

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.015

doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-27-33

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОВРЕМЕННЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Алексей Петрович Болдырев<sup>1</sup>, Павел Дмитриевич Жиров<sup>2✉</sup>, Анжела Алексеевна Лагутина<sup>3</sup>, Сергей Андреевич Кравцов<sup>4</sup>, Николай Александрович Лукашов<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> apb.tubryansk@gmail.com

<sup>2</sup> zhirov.bstu@ya.ru

<sup>3</sup> milakova28@rambler.ru

<sup>3</sup> kravtsovs\_bryansk@mail.ru

<sup>4</sup> lukashov32@gmail.com

### Аннотация

Выполнен анализ существующих серийно выпускаемых поглощающих аппаратов подвижного состава железных дорог мира. Установлено, что все существующие фрикционные поглощающие аппараты можно разделить по типу корпуса и подпорно-возвратного устройства. В работе приводится математическая модель фрикционных поглощающих аппаратов шестигранного и пластинчатого типа. Дано отличие математических моделей друг от друга. Проанализированы существующие серийно выпускаемые эластомерные поглощающие аппараты. Установлено, что все эластомерные поглоща-

ющие аппараты можно разделить на два типа: с тремя камерами (расширения, сжатия и постоянного объема) и двумя камерами (расширения и сжатия). В работе приводятся подробные описания математических моделей эластомерных поглощающих аппаратов без привязки к конкретным моделям. Показано отличие математических моделей эластомерных поглощающих аппаратов с тремя и двумя камерами.

**Ключевые слова:** поглощающий аппарат, математическая модель, классификация, груз, поезд.

Ссылка для цитирования:

Болдырев А.П. Математические модели современных поглощающих подвижного состава железных дорог / А.П. Болдырев, П.Д. Жиров, А.А. Лагутина, С.А. Кравцов, Н.А. Лукашов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 3. – С. 27-33. doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-27-33.

Original article

Open Access Article

## MATHEMATICAL MODELS OF MODERN SHOCKABSORBING DEVICES OF RAILWAY ROLLING STOCKS

Aleksey Petrovich Boldyrev<sup>1</sup>, Pavel Dmitrievich Zhirov<sup>2✉</sup>, Angela Alekseevna Lagutina<sup>3</sup>, Sergey Andreevich Kravtsov<sup>4</sup>, Nikolay Aleksandrovich Lukashov<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> apb.tubryansk@gmail.com

<sup>2</sup> zhirov.bstu@ya.ru

<sup>3</sup> milakova28@rambler.ru

<sup>3</sup> kravtsovs\_bryansk@mail.ru

<sup>4</sup> lukashov32@gmail.com

### Abstract

The analysis of existing mass-produced absorbing devices of the world railway rolling stocks is carried out. It is found out that all existing friction absorbing devices can be divided according to the case type

and the supporting and return device. The paper presents a mathematical model of friction absorbing devices of hexagonal and plate type. The difference of mathematical models from each other is given. The

existing mass-produced elastomeric absorbing devices are analyzed. It is found out that all elastomeric absorbing devices can be divided into two types: with three chambers (expansion, compression and constant volume) and two chambers (expansion and compression). The paper provides detailed descriptions of mathemati-

cal models of elastomeric absorbing devices without reference to specific models. The difference between mathematical models of elastomeric absorbing devices with three and two chambers is shown.

**Keywords:** absorbing device, mathematical model, classification, cargo, trains.

*Reference for citing:*

*Boldyrev AP, Zhiron PD, Lagutina AA, Kravtsov SA, Lukashov NA. Mathematical models of modern shock absorbing devices of railway rolling stocks. Transport Engineering. 2025;3:27-33. doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-27-33.*

## Введение

Стремление увеличения пропускной способности грузового железнодорожного сообщения было главной целью железной дороги с момента ее возникновения. Поскольку спрос на транспортировку груза по железной дороге постоянно рос, железным дорогам пришлось совершенствоваться для увеличения пропускной способности, которая была достигнута при увеличении полезной нагрузки поезда (увеличения длины состава, увеличения полезной нагрузки вагона, улучшения навыков машиниста), сокращении времени цикла (увеличения скорости поездов, увеличения скорости погрузочно-разгрузочных работ), увеличении количества поездов на железнодорожной сети.

