



ISSN 2222-9396 (Print)

УДК 656.225

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-32-42>

К РАСЧЁТУ КРЕПЛЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГРУЗА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ

Туранов Х.Т.¹, Рузметов Я.О.^{2*}, Шихназаров Ж.А.²

¹Ташкентский государственный университет имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан

²Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан

* E-mail: yadgor.ruzmetov@yandex.ru

Аннотация. Представлен сравнительный анализ действующей и уточнённой методик расчёта крепления груза на железнодорожных платформах. Показано, что в соответствие с существующей методикой расчёта, усилие во всех упругих креплениях груза имеет одно и то же значение, независимо от топологии креплений груза в пространстве. Приведены расчёты усилий в упругих элементах крепления по уточнённой методике. Результаты сравнительного анализа показали, что усилия во всех проволочных креплениях, в отличие от существующей методики, имеют различные значения. Отмечен основной недостаток уточнённой методики расчёта – прочность отдельных элементов креплений не обеспечена, поскольку усилия в них более чем два раза превышают допустимые значения.

Ключевые слова: железная дорога, железнодорожная платформа, проволочные крепления, продольные силы, усилия, методика расчёта

© Туранов Х.Т., Рузметов Я.О., Шихназаров Ж.А., 2020

Поступила: 11 апреля 2020; Принята к публикации: 16 мая 2020; Опубликовано: 24 декабря 2020

Для цитирования:

Туранов Х.Т., Рузметов Я.О., Шихназаров Ж.А. К расчёту крепления твердотельного груза при воздействии продольных сил // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2020. Т.10. №1. С.32-42. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-32-42>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ISSN 2222-9396 (Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-32-42>



TO THE CALCULATION OF FASTENING A SOLID LOAD UNDER THE INFLUENCE OF LONGITUDINAL FORCES

Turanov Kh.T.¹, Ruzmetov Iai.O.^{2*}, Shikhnazarov Zh.A.²

¹Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

²Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

* E-mail: yadgor.ruzmetov@yandex.ru

Abstract. A comparative analysis of the current and updated methods for calculating the fastening of cargo on railway flatcar is presented. It is shown that, in accordance with the existing calculation method, the force in all elastic fasteners has the same value, regardless of the topology of the cargo fastenings. Calculations of forces in elastic fastening elements according to a refined method are presented. The results of a comparative analysis of the calculation results showed that the forces in all wire fastenings, in contrast to the existing method, have different meanings. The main drawback of the refined calculation method is noted – the strength of individual fastening elements is not ensured, since the forces in them are more than twice the permissible values.

Keywords: railway, flatcar, wire fastenings, longitudinal forces, calculation method

© Turanov Kh.T., Ruzmetov Iai.O., Shikhnazarov Zh.A., 2020

Received: April 11, 2020; Accepted: May 16, 2020; Published: December 24, 2020

For citation:

Turanov Kh.T., Ruzmetov Iai.O., Shikhnazarov Zh.A. To the calculation of fastening a solid load under the influence of longitudinal forces // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2020, vol.10, no.1, pp.32-42. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-32-42>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Обеспечение надёжного крепления грузов на железнодорожном подвижном составе является общеизвестной проблемой [1–24]. Так, например, в [1] изучено соударение вагона о группу «стоящих» вагонов на путях сортировочного парка. В этот момент может происходить смещение груза относительно пола вагона в сторону удара на 30.5 мм. В [1] также замечено, что сильные маневровые соударения вагонов при их роспуске с сортировочной горки могут приводить не только к повреждениям груза, но также и креплений груза и элементов подвижного состава. Авторами [1] высказано мнение о том, что необходимо обеспечивать определённые распределения усилий между различными элементами крепления, например, проволочными растяжками и упорными брусками, имеющими различную жёсткость. Однако, это мнение до сих пор не нашло отражения в нормативно-техническом документе [12], содержащем описание действующей методики расчёта крепления груза на железнодорожной платформе.

Авторы в работе [25] отмечают, что в исследовании [2] (стр. 35–60, 100–128) особое внимание уделяется креплению различных грузов на железнодорожных вагонах, авто- и морском транспорте. В [2] имеются результаты расчётов крепления груза упорными брусками, которые крепятся к полу вагона гвоздями (стр. 64–77). Причём, в расчётах вертикального и горизонтального ускорений, величину статического коэффициента трения (то есть трения сцепления) между деревянным полом вагона и гвоздями принимают равной 0.3 [1] (стр. 75–77), что меньше рекомендуемого значения, равного 0.45 [14].

Кроме того, в [2] все аналитические формулы получены с использованием принципа Даламбера, согласно которому сила инерции является фиктивной [5, 14]. Сила инерции Даламбера не имеет объекта действия. По этой причине в теоретической механике [5, 14] данную силу включают в условие равновесия сил лишь для того, чтобы учесть ускорение движения тела. Однако, усилия в креплениях или плетях, расположенных перпендикулярно продольной оси вагона, в работе [2] считаются известными и определяющими ускорение, например, в вертикальном и поперечном направлениях. Затем величину этих ускорений сравнивают с рекомендуемыми значениями ускорения вагона, которые появляются при движении вагона.

В [5] с использованием понятия «сдвигающих» и «удерживающих» сил впервые представлен пример расчёта крепления штучного груза на платформе, когда груз удерживается от сдвига деревянными брусками, прибиваемыми гвоздями к полу вагона. Однако результаты исследований [5] также не нашли применения в действующей методике [12].

Использованные в нормативно-техническом документе [12] формулы расчёта крепления груза на железнодорожных платформах являются недостаточно корректными, поскольку усилия в креплениях получаются одинаковыми, независимо от их пространственного

расположения. Некорректность формул в [12], по которым проводят расчёт гибких элементов крепления груза, доказана в [13–17]. Отсюда становится очевидным актуальность технической проблемы расчёта крепления грузов, перевозимых на железнодорожных платформах. Решение данной проблемы, на наш взгляд, представляет практический интерес для транспортной науки.

