

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.463.3:004.94

EDN: <https://elibrary.ru/kfuact>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Анализ напряженно-деформированного состояния удерживающего устройства для фиксации арочного длинномерного груза на железнодорожной платформе

С. А. Петрачков¹, М. Г. Гегедеш^{2,1}✉

¹Белорусский государственный университет транспорта,
Гомель, Республика Беларусь

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Необходимость совершенствования способов размещения и крепления грузов на подвижном составе обусловлена постоянным расширением ассортимента перевозимых грузов, увеличением максимальных скоростей движения грузовых поездов, а также разработкой и внедрением в перевозочный процесс новых конструкций грузовых вагонов. Предлагаются новые конструкции устройств для крепления грузов, в том числе длинномерных. При этом принятые в практике перевозок методы расчета схем погрузки и крепления грузов не позволяют сделать вывод о надежности таких нестандартных устройств и их удерживающих свойств.

Материалы и методы. Выполнено исследование напряженно-деформированного состояния, разработанного авторами удерживающего устройства для фиксации арочного длинномерного груза на железнодорожном подвижном составе. Нагрузки, действующие на устройство в продольном и поперечном направлениях, определены аналитическим способом.

Результаты. Получены значения нормальных, эквивалентных (по Мизесу) напряжений и деформаций разработанной конструкции при самых неблагоприятных условиях ее нагружения.

Обсуждение и заключение. Результаты полученных на основе конечно-элементного анализа расчетов позволили выработать рекомендации по применению предлагаемой конструкции для фиксации рассматриваемого длинномерного груза от опрокидывания и поступательных перемещений в продольном и поперечном направлениях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожная платформа, длинномерный груз, фиксирующее груз устройство, компьютерное моделирование, безопасность перевозки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Петрачков С. А., Гегедеш М. Г. Анализ напряженно-деформированного состояния удерживающего устройства для фиксации арочного длинномерного груза на железнодорожной платформе // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 1. С. 9–20.

Original article

UDK 629.463.3:004.94

EDN: <https://elibrary.ru/kfuact>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



Stress-strain state analysis of a fastening device for an arched long good on a flatcar

Siarhei A. Petrachkou¹, Maryna G. Gegedesh^{2,1}✉

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

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

ABSTRACT

Introduction. The need to improve ways of placing and securing goods on rolling stock is determined by the constant expansion of the range of goods transported, an increase in the maximum speeds of freight trains, as well as the development and implementation of new railway cars designs in the transportation process. New designs of devices for arched loads, including long goods, are proposed. At the same time, the methods of analysing freight handling and cargo fastening schemes adopted in the practice of transportation do not allow to conclude about the reliability of such non-standard devices and their retaining properties.

Materials and methods. A study of the stress-strain state of a fastening device for an arched long good on a rolling stock is performed. The loads acting on the device in the longitudinal and transverse directions are determined analytically.

Results. The values of normal, equivalent (according to Mises) stresses and deformations of the developed structure under adverse conditions of its loading are obtained.

Discussion and conclusion. The results of the calculations obtained on the basis of finite element analysis made it possible to develop recommendations for the application of the proposed design to arched long goods to eliminate tipping and translational movements in the longitudinal and transverse directions.

KEYWORDS: railway flatcar, long good, cargo fastening device, computer modelling, railway transportation safety

FOR CITATION: Petrachkou S. A., Gegedesh M. G. Stress-strain state analysis of a fastening device for an arched long good on a flatcar. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(1):9–20. (In Russ.).

Введение. В современных условиях глобализации транспортных процессов происходит непрерывное расширение числа и типов перевозимых грузов, а также увеличение длины, скорости и массы железнодорожных составов, что требует более совершенного вагонного парка и новых способов размещения и крепления грузов на железнодорожном подвижном составе.

Достаточно часто грузы выходят за пределы одной или обеих концевых балок рамы вагона более чем на 400 мм. В таких случаях их относят к длинномерным и размещают на сцепе вагонов с опорой на один вагон или с опорой на два вагона в зависимости от их длины и массы. К числу таких грузов, например, относятся железобетонные изделия и металлопрокат.

Силы инерции, действующие на длинномерные грузы при прохождении железнодорожным составом стрелочных переводов и входе в кривые участки пути малого радиуса (350–500 м), приводят к смещению грузов относительно их первоначального положения, вследствие чего способны произойти разрушение деревянных деталей креплений и расслабление проволочных нитей, что может привести к повреждению вагона и груза, а также к возникновению необходимости повторного закрепления груза в процессе транспортировки к станции назначения.

Принятая в настоящее время методика расчета средств крепления грузов на железнодорожном подвижном составе использует положения, характерные для механики твердых тел, однако и длинномерные грузы, и многие средства их крепления обладают упруго-пластическими свойствами, учет которых возможен только при использовании цифровых технологий. В условиях постоянно растущего числа устройств, предназначенных для крепления грузов, расчеты на основе компьютерного моделирования позволяют достаточно точно оценить надежность предлагаемых конструкций при условии адекватности разработанных моделей реальным процессам, происходящим при движении вагона-платформы.

Краткий обзор проблемы. Длинномерные грузы относятся к категории негабаритных и требуют специальных условий перевозки как железнодорожным [1, 2], так и автомобильным транспортом [3, 4], поскольку их динамическое поведение в процессе перевозки отличается от грузов меньшей длины, что можно объяснить возможностью возникновения вертикальных колебаний, т.е. при увеличении длины грузовой единицы закрепление может потерять удерживающие свойства.

Существуют различные способы размещения и крепления длинномерных грузов при перевозке их железнодорожным транспортом, которые описаны, например, в Технических условиях размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах^{1,2}. Также известны различные виды устройств для крепления длинномерных грузов на открытом железнодорожном подвижном составе, которые предназначены для погашения инерционных сил, действующих на груз в продольном и поперечном направлениях в процессе перевозки [5, 6].

Некоторые авторы предлагают изменения в конструкции конкретных вагонов под перевозку определенных видов грузов, например, в работах [7, 8], однако такой вариант не может быть использован для широкой номенклатуры грузов и в особенности длинномерных.

Наиболее часто исследователи как в странах СНГ, так и за рубежом используют математическое моделирование для описания поведения груза, позволяющее учесть колебания груза как твердого тела в различных плоскостях [9–11]. Однако при этом не учитываются упруго-пластические свойства элементов крепления грузов и самого длинномерного груза, которые могут привести как к уменьшению, так и к увеличению относительных смещений груза.