Управление очень длинными и тяжелыми поездами требуют опыта машиниста, особенно на сложных участках пути, значительно сократив время цикла. Управление поездом – это уникальный набор навыков, оказывающий прямое влияние на эксплуатационные расходы, техническое обслуживание и срок службы железной дороги. Достижение оптимального управления возможно при использовании беспилотных технологий управления подвижным составом железных дорог.

Увеличение полезной нагрузки поезда требует усовершенствования систем соединения единиц подвижного состава. Системы соединения являются ключевыми для длинных и тяжелых поездов, поскольку они обеспечивают как соединение подвижного состава, так и демпфирование во время его движения и формирования.

Системы соединения подвижного состава позволяют формировать его из отдельных компонентов (вагонов, локомотивов). Эти соединительные системы состоят из нескольких компонентов, и узел назы-

вают сцепным устройством, который позволяет буксировать и тормозить. Основными функциями сцепного устройства являются:

- обеспечение быстрого и безопасного сцепления/расцепления подвижного состава;

- передача тягового и тормозного усилий вдоль поезда;

- поглощения энергии соударений при операциях на сортировочных горках, переходных режимах движения поезда и аварийных ситуациях;

- предусматривать затяжку сцепки, чтобы гарантировать, что локомотивам не придется преодолевать статическое сопротивление качению всего поезда при трогании.

- допускать разъединение поезда из-за отказа одного из его компонентов, для уменьшения повреждений подвижного состава во время превышения сил нормативных значений или схода с рельсов.

Соединения подвижного состава в начале 1800-х гг. состояли из простых буферов и цепных муфт, которые имели ограниченную пропускную способность, были небезопасны и имели значительный люфт. С тех пор сцепные устройства претерпели значительные изменения, при этом функции соединения и продольного демпфирования выполняются отдельными компонентами сцепного устройства. Соединения обеспечиваются различными формами муфт, демпфирование обеспечивается поглощающими аппаратами и буферами. За последнее время было разработано множество конструкций поглощающих аппаратов для различных условий применения. Кроме того, существующие аппараты постоянно совершенствуются и оптимизируются.

Для достижения поставленной цели будет проведен обзор различных поглощающих аппаратов, применяемых в существующих современных грузовых поездах;

рассмотрены особенности и характеристики каждого типа поглощающих аппаратов; приведены особенности моделирования поглощающих аппаратов.

### Обзор существующих поглощающих аппаратов

Возможно, наиболее важным компонентом соединения вагонов является поглощающий аппарат (или буфер), который обеспечивает необходимую жесткость соединения и демпфирование. Демпфирование обеспечивается либо сухим трением, полимерным гистерезисом или вязким трением. Жесткость обеспечивается стальными пружинами или полимерными пружинами, а также жесткостью жидких полимеров в гидравлических системах. Особенностью работы поглощающих аппаратов всех существующих сцепных устройств является то, что и при действии тяговых усилий и при действии тормозных усилий аппарат работает только на сжатие.

Исходя из приведенных выше видов демпфирования поглощающие аппараты разделяют на фрикционные и эластомерные.

Среди фрикционных поглощающих аппаратов распространёнными являются следующие типы [1]:

- поглощающие аппараты с шестигранным сечением корпуса с тремя фрикционными клиньями, как показано на рис. 1а.

- пластинчатые поглощающие аппараты с прямоугольным сечением корпуса с, как минимум, двумя фрикционными клиньями, как показано на рис. 1б.

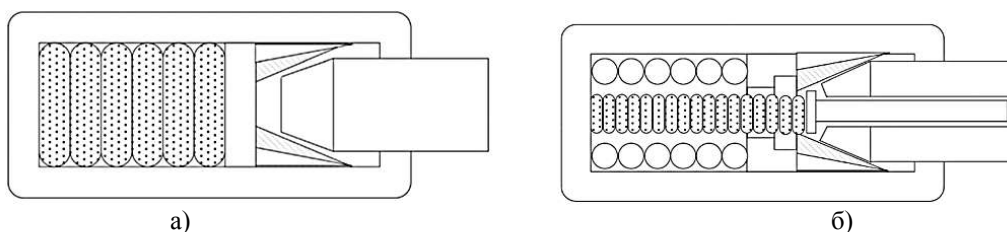


Рис. 1. Схемы шестигранного (а) и пластинчатого (б) поглощающих аппаратов  
Fig. 1. Schemes of hexagonal (a) and plate (b) draft gears

Фрикционное трение обеспечивает большие демпфирующие силы при различных скоростях нагрузки. Важным во фрикционных поглощающих аппаратах является подпорно-возвратное устройство (пружина). В существующих серийно выпускаемых поглощающих аппаратах выделяют пружины трех типов (табл. 1):

- стальная пружина, аналогичная *Wabtec Mark 50* и *Miner Crown SE*;
- прямоугольная полимерная пружина, аналогичная *Miner SL-76* и *PT-130*;
- круглая полимерная пружина, аналогичная *Amsted Rail Endurance 325*, *ПМКП-110* и *PT-120*.

