

УДК 629.4.015:656.073.22

И. А. ВОРОЖУН¹, А. В. ВОРОЖУН¹, М. Г. ГЕГЕДЕШ^{1,2}

¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

²Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь

АНАЛИЗ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ДЛИННОМЕРНОГО ГРУЗА НА ПЛАТФОРМАХ

Представлены математические модели механических систем, включающие в себя груз, закрепленный на сцепе двух платформ и на одной платформе с вагонами прикрытия при торможении поезда. Получены зависимости продольных сил в межвагонных связях от способа крепления длинномерного груза.

Ключевые слова: длинномерный груз, железнодорожная платформа, торможение поезда, математическое моделирование, компьютерное моделирование.

Постоянное расширение ассортимента перевозимых грузов требует совершенствования как вагонного парка, так и способов размещения и крепления грузов на подвижном составе. Значительную часть транспортируемых грузов составляют длинномерные, например, металлопрокат и железобетонные изделия (рисунок 1).



Рисунок 1 – Размещение длинномерных грузов на сцепе вагонов

На каждом виде транспорта существует свое понятие длинномерного или крупногабаритного груза. Так, при перевозках железнодорожным транспортом под ним понимается груз, длина которого превышает длину вагона более чем на 0,4 м с каждой торцевой стороны [1]. Груз при транспортировке размещают на одном вагоне, сцепе вагонов или в сочлененных вагонах. Наибольшие динамические нагрузки возникают при перевозке длинномерных грузов на сцепе вагонов вследствие провисания между опорными устройствами и возможности смещения осей вагонов относительно друг друга при движении по криволинейному в плане или профиле пути.

Для удержания таких грузов от их относительного перемещения в процессе перевозки используют специализированные устройства: фитинговые

упоры [2, 3]; упругие, гравитационные и комбинированные турникетно-крепежные устройства (ТКУ) [4, 5], а также иные конструкции, которые необходимо разрабатывать и испытывать на прочность для каждого отдельного вида грузов. Их применение на современных вагонах позволяет увеличить массу перевозимого груза и его длину, а также предотвратить повреждаемость грузов и вагонов в процессе перевозки.

Для установления сил, действующих на груз, требуется исследование динамики механических систем, включающих сцепы вагонов с грузом при их взаимодействии с иными единицами подвижного состава (локомотивами, вагонами). В работе [6] в среде программы MSC ADAMS создана 3D-модель транспортировки рельсов на сцепе из двух платформ. Проанализирована кинематика проезда стрелочного перевода и движения в кривой. Авторы отмечают, что отсутствие в рельсах отверстий для болтовых соединений обуславливает сложность их увязки в ярусы. Предложено на пол каждой платформы и между ярусами рельсов укладывать две металлические и две деревянные поперечные прокладки, нижний ярус отдельно крепить к платформе тросами, а остальные ярусы соединять тросами как между собой, так и с нижним ярусом.

Методы математического и компьютерного моделирования динамической нагруженности штабеля груза длиной 22 м, расположенного на сцепе из двух вагонов-платформ модели 13-4012, рассмотрены в статье [7]. Для анализа продольно-изгибных колебаний груза использована модель балки на двух упругих опорах. Получены зависимости основных динамических характеристик от скорости движения.

Транспортировка сверхдлинного груза на платформе модели NX70A изучается в публикации [8]. Построена динамическая модель платформы с грузом, а также выполнено моделирование с помощью SIMULIA Simpack с целью поиска наиболее неблагоприятных режимов движения. В результате расчетов определен допустимый вес загрузки на основе сравнения давления от грузов с различными длинами с допусковым давлением.

В статьях [9, 10] анализируются динамические процессы, связанные с транспортировкой стратегических грузов (военной техники, сельскохозяйственных машин и др.) в специально разработанном съемном модуле на вагон-платформе модели 13-7024. Применение такого модуля позволяет расширить номенклатуру перевозимых на платформах грузов без их усовершенствования.

Авторами [11] для снижения материалоемкости конструкции рамы сочлененной платформы предложено использовать круглые трубы. Для определения их оптимальных размеров был проведен прочностной расчет несущей конструкции опытного образца вагона-платформы модели 13-401.