Достаточно часто для крепления длинномерных грузов используются опорно-крепежные (турникетные) устройства [15, 16], однако для длинномерных грузов определенной кривизны с малой площадью опирания и длиной, значительно превышающей толщину, они не могут быть применены.

Существуют исследования, направленные на изучение напряженно-деформированного состояния некоторых элементов креплений грузов при их перевозке автомобильным [12, 13], морским [14] транспортом, однако в области железнодорожного транспорта такие исследования не выполнялись.

Целью представленной работы является разработка способа размещения и крепления длинномерного груза криволинейной формы с малой площадью опирания с учетом упруго-пластических свойств фиксирующей конструкции на основе компьютерного моделирования. Задачи, обусловленные целью, включают в себя аналитический расчет сил и нагрузок, воспринимаемых средствами крепления, разработку конструкции, позволяющей зафиксировать несколько единиц длинномерного груза криволинейной формы, а также анализ прочности устройства на основе параметров его напряженно-деформированного состояния под действием расчетных нагрузок.

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

² Tiedown Handbook for Rail Movements / R. E. Kerr [et al.]; Transportation Engineering Agency; edited by R. E. Kerr. Virginia: Newport News. 2003. 97 p.

Методы и новые приемы анализа. Для расчета основных характеристик груза и сил, действующих на него в продольном и поперечном направлениях, использована стандартная методика, применяемая при разработке схем размещения и крепления грузов и описанная в Соглашении о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС)³. Она подразумевает расчет инерционных сил, действующих на груз в продольном и поперечном направлениях, а также подбор устройств и элементов крепления грузов, способных оказать удерживающее от относительного смещения груза воздействие, обеспечивающих гашение этих инерционных сил, например, брусков, растяжек, увязок и т.д. При этом аналитический расчет удерживающих сил при использовании конструкций более сложной конфигурации, в том числе, состоящих из элементов, изготовленных из материалов с различными свойствами, представляет собой весьма трудоемкую задачу.

Общая масса груза ($Q_{гр}^o$) включает массу четырех узких арочных конструкций и массу средств крепления и составляет 52 т. Схема размещения арочного груза на открытом подвижном составе приведена на рис. 1. Погрузка четырех деревянных полуарок производится на 4-осный транспортер модели 14-Т302 (тип 3931) грузоподъемностью 64 т. С двух сторон транспортера устанавливаются платформы прикрытия (по одному вагону перед платформой с грузом и после нее). Сцеп для перевозки длинномерного груза должен быть сформирован таким образом, чтобы в порожнем состоянии высота продольных осей автосцепок грузонесущих вагонов от уровня верха головок рельсов была больше высоты осей автосцепок вагонов прикрытия и промежуточных вагонов на 50–100 мм⁴. Груз располагается

таким образом, чтобы смещение центра тяжести груза в продольном и поперечном направлениях было равно нулю, центры тяжести грузов и вагона при таком размещении криволинейного груза будут совпадать.

Для фиксации каждой единицы арочного длинномерного груза была разработана конструкция, общий вид которой представлен на рис. 2. Устройство представляет собой металлическую раму, с равномерно расположенными ячейками, число которых соответствует числу единиц груза и с установленным прокладочным материалом, защищающим груз от механических повреждений и позволяющим обеспечить расчетный коэффициент трения между грузом и рамой. Для удержания груза от поступательных перемещений в продольном и поперечном направлениях конструкция имеет прижимные балки, которые создают необходимую силу трения между грузом и рамой за счет завертывания гаек с расчетным моментом затяжки. Рама выполняется из стандартных швеллеров, включает несколько секций для размещения каждого груза отдельно и приваривается к металлическому листу, прикрепленному к полу железнодорожной платформы. Высота рамы соответствует высоте груза в месте ее установки. Поскольку груз не симметричен относительно поперечной оси, используются рамы высотой 2,040 м и 1,504 м.

Аналитические расчеты, выполненные по стандартной методике, позволили сделать вывод о том, что вагон с грузом устойчив от опрокидывания.

Продольная инерционная сила $F_{пр}$, тс, определяется по стандартной формуле:

$$F_{пр} = a_{пр} Q_{гр}, \quad (1)$$

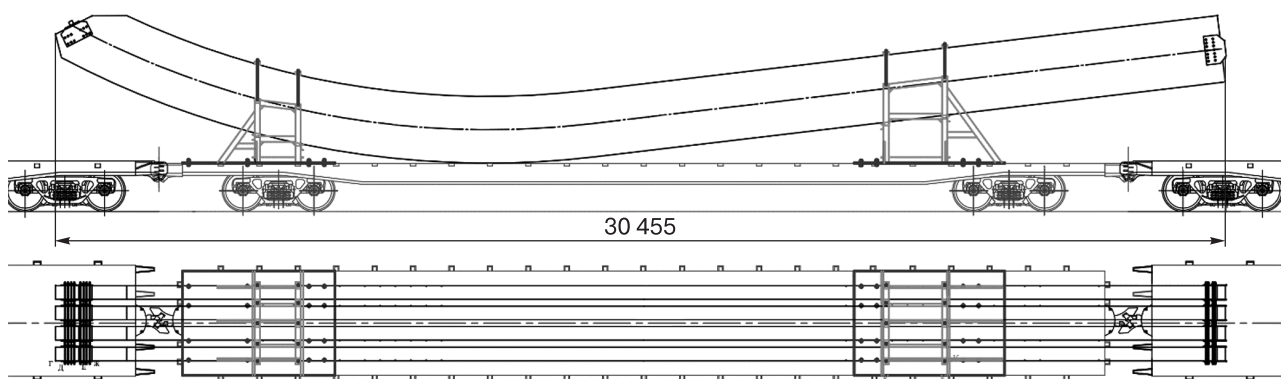


Рис. 1. Схема размещения рассматриваемого длинномерного груза арочной формы*

* Источник: разработан авторами

Fig. 1. The placement scheme for the considered arched long goods*

* Source: developed by the authors

³ Технические условия размещения и крепления грузов. Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) [Электронный ресурс]: действует с 1 ноября 1951 г. с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 июля 2024 года. URL: <https://osjd.org/ru/8978/page/106077?id=2845> (дата обращения: 12.01.2025).

⁴ Там же.

