

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.46.016:625.1.032.8

А. Н. КОМАРОВА<sup>1\*</sup>, Ю. П. БОРОНЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Петербургский государственный университет путей сообщения, Московский проспект, 9, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел./факс 8 (812) 335 69 07 доб. 256, эл. почта An-komarova@mail.ru

<sup>2</sup> Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Петербургский государственный университет путей сообщения, Московский проспект, 9, Санкт-Петербург, Россия, 190031, эл. почта boron49@yandex.ru

## ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НЕТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Цель.** Одним из приоритетных направлений совершенствования перевозочного процесса железнодорожным транспортом является повышение его энергоэффективности. Предварительная количественная оценка величины сопротивления от сил крипа грузового вагона, определение влияния демпфирования на величину мощности силы сопротивления движению в резонансных режимах. **Методика.** Исследование проводилось методом математического моделирования в программном комплексе MEDYNA и аналитическим методом. **Результаты.** Энергозатраты на преодоление сопротивления от сил крипа составляют значительную часть в общих энергозатратах на преодоление сопротивления движению; в резонансных режимах происходит резкое увеличение потребляемой мощности, на её величину оказывает значительное влияние величина демпфирования. **Научная новизна.** Установлено, что энергозатраты на преодоление сопротивления от сил крипа составляют значительную часть в общих энергозатратах на преодоление сопротивления движению, особенно в резонансных режимах. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть применены для разработки математической модели вагона и методики оценки сопротивления движению, учитывающих сопротивление от сил крипа и диссипацию энергии в окружающую среду в подвешивании.

**Ключевые слова:** энергоэффективность; энергопотери; сопротивление движению; силы крипа; резонансная скорость

### Введение

Одним из приоритетных направлений совершенствования перевозочного процесса железнодорожным транспортом является повышение его энергоэффективности.

Под энергоэффективностью понимается результативность преобразования энергии в полезную работу, которая зависит от величины энергопотерь в системе. Оценка энергоэффективности вагонов заключается в определении величины потерь при его передвижении, т.е. определении его сопротивления движению.

### Цель

Сопротивление движению принято разделять на основное, всегда сопровождающее поезд (вагон) при движении и дополнительное сопротивление, возникающее при определенных условиях (при движении в кривых, на спусках, подъемах, при трогании с места). Основное сопротивление движению представляют в виде суммы шести его составляющих: трение в буксовых подшипниках, трение качения ко-

лес по рельсам, трение скольжения колес по рельсам, сопротивление от рассеяния энергии в пути и сопротивление от рассеяния энергии в окружающую среду и аэродинамическое сопротивление.

### Методы

Анализ структуры основного сопротивления четырехосных грузовых вагонов в ранее проведенных исследованиях П. Н. Астахова [1] позволяет выделить три самых значительных её компонента: сопротивление качению колес по рельсам, диссипация энергии в окружающую среду при колебаниях экипажа и аэродинамическое сопротивление. Среди этих трех составляющих наиболее актуальным является исследование первых двух вследствие того, что в сопротивлении качения силы крипа вызывают износ колес и рельсов, а диссипация энергии в окружающую среду происходит в основном в рессорном подвешивании тележек, параметры которого в значительной степени влияют на динамическое поведение вагона.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Оценку энергопотерь поезда от основного сопротивления проводят двумя типами методов: экспериментальными и теоретическими.

Экспериментальные методы имеют ряд существенных недостатков, таких как сложность, дороговизна и необходимость исключать из эксплуатации участки железной дороги, поэтому используются менее дорогостоящие методы математического моделирования, которые с достаточной точностью отражают процесс движения рельсового экипажа.

К теоретическим методам оценки потерь энергии при движении подвижного состава относятся методы, использующие математические модели движения поезда (математические модели энергопотребления). В таких программах определение сопротивления движению является частью системы для оценки энергозатрат на передвижение поезда.

Примером математической модели учитывающей влияние сопротивления движению на энергозатраты при передвижении поезда может служить модель, разработанная группой американских ученых [4]. Математическая модель основана на определении энергии, необходимой для преодоления сопротивления движению и включает в себя оценку сопротивления от уклонов, сопротивления в кривых, аэродинамического сопротивления.

К одному из исследований последних лет можно отнести математическую модель движения поезда, разработанную шведским ученым П. Лукашевичем [6]. Математическая модель позволяет оценить энергозатраты на передвижение поезда и включает в себя оценку сопротивления движению, силы торможения, силу тяги. Также модель учитывает основное сопротивление движению, сопротивления в кривых, сопротивление от уклонов и аэродинамическое сопротивление и влияние на них ветра, длины поезда, количества осей, осевых нагрузок, типа пути и сил крипа локомотива.