Остальная часть статьи организована следующим образом: во втором разделе представлен пример расчёта усилий в гибких элементах крепления груза на железнодорожной платформе; третий раздел содержит расчёт усилия в проволочных креплениях груза с использованием существующей методики [12]; в четвёртом разделе представлена уточнённая методика [11] определения усилия в креплениях груза, а также пример расчёта с её использованием; в заключении показаны недостатки существующей методики и обосновывается перспективность использования предлагаемой уточнённой методики расчёта крепления груза на железнодорожных платформах.

2. Расчёт усилий в гибких элементах крепления груза на железнодорожной платформе

В разделе представлен пример расчётов усилий в гибких элементах крепления груза на железнодорожной платформе, выполненных в соответствии с методикой [22]. Схема размещения и крепления груза на платформе с использованием упругих и упорных средств крепления представлена на **рис.1**.

Исходные данные расчётного примера:

- G – сила тяжести груза, 450 кН;
- $a_{ex} = 1.6 \cdot g$ – переносное ускорение вагона при движении в продольном направлении, m/c^2 ;
- $k_{д.х} = a_{ex}/g = 1.6$ – коэффициент, учитывающий продольную динамику вагона [22];
- $f_{сц.}$ – коэффициент трения при сцеплении, принимается для пары «металл – дерево» равным 0.45 [13–15];
- $k_l = 0.6$ – коэффициент, учитывающий состояние пола вагона;
- $n_{кр.х} = 16$ – количество гвоздей, в соответствии со схемой **рис.1**, шт.;
- $n_{бр.х} = 6$ – количество упорных брусков, в соответствии со схемой **рис.1**, шт.;
- $[R_{кр}] = 1.08$ – допускаемое значение силы на один гвоздь, кН [12].

Вычисление продольных сил, воспринимаемых упругими и упорными элементами крепления, производится в соответствии с методикой, представленной в [5, 13–15, 22]. Вычисления производились с использованием программы MathCAD [26].

Переносная сила инерции в продольном направлении и сила трения при сцеплении определяются, соответственно, как [16, 17]

$$I_{ex} = k_{д.х} G, \quad (1)$$

$$F_{тр.сц.х} = f_{сц.} G. \quad (2)$$

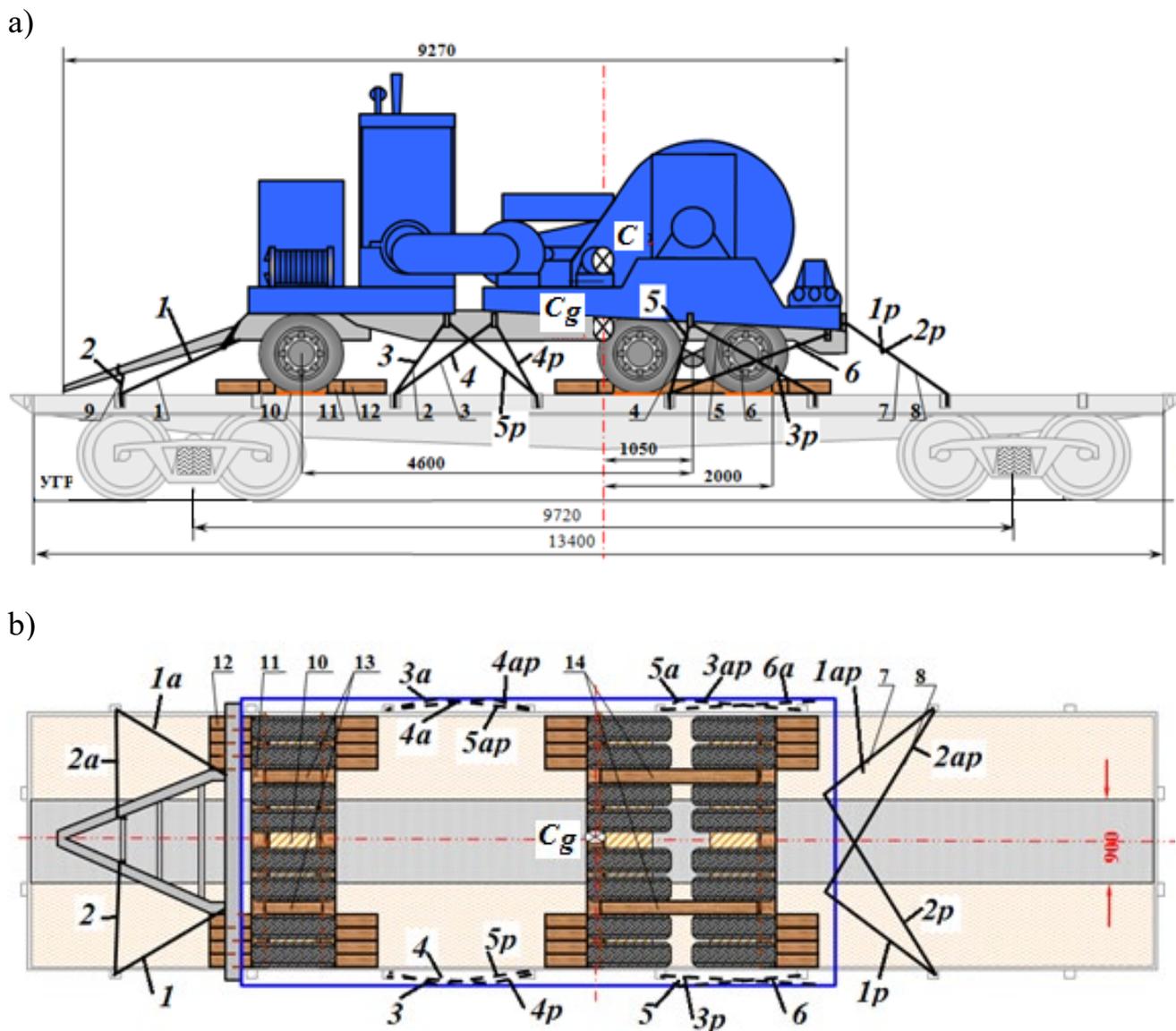


Рис. 1. Схема размещения и крепления груза на платформе с использованием упругих и упорных средств крепления: а) вид сбоку; б) вид сверху; 1 – 6, 1а – 6а; 1р – 6р, 1ар – 6ар – упругие элементы крепления различных направлений