Целью представленной работы стало определение продольных сил в межвагонных связях поезда при транспортировке длинномерных грузов, размещенных на сцепе вагонов.

Рассматриваются случаи торможения подвижного состава при способе погрузки длинномерных грузов на одну платформу с прикрытием или на сцеп из двух платформ. От продольного смещения груз удерживается силами трения и силами упругости устройства крепления.

Состав поезда представляет механическую систему со многими степенями свободы. В качестве расчетной схемы при решении рассматриваемой задачи целесообразно использование упрощенной одномерной модели, отражающей основные свойства системы. Она включает движущиеся по прямому горизонтальному участку пути локомотив и вагоны, в качестве которых выступают платформы, загруженные длинномерным грузом.

При разработке математических моделей, позволяющих оценить силы, действующие в межвагонных связях, введены следующие допущения:

- платформы с тележками и длинномерный груз считаются абсолютно твердыми телами;
- движение рассматривается на прямом горизонтальном участке пути;
- зазоры в межвагонных связях отсутствуют;
- упругие элементы устройства крепления груза на платформе имеют линейные характеристики;
- массы платформ и длинномерного груза сосредоточены в их центрах масс;
- центры масс всех тел перемещаются по параллельным прямым;
- вертикальными, а также угловыми перемещениями платформ и длинномерного груза пренебрегаем;
- начало отсчёта каждой из координат, определяющих положение локомотива, платформ и груза, соответствует моменту начала торможения поезда.

На рисунке 2 приведена расчетная схема поезда при размещении длинномерного груза на платформах с прикрытием. На ней обозначены: $m_{л}$, m_{pi} , m_{rj} – массы соответственно локомотива, i -й платформы и j -го длинномерного груза ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, k$); $x_{л}$, x_{pi} , x_{rj} – координаты соответственно локомотива, i -й платформы и j -го длинномерного груза.

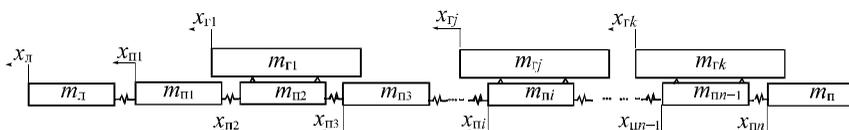


Рисунок 2 – Расчетная схема поезда при размещении длинномерного груза на одной платформе с прикрытием

С применением принципа Даламбера составлена система дифференциальных уравнений, отражающих движение локомотива, n вагонов-платформ и k грузов для случая погрузки длинномерных грузов на одну платформу с прикрытием (см. рисунок 2):

$$\left\{ \begin{array}{l}
m_{\text{л}} \ddot{x}_{\text{л}} = R_{\text{п}_1} - F_{\text{тл}} - F_{\text{сл}}; \\
m_{\text{п}_1} \ddot{x}_{\text{п}_1} = -R_{\text{п}_1} - F_{\text{с}_1} + R_{\text{п}_2} - F_{\text{т}_1}; \\
m_{\text{п}_2} \ddot{x}_{\text{п}_2} = -R_{\text{п}_2} - F_{\text{с}_2} + R_{\text{п}_3} - F_{\text{т}_2} + F_{\text{тп}_1} + F_{\text{пп}_1}; \\
m_{\text{т}_1} \ddot{x}_{\text{т}_1} = -F_{\text{тп}_1} - F_{\text{пп}_1}; \\
\dots \\
m_{\text{п}_i} \ddot{x}_{\text{п}_i} = -R_{\text{п}_i} - F_{\text{с}_i} + R_{\text{п}_{i+1}} - F_{\text{т}_i} + F_{\text{тп}_j} + F_{\text{пп}_j}; \\
\dots \\
m_{\text{п}_{n-2}} \ddot{x}_{\text{п}_{n-2}} = -R_{\text{п}_{n-2}} - F_{\text{с}_{n-2}} + R_{\text{п}_{n-1}} - F_{\text{т}_{n-2}}; \\
m_{\text{п}_{n-1}} \ddot{x}_{\text{п}_{n-1}} = -R_{\text{п}_{n-1}} - F_{\text{с}_{n-1}} + R_{\text{п}_n} - F_{\text{т}_{n-1}} + F_{\text{тп}_k} + F_{\text{пп}_k}; \\
m_{\text{т}_k} \ddot{x}_{\text{т}_k} = -F_{\text{тп}_k} - F_{\text{пп}_k}; \\
m_{\text{п}_n} \ddot{x}_{\text{п}_n} = -R_{\text{п}_n} - F_{\text{с}_n} - F_{\text{т}_n};
\end{array} \right. \quad (1)$$

