

БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

УДК 656.212.6.073.22.002.5

С. М. ВАСИЛЬЕВ, ассистент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАТКОВЫХ ТУРНИКЕТНО-КРЕПЁЖНЫХ УСТРОЙСТВ

Разработана математическая модель механической системы, включающей в себя груз, закреплённый на сцепе из двух или трёх платформ с применением подвижных турникетно-крепежных устройств (ТКУ) и группу из нескольких вагонов, с которой соударяется сцеп. Получены количественные зависимости между основными параметрами ТКУ каткового типа и продольными ускорениями, действующими на груз, закреплённый с их использованием на подвижном составе. Определены рациональные значения параметров ТКУ каткового типа, при которых снижается повреждаемость грузов и вагонов в процессе транспортировки.

Продольные силы, действующие на длинномерный груз и платформы сцепа, на которых он размещён, могут достигать значительных величин как в процессе маневровой работы при возникновении соударений с другими единицами подвижного состава, так и при движении в составе поезда, в частности при резких торможениях.

Для снижения уровня динамических воздействий на длинномерный груз и опорные вагоны сцепа при взаимодействии последнего с другими единицами подвижного состава применяются подвижные ТКУ, использование которых обеспечивает продольное перемещение груза из равновесного положения относительно опорного вагона или вагонов сцепа, что сопровождается кинематически обусловленным повышением центра тяжести груза, за счёт чего достигается последующее восстановление первоначального взаиморасположения груза и вагонов.

На практике наибольшее распространение получили катковые ТКУ, где кинетическая энергия удара переходит в потенциальную энергию подъема груза при перекачивании его на тела качения по криволинейным направляющим.

Исследованию динамических свойств подвижных ТКУ посвящён ряд работ Е. П. Блохина, А. Д. Железнякова, В. А. Каблукова, В. А. Калашника, Б. Г. Кеглина, Г. В. Костина, Г. Б. Крайзгура, В. А. Лазаряна, А. Д. Малова, Л. А. Манашкина, И. К. Мороза, Б. К. Спиридонова, Е. Ф. Стуся, А. В. Шатунова и др. [3–14]. Можно указать на некоторые недостатки указанных выше исследований:

– в моделях соударения группа вагонов («стенка»), в которую ударяется сцеп, представлена, как правило, одним вагоном, масса которого равна приведенной массе нескольких вагонов. При этом не учитывается действие сил поглощающих аппаратов

между вагонами «стенки» в процессе соударения, что приводит к значительному завышению расчётных величин сил, действующих на вагоны сцепа и груз;

– межвагонные связи в моделях соударения рассматривались чаще всего как линейные упругие элементы, что приводит к существенным погрешностям в расчетах, т. к. в действительности типовые поглощающие аппараты автосцепных устройств четырехосных грузовых вагонов имеют довольно сложную силовую диаграмму, характеризующуюся переменной величиной предварительной затяжки при нагружении-разгрузке и зависимостью линий нагружения и разгрузки от величины и скорости сжатия поглощающего аппарата;

– в моделях гравитационных ТКУ использовались статические силовые характеристики, которые дают менее адекватные результаты расчетов по сравнению с динамическими силовыми характеристиками, поскольку в данном случае не учитывается, что колебания сил при динамике имеют более широкий спектр;

– в моделях гравитационных ТКУ отсутствует ограничение рабочего хода ТКУ. Это не позволяет учесть важнейший момент в работе рассматриваемой системы, когда заканчивается рабочий ход ТКУ и наступает удар груза об ограничитель, который необходимо учитывать для обеспечения сохранности груза и подвижного состава;

– в качестве оценочных критериев использовалось, как правило, ускорение груза при ударе. Вопросы защиты грузов решались в отрыве от защиты опорных вагонов и без оценки экономической целесообразности проводимых мероприятий.

Устранение ряда недостатков, имевших место в ранее выполненных исследованиях по анализу динамики систем «подвижной состав – подвижные

турникетно-крепёжные устройства – груз» позволяет получить адекватное представление о влиянии параметров ТКУ на сохранность грузов, закреплённых на вагонах посредством данных устройств. Поэтому целью работы является анализ влияния параметров катковых ТКУ на сохранность грузов и определение рациональных значений этих параметров на основе математической модели, в которой устранены недостатки, присущие проводившимся ранее исследованиям.

Математическая модель системы «подвижной состав – катковые ТКУ – груз». В реальных условиях эксплуатации возможны различные варианты взаимодействия вагона или сцепа вагонов с другими единицами подвижного состава.

