

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ISBN 978-985-468-276-1. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 1. Гомель, 2007

УДК 629.463.62

И. А. ВОРОЖУН, А. В. ЗАВОРОТНЫЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПЛАТФОРМЕ

Методом математического моделирования исследовано влияние сил трения и жесткости канатов крепления труб к железнодорожной платформе на величину продольного перемещения труб при разных скоростях соударения вагонов. Установлено, что чем меньше жесткость канатов, тем в большей мере сказывается её влияние на величину сил в канатах, а чем больше жесткость канатов, тем в меньшей мере сказывается влияние сил трения на смещение пакета труб относительно платформы в процессе соударения вагонов.

В настоящее время на всех видах транспорта большое внимание уделяется безопасности движения, а также сохранности перевозимого груза. Сохранность перевозимых грузов влечёт совершенствование способов размещения и крепления грузов на транспортном средстве. Одним из основных видов транспорта для перевозки грузов является железнодорожный транспорт. Железнодорожный вагон с размещённым на нём грузом представляет сложную механическую систему, и обеспечение безопасности его движения требует проведения различных исследований.

Многочисленные исследования показали, что основной причиной, приводящей к повреждению перевозимых грузов и вагонов, является нарушение крепления грузов в процессе транспортирования.

В работе [1] отражены исследования динамических сил, действующих на груз и элементы его крепления в вагоне, а также методика определения норм

крепления грузов. Крепление грузов на открытом подвижном составе с применением амортизаторов удара рассмотрено в работах [2, 3]. В этих работах отмечается, что применение в конструкции вагона подвижной хребтовой балки позволяет уменьшить динамическое воздействие на перевозимый груз и элементы его крепления при переходных режимах движения. Авторы работы [4] отмечают, что в связи с большими объемами перевозок труб для газопроводов в США начинают применять платформы с упругими торцовыми стенками и стойками на продольных брусках. При соударениях вагонов трубы могут сдвигаться вдоль платформы, а упругие стенки воспринимают эти воздействия. Однако различие в параметрах как самих вагонов, так и поглощающих аппаратов междувагонных связей не позволяет перенести результаты зарубежных исследований на используемые в нашей стране технические средства. Другим возможным направлением защиты вагонов и грузов от ударных нагрузок является применение устройства для крепления грузов многоразового использования. К наиболее эффективным из них следует отнести подвижные опорно-крепежные устройства, применяемые для крепления грузов как на одном вагоне, так и на сцепках вагонов. Среди них можно выделить упругие опорно-крепежные устройства, в которых ударная нагрузка передается через упругие элементы (пружины или рессоры) от вагона грузу, обеспечивая смягчение действия этой нагрузки за счёт их упругой деформации и последующее возвращение груза в исходное положение при их распрямлении.

Одним из вариантов решения проблемы перевозки труб может явиться создание специализированных вагонов. Так, на Украине (ОАО “Днепровагонмаш”) разработан специализированный вагон для перевозки труб большого диаметра (от 530 до 1420 мм) длиной от 10700 до 11800 мм с защитным полиэтиленовым покрытием и без него. Этот вагон позволяет: исключить применение расходных материалов для крепления труб; упростить процесс размещения и крепления труб; обеспечить сохранность защитного полиэтиленового покрытия и фасок под сварку на торцах труб. Применение таких вагонов позволит повысить эффективность использования грузоподъемности подвижного состава.

Действующие технические условия [5] предусматривают крепление грузов на подвижном составе с использованием в основном проволочных растяжек и обвязок, а также деревянных клиньев, упорных и распорных брусков, прибиваемых к полу платформы. В связи с этим значительная часть исследований направлена по пути совершенствования методики расчёта креплений такого рода.

В работе [6], посвящённой расчёту устойчивости и крепления грузов, перевозимых на открытом подвижном составе, рассмотрены вопросы крепления многорядных штабельных грузов и расчёта инвентарных растяжек. Автор отмечает, что в существующей методике расчёта крепления грузов на

открытом подвижном составе изложен порядок расчета креплений только единичных цилиндрических грузов, а методы расчета элементов креплений, удерживающих от продольного выскальзывания подвижных единиц цилиндрических грузов в штабеле относительно неподвижных, отсутствуют.