Существует еще одна современная программа для моделирования и расчета энергопотребления ARTEMIS [5]. Она учитывает следующие типы сопротивления: сопротивление качению, аэродинамическое сопротивление и сопротивление от уклонов. При этом программа позволяет учитывать влияние конфигурации

поезда, размера вагонов, их положение и осевую нагрузку.

Анализ математических моделей, используемых для оценки энергопотребления поезда, позволяет установить, что при оценке эффективности движения поезда учитываются лишь некоторые составляющие основного и дополнительного сопротивлений, но при этом не учитываются сопротивления от сил крипа и колебаний вагонов на рессорном подвешивании, оказывающие значительное влияние на динамическое поведение экипажа.

Одной из немногих математических программ, учитывающих все составляющих основного и дополнительного сопротивлений поезда, является программа «ВЭИП» («Взаимодействие пути и подвижного состава»). В программе реализованы новые теоретические методы определения составляющих основного и дополнительного сопротивлений, разработанные проф. А. Я. Коганом. По методу автора [3] мощность рассеяния энергии при боковых и вертикальных колебаниях экипажа определяется через функцию рассеяния в уравнениях Лагранжа II рода, описывающих эти колебания. При этом количественной зависимости рассеяния энергии при колебаниях от параметров подвешивания не проводится. Потери энергии связанные с силами крипа и износом колес учитываются без влияния на них условий движения и параметров подвешивания.

Таким образом, анализ современных теоретических методов оценки энергоэффективности подвижного состава позволяет сделать заключение, что вопрос влияния параметров рессорного подвешивания тележек вагонов и условий движения поезда на сопротивление движению не изучен и требует тщательного исследования. В связи с этим нами была поставлена задача разработки математической модели для определения количественной оценки сопротивления движению от сил крипа и потерь при колебаниях экипажа.

Для решения поставленной задачи были проведены предварительные исследования, имеющие два этапа. Первый этап был посвящен оценке величины сопротивления движению от сил крипа в зависимости от скорости движения вагона и его осевой нагрузки.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для этого в программном комплексе Medyna были разработаны нелинейные математические модели движения полувагона на тележках модели 18-100 с осевой нагрузкой 23,5 тс и на тележках 18-9855 с осевой нагрузкой 25 тс. Исследование проводилось для груженого режима на прямом участке пути.

Величина энергии, затрачиваемая на преодоление сопротивления вызываемого силами крипа, определялось через фактор износа, который оценивался на скоростях движения 40...100 км/ч с шагом в 20 км/ч.

Энергия, необходимая для преодоления сил крипа вагоном, определялась по формуле:

$$E = W_{av} \cdot L \cdot n \quad (1),$$

где  $W_{av}$  – средний фактор износа при передвижении на 1000 м;

$L$  – расстояние;

$n$  – количество колес вагона

Результаты исследования показывают, что затраты энергии на преодоление сопротивления сил крипа составляют значительную часть в общих энергозатратах на преодоление сопротивления движению. Максимальная величина энергии, необходимой для преодоления сил крипа составляет 54 % от энергии, необходимой для преодоления основного сопротивления движению со скоростью 40 км/ч вагона с осевой нагрузкой 25 т. Данные результаты требуют уточнения.

На втором этапе аналитическим методом исследовалось движение груженого вагона по непрерывной волнообразной неровности на простейшей модели, состоящей из обрессоренного груза с демпфером (рис. 1).

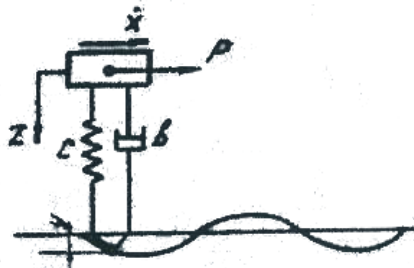


Рис. 1. Простейшая модель груженого вагона

Для оценки мощности силы тяги, необходимой для обеспечения движения вагона по неровностям, от величины коэффициента демпфирования использовалось уравнение баланса мощностей вида [2]:

$$N = \frac{1 \cdot b \cdot h^2 \cdot \omega^6 \cdot V^6}{8(k^2 - \omega^2 \cdot V^2)^2 + \frac{b^2 \cdot \omega^2 \cdot V^2}{m^2}} \quad (2)$$

где  $b$  – коэффициент демпфирования;  
 $h$  – амплитуда неровности рельса;  
 $\omega$  – частота вынужденных колебаний;  
 $k$  – частота свободных колебаний;  
 $V$  – скорость движения;  
 $m$  – масса обрессоренных частей.