Наиболее вероятным является соударение набегающего вагона или сцепа с другими вагонами, находящимися в составе неподвижной группы. На рисунке 1 представлена схема соударения, при котором груз на сцепе из двух вагонов соударяется со стенкой, состоящей из n вагонов. На этой схеме x_g , x_{p1} , x_{p2} , x_{s1} , x_{si} , x_{sn} – координаты центров масс соответственно груза, первой и второй платформ сцепа, первого, i -го и n -го вагонов «стенки», отсчитываемые от их положения в начальный момент соударения, м.

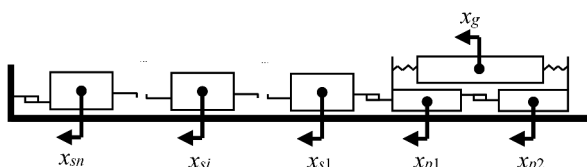


Рисунок 1 – Расчётная схема соударения для сцепа из двух платформ

Пользуясь принципом Даламбера, можно записать в виде системы дифференциальных уравнений обобщённую математическую модель соударения одного вагона и сцепа из двух или трёх вагонов с группой заторможенных вагонов, справедливую для различных расчётных вариантов соударения:

$$\begin{cases} m_{p1}x''_{p1} + P_{p1,s1} + P_{p1,p2} + N_{p1,g} = 0; \\ m_{p2}x''_{p2} + P_{p2,p1} + P_{p2,p3} + N_{p2,g} = 0; \\ m_{p3}x''_{p3} + P_{p3,p2} + N_{p3,g} = 0; \\ m_g x''_g + N_{g,p1} + N_{g,p2} + N_{g,p3} = 0; \\ m_{s1}x''_{s1} + P_{s1,p1} + P_{s1,s2} + F_{s1} \text{sign } x'_{s1} = 0; \\ \dots \\ m_{si}x''_{si} + P_{si,si-1} + P_{si,si+1} + F_{si} \text{sign } x'_{si} = 0; \\ \dots \\ m_{sn}x''_{sn} + P_{sn,sn-1} + F_{sn} \text{sign } x'_{sn} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где m_{p1} , m_{p2} , m_{p3} , m_g , m_{s1} , m_{si} , m_{sn} – массы соответственно первой, второй и третьей по ходу движения

платформ сцепа, масса груза, массы первого, i -го и n -го вагонов «стенки», кг; x''_{p1} , x''_{p2} , x''_{p3} , x''_g , x''_{s1} , x''_{si} , x''_{sn} – продольное ускорение соответственно первой, второй и третьей по ходу движения платформ сцепа, груза, первого, i -го и n -го вагонов «стенки», м/с²; P – сила реакции межвагонных связей, Н; N – сила продольной реакции подвижной опоры, Н; F_{s1} , F_{si} , F_{sn} – сила сопротивления перемещениям соответственно первого, i -го и n -го вагонов, образующих стенку, Н; x'_{s1} , x'_{si} , x'_{sn} – скорость соответственно первого, i -го и n -го вагонов «стенки», м/с; $\text{sign } x'_{si}$ – знак скорости, равный +1 при $x'_{si} > 0$ и –1 при $x'_{si} < 0$.

На основе обобщённой модели соударения разработаны и реализованы на ЭВМ в пакете Mathcad модели для различных конкретных вариантов взаимодействия единиц подвижного состава.

Для расчёта значений силы реакции межвагонных связей P при решении системы уравнений (1) использованы математические модели, воспроизводящие сложную силовую диаграмму поглощающих аппаратов, разработанные Б. Г. Кеглиным и Л. Н. Никольским [10].

Для расчёта значений силы продольной реакции подвижной опоры N разработаны математические модели динамических силовых характеристик ТКУ каткового, ползкового и клинового типов. Поскольку в подвижных опорах подвижного типа консервативная возвращающая сила при перемещениях груза относительно опорного вагона в продольном направлении возникает вследствие его подъёма, задачей аналитического определения силовых характеристик подвижной опоры является установление количественной зависимости между законом движения центра тяжести груза в вертикальной плоскости относительно центра тяжести опорного вагона и продольными силами, сообщаемыми этому грузу через эту опору.