#### Серийно выпускаемые фрикционные поглощающие аппараты

Таблица 1

Table 1

#### *Serially produced friction draft gears*

Модель поглощающего аппарата	Тип корпуса	Тип подпорно-возвратного устройства
ПМКП-110	прямоугольный	полимерная пружина
PT-120	шестиугольный	полимерная пружина
Amsted Rail Endurance 325	шестиугольный	полимерная пружина
Cardwell Westinghouse Mark 325, 50, 70E, 558, 75G и 90AT	прямоугольный	стальная пружина
Cardwell Westinghouse R500	прямоугольный	стальная пружина
Miner Crown SE, TG, SG	прямоугольный	стальная пружина
Miner RF-444, TF-880	шестиугольный	полимерная пружина
Miner SL-76	шестиугольный	полимерная пружина
Sigra PowrGuard GX, XE	прямоугольный	стальная пружина
PT-130	шестиугольный	полимерная пружина

Стальные пружины характеризуются линейной жесткостью до тех пор, пока не достигается смыкание витков. Характеристики стальных пружин не зависят от скорости нагружения. Стальных пружин может быть несколько, и они могут включаться в работу при различном ходе поглощающего аппарата. Демпфирующие свойства стальных пружин практически отсутствуют.

Полимерные пружины имеют нелинейную силовую характеристику, которая зависит от температуры и скорости нагружения. Полимерные пружины обеспечивают дополнительное демпфирование.

Перечень поглощающих аппаратов, которые используются в настоящее время в существующих автосцепных устройствах мира, приведен в табл. 1.

Фрикционные поглощающие аппараты разработаны и производятся компаниями *Amsted*, *Bradken*, *Cardell Westinghouse*, *Miner* и *Sigra*. В РФ поглощающие аппараты РТ-120 и РТ-130 разработаны и производятся компанией АО «ВагонМаш», поглощающий аппарат ПМКП-110 разработан учеными БГТУ (БИТМ) Б.Г. Кеглиным и А.П. Болдыревым и производится рядом компаний как на территории РФ, так и в некоторых странах СНГ [2].

### Математическая модель фрикционных поглощающих аппаратов

Наиболее подробно математическую модель фрикционных поглощающих аппаратов описали ученые БГТУ (БИТМ) Л.Н. Никольский и Б.Г. Кеглин. Дальнейшее усовершенствование модели также

было проведено их учениками в рамках созданной ими научной школы [3].

Фрикционные поглощающие описываются следующей математической зависимостью

$$P(x, v) = \begin{cases} \psi_1(v)i_1F(x, v) & \text{при } x < a, v > 0; \\ \psi_2(v)i_1F(x, v) & \text{при } x \geq a, v > 0; \\ c(x - x_{max}) + \psi_2(v)i_1F(x, v) & \text{при } x \geq x_{max}, v > 0; \\ \psi_{1p}(v)i_1F(x, v) & \text{при } x_{max2} - a < x < x_{max2}, v < 0; \\ \psi_{2p}(v)i_1F(x, v) & \text{при } x \leq x_{max2} - a, v < 0; \\ c(x - x_{max}) + \psi_{2p}(v)i_1F(x, v) & \text{при } x \geq x_{max}, v < 0, \end{cases}$$

где  $\psi_j$  – коэффициенты передачи;  $F(x, v)$  – характеристика подпорной части аппарата, остальные параметры являются геометри-

ческими параметрами конкретных моделей поглощающих аппаратов.

