

УДК 629.4.015:004.942

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

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ДЛИННОМЕРНОГО ГРУЗА НА СЦЕПАХ ПЛАТФОРМ

Рассмотрены варианты размещения и крепления длинномерного груза на сцепах из двух или трех железнодорожных платформ. В результате математического моделирования определены силы в элементах продольного крепления груза к платформам, а также в междувагонных связях при соударении вагонов. Показано, что значения сил в элементах крепления и междувагонных связях при использовании двух и трех платформ различаются незначительно.

Ключевые слова: длинномерный груз, сцеп платформ, соударение вагонов, продольные силы.

Ассортимент производимых на предприятиях различных отраслей промышленности изделий постоянно расширяется. В частности, всё чаще находят применение длинномерные изделия, такие как металлопрокат, железобетонные конструкции (рисунок 1) и другие крупногабаритные грузы, которые требуют особых условий транспортировки.

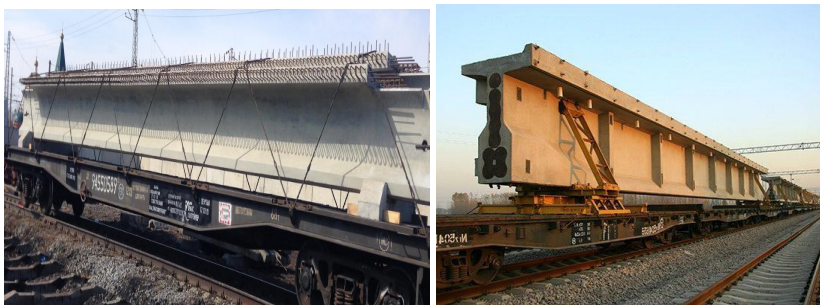


Рисунок 1 – Размещение длинномерных грузов на вагонах и их сцепах

Согласно существующим нормативным документам груз, транспортируемый железнодорожным транспортом, считается длинномерным, если его длина превышает стандартную длину вагона более чем на 0,4 м с каждой его торцевой стороны [1]. Техническое оснащение подвижного состава и организация перевозочного процесса должны быть адаптированы для учета особенностей длинномерных грузов, чтобы обеспечить их безопасную доставку в точки назначения. Поэтому разработке специальных вагонов, механизмов

крепления, а также правилам транспортировки, обеспечивающим сохранность груза и безопасность движения, уделяется усиленное внимание [2–5].

Наиболее неблагоприятные воздействия платформа, груз и элементы его крепления испытывают при соударениях вагонов во время проведения маневровых работ, особенно при роспуске с сортировочных горок [6]. Относительно невысокая жесткость средств крепления ведет к необходимости учета возможности смещения груза при соударениях вагонов, которое может повлиять на безопасность движения. Поэтому необходим анализ взаимодействий в системе «поезд – транспортируемый груз» [7], для выполнения которого может быть использован подход, представленный ранее в работах [8, 9].

Целью представленной работы является сравнение вариантов размещения и крепления длинномерного груза на сцепе двух и трех железнодорожных платформ.

Математическая модель системы. Загруженные длинномерным грузом платформы представляют собой механическую систему со многими степенями свободы. Для облегчения проведения расчетов целесообразно заменить ее расчетной схемой с ограниченным числом степеней свободы.

При рассмотрении процесса соударения сцепы платформ, нагруженных длинномерным грузом с группой из n неподвижных вагонов (далее называемых «стенкой»), используются допущения, которые введены ранее в работе [10]:

- вагоны, платформы с тележками и длинномерный груз представляют собой абсолютно твердые тела, вертикальными, а также угловыми перемещениями которых пренебрегаем; массы тел сосредоточены в центрах масс;
- длинномерный груз размещен на платформах симметрично относительно их продольной и поперечной плоскостей симметрии;
- упругие элементы устройства крепления груза имеют линейные характеристики;
- зазоры в междувагонных связях отсутствуют, откат платформ после соударения ограничивается данными связями.