Обобщённая математическая модель динамической силовой характеристики крепёжного устройства подвижного типа, позволяющая выполнять расчёт всех известных в настоящее время подобных устройств, разработана на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» БелГУТа профессором В. И. Сенько, доцентом А. Д. Железняковым и может быть представлена в виде

$$N = m_g \left(g + \frac{d^2 H}{dx^2} (x')^2 + \frac{dH}{dx} x'' \right) \frac{\frac{dH}{dx} + \mu \text{sign } x'}{1 - \mu \frac{dH}{dx} \text{sign } x'} \quad (2)$$

где H – величина подъёма груза, м; x – продольное перемещение груза относительно указанного вагона, м; $\text{sign } x'$ – знак скорости, равный +1 при $x' \geq 0$ и –1 при $x' < 0$; g – ускорение свободного

падения, м/с²; μ – приведенный коэффициент трения между грузом и опорой.

Для катковых устройств μ принимается равным эквивалентному коэффициенту сопротивления μ_k .

На основе обобщенной модели силовой характеристики автором разработаны модели силовых характеристик для подвижных ТКУ различных типов и, в частности, для ТКУ каткового типа, принципиальная схема которого представлена на рисунке 2.

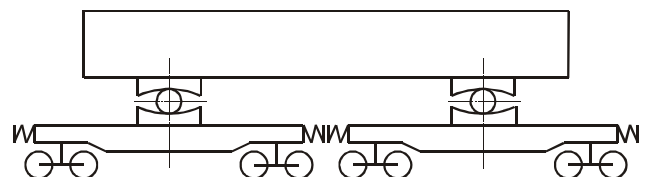


Рисунок 2 – Принципиальная схема каткового ТКУ

Для каждого из типов ТКУ в зависимости от особенностей конструкции и геометрической формы рабочих поверхностей была определена функция H , выражающая зависимость высоты подъема груза от его продольного перемещения относительно опорного вагона, и подставлена в уравнение (2).

Для ТКУ каткового типа с цилиндрическими профилями катка и опорных элементов формула силовой характеристики после подстановки и преобразований принимает следующий вид:

$$N_k = m_g \left(g + \frac{4(R-r)^2 x^2}{(4(R-r)^2 - x^2)^{3/2}} + \frac{x x'}{\sqrt{4(R-r)^2 - x^2}} \right) \frac{\sqrt{4(R-r)^2 - x^2} + \mu \operatorname{sign} x'}{1 - \mu \frac{x}{\sqrt{4(R-r)^2 - x^2}} \operatorname{sign} x'}$$

где R – радиус рабочих поверхностей каткового ТКУ, м; r – радиус катка, м.

Влияние параметров катковых ТКУ на продольное ускорение груза. Эффективность ТКУ оценивается с позиций их главного назначения – обеспечение сохранности перевозимого груза и вагонов. В настоящее время наиболее распространенным подходом является сравнение тех или иных принципиальных схем крепления грузов по величинам продольных сил и ускорений, воспринимаемых ими при ударных взаимодействиях вагонов с другими единицами подвижного состава.

В результате моделирования получены графики зависимостей максимального ускорения груза от основных параметров катковых ТКУ (рисунки 3–6).

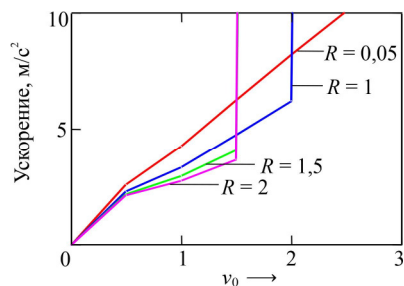


Рисунок 3 – Зависимость максимального ускорения груза от начальной скорости соударения v_0 при $r = 0,1$ м, $\mu = 0,1$, $m_g = 60000$ кг

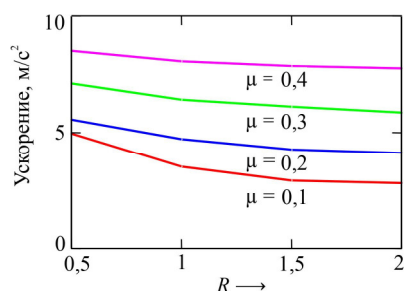


Рисунок 4 – Зависимость максимального ускорения груза от радиуса опорных поверхностей R при $v_0 = 1,39$ м/с, $r = 0,1$ м, $m_g = 60000$ кг

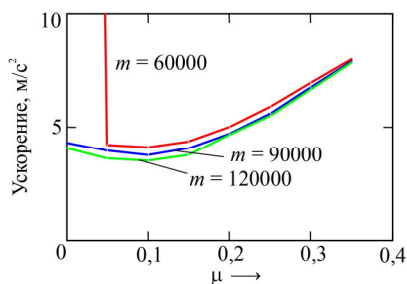


Рисунок 5 – Зависимость максимального ускорения груза от коэффициента трения μ при $v_0 = 1,39$ м/с, $R = 1$ м, $r = 0,1$ м