где $\ddot{x}_{\text{л}}$, $\ddot{x}_{\text{п}_i}$, $\ddot{x}_{\text{т}_j}$ – продольные ускорения локомотива, i -й платформы и j -го длинномерного груза; $F_{\text{тл}}$, $F_{\text{т}_i}$ – силы торможения соответственно локомотива и i -й платформы; $F_{\text{сл}}$, $F_{\text{с}_i}$ – силы сопротивления движению соответственно локомотива и i -й платформы; $R_{\text{п}_i}$ – силы в межвагонных связях; $F_{\text{пп}_j}$ – сила упругости в элементах продольного крепления j -го груза к платформе; $F_{\text{тп}_j}$ – сила трения между поверхностями j -го груза и платформы.

Силы упругости в элементах продольного крепления j -го груза определяются выражением

$$F_{\text{пп}_j} = c_1 \Delta l_{\text{т}_j},$$

где c_1 – коэффициент жесткости упругих элементов крепления груза; $\Delta l_{\text{т}_j}$ – деформация упругих элементов крепления j -го груза.

Принято, что сила трения между поверхностями груза и платформы приложена в продольной вертикальной плоскости и определяется выражением

$$F_{\text{тп}_j} = f N,$$

где f – коэффициент трения между поверхностями груза и платформы; N – сила нормального давления груза.

Силы в межвагонных связях с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами для случаев перемещений вагонов, не превышающих величину хода поглощающих аппаратов, определяются выражениями вида [6]

$$R_{\text{п}_i} = c(x_{\text{п}_i} - x_{\text{п}_{i-1}})(1 + \mu \cdot \text{sgn}((x_{\text{п}_i} - x_{\text{п}_{i-1}})(\dot{x}_{\text{п}_i} - \dot{x}_{\text{п}_{i-1}}))),$$

где c – коэффициент жесткости упругих элементов межвагонных связей; μ – коэффициент относительного трения в межвагонных связях.

Выполнена оценка влияния загруженности вагонов на величину продольных сил в межвагонных связях. Численное интегрирование дифференциальных уравнений в среде MathCAD [13] в рассмотренных в статье случаях проводилось для начальной скорости торможения поезда 100 км/ч при следующих исходных данных: $m_n = 129000$ кг; $c = 11$ МН/м; $\mu = 0,55$; $f = 0,6$. Результаты расчетов для двух составов: из 11 вагонов массой по 76 т и с чередованием порожних массой 22 т и груженых массой 76 т платформ представлены на рисунке 3. Значения сил на графиках здесь и далее соответствуют автосцепкам, расположенным в передней части соответствующего вагона-платформы.

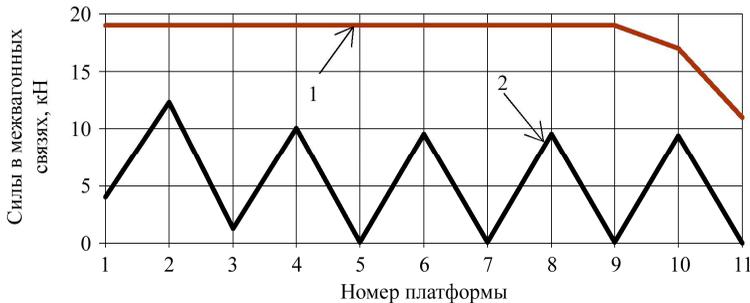


Рисунок 3 – Продольные силы в межвагонных соединениях для случаев:
 1 – всех груженых вагонов; 2 – чередования порожних и груженых вагонов

Анализ полученных результатов показывает, что при одинаковой загруженности вагонов значения наибольших сжимающих сил в межвагонных связях практически не меняются по длине состава. Уменьшение этих сил наблюдается лишь для двух концевых вагонов. В случае чередования порожних (1, 3, 5, 7, 9, 11) и груженых (2, 4, 6, 8, 10) вагонов по длине состава наблюдается незначительное уменьшение сжимающих сил в межвагонных связях, идущих от порожних вагонов к следующим за ними груженым, начиная уже с третьего вагона. При этом сжимающие силы в автосцепках, ведущих от груженых вагонов к порожним, практически отсутствуют.