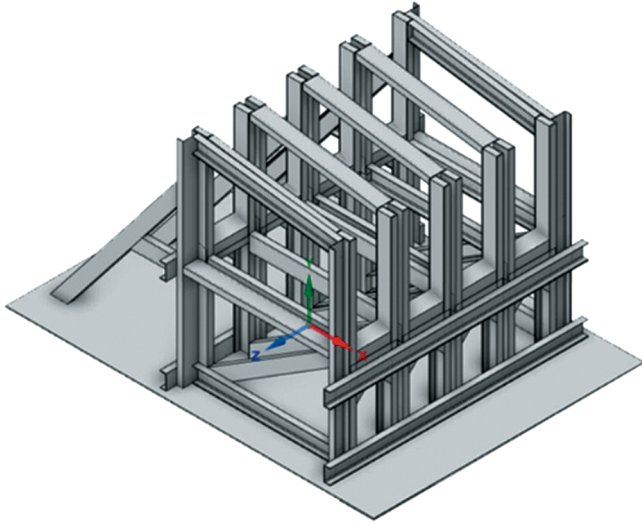


Рис. 2. Предлагаемое удерживающее устройство для длинномерного груза*
* Источник: разработан авторами

Fig. 2. Proposed positioning device for long goods*
* Source: developed by the authors

где $a_{пр}$ — удельная продольная инерционная сила, тс, на тонну массы груза, определяемая по формуле:

$$a_{пр} = a_{22} - \frac{Q_{гр}^o (a_{22} - a_{94})}{72}, \quad (2)$$

где a_{22} , a_{94} — значения удельной продольной инерционной силы в зависимости от типа крепления при массе брутто вагона 22 т и 94 т, соответственно, $a_{22} = 1,90$ тс/т, $a_{94} = 1,67$ тс/т, тогда

$$a_{пр} = 1,90 - \frac{52(1,90 - 1,67)}{72} = 1,73 \text{ тс/т.}$$

Продольная инерционная сила, действующая на одну грузовую единицу массой 11,5 т, составляет

$$F_{пр} = 1,734 \cdot 11,50 = 19,941 \text{ тс.}$$

Продольная инерционная сила грузов с учетом крепления равна

$$F_{пр}^{гр} = 1,734 \cdot 52 = 90,168 \text{ тс.}$$

Поперечная инерционная сила $F_{п}$, тс, определяется по стандартной формуле:

$$F_{п} = a_{п} Q_{гр}, \quad (3)$$

где $a_{п}$ — удельная поперечная инерционная сила, тс, на тонну массы груза, определяемая по формуле:

$$a_{п} = a_c - \frac{2(a_{ш} - a_c)}{l_{гп}} l_{гп пр}, \quad (4)$$

где $l_{в}$ — база вагона; $l_{гп пр}$ — расстояние от центра тяжести груза (ЦТ_{гр}) до вертикальной плоскости, проходящей через поперечную ось платформы;

a_c , $a_{ш}$ — удельные поперечные инерционные силы для случаев, когда ЦТ_{гр} находится в вертикальных поперечных плоскостях, проходящих соответственно через середину вагона и через шкворневую балку, т.е. $a_c = 0,330$ тс/т, $a_{ш} = 0,550$ тс/т.

Удельная поперечная инерционная сила одной единицы груза:

$$a_{п1} = 0,330 + \frac{2(0,550 - 0,330)}{19,00} \cdot 0 = 0,330 \text{ тс/т.}$$

Поперечная инерционная сила, действующая на одну единицу груза:

$$F_{п1} = 0,330 \cdot 11,55 = 3,795 \text{ тс.}$$

Поперечная инерционная сила, действующая на весь длинномерный груз:

$$F_{п}^{гр} = 0,330 \cdot 52 = 17,160 \text{ тс.}$$

Ветровая нагрузка $W_{п}$, тс, при расчетах принимается направленной по нормали к поверхности груза и определяется из расчета удельной ветровой нагрузки, равной $0,050$ тс/м², по формуле

$$W_{п} = 0,050 S_{гр}, \quad (5)$$

где $S_{гр}$ — площадь боковой наветренной поверхности груза, м².

Ветровая нагрузка, действующая на одну единицу груза и на весь груз с элементами крепления, соответственно равна

$$W_{п1} = 0,05 \cdot 55 = 2,750 \text{ тс;}$$

$$W_{п}^{гр} = 0,05 \cdot 63 = 3,150 \text{ тс.}$$

Инерционная сила, действующая на груз по вертикали, $F_{в}$, тс, определяется по формуле

$$F_{в} = a_{в} Q_{гр}, \quad (6)$$

где $a_{в}$ — удельная вертикальная инерционная сила, кгс.

Вертикальные силы, действующие на одну единицу груза и на весь груз с элементами крепления, соответственно равны

$$F_{в1} = 0,291 \cdot 11,5 = 3,347 \text{ тс;}$$

$$F_{в}^{гр} = 0,291 \cdot 52 = 15,132 \text{ тс.}$$

Поскольку рассматриваемый длинномерный груз имеет малую площадь опирания, необходимо также производить проверку на устойчивость от опрокидывания.

В продольном направлении проверяется возможность опрокидывания груза относительно опорной рамы. Коэффициент запаса устойчивости в продольном направлении $\eta_{пр}$ определяется по формуле

$$\eta_{пр} = \frac{l_{пр}^o}{a_{пр} (h_{ит} - h_{ит}^{пр})}, \quad (7)$$

где $l_{\text{пр}}^0$ — кратчайшее расстояние от проекции ЦТ груза на горизонтальную плоскость до ребра опрокидывания вдоль вагона принимается равным 7,890 м; $h_y^{\text{пр}}$ — высота продольного упора, принимается равной 1,250 м; $h_{\text{цт}}$ — высота центра тяжести груза относительно пола вагона, м.

Значение коэффициента запаса устойчивости в продольном и поперечном направлениях составляет не менее 1,250⁵.