Движение рассматриваем на прямом горизонтальном участке пути, а начало отсчета координат x_r , $x_{пj}$, x_{vi} (индекс «г» здесь и далее соответствует грузу, «пj» – j-й платформе, «vi» – i-му вагону стенки), определяющих положение элементов системы располагаем в местах, соответствующих моменту соприкосновения первой платформы сцепы с вагонами стенки. Тогда расчетные схемы для рассматриваемых случаев размещения длинномерного груза приобретают вид, представленный на рисунках 2 и 3. На схемах помимо координат обозначены массы m тел системы, а также направления сил трения $F_{тр}$, сил в элементах крепления длинномерного груза к платформам $F_{пр}$ и сил в междувагонных связях $R_{п}$ и $R_{в}$.

С применением способа Даламбера составлены системы дифференциальных уравнений, описывающие движение груза, платформ и n вагонов стенки. Для случая крепления груза к одной платформе при двух платформах прикрытия по концам (см. рисунок 2) имеем

$$\left. \begin{aligned}
 m_{\Gamma} \ddot{x}_{\Gamma} + F_{\text{np}} + F_{\text{tp}} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{\Gamma} - \dot{x}_{\text{п}2}) &= 0; \\
 m_{\text{п}1} \ddot{x}_{\text{п}1} + R_{\text{п}1} &= 0; \\
 m_{\text{п}2} \ddot{x}_{\text{п}2} - F_{\text{np}} - F_{\text{tp}} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{\Gamma} - \dot{x}_{\text{п}2}) - R_{\text{п}1} + R_{\text{п}2} &= 0; \\
 m_{\text{п}3} \ddot{x}_{\text{п}3} - R_{\text{п}2} + R_{\text{п}3} &= 0; \\
 m_{\text{в}1} \ddot{x}_{\text{в}1} - R_{\text{п}3} + R_{\text{в}1} &= 0; \\
 \dots & \\
 m_{\text{в}i} \ddot{x}_{\text{в}i} - R_{\text{в}i} + R_{\text{в}i+1} &= 0; \\
 \dots & \\
 m_{\text{в}n} \ddot{x}_{\text{в}n} - R_{\text{в}n} + R_{\text{в}n+1} &= 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

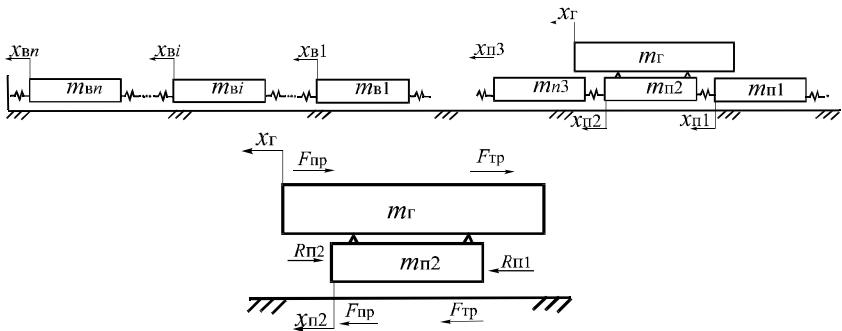


Рисунок 2 – Расчетная схема соударения загруженного длиномерным грузом сцепа из трех платформ (груз крепится к одной платформе при двух платформах прикрытия по концам) с группой неподвижных вагонов

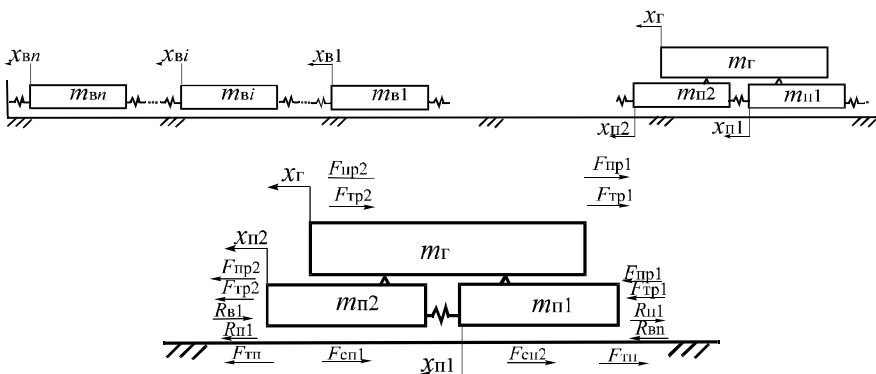


Рисунок 3 – Расчетная схема соударения загруженного длиномерным грузом сцепа из двух платформ с группой неподвижных вагонов