Fig. 1. Scheme of placing and fastening cargo on the flatcar using elastic and solid fastening fixtures: a) side view; b) top view; 1 – 6, 1а – 6а; 1р – 6р, 1ар – 6ар – elastic fastening elements of different directions

Подставляя исходные данные в (1) и (2), получим [22]

$$I_{ex} = k_{dx} G = 1.6 \cdot 450 = 720 \text{ кН},$$

$$F_{тр.сц.х} = f_{сц} G = 0.45 \cdot 450 = 202.5 \text{ кН}.$$

Продольная сдвигающая сила $F_{сд.х}$ (см. формулу (3.9) в [14]) рассчитывается как

$$F_{сд.х} = F_x = I_{ex} = 720 \text{ кН}.$$

Значение продольной силы, которая воспринимается упругими элементами крепления груза, рассчитывается по формуле (4.6) в [5] и/или (7.15) в [15]

$$\Delta F_x = F_{сд.х} - F_{тр.сц.х}. \quad (3)$$

С учетом исходных данных и результатов, полученных при расчётах по формулам (1) и (2), величина ΔF_x будет равна

$$\Delta F_x = 720 - 202.5 = 517.5 \text{ кН}.$$

Расчёт усилий в упругих элементах крепления выполним по рекомендуемым формулам, представленным в [15]. Проекция упругих сил крепления на горизонтальную ось вагона рассчитывается по следующим формулам (7.18а) в [15]

$$R0_{kx} = R0 \cdot \sum_{i=1}^{i=n_{оп.х}} \left(\frac{a_i}{l_i} + \frac{a_{ia}}{l_{ia}} \right), k = 1, \quad (4)$$

$$R0_{kx} = R0 \cdot \sum_{i=1}^{i=n_{op,x}} \left(\frac{a_{ip}}{l_{ip}} + \frac{a_{iap}}{l_{iap}} \right), k = 2. \quad (4a)$$

где $R0$ – среднее значение усилий от скруток проволочных креплений, которым подвергаются эти крепления при подготовке груза к отправке, $R0 = 20$ кН; l_i, l_{ia}, l_{ip} ,

l_{iap} – длины креплений различных направлений (см. **рис. 1**); $a_i, a_{ia}, a_{ip}, a_{iap}$ – проекции креплений различных направлений на продольную ось вагона, м; k – число направлений, $k = 2$; i – число упругих элементов крепления в каждом направлении, $i = 6$.

Численные значения геометрических параметров креплений (формулы 4 и 4a) представлены в **табл. 1**.

Таблица 1. Длины упругих креплений и величины их проекций на горизонтальную (продольную) ось вагона [22]
Table 1. Lengths of elastic fastening and the values of their projections on the horizontal (longitudinal) axis of the flatcar

Направление k	Параметр элемента крепления	Длина, м					
$k = 1$	a_i	1.19	0.041	0.52	1.095	0.232	1.861
	l_i	1.467	1.087	1.06	1.432	0.952	12.078
	a_{ia}	1.19	0.041	0.52	1.095	0.232	1.861
	l_{ia}	1.497	1.087	1.06	1.432	0.952	2.078
$k = 2$	a_{ip}	1.19	1.286	1.382	0.52	0.903	0
	l_{ip}	1.786	2.515	1.662	1.06	1.292	0
	a_{iap}	1.286	1.286	1.382	0.52	0.903	0
	l_{iap}	1.851	2.515	1.662	1.06	1.292	0

Подставив в формулы (4 и 4a) данные из **табл. 1**, с учетом симметричного размещения груза относительно продольной оси вагона, получим, кН

$$R0_{1x} = 20 \cdot 2 \cdot \left(\frac{1.19}{1.467} + \frac{0.041}{1.087} + \frac{0.52}{1.06} + \frac{1.095}{1.432} + \frac{0.232}{0.952} + \frac{1.861}{2.078} \right) = 40 \cdot (0.811 + 0.038 + 0.49 + 0.769 + 0.244 + 0.896) = 40 \cdot 3.24 = 129.73,$$

$$R0_{2x} = 20 \cdot 2 \cdot \left(\frac{1.19}{1.786} + \frac{1.286}{2.515} + \frac{1.382}{1.662} + \frac{0.52}{1.06} + \frac{0.903}{1.292} \right) = 40 \cdot (0.666 + 0.511 + 0.8315 + 0.4906 + 0.699) = 40 \cdot 3.213 = 128.523.$$

Разность между проекциями сил разных направлений на продольную ось вагона, кН

$$FR0_{x0} = R0_{1x} - R0_{2x} = 129.73 - 128.523 = 1.207.$$

Проекции упругих сил крепления на вертикальную ось вагона рассчитываются по следующим формулам 7.19a в [15]

$$R0_{kz} = R0 \cdot \sum_{i=1}^{i=n_{op,x}} \left(\frac{h_i}{l_i} + \frac{h_{ia}}{l_{ia}} \right), k = 1, \quad (5)$$

$$R0_{kz} = R0 \cdot \sum_{i=1}^{i=n_{op,x}} \left(\frac{h_{ip}}{l_{ip}} + \frac{h_{iap}}{l_{iap}} \right), k = 2, \quad (5a)$$

где $h_i, h_{ia}, h_{ip}, h_{iap}$ – проекции креплений различных направлений на вертикальную ось вагона, м (**табл. 2**).