Таким образом, коэффициент запаса устойчивости груза ($h_{\text{цт}} = 1,800$ м) в продольном направлении относительно опорной рамы равен

$$\eta_{\text{пр}}^{\text{отн.рамы}} = \frac{7,890}{1,734(1,800 - 1,250)} = 8,273 > 1,250.$$

Также проверяется возможность опрокидывания груза относительно пола вагона. В данном случае кратчайшее расстояние от проекции центра тяжести груза на горизонтальную плоскость до ребра опрокидывания вдоль вагона принимается $l_{\text{пр}}^0 = 9,390$ м; высота общего центра тяжести груза и рамы относительно пола вагона $h_{\text{цт}} = 1,757$ м; высота продольного упора равна 0 м, тогда

$$\eta_{\text{пр}}^{\text{отн.пола}} = \frac{9,390}{1,734(1,757 - 0,000)} = 3,080 > 1,250.$$

В поперечном направлении проверяется возможность опрокидывания груза с опорными рамами относительно пола транспортера. Коэффициент запаса устойчивости в поперечном направлении $\eta_{\text{п}}$ определяется по формуле

$$\eta_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{гр}} b_{\text{п}}^0}{F_{\text{п}}(h_{\text{цт}} - h_y^{\text{п}}) + W_{\text{п}}(h_w - h_y^{\text{п}})}, \quad (8)$$

где $b_{\text{п}}^0$ — кратчайшее расстояние от проекции ЦТ груза на горизонтальную плоскость до ребра опрокидывания поперек вагона, м, принимается $b_{\text{п}}^0 = 1,350$ м;

$h_y^{\text{п}}$ — высота поперечного упора, м, принимается 0,000 м;

h_w — высота приложения ветровой нагрузки, м;

Таким образом, коэффициент запаса устойчивости в поперечном направлении относительно пола транспортера равен

$$\eta_{\text{п}}^{\text{отн.пола}} = \frac{52 \cdot 1,35}{17,160(1,800 - 0) + 2,750(1,800 - 0)} = 1,960 > 1,250.$$

Кроме того, в поперечном направлении необходимо учесть возможность опрокидывания груза относительно опорной рамной конструкции. В этом случае кратчайшее расстояние от проекции центра тяжести груза

на горизонтальную плоскость до ребра опрокидывания поперек вагона составляет $l_{\text{пр}}^0 = 0,175$ м, высота поперечного упора принимается равной $h_y^{\text{п}} = 1,660$ м, высота приложения ветровой нагрузки $h_w = 1,800$ м.

Тогда коэффициент запаса устойчивости груза относительно рамной конструкции в поперечном направлении составит

$$\eta_{\text{п}}^{\text{отн.рамы}} = \frac{11,500 \cdot 0,175}{3,795(1,800 - 1,660) + 2,750(1,800 - 1,660)} = 2,200 > 1,250.$$

Таким образом, произведенные аналитические расчеты показывают, что рассматриваемый криволинейный длинномерный груз устойчив к опрокидыванию в продольном и поперечном направлениях как относительно предлагаемой для его фиксации рамной конструкции, так и относительно пола вагона.

Груз имеет двухстороннюю верхнюю негабаритность второй степени (Н0020). Нагрузка на ось и погонная нагрузка составляют соответственно 20,25 т/ось и 3,21 т/м и не превышают допустимых значений.

Анализ напряженно-деформированного состояния конструкции, устанавливаемой на платформу. Расчеты напряженно-деформированного состояния удерживающей рамы выполнены в модуле Static Structural программного инженерного комплекса ANSYS Workbench. На рис. 3 приведена конечно-элементная модель предлагаемой конструкции из швеллеров типа 16П, которая включает более 160 тысяч конечных элементов.

Конструкция состоит из металлических швеллеров, выполненных из стали, внутрь которых вложены деревянные бруски, позиционированные по форме груза, как показано на рис. 4.

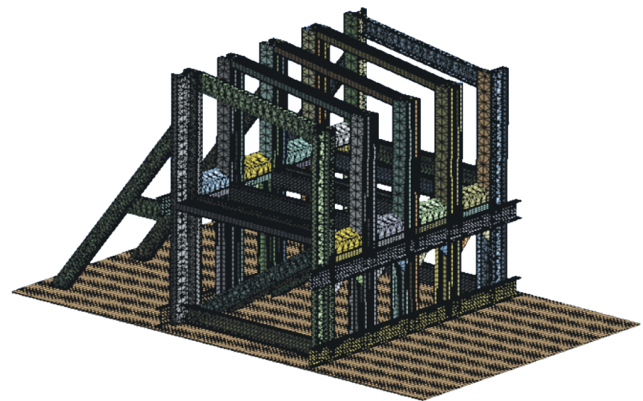


Рис. 3. Конечно-элементная модель конструкции для фиксации арочного длинномерного груза в ANSYS Workbench*

* Источник: разработан авторами

Fig. 3. Finite element model of the device for the arched long goods fixing in ANSYS Workbench*

* Source: developed by the authors

⁵ Там же.

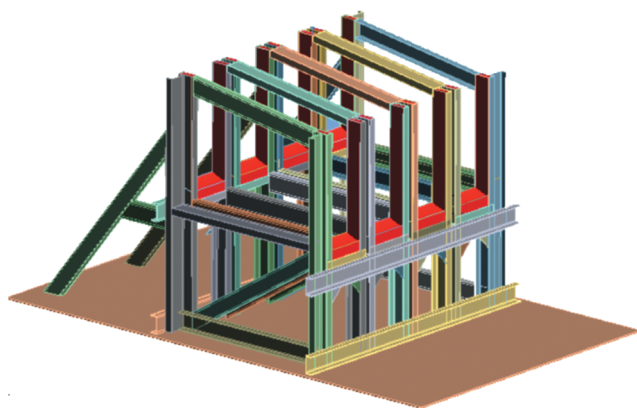


Рис. 4. Позиции деревянных брусков в металлической раме (выделены красным)*

* Источник: разработан авторами

Fig. 4. Positions of wooden blocks in the metal frame (highlighted in red)*
* Source: developed by the authors

Моделирование производилось для двух расчетных режимов, соответствующих параметрам нагружения в продольном и поперечном направлениях. Характеристики материалов для изготовления удерживающего устройства приведены в табл. Коэффициент трения между металлическими и деревянными частями конструкции принят равным 0,4. Также учитывались гравитационные силы для элементов конструкции (ускорение свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$), направленные вертикально вниз.

Таблица

Исходные данные для компьютерного моделирования*

Table

Initial data for computer simulation*

Элементы конструкции	Материал	Модуль упругости, Па	Коэффициент Пуассона
Металлические швеллеры	Ст3сп (ГОСТ 380-2005)	$200,0 \cdot 10^9$	0,300
Деревянные бруски	сосна (ГОСТ 2695-83)	$9,3 \cdot 10^9$	0,3742

* Источник: разработаны авторами

* Source: developed by the authors

Расчеты производились для схемы размещения груза, приведенной на рис. 1. При этом рассматривалось напряженно-деформированное состояние той части конструкции, которая имеет элементы большей длины (на рис. 1 она поддерживает правую часть арочного груза), то есть наименее безопасная с точки зрения прочности. Конструкция, используемая для фиксации четырех единиц арочного груза с другой стороны, (рис. 1, левая часть груза) подобна по числу

и расположению элементов и идентична по используемым материалам.

