии пары устойчивости, достигнув величины хода лишь 33 мм из 35 возможных (рис. 9).

Тем не менее внешняя часть элемента претерпела наименьшее искажение формы в нагруженном состоянии, а увеличение внешнего диаметра при достаточной силе сопротивления сжатию было наименьшим из всех рассмотренных моделей. По всей видимости, это связано с уменьшением внешнего диаметра составного элемента от крайних плоскостей к средней. Кроме того, проблему с концентрацией напряжений из-за малого расстояния между выступами несложно решить, заменив два

средних выступа вложенной парой устойчивости, выполненной в виде отдельных частей. Пример такого элемента представлен на рис. 10.

Полученный элемент состоит из двух пар концентрических осесимметричных объектов, в каждую из которых входит так называемое большое и малое кольцо. Наибольший внешний диаметр большого кольца составляет 160 мм, высота — 50 мм. Малое кольцо вкладывается в большое, образуя половину составного элемента. При смыкании двух половин большие кольца образуют две пары устойчивости — наружную и внутреннюю, третья вложенная пара устойчивости образуется малыми кольцами.

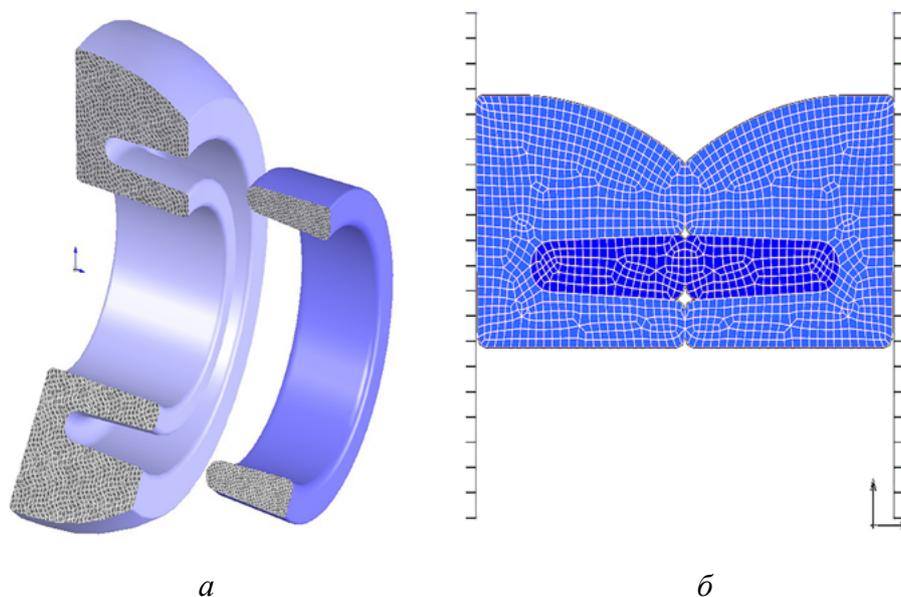


Рис. 10. Модель опорного полимерного элемента с вложенным кольцом:
a — геометрическая модель;
б — конечно-элементная модель в осесимметричной постановке

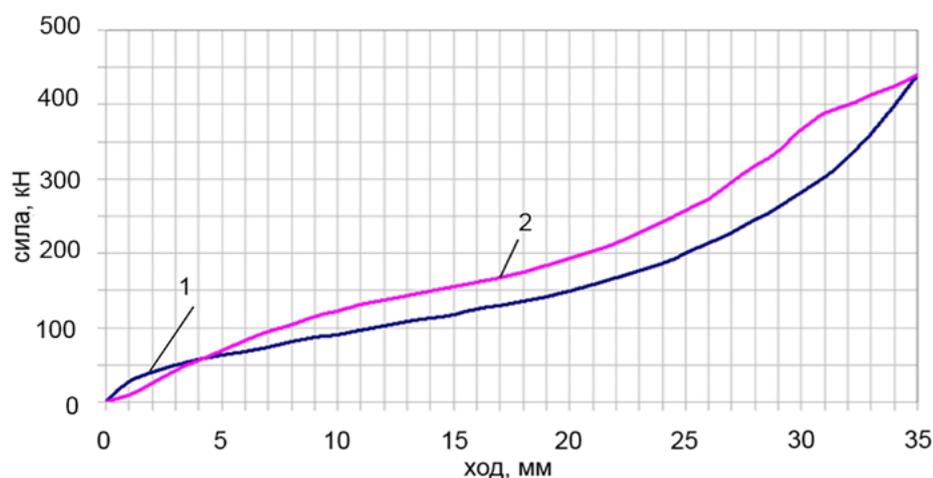


Рис. 11. Силовые характеристики элементов:
 график 1 — экспериментальная, опорного элемента аппарата ПМКП-110;
 график 2 — расчетная, элемента с вложенными кольцами

Силовая характеристика элемента с вложенными кольцами представлена на рис. 11, параметры силовой характеристики — в таблице.