Параметры вагона принимались следующими: коэффициент демпфирования варьировался в пределах  $0,1 \dots 0,5b_{кр}$ ; амплитуда неровности рельса принималась равной 10 мм; скорость движения варьировалась в пределах  $0 \dots 80$  м/с; масса обрессоренных частей принималась равной 80 т.

## Результаты

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и в табл. 1.

Таблица 1

Мощность силы тяги, кВт

| Коэффициент демпфирования, доля от $b_{кр}$ | Необходимая мощность на резонансной скорости, кВт | Средняя мощность, кВт |
|---|---|-----------------------|
| 0,1   | 19,2  | 3,4                   |
| 0,2   | 11,2  | 2,8                   |
| 0,3   | 7,7   | 2,4                   |
| 0,4   | 5,8   | 2,3                   |
| 0,5   | 4,8   | 2,3                   |

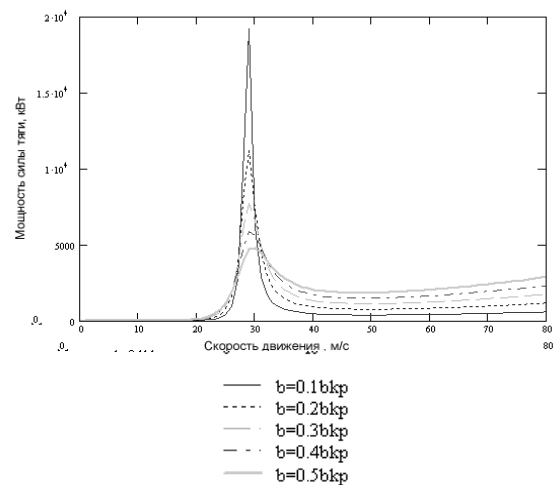


Рис. 2. Зависимость мощности силы тяги от скорости

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Выводы**

По результатам расчетов, установлено следующее:

1. При резонансах происходит резкое увеличение потребляемой мощности.
2. Изменение величины коэффициента демпфирования в установленном диапазоне оказывает значительное влияние на величину мощности силы тяги в резонансных режимах.

Анализ результатов предварительных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Затраты энергии на преодоление сопротивления от сил крипа являются существенными и требуют дальнейших исследований.
2. В резонансных режимах наблюдается существенное увеличение сопротивления при движении, которое может оказать влияние на движение поезда при ограниченной мощности двигателей локомотива.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Астахов, П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава : труды ЦНИИ МПС / П. Н. Астахов. – М. : Транспорт, 1966. – Вып. 311. – 178 с.
2. Вольфсон, С. А. Энергетический баланс при движении железнодорожного экипажа по пути с неровностями / С. А. Вольфсон, Ю. Г. Минкин // Динамика и меры повышения эксплуатационной надежности локомотивов в условиях железных дорог Урала и Сибири : сетевая науч.-техн. конф. / Омский ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Омск. : ОмИИТ, 1973. – С. 139–145.
3. Коган, А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1997. – 326 с.
4. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – М. : Издательство «Маршрут», 2005. – 448 с.
5. Лесничий, В. С. Компьютерное моделирование задач динамики железнодорожного подвижного состава. Ч. 3. Моделирование динамики грузовых вагонов в программном комплексе MEDYNA : учеб. пособие / В. С. Лесничий, А. М. Орлова. – СПб : ПГУПС, 2002. – 35 с.
6. Kraay, D. Optimal pacing of trains in freight / D. Kraay, P. T. Harker, B. Chen // Journal Operations Research. – 1991. – Vol 39. – №. 1. – P. 82–89.
7. Lindgreen, E. Driving resistance from railroad trains / E. Lindgreen, S. C. Sorenson. – Copenhagen : DTU, 2005. – 86 p.
8. Lukaszewicz, P. Energy consumption and running time for trains : doct. ... thesis / P. Lukaszewicz. – Stockholm : KTH, 2001. – 154 p.

А. Н. КОМАРОВА<sup>1\*</sup>, Ю. П. БОРОНЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагоны та вагонне господарство», Петербурзький державний університет шляхів сполучення, Московський проспект, 9, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. / факс 8 (812) 335 69 07 доб. 256, ел. пошта An-komarova@mail.ru

<sup>2</sup>Каф. «Вагоны та вагонне господарство», Петербурзький державний університет шляхів сполучення, Московський проспект, 9, Санкт-Петербург, Росія, 190031, ел. пошта boron49@yandex.ua

**ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НЕТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

**Мета.** Одним з пріоритетних напрямків вдосконалення перевізного процесу залізничним транспортом є підвищення його енергоефективності. Попередня кількісна оцінка величини опору від сил крипу вантажного вагона, визначення впливу демпфування на величину потужності сили опору руху в резонансних режимах.