При определении расчетных значений нагрузок для использования в компьютерной модели учитывались вес груза, продольная, поперечная и вертикальная инерционные силы, ветровая нагрузка и нагрузки от болтов. Расчетная нагрузка на рамную конструкцию в продольном направлении принимается равной 98 кН, в поперечном направлении — 14 кН.

Первый расчетный режим подразумевает сочетание нагрузки от веса груза и сил, действующих на груз в продольном направлении. Схема нагружения приведена на рис. 5. Максимальные эквивалентные напряжения в металлической раме составляют 126,27 МПа (рис. 6) и не превышают предела текучести материала ($\sigma_T = 400,00 \text{ МПа}$), нормальные напряжения в продольном направлении (рис. 7) достигают 119,33 МПа и не превышают допускаемого значения ($[\sigma] = 125,00 \text{ МПа}$), максимальные деформации не превышают 1,6 мм (рис. 8).

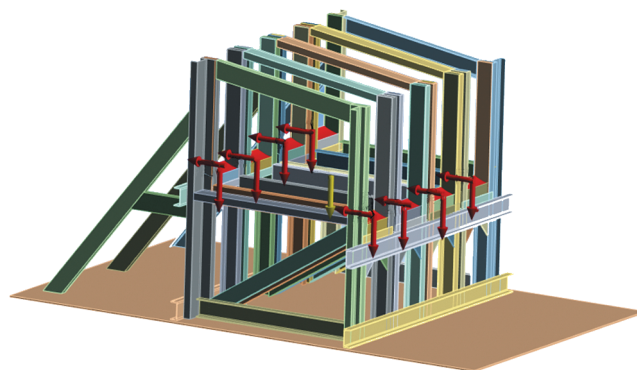


Рис. 5. Расчетная схема для первого режима нагружения*

* Источник: разработан авторами

Fig. 5. The calculation scheme for the first loading mode*

* Source: developed by the authors

Таким образом, в элементах предлагаемой конструкции имеется значительный запас прочности по эквивалентным напряжениям при воздействии продольных расчетных нагрузок.

Второй расчетный режим подразумевает сочетание нагрузки от веса груза и сил, действующих на груз в поперечном направлении. Схема нагружения рамной конструкции приведена на рис. 9.

Максимальные эквивалентные напряжения в металлической рамной конструкции составляют 121,94 МПа (рис. 10), нормальные напряжения в продольном направлении (рис. 11) достигают 117,69 МПа и не превышают соответствующих допускаемых значений. При этом по эквивалентным напряжениям имеется достаточно большой запас прочности. Максимальные деформации составляют 3,3 мм (рис. 12).

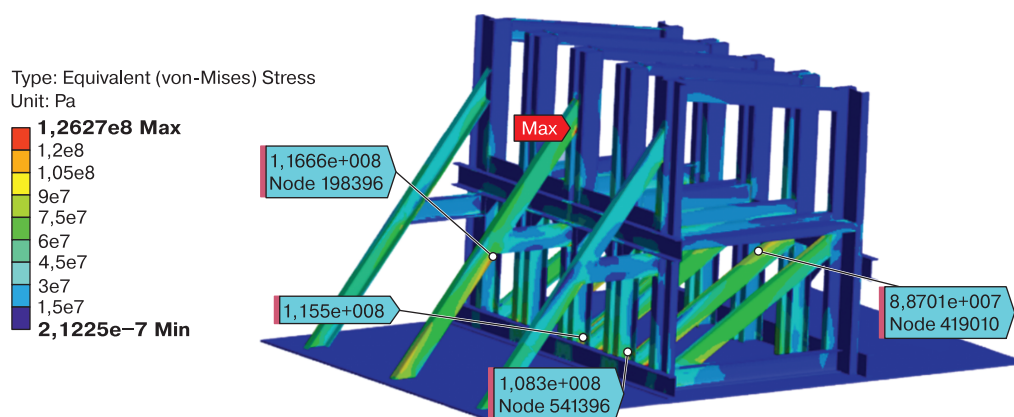


Рис. 6. Результаты расчета эквивалентных напряжений при действии продольных нагрузок*
* Источник: разработан авторами

Fig. 6. Calculation results for the equivalent stresses under the longitudinal loads action*
* Source: developed by the authors

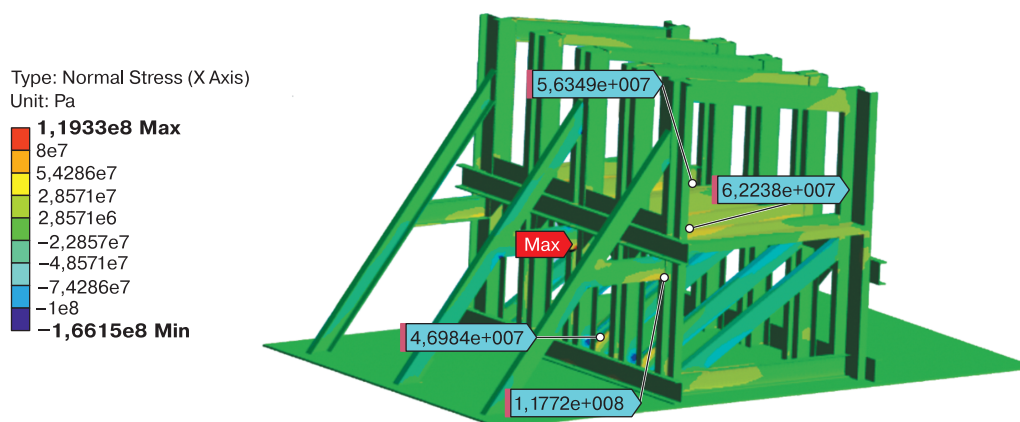


Рис. 7. Результаты расчета нормальных напряжений в продольном направлении при действии продольных нагрузок*
* Источник: разработан авторами

Fig. 7. Calculation results for the normal stresses in the longitudinal direction under the longitudinal loads action*
* Source: developed by the authors