Полученные результаты показывают значительное преимущество расчетной силовой характеристики элемента с вложенными кольцами над экспериментальной характеристикой элемента, с которым производится сравнение.

Параметры расчетных силовых характеристик

Вид силовой характеристики	Коэффициент полноты	Энергоемкость, кДж	Макс. сила, кН
Экспериментальная (элемент ПМКП-110)	0,363	5,59	431,6
Расчетная (элемент со вложенными кольцами)	0,448	6,89	430,7
Расхождение	23,6 %	23,4 %	-0,2 %

По наиболее значимому параметру — энергоёмкости — достигнут прирост в 23,4 %, полнота характеристики увеличилась на 23,6 %, при этом максимальное усилие осталось практически на прежнем уровне, снизившись на 0,2 %.

Разумеется, ни полученная расчетная силовая характеристика, ни положительная оценка принципиальной работоспособности созданного элемента не дают оснований для каких-либо выводов о перспективности выбранного технического решения. Точный ответ на этот вопрос может быть получен только в результате экспериментальных исследований, в ходе которых наверняка претерпят изменение и расчетная модель, и наши представления о характеристиках используемого полимерного материала.

Тем не менее результаты проведенного исследования дают основания полагать целесообразными дальнейшие усилия по разработке и изучению свойств составных полимерных элементов.

Библиографический список

1. Федеральная служба государственной статистики: Транспорт. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 26.07.2022).

2. Болдырев А. П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава / А. П. Болдырев, П. Д. Жиров. — Курск: Университетская книга, 2021. — 230 с.

3. Кеглин Б. Г. Грузовым вагонам — современные поглощающие аппараты / Б. Г. Кеглин, А. П. Болдырев, А. С. Васильев и др. // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2014. — № 4(40). — С. 20–21.

4. Болдырев А. П. Основные тенденции разработки и внедрения новых конструкций поглощающих аппаратов автосцепки грузовых вагонов / А. П. Болдырев, Д. А. Ступин, А. М. Гуров // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — Т. 15. — № 1. — С. 30–35.

5. ГОСТ 32913—2014. Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки. Введ. 01.06.2015. Госстандарт России: ФГУП «Стандартинформ», 2015. — 12 с.

6. Болдырев А. П. Теоретические и экспериментальные исследования полимерных элементов амортизаторов удара автосцепки / А. П. Болдырев, В. В. Говоров // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2011. — № 2(30). — С. 42–46.

7. Болдырев А. П. Разработка и исследование фрикционно-полимерного поглощающего аппарата ПМКП-110 класса Т1 / А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин, А. В. Иванов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2005. — № 4. — С. 8.

8. 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.

9. Кеглин Б. Г. Улучшение конструкции поглощающих аппаратов / Б. Г. Кеглин, Л. Н. Никольский, А. Г. Стриженок // Железнодорожный транспорт. — 1980. — № 6. — С. 23–26.

10. Жилкин В. А. Моделирование и статический расчет элементов конструкций в MSC PATRAN-NASTRAN-MARC: учебное пособие / В. А. Жилкин. — СПб.: Проспект Науки, 2016. — 240 с. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/80063.html> (дата обращения: 04.08.2022).

Дата поступления: 24.10.2022

Решение о публикации: 06.02.2023

Контактная информация:

КРАВЦОВ Сергей Андреевич — ассистент;
kravtsovs_bryansk@mail.ru

БОЛДЫРЕВ Алексей Петрович — д-р техн. наук,
профессор; apb.tubryansk@gmail.com

ЛОЗБИНЕВ Федор Юрьевич — д-р техн. наук,
профессор; flozbinev@yandex.ru

Computational and Experimental Evaluation of the Characteristics of Polymer Elements

S. A. Kravtsov, A. P. Boldyrev, F. Yu. Lozbinev

Bryansk State Technical University, 7, boulevard 50 let Oktyabrya, Bryansk, 241035, Russian Federation

For citation: Kravtsov S. A., Boldyrev A. P., Lozbinev F. Yu. Computational and Experimental Evaluation of the Characteristics of Polymer Elements // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 7–16. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-7-16

Summary

Purpose: To study the job of polymer elements of coupler draft gear. To develop the models of polymer elements of draft gear retaining set given the use in a polymer element of parts that lose stability during an operation. To obtain force characteristics of the developed models of polymer elements with the help of computer simulation. To compare the parameters of obtained force characteristics with the experimental data of non-modernized polymer element. As an object of research, to use supporting polymer element of draft gear PMKP-110.