Литературные источники, посвященные вопросам размещения и крепления грузов на подвижном составе, свидетельствуют о том, что при всем многообразии способов крепления грузов на вагонах действующие методы расчета не учитывают реальные факторы, оказывающие влияние на крепление транспортируемых грузов. Поэтому существует необходимость совершенствования как самих устройств для крепления грузов, так и методов их расчета, позволяющих устранить выявленные недостатки и способствовать улучшению технологии крепления грузов и повышению безопасности движения поездов. Возможные пути решения задачи о динамической нагруженности кузова полувагона при перевозке труб отражены в работе [7]. Как отмечает автор, решение рассматриваемой задачи осложняется тем, что при движении вагона, загруженного трубами, последние испытывают колебания в вертикальной плоскости и передают динамические нагрузки на элементы кузова.

Обзор литературы показал, что в отличие от установленного в [5] способа размещения и крепления трех стальных труб диаметром 1420 мм с полиэтиленовым покрытием на четырехосной железнодорожной платформе, авторами ряда работ предложены устройства для размещения и крепления на платформе четырех и даже пяти труб указанного диаметра как с полиэтиленовым покрытием, так и без него. Например, в работе [8] предложено устройство для размещения на платформе четырех труб диаметром 1420 мм с полиэтиленовым покрытием. Для крепления труб к платформе применены стальные канаты, обеспечивающие смягчение действия инерционной нагрузки за счет их упругой деформации и последующее возвращение труб в исходное положение. Проведенные в соответствии с требованиями главы 1 Технических условий [5] натурные испытания трех платформ, загруженных трубами, подтвердили правильность выбранного конструктивного решения. Однако выполненный анализ литературных источников позволяет утверждать, что вопросы размещения и крепления труб большого диаметра, в частности металлических труб диаметром 1420 мм, на железнодорожных платформах с наибольшим использованием габарита погрузки освещены не в должной мере. Предложенные устройства для крепления труб большого диаметра на железнодорожных платформах лишь частично прошли натурные испытания. Описание математического моделирования работы таких устройств в известной нам литературе отсутствует.

Исходя из этого, а также учитывая, что перевозка труб диаметром 1420 мм для магистральных нефтепроводов относится к массовым перевозкам, можно отметить необходимость разработки многооборотных устройств для размещения и крепления указанных труб на железнодорожной платформе. Совер-

шенствование методики расчёта таких устройств является актуальной прикладной задачей, имеющей значение не только для железнодорожного транспорта Беларуси, но и России, а также других стран СНГ. Важность и актуальность данной задачи объясняется тем, что применение таких устройств позволит использовать грузоподъемность платформ более полно и даже превысить использование грузоподъёмности полувагонов за счёт размещения пяти труб диаметром 1420 мм вместо четырёх, а надёжность крепления труб на платформе обеспечивает их сохранность, безопасность движения поездов и повышает качество оказываемых услуг.

В работе [9] исследовалось влияние предварительного натяжения упругих элементов поперечной обвязки на продольное перемещение труб. Предварительное натяжение упругих элементов поперечной обвязки создается натяжными устройствами при погрузке труб на железнодорожную платформу. Однако как при маневровой работе, так и при транспортировании весь штабель труб может сместиться вдоль платформы и создать одностороннее ослабление натяжения упругих элементов продольного крепления труб к платформе.

Целью исследования является оценка продольного смещения труб относительно платформы и динамических сил в автосцепке платформы при разных скоростях соударения вагонов. Для проведения исследования соударения платформы, загруженной трубами, с группой неподвижных вагонов воспользуемся ее упрощенной схемой, представленной на рисунке 1.