**Методика.** Дослідження проводилося методом математичного моделювання в програмному комплексі MEDYNA і аналітичним методом. **Результати.** Енерговитрати на подолання опору від сил крипу складають значну частину в загальних енерговитратах на подолання опору руху; в резонансних режимах відбувається різке збільшення споживаної потужності, на її значення значно впливає величина демпфування. **Наукова новизна.** Встановлено, що енерговитрати на подолання опору від сил крипу складають значну частину в загальних енерговитратах на подолання опору руху, особливо в резонансних режимах. **Практична значущість.** Результати роботи можуть бути застосовані для розробки математичної моделі вагона і методики оцінки опору руху, що враховують опір від сил крипу і дисипацію енергії в навколишнє середовище в підвищенні.

*Ключові слова:* енергоефективність; енерговитрати; опір руху; сили крипу; резонансна швидкість

A. N. KOMAROVA<sup>1\*</sup>, Y. P. BORONENKO<sup>2</sup><sup>1\*</sup>Department of Railcars and Railcar's Maintenance, Saint-Petersburg State Railway Transport University, Moskovskyy Str. 9, Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel./fax 8 (812) 335 69 07 доб. 256, e-mail An-komarova@mail.ru<sup>2</sup>Department of Railcars and Railcar's Maintenance, Saint-Petersburg State Railway Transport University, Moskovskyy Str. 9, Saint-Petersburg, Russia, 190031, e-mail boron49@yandex.ru

## ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF NON-TRACTIVE ROLLING STOCK

**Purpose.** One of the priority areas for improving the transportation process by railway transport is to increase its energy efficiency. Preliminary quantitative assessment of the resistance of the creep forces wagon, determination of the influence of damping on the amount of power resistance force at the resonance modes. **Methodology.** The study was conducted using mathematical modeling software system MEDYNA and an analytical method. **Findings** Energy consumption for overcoming resistance from forces creeps up a significant portion of total energy consumption to overcome the resistance movement, the resonance modes is a sharp increase in power consumption; its value significantly affects the value of damping. **Originality.** It is found that energy consumption in order to overcome the resistance of the power creeps up is a significant portion of total energy consumption to overcome the resistance movement, especially in the resonant modes. **Practical value.** The results can also be applied for development of a mathematical model of the car and the methodology for assessment of the resistance to motion that taking into account the resistance of the creep forces and the dissipation of energy in the environment as a hanging.

*Keywords:* energy efficiency; energy losses; movement resistance; creep forces; resonant mode.

### REFERENCES

1. Astakhov P.N. Soprotivleniye dvizheniyu zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Resistance to rolling stock movement]. *Trudy TSNII MPS* [Proc. of All-Union Central Research Institute of Railway Transport]. Moscow, Transport Publ., 1966, issue 311, 178p.
2. Volfson S.A., Minkin Yu.G. *Energeticheskiy balans pri dvizhenii zheleznodorozhnogo ekipazha po puti s nerovnostyami* [Power balance at movement of railway crew on the way with roughnesses]. *Trudy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Dinamika i mery povysheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti lokomotivov v usloviyakh zheleznykh dorog Urala i Sibiri"* [Proc. of the Scientific and Technical Conf. "Dynamics and measures of increase of operational reliability of locomotives in conditions of the railroads of the Urals and Siberia"]. Omsk, OmIIT Publ., 1973, pp. 139-145.
3. Kogan A.Ya. *Dinamika puti i yego vzaimodeystviye s podvizhnym sostavom* [Dynamics of a way and its interaction with a rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1997. 326 p.
4. Kuzmich V.D., Rudnev V.S., Frenkel S.Ya. *Teoriya lokomotivnoy tyagi* [Locomotive traction theory]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 448 p.
5. Lesnichiy V.S., Orlova A.M. *Kompyuternoye modelirovaniye zadach dinamiki zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Chast 3: Modelirovaniye dinamiki grusovykh vagonov v programmnom komplekse Medyna*. (Computer simulation of the dynamics of railway vehicles, Part 3: Modeling the dynamics of freight cars in the software package MEDYNA). Saint-Petersburg, PGUPS Publ., 2002. 35 p.
6. Kraay D., Harker P. T., Chen B. Optimal pacing of trains in freight. *Journal Operations Research*, 1991, vol. 39, no. 1, pp. 82-89.
7. Lindgreen E., Sorenson S.C. *Driving resistance from railroad trains*. Copenhagen, DTU Publ., 2005. 86 p.
8. Lukaszewicz P. *Energy consumption and running time for trains*. Doct. Diss. Stockholm, 2001. 154 p.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. П. С. Анисимовым (Россия); д.т.н. В. Л. Горобцом (Украина)*

Поступила в редколлегию 04.12.2012

Принята к печати 25.02.2013