Таблица 2. Величины проекций упругих креплений на вертикальную ось вагона
Table 2. Values of projections of elastic fastening on the vertical axis of the flatcar

Направление k	Параметр элемента крепления	Длина, м					
$k = 1$	h_i	0.605	0.302	0.907	0.907	0.907	0.907
	h_{ia}	0.605	0.302	0.907	0.907	0.907	0.907
$k = 2$	h_{ip}	1.008	1.008	0.907	0.907	0.907	0
	h_{iap}	1.008	1.008	0.907	0.907	0.907	0

Подставив в формулы (5 и 5a) данные из **табл. 2**, с учетом симметричного размещения груза относительно продольной оси вагона, получаем следующие значения проекции упругих сил от предварительных скруток проволоки крепления на вертикальную ось, кН

$$R0_{1z} = 20 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0.605}{1.467} + \frac{0.302}{1.087} + \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.907}{1.432} + \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.907}{2.078} \right) = 40 \cdot (0.412 + 0.278 + 0.858 + 0.633 + 0.952 + 0.432) = 40 \cdot 3.569 = 142.76,$$

$$R0_{2z} = 20 \cdot 2 \cdot \left(\frac{1.008}{1.786} + \frac{1.008}{2.515} + \frac{0.907}{1.662} + \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.907}{1.292} \right) = 40 \cdot (0.565 + 0.401 + 0.546 + 0.856 + 0.702) = 40 \cdot 3.06 = 122.374.$$

Вычисление силы трения сцепления от усилия предварительных скруток проволоки крепления $R0$ на вертикальную ось производится по формуле (7.11) в [15]

$$FR0_{cu,kz} = f_{cu} \cdot R0_{iz}, k = 1, 2. \quad (6)$$

С учетом рассчитанных значений RO_{1z} и RO_{2z} получаем следующие значения силы трения сцепления от предварительных скруток проволоки крепления, кН

$$FR0_{сц.1z} = 0.45 \cdot 142.76 = 64.241,$$

$$FR0_{сц.2z} = 0.45 \cdot 122.374 = 55.068.$$

Тогда сумма сил трения сцепления от предварительных скруток проволоки крепления будет равна, кН

$$\Delta FR0_{сц.1z} = FR0_{сц.1z} + FR0_{сц.2z} =$$

$$= 64.241 + 55.068 = 119.309.$$

В результате расчётов установлено, что проекции элементов крепления груза на вертикальную ось значительно влияют на величину силы трения по продольной оси вагона. Причиной тому является увеличение величины удерживающей силы.

Удерживающую силу вдоль вагона от усилия предварительных скруток проволоки крепления рассчитаем по предлагаемой нами формуле

$$FR0_{сц.уд.х0} = F_{тр.сц.х} + FR0_{х0} + FR0_{тр.сц.х0}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) данные, полученные в результате расчётов по формулам (1), (4), (4а) и (6), получим, кН $FR0_{сц.уд.х0} = 202.5 + 1.207 + 119.309 = 323.016.$

Реакция упорных брусков рассчитывается по формулам (4.5) в [15] и/или (46) в [12]

$$R_{бр.х} = k_1 n_{кр.х} n_{бр.х} [R_{кр}]. \quad (8)$$

Подставляя исходные данные в (8), получим реакции упорных брусков с учётом принятого в расчётах количеством гвоздей, кН

$$R_{бр.х} = 0.6 \cdot 16 \cdot 6 \cdot 1.08 = 62.208.$$

Сумма всех «удерживающих» сил вдоль продольной оси вагона с учётом реакции упорных брусков рассчитывается по формуле

$$FR0_{сц.уд.х} = FR0_{тр.сц.х} + R_{бр.х}. \quad (9)$$

Удерживающую силу вычислим по формулам (7) и (8), подставив результаты расчётов в (9), кН

$$FR0_{сц.уд.х} = 202.5 + 62.208 = 264.708.$$

Продольная сила, воспринимаемая элементами крепления груза, определится как разность между сдвигающей и удерживающей силами (формула (7.15) в [15])

$$\Delta FR0_{бр.сц.х} = F_{сд.х} - FR0_{сц.уд.х} \quad (10)$$

Подставляя результаты расчётов по формулам (1) и (9), в формулу (10), получим, кН

$$\Delta FR0_{бр.сц.х} = 720 - 264.798 = 455.292.$$

Как видно, сдвигающая сила по величине превышает удерживающую. Это является причиной возможного сдвига груза вдоль вагона, который сопровождается выдёргиванием гвоздей упорных брусков.

3. Расчёт усилий в проволочных креплениях груза в соответствии с существующей методикой

Усилия в проволочных креплениях груза при воздействии продольных сил определим по формуле (39)

в [12], которую для удобства расчёта представим в следующем виде

$$R_{kx} = \frac{\Delta F_{бр.сц.х}}{a}, \quad k = \overline{1, 2}, \quad a \in \{b1, b2\}, \quad (11)$$

где $\Delta F_{бр.сц.х}$ – продольная сила, воспринимаемая упругими и упорными элементами крепления (см. формулу (10)), где $\Delta F_{бр.сц.х} = 455.292$ кН), кН; $b1, b2$ – безразмерные числа, которые определяются с учётом заданных значений физико-геометрических параметров проволочных креплений по формулам

$$b1 = \left(f_{сц} \times \frac{h_i}{l_i} + \frac{a_i}{l_i} \right) + \left(f_{сц} \times \frac{h_{ip}}{l_{ip}} + \frac{a_{ip}}{l_{ip}} \right), \quad i = \overline{1, 6}, \quad (12)$$

$$b2 = \left(f_{сц} \times \frac{h_{ia}}{l_{ia}} + \frac{a_{ia}}{l_{ia}} \right) + \left(f_{сц} \times \frac{h_{iap}}{l_{iap}} + \frac{a_{iap}}{l_{iap}} \right), \quad i = \overline{1, 6}, \quad (13)$$

где h_i, a_i и l_i ; h_{ip}, a_{ip} и l_{ip} ; h_{ia}, a_{ia} и l_{ia} ; h_{iap}, a_{iap} и l_{iap} – рассчитанные по данным схемы (рис. 1) значения проекции упругих элементов крепления различных направлений, соответственно, на вертикальную и продольную ось вагона, а также длины этих креплений, м. Для рассматриваемого расчётного примера значения этих переменных приведены в табл. 1, 2.