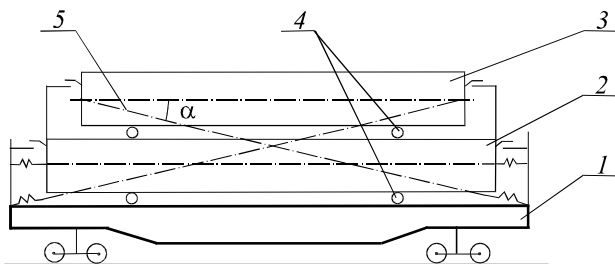


Рисунок 1 – Схема размещения на платформе четырех труб:
1 – платформа; 2 – нижний ярус труб; 3 – верхний ярус труб; 4 – опоры для труб;
5 – канаты продольного крепления труб к платформе

На схеме нижний 2 и верхний 3 яруса труб условно установлены на опоры 4, которые позволяют смещаться трубам относительно платформы 1 только в продольном направлении. Каждый ярус содержит две трубы. Оси канатов 5 продольного крепления труб верхнего яруса наклонены под углом α к полу платформы, а нижнего яруса – горизонтальны. Возвращение платформы и труб в исходное положение осуществляется за счет упругих свойств элементов междувагонных связей и канатов продольного крепления труб.

На основе схемы (см. рисунок 1) составлена расчетная схема, представленная на рисунке 2. При исследовании движение всех масс системы будем рассматривать в продольной вертикальной плоскости от положения, которое занимала платформа с трубами в момент накатывания на группу из трех неподвижных вагонов.

В связи с этим при рассмотрении процесса соударения платформы, загруженной трубами, с группой из трех неподвижных четырехосных полувагонов, целесообразно ввести следующие основные предпосылки и допущения:

- вагоны, платформа с тележками и трубы считаются абсолютно твердыми телами;
- движение рассматривается на прямом горизонтальном участке пути;
- трубы размещены на платформе симметрично относительно ее продольной и поперечной плоскостей симметрии;
- упругие элементы устройства крепления труб на платформе имеют линейные характеристики;
- откат платформы после соударения ограничивается автосцепными устройствами;
- зазоры в междувагонных связях отсутствуют;
- массы вагонов, платформы и труб сосредоточены в их центрах масс;
- центры масс всех тел перемещаются по параллельным прямым;
- вертикальными, а также угловыми перемещениями вагонов, платформы и труб пренебрегаем;
- начало отсчёта каждой из координат x_i , определяющих положение элементов системы, соответствует моменту соприкосновения платформы с вагонами стенки.

Помимо принятых основных допущений полагаем, что изменением угла α наклона канатов при перемещениях труб верхнего яруса и силами предварительного натяжения канатов, созданного в процессе погрузки, можно пренебречь.

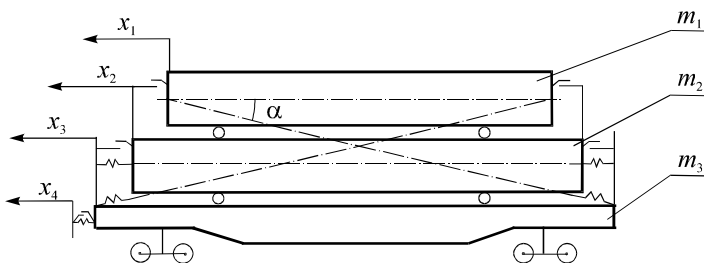


Рисунок 2 – Расчетная схема взаимодействия платформы и труб при соударении вагонов

Обозначим продольные горизонтальные перемещения верхнего и нижнего ярусов труб, платформы и трех вагонов координатами x_1, \dots, x_6 , соответственно. Таким образом, с учетом принятых допущений система имеет шесть независимых координат. Применим способ Германа-Даламбера и запишем систему дифференциальных уравнений, отражающих движение труб верхнего и нижнего ярусов, платформы и трех вагонов, по представленной расчетной схеме:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + T_1 \cos \alpha + F_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) &= 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 + T_2 - F_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + F_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) &= 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 - T_1 \cos \alpha - T_2 - F_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + R_1 &= 0; \\ m_4 \ddot{x}_4 - R_1 + R_2 &= 0; \\ m_5 \ddot{x}_5 - R_2 + R_3 &= 0; \\ m_6 \ddot{x}_6 - R_3 + R_4 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где m_1, \dots, m_6 – массы соответственно труб верхнего и нижнего ярусов, платформы, трех вагонов; T_1, T_2 – силы в канатах крепления труб соответственно верхнего и нижнего ярусов; F_1, F_2 – силы сухого трения труб соответственно верхнего и нижнего ярусов по поверхностям вкладышей опор крепления; R_1, \dots, R_4 – силы в междувагонных связях.