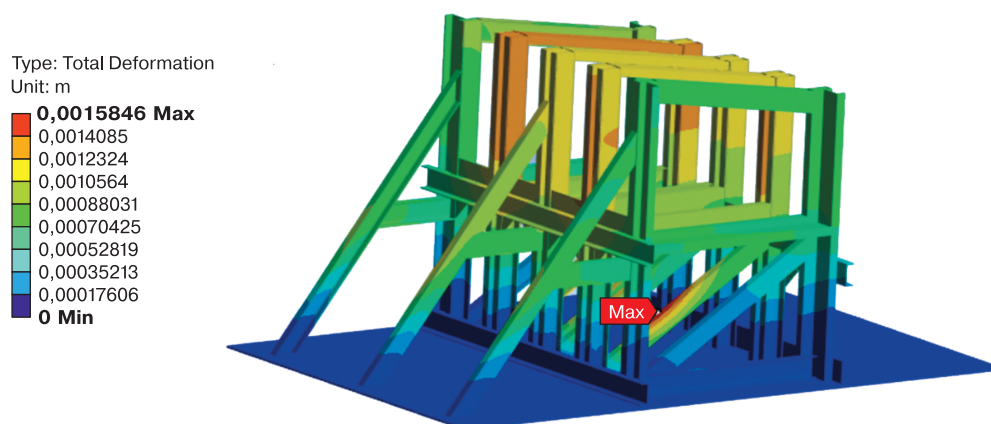


Рис. 8. Результаты расчета деформаций при действии продольных нагрузок*
* Источник: разработан авторами

Fig. 8. Calculation results for the deformations under the longitudinal loads action*
* Source: developed by the authors

На основании произведенных расчетов было выполнено размещение и крепление реального арочного груза на транспортере платформенного типа (рис. 13) и осуществлены его перевозки, которые показали надёжность работы крепления. Сохранность груза и безопасность перевозки были обеспечены в полной мере, не было составлено ни одного акта о нарушении сохранности груза (акт общей формы, коммерческий акт).

Таким образом, решение задач по безопасному размещению и креплению грузов на железнодорожном подвижном составе может быть успешно выполнено с применением цифровых технологий.

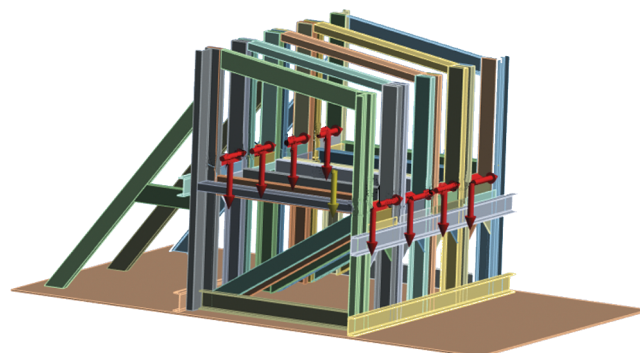


Рис. 9. Расчетная схема для второго режима нагружения*

* Источник: разработан авторами

Fig. 9. Calculation scheme for the second loading mode*

* Source: developed by the authors

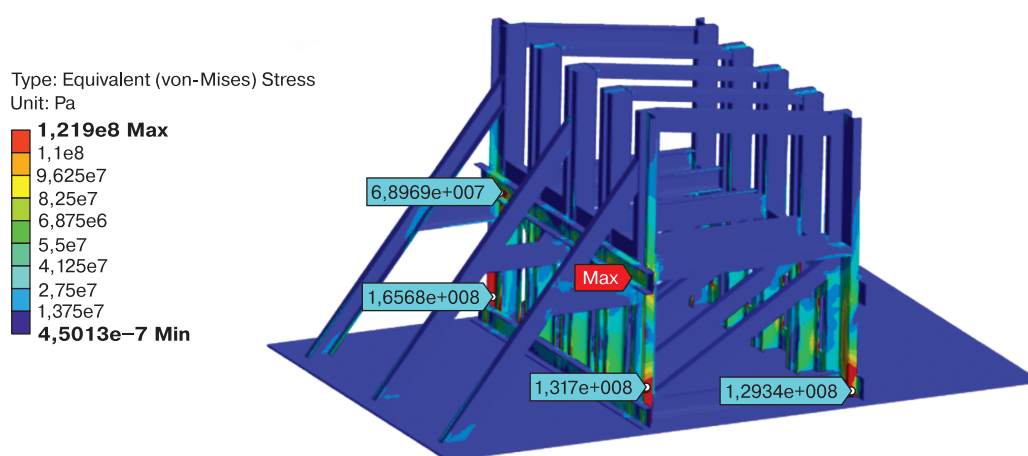


Рис. 10. Результаты расчета эквивалентных напряжений при действии нагрузок в поперечном направлении*

* Источник: разработан авторами

Fig. 10. Calculation results for the equivalent stresses under the loads action in the transverse direction*

* Source: developed by the authors

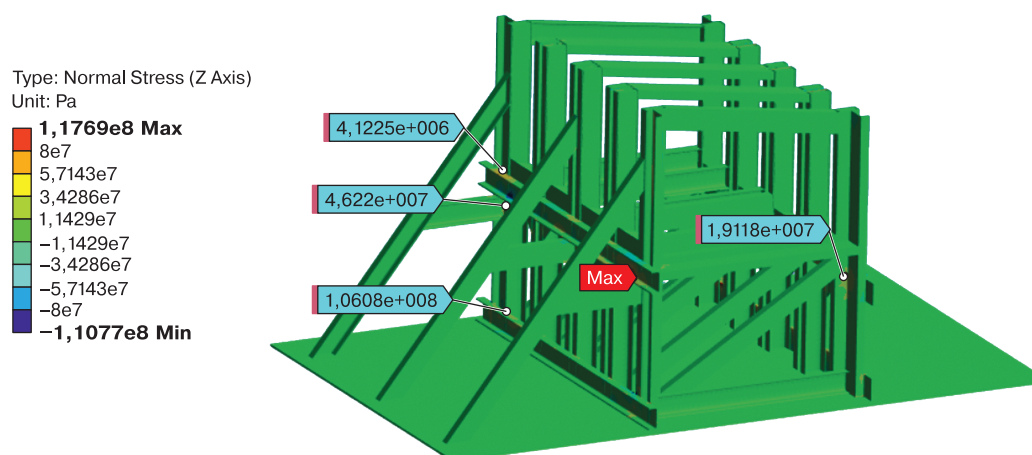


Рис. 11. Результаты расчета нормальных напряжений в поперечном направлении при действии поперечных нагрузок*