Здесь необходимо отметить, что вывод формулы (39) в [12] общеизвестен и представлен в [13] (см. С. 133-134).

Подставляя данные табл. 1, 2 в формулы (12) и (13), с учетом того, что коэффициент трения сцепления

$f_{сц} = 0.45$, получаем

$$b1 = \left(\begin{aligned} & \left(0.45 \times \frac{0.605}{1.467} + \frac{1.19}{1.467} \right) + \left(0.45 \times \frac{0.605}{1.786} + \frac{1.19}{1.786} \right) + \\ & + \left(0.45 \times \frac{0.302}{1.087} + \frac{0.041}{1.087} \right) + \left(0.45 \times \frac{0.302}{2.515} + \frac{0.041}{2.515} \right) + \\ & + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.52}{1.06} \right) + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.662} + \frac{0.52}{1.662} \right) + \\ & + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.432} + \frac{1.095}{1.432} \right) + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{1.095}{1.06} \right) + \\ & + \left(0.45 \times \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.232}{0.952} \right) + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.232}{1.292} \right) + \\ & + \left(0.45 \times \frac{0.907}{2.078} + \frac{1.861}{2.078} \right) \end{aligned} \right) = 8.61,$$

$$b2 = \left(\begin{aligned} & \left(0.45 \times \frac{0.605}{1.467} + \frac{1.19}{1.467} \right) + \left(0.45 \times \frac{1.008}{1.851} + \frac{1.286}{1.851} \right) + \\ & + \left(0.45 \times \frac{0.302}{1.087} + \frac{1.286}{1.087} \right) + \left(0.45 \times \frac{1.008}{2.515} + \frac{1.286}{2.515} \right) + \\ & + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{1.382}{1.06} \right) + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.662} + \frac{1.382}{1.662} \right) + \\ & + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.432} + \frac{0.52}{1.432} \right) + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.52}{1.06} \right) + \\ & + \left(0.45 \times \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.903}{0.952} \right) + \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.903}{1.292} \right) \end{aligned} \right) = 9.985.$$

С учетом полученных значений безразмерных чисел b_1, b_2 и величины продольных сил $\Delta F_{\text{бр.ц.х}} = 455.292$ кН, а также учитывая несимметричность расположения элементов крепления разных направлений относительно продольной оси вагона, по формуле (11) получим, кН

$$R_{1x} = \frac{455.292}{8.61} = 52.879, R_{2x} = \frac{455.292}{9.985} = 45.598.$$

В результате представленных расчётов по существующей методике становится очевидным, что усилия во всех проволочных креплениях груза при воздействии продольных сил, независимо от различного расположения геометрических параметров креплений в пространстве, имеют примерно одинаковое значение. Например, одного направления $R_{1x} = 52.9$, а другого – $R_{2x} = 45.6$ кН. Это не соответствует действительности, поскольку различным по длине упругим элементам крепления должны соответствовать различные значения усилия в них.

Кроме того, рассчитанная по существующей методике сумма усилий во всех упругих креплениях значительно больше допустимого (24.8 кН). Это может привести к неверному выводу о том, что прочность креплений с диаметром 6 мм и количеством нитей 8 шт. недостаточна. Однако, учитывая, что при подготовке груза к отправке они подвергались предварительной закрутке усилиями $R_i = 20$ кН, прочность всех упругих элементов креплений на самом деле обеспечивается. Таким образом, можно сделать вывод о некорректности использования существующей методики расчёта крепления груза [12] для обеспечения безопасности перевозочного процесса.

4. Определение усилия в креплениях груза по уточнённой методике

Усилия в проволочных креплениях при воздействии продольных сил находим согласно формуле (1) [1] или [11] как

$$R_{ix} = Z_{kx} \times \frac{n_i}{l_i} \times \frac{a_i}{l_i}, k = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 6}, \quad (14)$$

$$R_{ipx} = Z_{kx} \times \frac{n_{ip}}{l_{ip}} \times \frac{a_{ip}}{l_{ip}}, k = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 6}, \quad (14a)$$

где Z_{kx} – физический параметр, определяемый по формуле [11]

$$Z_{kx} = \frac{\Delta F_{\text{бр.ц.х}}}{C0_{\text{ц.кx}}}, k = \overline{1, 2}, \quad (15)$$

где $\Delta F_{\text{бр.ц.х}}$ – продольная сила, действующая на упругие и упорные элементы крепления (см. формулу

(10)); $c0_{\text{ц.кx}}$ – параметры упругих элементов крепления, определяемые по формуле (2) [1] и [11].

Параметры упругих элементов крепления $c0_{\text{ц.кx}}$, расположенных вдоль вагона, при коэффициенте трения сцепления $f_{\text{ц.}}$ равным 0.45, рассчитываются по формулам, полученных нами из формулы (2) [11]

$$c0_{\text{ц.1x}} = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_i}{l_i} \times \left(f_{\text{ц.}} \times \frac{h_i}{l_i} + \frac{a_i}{l_i} \right) \times \frac{a_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_{ia}}{l_{ia}} \times \left(f_{\text{ц.}} \times \frac{h_{ia}}{l_{ia}} + \frac{a_{ia}}{l_{ia}} \right) \times \frac{a_{ia}}{l_{ia}}, \quad (16)$$

$$c0_{\text{ц.2x}} = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_i}{l_i} \times \left(f_{\text{ц.}} \times \frac{h_{ip}}{l_{ip}} + \frac{a_{ip}}{l_{ip}} \right) \times \frac{a_{ip}}{l_{ip}} + \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_{ip}}{l_{ip}} \times \left(f_{\text{ц.}} \times \frac{h_{iap}}{l_{iap}} + \frac{a_{iap}}{l_{iap}} \right) \times \frac{a_{iap}}{l_{iap}}, \quad (17)$$

где n_i – число нитей в проволочных креплениях, $n_i = 8$ штук.