Силы в канатах крепления верхнего и нижнего ярусов труб определяются выражениями:

$$T_1 = c_1(x_1 - x_3); T_2 = c_2(x_2 - x_3),$$

где c_1, c_2 – коэффициенты жесткости канатов продольного крепления к платформе соответственно верхнего и нижнего ярусов труб.

Силы сухого трения труб по поверхностям вкладышей опор крепления определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} F_1 &= f_1(m_1 g + T_1 \sin \alpha); \\ F_2 &= f_2[(m_1 + m_2)g + T_1 \sin \alpha], \end{aligned}$$

где f_1, f_2 – коэффициенты трения между поверхностями вкладышей опор крепления и труб соответственно верхнего и нижнего ярусов; g – ускорение свободного падения.

Силы в междувагонных связях с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами при перемещениях вагонов, не превышающих ход поглощающих аппаратов, представим в виде:

$$\begin{aligned} R_1 &= c(x_3 - x_4)[1 + \mu \operatorname{sgn}((x_3 - x_4)(\dot{x}_3 - \dot{x}_4))]; \\ R_2 &= c(x_4 - x_5)[1 + \mu \operatorname{sgn}((x_4 - x_5)(\dot{x}_4 - \dot{x}_5))]; \\ R_3 &= c(x_5 - x_6)[1 + \mu \operatorname{sgn}((x_5 - x_6)(\dot{x}_5 - \dot{x}_6))]; \\ R_4 &= cx_6[1 + \mu \operatorname{sgn}(x_6 \dot{x}_6)], \end{aligned}$$

где c – коэффициент жесткости упругих элементов междувагонных связей;
 μ – коэффициент трения в элементах междувагонных связей.

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений (1) проводилось для скоростей соударения вагонов 0,5–3 м/с при следующих исходных данных: $m_1 = m_2 = 13600$ кг; $m_3 = 21000$ кг; $m_4 = m_5 = m_6 = 84000$ кг; $g = 9,8$ м/с²; $c = 11$ МН/м; $\alpha = 7^\circ$; $\mu = 0,55$.

На данном этапе проводилось исследование влияния сил сухого трения труб по опорам устройства, а также жесткости канатов крепления на величину продольного смещения труб относительно платформы и динамических воздействий при разных скоростях соударения вагонов. При этом значения коэффициентов жесткости c_1, c_2 принимались одинаковыми и варьировались в пределах 0,2–5 МН/м; значения коэффициентов трения f_1, f_2 также принимались одинаковыми и варьировались в пределах 0,2–0,6.

Согласно требованиям технических условий [5] способы размещения и крепления грузов на открытом подвижном составе для сетевых и местных технических условий должны подвергаться испытаниям на соударение вагонов (ударным испытаниям). По действующим нормативам из 12 соударений два последних проводятся со скоростями 7–8 и 8–9 км/ч для установления факта отсутствия повреждений вагонов.

Расчеты проводились в среде MathCAD 2001 Professional. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рисунках 3, 4 для скорости соударения вагонов 2,5 м/с.

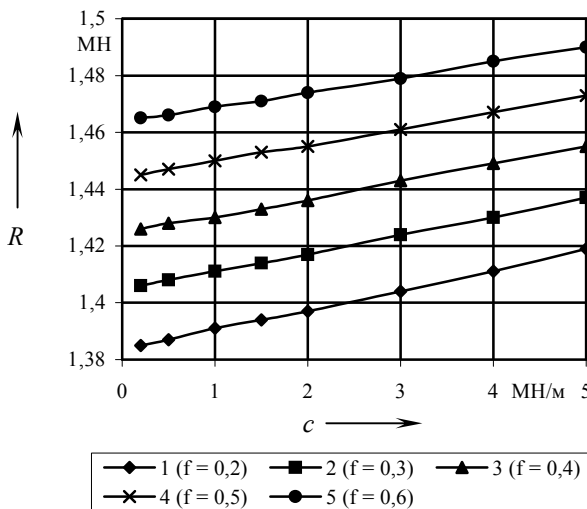


Рисунок 3 – Наибольшие значения сил в автосцепке платформы при скорости соударения 2,5 м/с

Как показывают расчеты (см. рисунок 3), увеличение сил сухого трения между поверхностями труб и вкладышей опор в сочетании с увеличением жесткости канатов продольного крепления труб приводит к увеличению динамических воздействий на платформу и на вагоны в процессе их соударения, что вполне согласуется с результатами исследований [1] и других авторов.