Для оценки влияния на значения продольных сил в межвагонных связях при торможении поезда сил трения между поверхностями груза и платформы, а также сил упругости в устройствах крепления груза осуществлялось путем варьирования соответственно коэффициентов трения f_1 и жесткости c_1 . Результаты расчетов для состава из 11 платформ массой по 22 т и груза массой 54 т представлены на рисунке 4. Из него следует, что при размещении длинномерного груза на одном вагоне с прикрытием уменьшение жесткости устройства крепления груза к платформе приводит к увеличению продольных сжимающих сил в межвагонных связях. При этом наблюдается интенсивное нарастание сжимающих сил в автосцепках, ведущих от груженых вагонов к порожним.

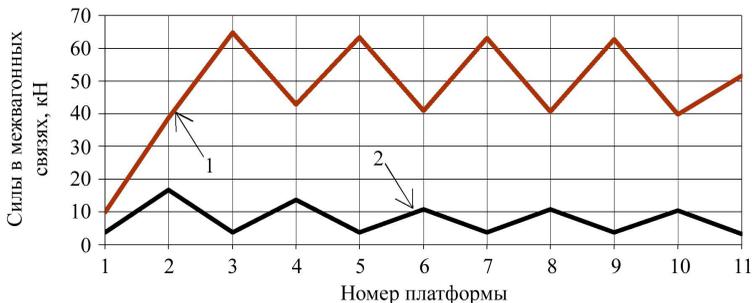


Рисунок 4 – Продольные силы в межвагонных соединениях для случая упругого крепления груза на платформе с прикрытием при $c_1 = 100$ МН/м (1); $c_1 = 1000$ МН/м (2)

Для анализа транспортировки длинномерного груза на сцепе из двух платформ использована расчетная схема, приведенная на рисунке 5. В ней груз удерживается от продольного смещения силами трения между поверхностями груза и платформ, а также силами упругости каждого устройства крепления.

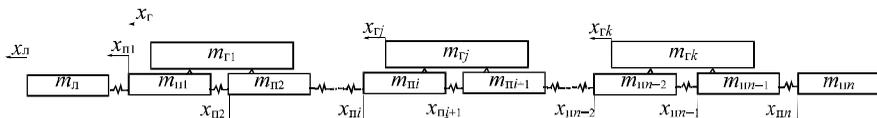


Рисунок 5 – Схема транспортировки длинномерного груза на сцепе из двух платформ

Движение единиц железнодорожного подвижного состава и груза в этом случае описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases}
 m_{л} \ddot{x}_{л} = R_{п_1} - F_{тл} - F_{сл}; \\
 m_{п_1} \ddot{x}_{п_1} = -R_{п_1} - F_{c_1} + R_{п_2} - F_{т_1} + F_{т_{п_1}} + F_{п_{п_1}}; \\
 m_{п_2} \ddot{x}_{п_2} = -R_{п_2} - F_{c_2} + R_{п_3} - F_{т_2} + F_{т_{п_2}} + F_{п_{п_2}}; \\
 m_{г_1} \ddot{x}_{г_1} = -F_{т_{п_1}} - F_{п_{п_1}} - F_{т_{п_2}} - F_{п_{п_2}}; \\
 \dots \\
 m_{п_i} \ddot{x}_{п_i} = -R_{п_i} - F_{c_i} + R_{п_{i+1}} - F_{т_i} + F_{т_{п_i}} + F_{п_{п_i}}; \\
 \dots \\
 m_{п_{n-2}} \ddot{x}_{п_{n-2}} = -R_{п_{n-2}} - F_{c_{n-2}} + R_{п_{n-1}} - F_{т_{n-2}} + F_{т_{п_{k-1}}} + F_{п_{п_{k-1}}}; \\
 m_{п_{n-1}} \ddot{x}_{п_{n-1}} = -R_{п_{n-1}} - F_{c_{n-1}} + R_{п_n} - F_{т_{n-1}} + F_{т_{п_k}} + F_{п_{п_k}}; \\
 m_{г_k} \ddot{x}_{г_k} = -F_{т_{п_{k-1}}} - F_{п_{п_{k-1}}} - F_{т_{п_k}} - F_{п_{п_k}}; \\
 m_{п_n} \ddot{x}_{п_n} = -R_{п_n} - F_{c_n} - F_{т_n}.
 \end{cases} \quad (2)$$