Коэффициенты передачи вычислялись по формулам:

$$\psi_1(v) = \frac{\sin(\Theta)(1 + \tan(\gamma) \tan(\beta + \rho_3)) + (\tan(\beta + \rho_3) - \tan(\gamma))f_4 e^{-b \cdot v}}{\sin(\Theta)(1 - \tan(\gamma) \tan(\alpha + \rho_2)) + (\tan(\alpha + \rho_2) + \tan(\gamma))f_4 e^{-b \cdot v}}$$

$$\psi_{1p}(v) = \frac{1 + \tan(\gamma - \rho_1) \tan(\beta - \rho_3)}{1 - \tan(\gamma - \rho_1) \tan(\alpha - \rho_2)}$$

$$\psi_2(v) = \psi_1(v) + (\psi_1(v) - 1) \frac{2(1 - \tan(\gamma)f_0 e^{-b \cdot v})f_0 e^{-b \cdot v}}{\tan(\gamma) + f_0 e^{-b \cdot v}}$$

$$\psi_{2p}(v) = \frac{\psi_{1p}(v)}{1 + (f_0 + f_0)(\psi_{1p}(v) - 1) \cot(\gamma - \rho_1)}$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  – характерные углы аппарата.

Силовая характеристика подпорно-возвратного устройства  $F(x, v)$  описывается либо линейной зависимостью, независящей от скорости для стальных пружин, ли-

бо нелинейной зависимостью, зависящей от скорости для полимерных пружин.

Угол  $\Theta$  для шестигранных поглощающих аппаратов составляет  $60^\circ$ , для пластинчатых –  $90^\circ$ . Обычно ход первой сту-

пени  $a$  у шестигранных поглощающих аппаратов отсутствует.

Среди эластомерных поглощающих аппаратов (табл. 2) распространёнными являются следующие типы:

– поглощающие аппараты с тремя рабочими камерами (расширения, сжатия и

камеры постоянного объема), как показано на рис. 2а;

– поглощающие аппараты с двумя рабочими камерами (расширения и сжатия), как показано на рис. 2б.

Таблица 2

Серийно выпускаемые эластомерные поглощающие аппараты

Table 2

*Serially produced elastomeric draft gears*

Модель поглощающего аппарата	Тип подпорно-возвратного устройства	Количество камер
Oleo Hydraulic	-	2
73ZW	полимерная пружина	3
АПЭ-90	-	2
АПЭ-95	полимерная пружина	2
73ZWy2	полимерная пружина	3
АПЭ-120-И	-	3

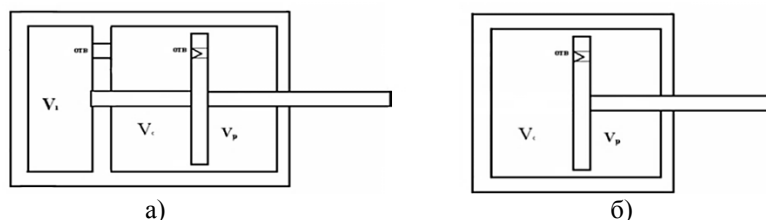


Рис. 2. Схемы трехкамерного (а) и двухкамерного (б) эластомерных поглощающих аппаратов  
Fig. 2. Schemes of three-chamber (a) and two-chamber (b) elastomeric draft gears

### Математическая модель эластомерных поглощающих аппаратов

Математическая модель эластомерных поглощающих аппаратов наиболее подробно описывается в работах ученых МИИТ [4] и БГТУ [5].

Силовая характеристика трехкамерных эластомерных поглощающих аппаратов имеет следующий вид

$$P_A = q_c S_c - q_p S_p + q_1 S_{ш2}$$

где  $S_c, S_p$  и  $S_1$  – площадь эффективного сечения камер сжатия, расширения и постоянного объема.

Давление в камерах расширения, сжатия и постоянного объема ( $q_c, q_p$  и  $q_1$ ) определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_c}{\partial t} &= \frac{E_0 + a q_c}{V_{c0} - x_a S_c} \left[ -K(q_c - q_p) - N_p(q_c - q_p) \frac{\pi r_p^4}{8 \rho \nu l} + \nu_a S_c \right] \\ \frac{\partial q_p}{\partial t} &= \frac{E_0 + a q_p}{V_{p0} - x_a S_p} \left[ K(q_c - q_p) + N_p(q_c - q_p) \frac{\pi r_p^4}{8 \rho \nu l} + \nu_a S_p \right] \\ \frac{dq_1}{dt} &= \frac{E_0 + a q_1}{V_{10} - x_p S_{ш2}} \left[ 6 \frac{q_c - q_1}{\rho g B_{CP2}} + \dot{x}_p S_{ш2} \right] \end{aligned}$$

где  $a$  – параметр, зависящий от типа эластомера;  $E_0$  – модуль упругости для эластомера; остальные параметры являются геометрическими параметрами конкретных моделей поглощающих аппаратов.