В случае размещения груза на сцепе из двух платформ (см. рисунок 3)

$$\left. \begin{aligned} m_r \ddot{x}_r + F_{np1} + F_{np2} + F_{tp1} (\operatorname{sgn}(\dot{x}_r - \dot{x}_{n1}) + F_{tp2} \operatorname{sgn}(\dot{x}_r - \dot{x}_{n2})) &= 0; \\ m_{n1} \ddot{x}_{n1} - F_{np1} - F_{tp1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_r - \dot{x}_{n1}) + R_{n1} &= 0; \\ m_{n2} \ddot{x}_{n2} - F_{np2} - F_{tp2} \operatorname{sgn}(\dot{x}_r - \dot{x}_{n2}) - R_{n1} + R_{n2} &= 0; \\ m_{b1} \ddot{x}_{b1} - R_{n2} + R_{b1} &= 0; \\ \dots & \\ m_{bi} \ddot{x}_{bi} - R_{bi+1} + R_{bi+2} &= 0; \\ \dots & \\ m_{bn} \ddot{x}_{bn} - R_{bn+1} + R_{bn+2} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В системах уравнений (1) и (2) точки над координатами соответствуют производным от них по времени.

Силы в упругих элементах крепления длинномерного груза к платформам определяются выражениями:

– для сцепы из трех платформ –

$$F_{np} = c_{np} (x_r - x_{n2});$$

– для сцепы из двух платформ –

$$F_{np1} = c_{np} (x_r - x_{n1}); \quad F_{np2} = c_{np} (x_r - x_{n2}),$$

где c_{np} – коэффициенты жесткости канатов продольного крепления груза к платформе.

Значения сил трения находятся по формулам вида

$$F_{tp} = f m_r g,$$

где f – коэффициент трения между поверхностями длинномерного груза и опорами платформ; m_r – суммарная масса груза, приходящаяся на опору; g – ускорение свободного падения;

Силы в междувагонных связях получаются из выражений

$$R_{bi} = c(x_{bi} - x_{bi+1}) [1 + \varphi \operatorname{sgn}((x_{bi} - x_{bi+1})(\dot{x}_{bi} - \dot{x}_{bi+1}))], \quad (3)$$

где c – коэффициент жесткости упругих элементов междувагонных связей; φ – коэффициент трения между элементами междувагонных связей.

Значения R_{ni} определяются по формуле (3), учитывая, что $x_{nj} = x_{bi}$.

При выполнении численных расчетов в качестве начальных условий соударения принято, что при $t = 0$ все рассматриваемые координаты равны нулю, а начальные скорости $\dot{x}_{r(0)} = \dot{x}_{n1(0)} = \dot{x}_{nj(0)} = \dot{x}_{nk(0)} = v_0$; $\dot{x}_{bi(0)} = 0$, где v_0 – начальная скорость соударения, соответствующая скорости движения платформ с грузом в момент соприкосновения с первым вагоном стенки.

Результаты вычислений. Расчеты проводились для скорости соударения вагонов 5 км/ч при следующих исходных данных: $m_{n1} = m_{n2} = m_{n3} = 22000$ кг; $m_r = 53000$ кг; $m_{b1} = m_{b2} = m_{b3} = 84000$ кг; $c_{np} = c = 2 \cdot 10^6$ Н/м; $f = 0,1$; $\varphi = 0,55$.

Размещение длинномерного груза на одной платформе с двумя порожними платформами прикрытия по концам (см. рисунок 2) не всегда экономически целесообразно, поэтому проведены расчеты сил в элементах крепления и междувагонных связях с варьированием масс ($m_{п1}$, $m_{п3}$), соответствующим загрузке платформ прикрытия сопутствующими грузами. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Динамические показатели при соударении сцепы из трех платформ

Масса платформ, кг		Наибольшая величина силы, кН			
$m_{п1}$	$m_{п3}$	$F_{пр}$	$R_{п1}$	$R_{п2}$	$R_{п3}$
22000	22000	265,0	315,7	455,3	516,5
22000	50000	248,8	274,6	390,0	682,9
50000	22000	229,0	470,2	477,5	519,0
50000	50000	218,9	414,6	445,6	682,9
22000	75000	235,2	246,2	350,5	765,6
75000	75000	191,8	420,0	513,2	765,6
75000	22000	206,5	534,2	534,0	521,8