* Источник: разработан авторами

Fig. 11. Calculation results for the normal stresses in the transverse direction under the transverse loads action*

* Source: developed by the authors

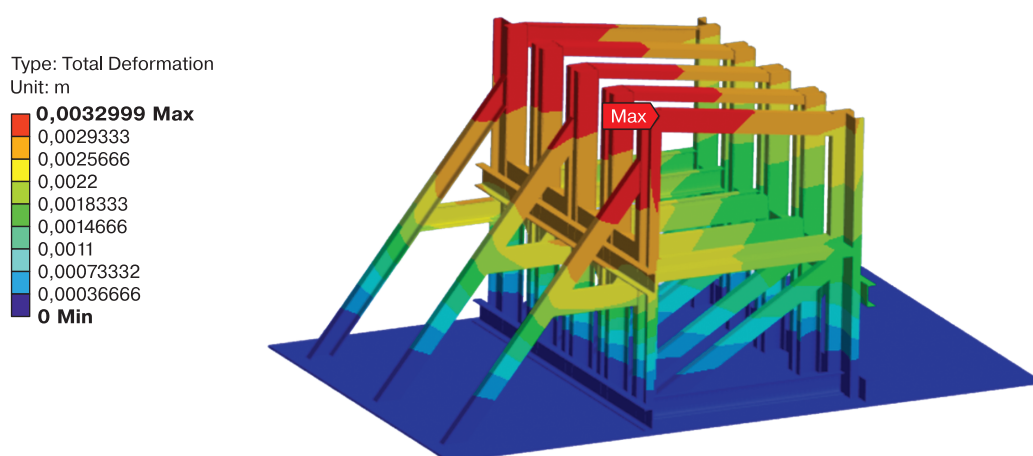


Рис. 12. Результаты расчета деформаций при действии расчетных нагрузок в поперечном направлении*
* Источник: разработан авторами

Fig. 12. Calculation results for the deformations under the action of loads in the transverse direction*
* Source: developed by the authors

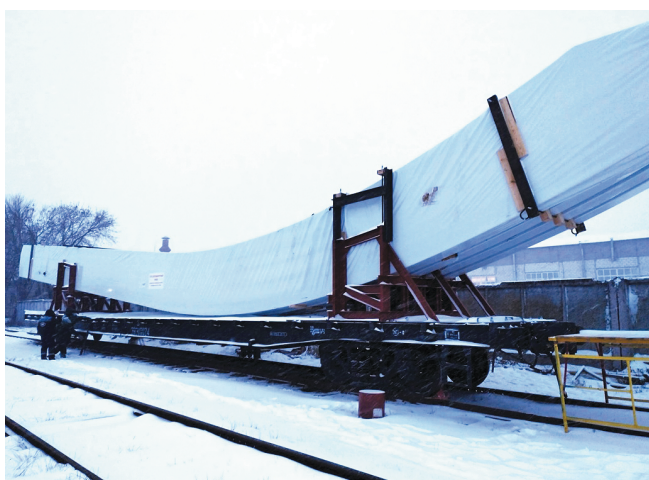


Рис. 13. Арочный груз на транспорте*
* Фото авторов

Fig. 13. The arched goods on the transporter*
* Photo made by the authors

Обсуждение. Подобные расчеты возможно производить для конструкций любого типа, однако необходимо учитывать не только прочностные характеристики предлагаемых удерживающих устройств, но и особенности их практического использования. Основными параметрами, которые следует учитывать, являются вес и доступность приобретения и изготовления составных частей устройства, простота установки и фиксации конструкции на подвижном составе и груза внутри нее, недопустимость повреждения пола вагона при эксплуатации устанавливаемого устройства. Использование современных инженерных программных комплексов при условии создания адекватных моделей позволяет производить необходимые расчеты для изменяющихся

параметров конструкций, материала изготовления, характера нагружения элементов устройства, что позволяет достаточно оперативно получить наиболее рациональный вариант конечного изделия без значительных временных затрат.

Заключение. Анализ напряженно-деформированного состояния предлагаемой конструкции для размещения и крепления длинномерного арочного груза показал, что максимальные значения эквивалентных напряжений при нагружении расчетными нагрузками в продольном и поперечном направлениях соответственно составляют 126,27 МПа и 121,94 МПа, что не превышает предела текучести материала изготовления рамы ($\sigma_T = 400,00$ МПа). Таким образом, предлагаемое устройство позволит повысить безопасность процесса транспортировки и сохранности длинномерных грузов сложной формы при перевозке железнодорожным транспортом за счет обеспечения их устойчивости от опрокидывания и поступательных перемещений при движении поезда на прямолинейных и криволинейных участках пути.

Применение цифровых технологий при выполнении расчетов по размещению и креплению грузов позволит подобрать необходимые параметры фиксирующих грузов устройств, оценить их прочность и надежность, а также повысить точность расчетов и сократить материальные затраты на проведение натурных испытаний в случае их необходимости.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Козлова Н.С., Власова Н.В. Преимущества и особенности перевозки негабаритных грузов железнодорожным транспортом // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях: сб. науч. тр. по итогам межд. науч. конф. Санкт-Петербург: 2018. № 5. С. 45–49. EDN: <https://elibrary.ru/nshvpz>.

Kozlova N. S., Vlasova N. V. Advantages and features of transportation of oversized cargo by rail. In: *Actual issues of technical sciences in modern conditions. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Saint-P. 2018;(5):45–49. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/nshvpz>.

2. Macioszek E. Essential techniques for fastening loads in road transport. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2021;(110): 97–104. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.110.8>.

3. Азиев Я., Ахундова Г., Мамедова У. Особенности перевозки негабаритных грузов автомобильным транспортом // Теория и практика науки: ключевые аспекты: материалы 9-й международной научно-практич. конф. Рим, Италия: 2024. № 42 (189). С. 519–525. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024.053>.

Aziev Ya., Akhundova G., Mamedova U. Features of transportation of oversized cargo by road transport. In: *Theory and Practice of Science: Key Aspects. Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference*. Rome, Italy: 2024;(42):519–525. (In Russ.). <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024.053>.

4. Бодрова М.С. Условия развития и тенденции в перевозке негабаритного груза // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2024. № 5. С. 155–161. <https://doi.org/10.24412/2220-2404-2024-5-5>.