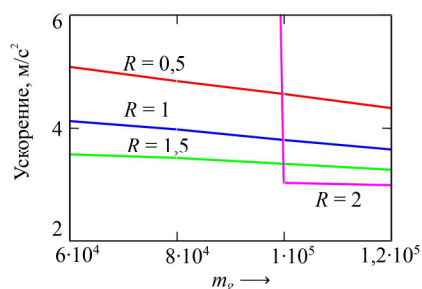


Рисунок 6 – Зависимость максимального ускорения груза от массы груза m_g при $v_0 = 1,39$ м/с, $r = 0,1$ м, $\mu = 0,05$

Из полученных графиков видно, что для ТКУ каткового типа характерно, что чем больше радиус рабочих поверхностей ТКУ и чем меньше коэффициент трения, тем меньше ускорение груза в пределах рабочего хода ТКУ, однако тем быстрее (при меньшей начальной скорости соударения) заканчивается рабочий ход ТКУ и наступает удар об ограничитель, сопровождающийся значительным ускорением.

В реализуемых на практике конкретных конструкциях катковых ТКУ радиус рабочих поверхностей, как правило, не поддается изменению (регу-

лировке), а имеется возможность отрегулировать силы трения. Поэтому для катковых ТКУ для множества комбинаций значений радиуса опорных поверхностей и начальной скорости соударения определены значения коэффициента трения, при котором достигается минимальное ускорение груза при ударе и работа ТКУ в пределах рабочего хода (таблица 1).

Таблица 1 – Оптимальные значения коэффициента трения при заданных радиусе рабочих поверхностей и начальной скорости соударения

R	Начальная скорость соударения v_0 , км/ч							
	2		4		6		8	
	μ	a	μ	a	μ	a	μ	a
0,50	0,05	2,079	0,05	4,114	0,1	5,960	0,15	7,674
0,75	0,05	1,832	0,05	3,634	0,1	5,181	0,15	6,703
1,00	0,05	1,705	0,10	3,317	0,1	4,783	0,15	6,206
1,25	0,05	1,608	0,10	3,133	0,1	4,456	0,15	5,826
1,50	0,05	1,534	0,10	2,994	0,1	4,210	0,15	5,544
1,75	0,05	1,473	0,05	2,660	0,1	3,978	0,20	5,576
2,00	0,05	1,429	0,10	2,800	0,1	3,815	0,20	5,418

В качестве примера на рисунке 7 приведены графики зависимости максимального ускорения груза от начальной скорости соударения при радиусе рабочих поверхностей, равном 1,5 м, и различных коэффициентах трения. На рисунке видно, что, например, при радиусе рабочих поверхностей 1,5 м и начальной скорости соударения 1,6 м/с минимальное значение продольного ускорения достигается на линии графика, которая соответствует коэффициенту трения 0,1.

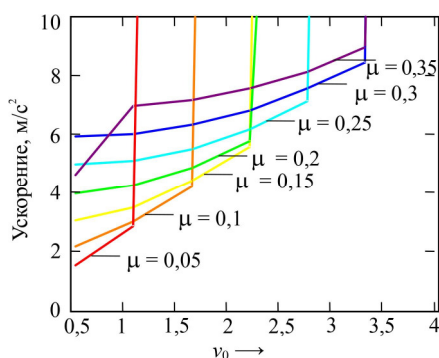


Рисунок 7 – Зависимость максимального ускорения груза от начальной скорости соударения при радиусе рабочих поверхностей, равном 1,5 м, и различных коэффициентах трения μ

Для ТКУ каткового типа характерно, что по мере увеличения коэффициента трения максимальное ускорение груза сначала уменьшается, а затем при дальнейшем увеличении коэффициента трения ускорение увеличивается, т. е. на графике зависимости ускорения от коэффициента трения виден минимум функции. Это объясняется тем, что на ускорение груза влияет как коэф-

фициент трения, так и радиусы опорных поверхностей.

В процессе проектирования катковых ТКУ можно задавать не только коэффициент трения, но и радиус рабочих поверхностей. Поэтому для катковых ТКУ определены такие сочетания значений коэффициента трения и радиуса опорных поверхностей, при которых продольное ускорение груза минимальное (таблица 2).