Из графиков (см. рисунок 4) следует, что чем меньше коэффициент жесткости c , тем в большей мере сказывается его влияние на величину сил в канатах продольного крепления труб к платформе при соударении вагонов (восходящие кривые). Поскольку силы в канатах крепления пропорциональны смещению труб, то чем больше коэффициент жесткости c , тем в меньшей мере сказывается влияние сил трения на смещение пакета труб относительно платформы в процессе соударения вагонов (нисходящие кривые).

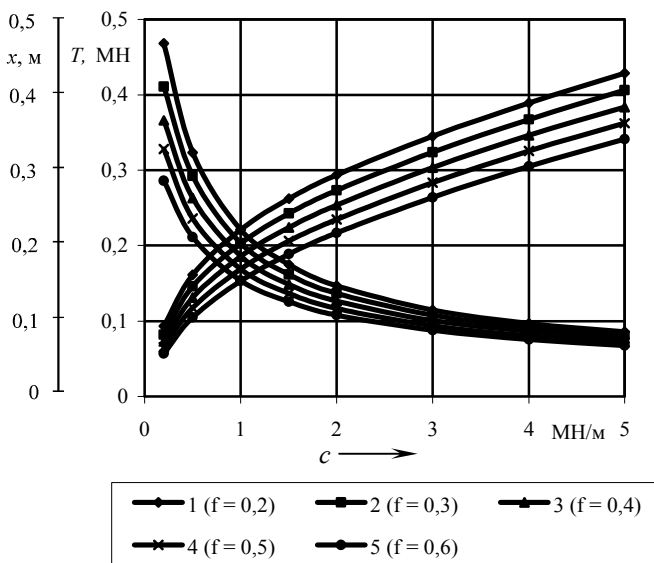


Рисунок 4 – Смещения труб (нисходящие кривые) и соответствующие им силы в канатах крепления (восходящие кривые) при скорости соударения 2,5 м/с

Следует отметить, что повышение коэффициента сухого трения между поверхностями труб и вкладышей опор позволяет уменьшить силы, действующие на канаты продольного крепления труб. Следовательно, для крепления труб в продольном направлении можно будет применить канаты с меньшим разрывным усилием, т.е. меньшего диаметра и с меньшей массой.

По действующим нормативам при роспуске с сортировочных горок скорость набегающего вагона на момент соударения не должна превы-

шать 5 км/ч. На рисунках 5, 6 представлены графики изменения сил в автосцепке, канатах продольного крепления труб, а также перемещений ярусов труб относительно платформы при скорости соударения 1,5 м/с в зависимости от коэффициента жесткости c . Коэффициент сухого трения между поверхностями труб и вкладышей опор для исследования принят равным 0,35. Как показывают расчеты (см. рисунок 5), коэффициент жесткости канатов оказывает влияние на величину наибольших сил в автосцепке при соударении вагонов.

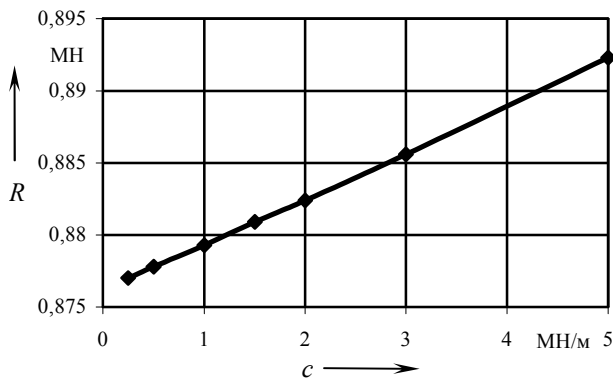


Рисунок 5 – Наибольшие значения сил в автосцепке платформы при скорости соударения 1,5 м/с