Methods: Computer modeling based on finite element method (FEM) was used to determine optimal variant of polymer element geometry. Since polymer elements' job involves significant deformation of the elements themselves, the simulation was carried out in software package, which specializes in solving highly nonlinear problems. To compare the effectiveness of the developed models, the polymer element experimental study was carried out. **Results:** The necessity to study and modernize polymeric suites of automatic coupler draft gears is shown. One of the directions for polymer elements modernization is considered and several variants for polymer element models designed within the studied trends are presented. The most promising variants from possible models was chosen. Further research recommendations are given. **Practical significance:** The considered approach in polymer element study and modernization makes it possible to obtain a polymer suite with force characteristic improved parameters — an energy intensity and completeness coefficients. Such polymer suites installed into draft gears can increase their reliability, increase the efficiency that in a whole can affect the safety of cars and goods they carry.

Keywords: Polymer element, automatic coupler draft gear, finite element method, force characteristic, completeness coefficient, energy intensity, hyper-elastic material.

References

1. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki: Transport* [Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (accessed: July 26, 2022). (In Russian)
2. Boldyrev A. P., Zhiron P. D. *Raschet i proektirovanie amortizatorov udara podvizhnogo sostava* [Calculation and design of rolling stock shock absorbers]. Kursk: Universitetskaya kniga Publ., 2021, 230 p. (In Russian)
3. Keglin B. G., Boldyrev A. P., Vasil'ev A. S. et al. *Gruzovym vagonam — sovremennye pogloshchayushchie apparaty* [Modern draft gears for freight cars]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Wagons and wagon economy]. 2014, Iss. 4(40), pp. 20–21. (In Russian)
4. Boldyrev A. P., Stupin D. A., Gurov A. M. *Osnovnye tendentsii razrabotki i vnedreniya novykh konstruktivnykh pogloshchayushchikh apparatov avtostseпки грузовых вагонов* [Main trends in the development and implementation of new designs of draft gears for automatic couplers of freight cars]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2018, vol. 15, Iss. 1, pp. 30–35. (In Russian)
5. GOST 32913—2014 *Apparaty pogloshchayushchie stseпnykh i avtostseпnykh ustroystv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tekhnicheskie trebovaniya i pravila priemki. Vved. 01.06.2015* [GOST 32913—2014 Apparatus absorbing couplers and automatic couplers of railway rolling stock. Technical requirements and acceptance rules].

Gosstandart Rossii: FGUP “Standartinform”, 2015, 12 p. (In Russian)

6. Boldyrev A. P., Govorov V. V. Teoreticheskie i eksperimental’nye issledovaniya polimernykh elementov amortizatorov udara avtostseпки [Theoretical and experimental studies of polymeric elements of automatic coupler shock absorbers]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University]. 2011, Iss. 2(30), pp. 42–46. (In Russian)

7. Boldyrev A. P., Keglina B. G., Ivanov A. V. Razrabotka i issledovanie friktsionno-polimernogo pogloshchayushchego apparata PMKP-110 klassa T1 [Development and research of the friction-polymer draft gear PMKP-110 class T1]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel’skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport]. 2005, Iss. 4, pp. 8. (In Russian)

8. Boldyrev A. P., Keglina B. G. Razrabotka i vnedrenie perspektivnykh pogloshchayushchikh apparatov avtostseпки dlya gruzovykh vagonov [Development and implementation of advanced draft gears for automatic couplers for freight cars]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering]. 2005, Iss. 12, pp. 20–24. (In Russian)

9. Keglina B. G., Nikol’skiy L. N., Strizhenok A. G. Uluchshenie konstruksii pogloshchayushchikh apparatov [Improving the design of draft gears]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1980, Iss. 6, pp. 23–26. (In Russian)

10. Zhilkin V. A. *Modelirovanie i staticheskiy raschet elementov konstruksiy v MSC PATRAN-NASTRAN-MARC: uchebnoe posobie* [Modeling and static analysis of structural elements in MSC PATRAN-NASTRAN-MARC: tutorial]. St. Petersburg: Prospekt Nauki Publ., 2016, 240 p. Available at: <https://www.iprbookshop.ru/80063.html> (accessed: August 04, 2022). (In Russian)

Received: October 24, 2022

Accepted: February 06, 2023

Author’s information:

Sergey A. KRAVTSOV — Assistant;
kravtsovs_bryansk@mail.ru

Aleksey P. BOLDYREV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; apb.tubryansk@gmail.com

Fedor Yu. LOZBINEV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; flozbinev@yandex.ru