Выполнена оценка влияния жесткости устройства крепления груза и наличия дополнительной платформы прикрытия на продольные силы в междвагонных связях. В случае, представленном на рисунке 6, а, рассмотрен состав из 11 вагонов, в котором на первых сцепках первых десяти платформ размещены пять грузов массой 54 т каждый, а последняя 11-я платформа порожняя. Масса каждой из платформ принята равной 22 т. Расчеты показали, что при коэффициенте жесткости $c_1 = 1000$ МН/м значения продольных сжимающих сил в междвагонных связях не превышают 5 кН. Уменьшение значения коэффициента жесткости до $c_1 = 100$ МН/м сопровождается увеличением до 17 кН сил в связях локомотива с первой платформой и 11-й порожней платформы.

Поскольку при креплении длинномерного груза на сцепе из двух платформ отпадает необходимость в платформе прикрытия, аналогичные расчеты также выполнены для состава из 10 платформ (рисунок 6, б), которые показали, что отсутствие 11-й порожней платформы сопровождается увеличением сжимающих сил в междвагонных связях головных платформ каждого сцепа.

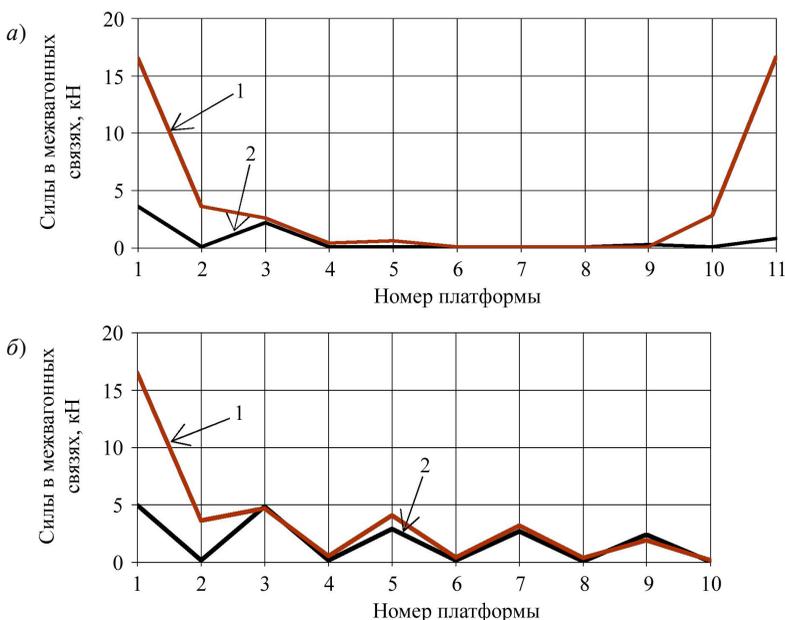


Рисунок 6 – Распределение сил в междвагонных соединениях составов с 11-й платформой прикрытия (а) и без нее (б) для случаев $c_1 = 100$ МН/м (1) и $c_1 = 1000$ МН/м (2)

Также рассмотрен вариант упругого крепления длинномерного груза на первой платформе при свободном опирании на вторую платформу сцепа.

Из графиков, представленных на рисунке 7, следует, что уменьшение коэффициента жесткости c_1 сопровождается значительным увеличением сил в межвагонных связях. При упругом креплении длинномерного груза только на одной из платформ сцепа силы в межвагонных связях оказываются в 3–10 раз большими, чем в случае упругого крепления на обеих платформах сцепа.