Отметим, что в данном расчётном примере геометрические параметры креплений имеют значения, приведённые в табл. 1, 2.

Подставляя исходные данные из табл. 1 и табл. 2 в формулы (16) и (17), получаем, 1/м

$$c0_{\text{ц.1x}} = \left(\begin{aligned} & \frac{8}{1.467} \left(0.45 \times \frac{0.605}{1.467} + \frac{1.19}{1.467} \right) \frac{1.19}{1.467} + \\ & + \frac{8}{1.786} \left(0.45 \times \frac{0.605}{1.786} + \frac{1.19}{1.786} \right) \frac{1.19}{1.786} + \\ & + \frac{8}{1.087} \left(0.45 \times \frac{0.302}{1.087} + \frac{0.041}{1.087} \right) \frac{0.041}{1.087} + \\ & + \frac{8}{2.515} \left(0.45 \times \frac{0.302}{2.515} + \frac{0.041}{2.515} \right) \frac{0.041}{2.515} + \\ & + \frac{8}{1.06} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.52}{1.06} \right) \frac{0.52}{1.06} + \\ & + \frac{8}{1.662} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.662} + \frac{0.52}{1.662} \right) \frac{0.52}{1.662} + \\ & + \frac{8}{1.432} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.432} + \frac{1.095}{1.432} \right) \frac{1.095}{1.432} + \\ & + \frac{8}{1.06} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{1.095}{1.06} \right) \frac{1.095}{1.06} + \\ & + \frac{8}{0.952} \left(0.45 \times \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.232}{0.952} \right) \frac{0.232}{0.952} + \\ & + \frac{8}{1.292} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.232}{1.292} \right) \frac{0.232}{1.292} + \\ & + \frac{8}{2.078} \left(0.45 \times \frac{0.907}{2.078} + \frac{1.861}{2.078} \right) \frac{1.861}{2.078} \end{aligned} \right) = 34.64,$$

$$c0_{\text{сш.2x}} = \left(\begin{aligned} & \frac{8}{1.467} \left(0.45 \times \frac{0.605}{1.467} + \frac{1.19}{1.467} \right) \frac{1.19}{1.467} + \\ & + \frac{8}{1.851} \left(0.45 \times \frac{1.008}{1.851} + \frac{1.286}{1.851} \right) \frac{1.286}{1.851} + \\ & + \frac{8}{1.087} \left(0.45 \times \frac{0.302}{1.087} + \frac{1.286}{1.087} \right) \frac{1.286}{1.087} + \\ & + \frac{8}{2.515} \left(0.45 \times \frac{1.008}{2.515} + \frac{1.286}{2.515} \right) \frac{1.286}{2.515} + \\ & + \frac{8}{1.06} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{1.382}{1.06} \right) \frac{1.382}{1.06} + \\ & + \frac{8}{1.662} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.662} + \frac{1.382}{1.662} \right) \frac{1.382}{1.662} + \\ & + \frac{8}{1.432} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.432} + \frac{0.52}{1.432} \right) \frac{0.52}{1.432} + \\ & + \frac{8}{1.06} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.52}{1.06} \right) \frac{0.52}{1.06} + \\ & + \frac{8}{0.952} \left(0.45 \times \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.903}{0.952} \right) \frac{0.903}{0.952} + \\ & + \frac{8}{1.292} \left(0.45 \times \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.903}{1.292} \right) \frac{0.903}{1.292} \end{aligned} \right) = 31.714.$$

Подставляя полученные значения $c0_{\text{сш.кx}}$ в формулу (15), получим, кН·м

$$Z_{1x} = \frac{455.292}{34.64} = 13.144; Z_{2x} = \frac{455.292}{31.714} = 14.356.$$

Результаты расчёта усилий в элементах креплений груза по формулам (14) и (14а) с учетом значений данных, полученных по формулам (15) – (17), сведены в табл. 3.

Анализ результатов расчётов усилий в упругих элементах крепления по формулам (1) и (2) [1] и [11] позволяет сделать вывод о том, что усилия во всех проволочных креплениях (растяжках), в отличие от существующей методики расчёта (см. формулу (11)), имеют различные значения, что соответствует действительности. Кроме того, усилия во всех проволочных креплениях с диаметром 6 мм и количеством нитей 8 шт. оказались меньше, чем допустимые (24.8 кН). Исключение составляет вторая пара проволочных креплений (табл. 3). Это говорит о том, что прочность второй пары проволочных креплений не обеспечена, в результате чего произойдёт их разрушения в процессе перевозки груза.

Таким образом, показано, что существующая и уточнённая методики не позволяют с достаточной точностью определять расчётные значения усилий в упругих элементах крепления груза в вагоне. Учитывая недостатки этих методик, предлагается новая методика расчётов по размещению и креплению грузов на вагоне, представленная в [14, 15].

Таблица 3. Результаты расчёта усилий в проволочных креплениях при воздействии продольных сил находим
Table 3. The results of calculating the forces in elastic fastenings under the action of longitudinal forces

Направление k	Обозначение усилия	Величины усилия в i -х элементах крепления, кН					
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
$k = 1$	R_{ix}	19.34	60.6	10.61	5.81	13.14	2.76
	R_{ipx}	18.7	20.74	4.32	10.61	7.15	0
$k = 2$	R_{iax}	19.61	61.32	10.74	5.88	13.3	2.8
	R_{iapx}	17.61	20.98	4.37	10.74	7.23	0

5. Заключение

В статье представлена последовательность расчёта продольных сил, воспринимаемых проволочными креплениями груза, размещённого на железнодорожной платформе, в соответствии с существующей [1, 5, 12] и уточнённой [11, 14, 15] методиками.