Bodrova M. S. Development conditions and trends in the transportation of oversized cargo. *Humanitarian, socio-economic and social sciences*. 2024;(5):155–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2220-2404-2024-5-5>.

5. Туранов Х.Т., Рузметов Я.О., Якушев А.В. О деформируемом состоянии механической системы «Груз-вагон-крепление» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, № 3. С. 455–468. EDN: <https://elibrary.ru/bajarc>.

Turanov H. T., Ruzmetov Ya. O., Yakushev A. V. On deformable state of the “Cargo-wagon-fastening” mechanical system. *Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering*. 2019;16(3):455–468. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/bajarc>.

6. Чаганова О.С., Быстренкова Т.И., Меньшова Е.В. Расчет средств крепления строительных грузов на современных вагонах сочлененного типа // Механика. Исследования и инновации. 2020. Вып. 13. С. 159–165. EDN: <https://elibrary.ru/aggkdh>.

Chaganova O. S., Bystrenkova T. I., Menshova E. V. Calculation of means of securing construction cargo on modern articulated cars. *Mekhanika. Researches and innovaions*. 2020;(13):159–165. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/aggkdh>.

7. Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Pavliuchenkov M., Kravchenko O., Solčanský S. Situational Adaptation of the Open Wagon Body to Container Transportation. *Applied Sciences*. 2023; 13(15):8605. <https://doi.org/10.3390/app13158605>.

8. Krasoń W., Niezgoda T., Stankiewicz M. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. *Transportation Research Procedia*. 2016;(14):615–624. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.307>.

9. Антропова А.В., Баталов А.В., Козлов В.В., Лагун А.В. Математическая модель оценивания динамических характеристик транспортировки ракетных блоков железнодорожным транспортом // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2020. № 673. С. 159–168. EDN: <https://elibrary.ru/xcdjhd>.

Antropova A. V., Batalov A. V., Kozlov V. V., Lagun A. V. Mathematical model for assessing the dynamic characteristics of transporting rocket blocks by rail. *Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky*. 2020;(673):159–168. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xcdjhd>.

10. Muradian L., Shvets A., Shvets A. Some dynamic processes at longitudinally-transverse shift of the cargo. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*. 2023;(120):187–204. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.120.12>.

11. Васильев С.М. Математическое моделирование динамических воздействий на длинномерные грузы и опорные вагоны // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. 2006. № 1–2(12–13). С. 30–36. EDN: <https://elibrary.ru/yleacn>.

Vasiliev S. M. Mathematical modeling of dynamic impacts on long loads and support cars. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport*. 2006;1–2(12–13):30–36. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yleacn>.

12. Waluś K. J., Olszewski Z., Krawiec P. Tension testing and analysis of cargo lashing straps in road transport. In: *Sustainable environment, development, and energy*. AIP Publishing. 2023;2976(1). <https://doi.org/10.1063/5.0172818>.

13. Giurgiu I. T., Roşca P., Pană I. F. CAD-CAE implementation in cargo securing systems testing. *Proceedings in Manufacturing Systems*. 2014;9(4):239–244.

14. Li M., Wang G., Liu K., Lu Y., Wang J. Experimental and Numerical Analysis of Supporting Forces and Lashing Forces in a Ship Cargo Securing Scheme. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024; 12(1):158. <https://doi.org/10.3390/jmse12010158>.

15. Musayev J., Solonenko V., Zhauyt A., Zhunisbekov S., Smailova G., Buzauova T. Research of the operation of the turnstile support-fastening device during the transportation of a long-dimensional heavy load. *Vibroengineering Procedia*. 2023;(49):80–85. <https://doi.org/10.21595/vp.2023.23185>.

16. Васильев С.М., Железняков А.А., Целковикова Л.П. Совершенствование подвижных турникетно-крепёжных устройств с целью установки на современные типы грузовых вагонов // Механика. Исследования и инновации. 2019. Вып. 12. С. 29–34. EDN: <https://elibrary.ru/rzrcmd>.

Vasiliev S. M., Zheleznyakov A. A., Tselkovikova L. P. Improvement of mobile turnstile and fastening devices for their placement on the modern types of cargo cars. *Mechanics. Researches and Innovations*. 2019;(12): 29–34. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/rzrcmd>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Александрович ПЕТРАЧКОВ, аспирант, заведующий лабораторией «Грузовая, коммерческая работа и тарифы», Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34), AuthorID: 985077, <https://orcid.org/0009-0006-8993-8346>

Марина Григорьевна ГЕГЕДЕШ, канд. техн. наук, доцент, декан машиностроительного факультета, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого (ГГТУ им. П. О. Сухого, 246029, г. Гомель, пр-т. Октября 48); доцент кафедры Техническая физика и теоретическая механика, Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34), AuthorID: 708868, <https://orcid.org/0000-0003-0776-9325>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Siarhei A. PETRACHKOU, Postgraduate Student, Head of the Cargo, Commercial Work and Tariffs Laboratory, Belarusian State University of Transport (246653, Gomel, 34 Kirova St.), AuthorID: 985077, <https://orcid.org/0009-0006-8993-8346>

Maryna G. GEGEDESH,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Dean of the Mechanical Engineering Faculty, Sukhoi State Technical University of Gomel (246029, Gomel, 48, October Ave); Associate Professor of the Technical Physics and Engineering Mechanics Department, Belarusian State University of Transport (246653, Gomel, 34, Kirova St.), AuthorID: 708868, <https://orcid.org/0000-0003-0776-9325>

ВКЛАД АВТОРОВ

Сергей Александрович ПЕТРАЧКОВ. Подготовка данных, разработка идеи, аналитические расчеты, написание рукописи статьи (50 %).

Марина Григорьевна ГЕГЕДЕШ. Разработка компьютерных моделей, подготовка данных для компьютерного моделирования, расчет напряженно-деформированного состояния конструкции, написание и редактирование рукописи статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Siarhei A. PETRACHKOU. Data preparation, idea development, analytical calculations, article writing (50 %).

Maryna G. GEGEDESH. Development of computer models, data preparation for computer modeling, device stress-strain state analysis, follow-on revision of the text (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 08.08.2024, рецензия от первого рецензента получена 19.08.2024, рецензия от второго рецензента получена 27.11.2024, рецензия от третьего рецензента получена 09.01.2025, принята к публикации 31.01.2025.

The article was submitted 08.08.2024, first review received 19.08.2024, second review received 27.11.2024, third review received 09.01.2025, accepted for publication 31.01.2025.