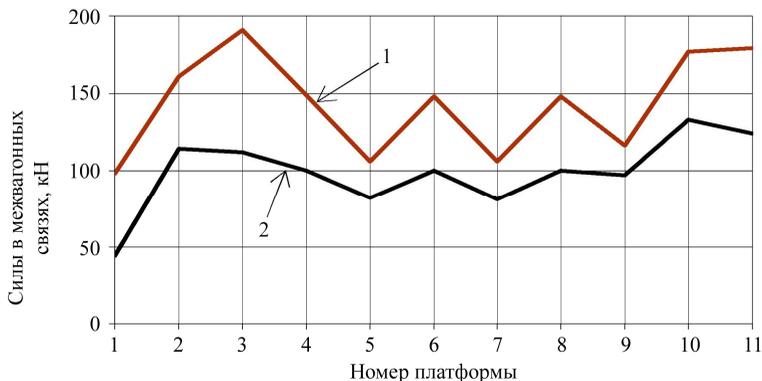


Рисунок 7 – Распределение продольных сил в межвагонных соединениях состава из 11 вагонов в случае упругого крепления груза только на передней платформе сцепа для случаев $c_1 = 100$ МН/м (1) и $c_1 = 1000$ МН/м (2)

Заключение. Полученные в ходе исследований результаты свидетельствуют о том, что уменьшение жесткости устройства крепления груза на сцепе платформ приводит к увеличению продольных сжимающих сил в межвагонных связях при торможении поезда. Из рассмотренных схем предпочтителен способ устройства крепления длинномерного груза на сцепе из двух платформ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах № ЦМ-943 : утв. 27.05.2003 МПС России. – М. : Юртранс, 2003. – 544 с.

2 Васильев, С. М. Совершенствование подвижных турникетно-крепежных устройств с целью установки на современные типы грузовых вагонов / С. М. Васильев, А. А. Железняков, Л. П. Целковикова // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – Вып. 12. – С. 29–34.

3 Петрачков, С. А. Компьютерное моделирование длинномерных грузов на сцепе из двух платформ / С. А. Петрачков, М. Г. Гегедеш // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 117–120.

4 Васильев, С. М. Математическое моделирование динамических воздействий на длинномерные грузы и опорные вагоны / С. М. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2006. – № 1–2 (12–13). – С. 30–36.

5 Research of the operation of the turnstile support-fastening device during the transportation of a long-dimensional heavy load / J. Musayev [et al.] // *Vibroengineering Proceedings*. – 2023. – Vol. 49. – P. 80–85.

6 **Shimanovsky, A.** Computer modeling of long loads transporting on the two coupled flatcars / A. Shimanovsky, M. Kuzniatsova, S. Petrachkou // *12th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics : Book of Abstracts*. – Sofia : Institute of Mechanics, 2013. – P. 435–440.

7 **Шатунов, О. В.** Динаміка зчепу вагонів-платформ під час перевезення довгомірного вантажу / О. В. Шатунов, А. О. Швець // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. – 2020. – № 4 (88). – С.114–131.

8 **Ren, Y.** Study on the overlong cargo's allowable loading weight of NX70A flat wagon / Y. Ren, M. Han, N. Yang // *Proceedings of the 3rd International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications*. – Dordrecht : Atlantis Press, 2015. – P. 1359–1363.

9 Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry / A. Lovska [et al.] // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, is. 16. – Article 5710. – 15 p.

10 Situational adaptation of the model 13-7024 flat car for transporting strategic cargo / A. Lovska [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2024. – Vol. 2, no. 7 (128). – P. 38–46.

11 Analysis of the loading on an articulated flat wagon of circular pipes loaded with tank containers / O. Fomin [et al.] // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, is. 12. – Article 5510. – 12 p.

12 **Вершинский, С. В.** Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.

13 **Поршнев, С. В.** Компьютерное моделирование физических систем с использованием пакета MathCAD / С. В. Поршнев. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2015. – 320 с.

I. A. VARAZHUN¹, A. U. VARAZHUN¹, M. G. GEGEDESH^{1,2}

¹*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

²*Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Gomel, Belarus*

ANALYSIS OF LONGITUDINAL FORCES FOR THE VARIOUS WAYS OF LONG LOADS PLACING ON FLATCARS

The paper presents mathematical models of mechanical systems that include cargo fastened to the coupling of the two flatcars and to the one flatcar with the covering cars at train braking. The dependences of longitudinal forces in inter-car couplings on the method of long cargo fastening are obtained.

Keywords: long cargo, railway flatcar, train braking, mathematical modeling, computer modeling.

Получено 15.10.2024