Таблица 2 – Оптимальные сочетания радиуса рабочих поверхностей и коэффициента трения, при которых обеспечивается минимальное продольное ускорение груза при соударении

R	Начальная скорость соударения v_0 , км/ч							
	2		4		6		8	
	μ	a	μ	a	μ	a	μ	a
0,50	0,05	2,079	0,10	4,085	0,15	5,959	0,15	7,674
0,75	0,05	1,832	0,10	3,577	0,10	5,181	0,15	6,703
1,00	0,05	1,705	0,05	3,304	0,10	4,783	0,15	6,206
1,25	0,00	1,592	0,05	3,039	0,10*	4,456	0,15*	5,826
1,50	0,00	1,466	0,05*	2,830	0,10*	4,210	0,15*	5,544
1,75	0,00	1,366	0,05*	2,660	0,10*	3,978	0,20*	5,576
2,00	0,00	1,275	0,05*	2,519	0,10*	3,815	0,20*	5,418

В качестве примера на рисунке 8 приведены графики зависимости максимального ускорения груза от коэффициента трения при начальной скорости соударения, равной 2,22 м/с, и различных значениях радиуса опорных поверхностей. На рисунке видно, что, например, при начальной скорости соударения 2,22 м/с и радиусе рабочих поверхностей 1,5 м минимальное значение продольного ускорения достигается при коэффициенте трения 0,15.

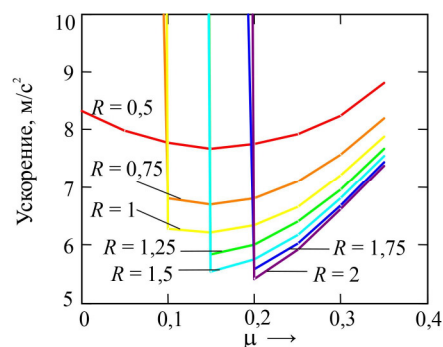


Рисунок 8 – Зависимость максимального ускорения груза от коэффициента трения μ при начальной скорости соударения, равной 2,22 м/с, и различных значениях радиуса опорных поверхностей R

Следует отметить, что во многих из рассмотренных комбинаций значений радиуса опорных поверхностей и коэффициента трения минимальное продольное ускорение достигается при полном использовании рабочего хода ТКУ. Такие сочетания отмечены в таблице 2 звездочкой (*). Если бы не было ограничения длины рабочего хода ТКУ, после которого происходит удар об ограни-

чители, то минимум ускорения в этих случаях достигался бы при другом значении коэффициента трения, и значение ускорения было бы меньше.

Определение рациональных параметров катковых ТКУ на основе обобщённого технико-экономического критерия. Для более полной оценки свойств турникетно-крепёжного устройства предлагается обобщенный технико-экономический критерий (ОТЭК), который формируется с учетом выводов, полученных в работах Л. Н. Никольского, Б. Г. Кеглина [10], А. Д. Железнякова, А. П. Болдырева, которые использовали данный критерий для оценки эффективности межвагонных амортизаторов. С учётом специфики рассматриваемой в данном исследовании механической системы ОТЭК, измеряемый в условных денежных единицах, может быть представлен в виде

$$u = \alpha_{уст} J_{уст} + \alpha_{пв} J_{пв} + \alpha_{пгр} J_{пгр},$$

где $\alpha_{уст}$, $\alpha_{пв}$, $\alpha_{пгр}$ – коэффициенты пропорциональности, связывающие условную повреждаемость с экономическим ущербом, измеряемым в условных денежных единицах; $J_{уст}$, $J_{пв}$, $J_{пгр}$ – условная повреждаемость вагонов сцепа: усталостная; от единичных перегрузок; повреждаемость груза от отдельных перегрузок.

Для катковых ТКУ определены рациональные значения параметров на основе ОТЭК. Минимальное значение ОТЭК для катковых ТКУ достигается при радиусе опорных поверхностей, равном 0,5 м, и коэффициенте трения, равном 0,1.

Таким образом в ходе исследования разработана и реализована на ЭВМ новая математическая модель системы «подвижной состав – катковые турникетно-крепёжные устройства – груз», отличающаяся от известных моделей тем, что составлена с учётом влияния межвагонных связей «стенки» (группы вагонов, с которой происходит соударение сцепа) и с использованием не статических, а динамических силовых характеристик катковых ТКУ, а также с учётом ограничений рабочего хода ТКУ.

С использованием предложенной математической модели исследовано влияние основных параметров катковых ТКУ на сохранность грузов, закреплённых на вагонах посредством данного типа устройств.