Показано, что в соответствии с существующей методикой, расчётные усилия во всех упругих креплениях груза при воздействии продольных сил имеют одинаковое значение. Это связано с тем, что существующая методика не учитывает различия в расположении креплений в пространстве и, соответственно, различия геометрических параметров этих креплений. Поскольку различным по длине упругим элементам крепления должны соответствовать разные значения уси-

лия в них, методика расчёта продольных сил, действующих на проволочные крепления груза на железнодорожной платформе, должна учитывать это условие.

Представлен расчёт усилий в проволочных креплениях груза по уточнённой методике, позволяющей учесть разницу усилий в зависимости от параметров креплений. Отмечен недостаток уточнённой методики, заключающийся в том, что в расчётное усилие в одной из пар проволочных креплений более чем в два раза превышает допустимое значение ($61/24.8 \approx 2.5$). Это говорит о том, что уточнённая методика также не позволяет получить расчётные значения усилий в гибких креплениях, соответствующие фактическим.

Учитывая недостатки рассмотренных в статье методик расчёта усилий в упругих элементах крепления, в перспективе должна быть применена новая методика расчёта по размещению и креплению грузов на вагоне.

Список литературы

1. Зылев В.Б. Вычислительные методы в нелинейной механике конструкций. М.: Инженер, 1999. 144 с.
2. Andersson N., Andersson P., Bylander R., Sökjer-Petersen S., Zether B. Equipment for Rational Securing of Cargo on Railway Wagons / VINNOVA - Swedish Agency for Innovation Systems. Stockholm, 2004. 233 с. URL: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20040906_091708_35258_Report_jvgRASLA.pdf
3. Johansson M. A. P. Equipment for Efficient Cargo Securing and Ferry Fastening of Vehicles / Swedish Association of Road Haulage Companies. Borlänge, Sweden, 2004. 31 с. URL: <https://nvfnorden.org/wp-content/uploads/2020/10/2004-Equipment-for-Efficient-Cargo-Securing-and-Ferry-Fastening-of-Vehicles.pdf>.
4. Driver's Handbook Cargo Securement: A Guide to the North American Cargo Securement Standard [Электронный ресурс]. URL: https://www.fmcsa.dot.gov/sites/fmcsa.dot.gov/files/docs/Drivers_Handbook_Cargo_Securement_508CLN.pdf.
5. Комаров К.Л., Яшин А.Ф. Теоретическая механика в задачах железнодорожного транспорта. Новосибирск: Наука, 2004. 295 с.
6. European Best Practice Guidelines on Cargo Securing for Road Transport [Электронный ресурс]. URL: https://www.freight-train.co.uk/downloads/Cargo_Securing_Guidelines.pdf.
7. Priddy J. D., Jones R. A. Experimental Determination of the Effect of Cargo Variations on Roll Stability // SAE Technical Paper Series. SAE International, 2005/11/01. <https://www.doi.org/10.4271/2005-01-3516>.
8. Safety of loads on vehicles: Code of practice. 3-е изд. London: Department for Transport, 2002. 123 с.
9. Balsom M., Wilson F. R., Hildebrand E. Impact of Wind Forces on Heavy Truck Stability // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2006. Т. 1969. № 1. С. 115-120. <https://www.doi.org/10.1177/0361198106196900116>.
10. Asia Industrial Gases Association. Vertical cylinder handling and transportation [Электронный ресурс]. URL: http://www.asiaiga.org/uploaded_docs/AIGA%20038_06%20Vertical%20cylinder%20handling%20and%20transportation_reformatted%20Jan%2012.pdf.
11. Организация сотрудничества железных дорог. (ОСЖД) Технические условия размещения и крепления грузов: Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) [Электронный ресурс]. URL: https://www.bmzm.ru/doc/tech_usl_gr.pdf.
12. Организация сотрудничества железных дорог. (ОСЖД) Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах: Приложение 14 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) [Электронный ресурс]. URL: <https://xn--b1addackhp8agm.xn--plai/smgs.pdf>.
13. Туранов Х.Т., Бондаренко А.Н., Власова Н.В. Крепления грузов в вагонах: Учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2006. 321 с.
14. Туранов Х.Т. Теоретическая механика в специальных задачах грузовых перевозок. Новосибирск, Екатеринбург: Наука; Изд-во УрГУПС, 2012. 447 с.
15. Туранов Х.Т. Взаимодействие открытого подвижного состава и твердотельного груза. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2011. 374 с.
16. Turanov Kh. Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system // Global Journal of Research in Engineering (GJRE-A). 2013. Т. 13. № 10. С. 7-16.
17. Turanov Kh. Mathematical Modeling of Cargo Motion Crosswise the Wagon under the Action of Plane Force System // Science and Technology. 2015. Т. 5. № 1. С. 5-14.
18. Vorobyov V., Manakov A., Repina I. Economic assessment of the control of human-factor impact on faults of technical facilities in railway-transport technological processes // MATEC Web of Conferences. 2018. Т. 239. С. 8011. <https://www.doi.org/10.1051/mateconf/201823908011>.
19. Туранов Х.Т., Рuzметов 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.
20. Pinykh A., Manakov A., Abramov A., Kolarzh S. Quality assurance and control system for railway track tamping // MATEC Web of Conferences. 2018. Т. 216. № 1. С. 3004. <https://www.doi.org/10.1051/mateconf/201821603004>.
21. Turanov K., Ruzmetov Y., Vlasova N. Calculating cargo securing elements on a railway platform under the impact of a spatial force system // E3S Web of Conferences. 2019. Т. 135. № 5. С. 2006. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/201913502006>.
22. Turanov K., Ruzmetov Y. The problem of fastening cargo on railway rolling stock // E3S Web of Conferences. 2020. Т. 157. № 3. С. 1008. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701008>.
23. Turanov K., Ruzmetov Y. On the shift of cargo on a railway platform under the influence of transverse forces // E3S Web of Conferences. 2020. Т. 157. № 3. С. 1012. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701012>.