Анализ результатов расчетов (см. таблицу 1) позволяет сделать заключение, что загрузка платформ прикрытия другими сопутствующими грузами приводит к уменьшению силы $F_{пр}$ в упругих элементах продольного крепления длинномерного груза к средней платформе сцепы. Однако увеличение загрузки платформ прикрытия приводит к росту сил в междувагонных связях, причем в набегавшей на стенку вагонов платформе сцепы сила $R_{п3}$ возрастает примерно в 1,5 раза.

При размещении длинномерного груза с опорой на две платформы (см. рисунок 2) рассмотрены способы упругого продольного крепления груза к одной или двум платформам сцепы. Результаты расчетов (таблица 2) свидетельствуют о том, что при продольном креплении длинномерного груза к обеим платформам сцепы силы $F_{пр1}$ и $F_{пр2}$ в упругих элементах этих креплений меньше, чем в случае крепления к одной из платформ сцепы. Следует отметить, что способ продольного крепления длинномерного груза к одной или двум платформам сцепы практически не влияет на силы $R_{п1}$, $R_{п2}$ в междувагонных связях.

Таблица 2 – Силы, возникающие при соударении сцепы из двух платформ

Сила	Наибольшая величина силы, кН, при креплении		
	к двум платформам	платформе 2	платформе 1
$F_{пр1}$	168,7	0	291,1
$F_{пр2}$	222,8	279,8	0
$R_{п1}$	385,8	383,2	392,8
$R_{п2}$	531,6	531,6	527,8

Выводы. Выполненный анализ показывает предпочтительность способа размещения длинномерного груза на сцепе из двух железнодорожных платформ. Целесообразность применения крепления с использованием трех платформ, при котором платформы прикрытия загружены сопутствующим грузом, требует экономического обоснования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Технические условия размещения и крепления грузов: Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). По состоянию на 1 июля 2020 года. Т. 1. – ОСЖД, 2020. – 447 с.

2 **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.

3 **Ворожун, И. А.** Оценка динамических сил в элементах крепления труб на железнодорожной платформе / И. А. Ворожун // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2008. – № 1. – С. 60–64.

4 **Ворожун, И. А.** Моделирование взаимодействия ярусов груза и платформы при торможении поезда / И. А. Ворожун, А. В. Шилович // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 52–58.

5 Analysis of the loading on an articulated flat wagon of circular pipes loaded with tank containers / O. Fomin, J. Gerlici, A. Lovska, K. Kravchenko // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, is. 12. – Article 5510. – 12 p.

6 **Васильев, С. М.** Моделирование соударений вагонов при сухом трении в опорах груза / С. М. Васильев, А. Д. Железняков, Л. П. Целковикова // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 2. – С. 10–12.

7 **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.

8 **Varazhun, I.** Modeling of the interaction between cargo tiers and flatcar during the collision of cars / I. Varazhun, A. Zavarotny // Technol. – 2013. – Roc. 5, is. 4. – P. 195–198.

9 **Chaganova, O. S.** Fastenings parameters determination for highly deformative cargo, taking into account its durability during transportation in cars and trains / O. S. Chaganova, I. A. Varazhun // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2018. – Vol. 7, is. 3. – P. 218–222.

10 **Ворожун, И. А.** Выбор рациональных параметров крепления труб на железнодорожной платформе / И. А. Ворожун // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2007. – № 1. – С. 154–157.

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

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

²*Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus*

A COMPARISON OF METHODS FOR THE LONG CARGO PLACING ON FLATCAR COUPLINGS

The variants for arranging and securing long cargo on couplings consisting of two or three railway flatcars are considered. Mathematical modeling is used to determine the forces in the longitudinal cargo-flatcar fixing elements, as well as in the inter-car connections during car collisions. It is shown that the forces in the fixing elements and in the inter-car connections differ slightly when two and three flatcars are coupled.

Keywords: long cargo, platform coupling, car collision, longitudinal forces.

Получено 30.10.2025