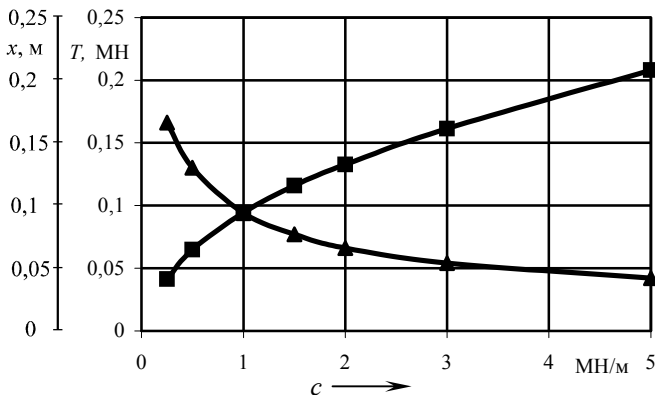


Рисунок 6 – Смещения труб (нисходящая кривая) и соответствующие им силы в канатах крепления (восходящая кривая) при скорости соударения 1,5 м/с

Из графиков (см. рисунок 6) видно, что с возрастанием коэффициента жесткости канатов продольного крепления труб (до 2 МН/м) наблюдается зна-

чительное уменьшение величины продольного смещения ярусов труб относительно платформы. Дальнейшее возрастание коэффициента жесткости канатов продольного крепления труб (свыше 2 МН/м) сопровождается незначительным уменьшением величины продольного смещения ярусов труб относительно платформы.

Выполненный анализ позволяет более рационально подходить к выбору коэффициента жесткости канатов продольного крепления труб, а также коэффициента сухого трения между поверхностями труб и ложементов опор.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет подобрать материал вкладышей опор на стадии проектирования устройства для размещения и крепления труб на железнодорожной платформе и более рационально подойти к выбору жесткости канатов продольного крепления труб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Малов, А. Д. Исследование ускорений и перемещений грузов в вагонах / А. Д. Малов // Вестник ВНИИЖТа, 1979. – № 4. – С. 50–55.

2 Бородулин, В. И. К вопросу использования упругих элементов для крепления груза и методики расчета характеристик гасителя колебаний / В. И. Бородулин, Н. И. Аносов // Вестник инженеров-электромехаников железнодорожного транспорта. – Самара, 2003. – № 1. – С. 230–232.

3 Бондаренко, А. Н. Моделирование взаимных продольных перемещений ярусов штабельных грузов с учетом сил трения / А. Н. Бондаренко, Х. Т. Туранов, Е. Д. Псеровская, О. В. Крытцева, К. В. Мурашко // Механика и трибология транспортных систем – 2003: материалы докл. междунар. конгр. – Ростов н/Д, 2003. – С. 126–130.

4 Соколов, М. М. Зарубежные вагоны. Особенности конструкции, теории и расчета / М. М. Соколов, Ю. П. Бороненко, А. А. Эстлинг. – Л.: ЛИИЖТ, 1988. – 60 с.

5 Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. – М.: Юридическая фирма «Юртранс», 2003. – 544 с.

6 Егоров, С. А. Расчет элементов крепления штабельных грузов, размещаемых ярусами по высоте / С. А. Егоров // Совершенствование эксплуатационной работы железных дорог. – Новосибирск, 2000. – С. 85–102.

7 Прибылов, А. Ф. Основы динамического расчета кузова полувагона при перевозке труб/ А. Ф. Прибылов; Курский гос. пед. ун-т. – Курск, 2002. – 82 с.

8 Устройство для крепления труб на транспортном средстве: а. с. 1296454 СССР: МКИ⁵ В 60 Р 7/12 / В. М. Горский, А. В. Заворотный, В. А. Иванов, В. А. Трусов, Ю. Д. Хорош, В. Ф. Антонов; Белорус. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – № 3959723; заявл. 17.09.85; опубл. 15.03.87 // Бюл. № 10. – 3 с.: ил.

9 Шилович, А. В. Динамические воздействия на крепления труб к железнодорожной платформе / А. В. Шилович, А. В. Сементовский, И. А. Ворожун // Материалы, технологии, инструменты. – 2002. – Т. 7, № 1. – С. 25–28.

10 Вершинский, С. В. Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов; под ред. С. В. Вершинского. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.