24. Ruzmetov Y., Molchanova O., Shikhazarov J. Calculation of solid-state cargo fastener under the influence of longitudinal forces // E3S Web of Conferences. 2020. Т. 157. № 3. С. 1016. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701016>.
25. Turanov K., Ruzmetov Y., Shikhazarov J. Incorrectness of the method of calculating cargo fastening on railway platforms // E3S Web of Conferences. 2020. Т. 164. № 20. С. 3040. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202016403040>.
26. Кирьянов Д. В. Самоучитель Mathcad 13. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 513 с.

References

1. Zylev V.B. *Calculation methods in nonlinear structural mechanics*. Moscow: Engineer. 1999. 144 p. (In Russ.).
2. Andersson N., Andersson P., Bylander R., Sökjer-Petersen S., Zether B. Equipment for Rational Securing of Cargo on Railway Wagons. Available at: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20040906_091708_35258_Report_jvgRASLA.pdf.
3. Johansson M. A. P. Equipment for Efficient Cargo Securing and Ferry Fastening of Vehicles : NVF-rapporter]. Available at: <https://nvfnorden.org/wp-content/uploads/2020/10/2004-Equipment-for-Efficient-Cargo-Securing-and-Ferry-Fastening-of-Vehicles.pdf>.
4. European Best Practice Guidelines on Cargo Securing for Road Transport. Available at: https://www.freight-train.co.uk/downloads/Cargo_Securing_Guidelines.pdf.
5. Komarov K.L., Jashin A.F. *Theoretical mechanics in problems of railway transport*. Novosibirsk: Nauka. 2004. 295 p. (In Russ.).
6. Driver's Handbook Cargo Securement: A Guide to the North American Cargo Securement Standard. Available at: https://www.fmcsa.dot.gov/sites/fmcsa.dot.gov/files/docs/Drivers_Handbook_Cargo_Securement_508CLN.pdf.
7. Priddy J. D., Jones R. A. Experimental Determination of the Effect of Cargo Variations on Roll Stability. 2005, : SAE International.
8. Balsom M., Wilson F. R., Hildebrand E. *Impact of Wind Forces on Heavy Truck Stability* // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2006, vol. 1969, no. 1, pp. 115–120. <https://www.doi.org/10.1177/0361198106196900116>.
9. Vertical cylinder handling and transportation. Available at: http://www.asiaiga.org/uploaded_docs/AIGA%20038_06%20Vertical%20cylinder%20handling%20and%20transportation_reformatted%20an%2012.pdf.
10. *Safety of loads on vehicles: Code of practice*. London: Department for Transport. 2002. 123 p.
11. Technical conditions for stowing and fastening cargo: Appendix 3 to the Agreement on International Goods Transport by Rail (SMGS). Available at: https://www.bmzm.ru/doc/tech_usl_gr.pdf. (In Russ.).
12. Rules for stowing and fastening cargo in wagons and containers: Appendix 14 to the Agreement on International Goods Transport by Rail (SMGS). Available at: <https://xn--b1addackhp8agm.xn--p1ai/smgs.pdf>. (In Russ.).
13. Turanov Kh.T., Bondarenko A.N., Vlasova N.V. *Fastening cargoes in wagons*. Yekaterinburg: USURT. 2006. 321 p. (In Russ.).
14. Turanov Kh.T. *Theoretical mechanics in special tasks on cargo transportation*. Novosibirsk, Yekaterinburg: Nauka; USURT. 2012. 447 p. (In Russ.).
15. Turanov Kh.T. *Interaction of open top rolling stock with solid-state freight*. Moscow: UMTs ZhDT. 2011. 374 p. (In Russ.).
16. Turanov Kh. *Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system* // Global Journal of Research in Engineering (GJRE-A). 2013, vol. 13, no. 10, pp. 7–16.
17. Turanov Kh. *Mathematical Modeling of Cargo Motion Crosswise the Wagon under the Action of Plane Force System* // Science and Technology. 2015, vol. 5, no. 1, pp. 5–14.
18. Vorobyov V., Manakov A., Repina I. *Economic assessment of the control of human-factor impact on faults of technical facilities in railway-transport technological processes* // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 239, p. 8011. <https://www.doi.org/10.1051/mateconf/201823908011>.
19. Ilinykh A., Manakov A., Abramov A., Kolarzh S. *Quality assurance and control system for railway track tamping* // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 216, no. 1, p. 3004. <https://www.doi.org/10.1051/mateconf/201821603004>.
20. Turanov Kh.T., Ruzmetov Ya.O., Yakushev A.V. *On deformable state of the “cargo-wagon-fastening” mechanical system* // Proceedings of Petersburg Transport University. 2019, vol. 16, no. 3, pp. 455–468. (In Russ.).

21. Turanov K., Ruzmetov Y., Vlasova N. *Calculating cargo securing elements on a railway platform under the impact of a spatial force system* // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 135, no. 5, p. 2006. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/201913502006>.
22. Turanov K., Ruzmetov Y. *The problem of fastening cargo on railway rolling stock* // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 157, no. 3, p. 1008. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701008>.
23. Turanov K., Ruzmetov Y. *On the shift of cargo on a railway platform under the influence of transverse forces* // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 157, no. 3, p. 1012. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701012>.
24. Ruzmetov Y., Molchanova O., Shihnazarov J. *Calculation of solid-state cargo fastener under the influence of longitudinal forces* // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 157, no. 3, p. 1016. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202015701016>.
25. Turanov K., Ruzmetov Y., Shikhazarov J. *Incorrectness of the method of calculating cargo fastening on railway platforms* // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 164, no. 20, p. 3040. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202016403040>.
26. Kir'janov D.V. *Tutorial Mathcad 13*. Saint Petersburg: BHV-Petersburg. 2006. 513 p. (In Russ.).