Математическая модель эластомерных поглощающих аппаратов с двумя камерами аналогична, за исключением отсутствия третьего слагаемого, связанного с камерой постоянного объема.

## Заклучение

Более длинные и тяжелые поезда являются основной целью многих железных дорог мира. При этом межвагонные устройства являются основным ключом к их созданию. Кроме этого, усовершенствование существующих межвагонных связей и их компонентов могут повысить безопасность и эффективность существующих поездов.

На основе материала статьи можно установить, что основным типом поглощающих аппаратов, существующим на железных дорогах мира, является фрикци-

онный, который обладает наименьшей стоимостью, но благодаря использованию современных материалов (полимерные пружины, фрикционные пары трения) эффективно защищающий подвижной состав и перевозимый груз.

Для вагонов, перевозящих грузы повышенной опасности и на локомотивах устанавливают эластомерные поглощающие аппараты, которые обладают более высокой энергоемкостью по сравнению с фрикционными поглощающими аппаратами.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wagner, S. A review on design and testing methodologies of modern freight train draft gear system / S. Wagner, C. Cole, M. Spiryagin // Railway Engineering Science. 2021. – DOI 10.1007/s40534-021-00237-y. – EDN AISSFI.
2. 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. – EDN HSYOFV.
3. Исторические аспекты создания и развития кафедры "Динамика и прочность машин" / А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин, Э. А. Фатьков, А. П. Шлюшников // Вестник Брянского государ-

- ственного технического университета. 2007. № 4(16). С. 4-9. – EDN KWBLEV.
4. Котуранов, В. А. Обоснование показателей, характеризующих новационность конструкций поглощающих аппаратов автосцепки в условиях маневровых соударений: специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Котуранов Василий Андреевич. Москва, 2014. 181 с. – EDN SVBZQX.
5. Грузовым вагонам - современные поглощающие аппараты / Б. Г. Кеглин, А. П. Болдырев, А. С. Васильев, А. М. Гуров // Вагоны и вагонное хозяйство. 2014. № 4(40). С. 20-21. – EDN SZRALN.

## REFERENCES

1. Wagner S, Cole C, Spiryagin M. A review on design and testing methodologies of modern freight train draft gear system Railway Engineering Science. 2021. DOI 10.1007/s40534-021-00237-y.
2. Boldyrev AP, Keglin BG, Ivanov AV. Development and research of ПМКП-110 class T1 friction and polymer absorbing device. Vestnik VNIIZHT. 2005;4:8.
3. Boldyrev AP, Keglin BG, Fatkov EA, Shlyushnikov AP. Historical aspects of founding

- and developing the Department of Dynamics and Strength of Machines. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2007;4(16):4-9.
4. Koturanov VA. Substantiation of indicators characterizing the innovative design of absorbing coupling devices in conditions of shunting collisions [dissertation]. [Moscow (RF)]; 2014.
5. Keglin BG, Boldyrev AP, Vasilyev AS, Gurov AM. Freight cars - modern absorbing devices. Vagoni I Vagonnoe Khozyistvo [Cars and Car Facilities]. 2014;4(40):20-21.

## Информация об авторах:

**Болдырев Алексей Петрович** – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. +8-910-331-20-00.

**Жиров Павел Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. +8-920-850-16-91.

**Лагутина Анжела Алексеевна** – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. +8-909-240-76-85.

**Кравцов Сергей Андреевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении»

**Boldyrev Aleksey Petrovich** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of High-Tech Transport Engineering, Bryansk State Technical University, phone: +8-910-331-20-00.

**Zhirov Pavel Dmitrievich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production and Service in Transport Engineering, Bryansk State Technical University, phone: +8-920-850-16-91.

**Lagutina Angela Alekseevna** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of High-

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. +8-920-833-07-73.

**Лукашов Николай Александрович** – аспирант кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. +8-999-705-98-05.

Tech Transport Engineering, Bryansk State Technical University, phone: +8-909-240-76-85.

**Kravtsov Sergey Andreevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production and Service in Transport Engineering, Bryansk State Technical University, phone: +8-920-833-07-73.

**Lukashov Nikolay Aleksandrovich** - Postgraduate student of the Department of High-Tech Transport Engineering, Bryansk State Technical University, phone: +8-999-705-98-05.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 07.02.2025; одобрена после рецензирования 05.03.2025; принята к публикации 06.03.2025. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 07.02.2025; approved after review on 05.03.2025; accepted for publication on 06.03.2025. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**