Для ТКУ каткового типа характерно, что чем больше радиус рабочих поверхностей ТКУ и чем меньше коэффициент трения, тем меньше ускорение груза в пределах рабочего хода ТКУ, однако тем быстрее (при меньшей начальной скорости соударения) заканчивается рабочий ход ТКУ и наступает удар об ограничители, сопровождающийся значительным ускорением. Для множества комбинаций значений радиуса опорных поверхно-

стей и начальной скорости соударения определены значения коэффициента трения, при котором достигается минимальное ускорение груза при ударе и работа ТКУ в пределах рабочего хода.

Определены оптимальные значения параметров катковых ТКУ на основе обобщённого технико-экономического критерия, учитывающего следующие виды ущерба, наносимого системе «подвижной состав – подвижные турникетно-крепёжные устройства – груз» от повреждающего действия на вагоны разовых продольных нагрузок значительной величины; усталостных повреждений вагонов; повреждающего действия на груз отдельных перегрузок. Из рассмотренных выше свойств гравитационных ТКУ вытекают возможные направления совершенствования их конструкций.

Список литературы

- 1 **Васильев, С. М.** Математическое моделирование динамических воздействий на длинномерные грузы и опорные вагоны / С. М. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – Гомель. – 2006. – № 1–2. – С. 30–36.
- 2 **Васильев, С. М.** Влияние параметров гравитационных турникетно-крепёжных устройств на повреждаемость длинномерных грузов / С. М. Васильев // Технические, экономические и экологические проблемы транспорта : материалы междунар. науч. конф., посвящённой 170-летию железных дорог России. 10–12 января 2008 г. / под общ. ред. А. П. Ковалёва, Н. Л. Кочегаровой. – Брянск : РГОТУПС, Брянский филиал, 2008. – С. 29–39.
- 3 **Каблуков, В. А.** Исследование продольной устойчивости металлопродукции при соударении вагонов / В. А. Каблуков, И. К. Мороз, А. В. Шатунов // Сб. науч. тр. / ДИИТ. – Днепропетровск, 1982. – Вып. 221/7: Вопросы улучшения технического содержания вагонов и совершенствования ходовых частей. – С. 52–56.
- 4 **Калашник, В. А.** К вопросу оценки инерционных сил при перевозке металлопродукции на открытом подвижном составе / В. А. Калашник, И. К. Мороз, И. В. Шатунов // Вопросы улучшения технического содержания вагонов и совершенствования ходовых частей : сб. науч. тр., Днепропетровск / ДИИТ. – Днепропетровск, 1984. – С. 73–77.
- 5 **Кеглин, Б. Г.** Динамика соударения платформ, нагруженных длинномерными незакрепленными грузами / Б. Г. Кеглин, Е. Ф. Стусь // Тр. БИТМ. – Брянск, 1974. – 347 с.
- 6 **Крайзгур, Г. Б.** О средствах продольной амортизации контейнерных платформ / Г. Б. Крайзгур, А. С. Лебедев, В. И. Угаров // Тр. ВНИИЖТ. – М., 1980. – Вып. 40. – С. 22–25.
- 7 **Малов, А. Д.** Крепление грузов на открытом подвижном составе для перевозки при высоких скоростях движения / А. Д. Малов // Тр. ВНИИЖТ. – М., 1965. – Вып. 294. – 166 с.
- 8 **Размещение и крепление грузов в вагонах / А. Д. Малов [и др.].** – М. : Машиностроение, 1980. – 328 с.
- 9 **Исследование с помощью ЭВМ нагрузок, действующих на вагоны и амортизированные грузы при соударении сцепов и пуске в ход грузовых поездов / Л. А. Манашкин [и др.].** – Тр. ДИИТ. – 1978. – Вып. 199/25: Проблемы механики наземного транспорта. – С. 87–93.
- 10 **Никольский, Л. Н.** Амортизаторы удара подвижного состава / Л. Н. Никольский, Б. Г. Кеглин. – М. : Машиностроение, 1986. – 144 с.
- 11 **Совершенствование способов размещения и крепления грузов в вагонах / под ред. А. Д. Малова.** – М. : Машиностроение, 1970. – 136 с.

12 **Спиридонов, Б. К.** Аналитическое определение динамических силовых характеристик катковых опор турникетно-крепежных устройств / Б. К. Спиридонов, А. Д. Железняков; БелИИЖТ. – Гомель, 1982. – 14 с. – Библиогр. : с. 14. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 10.09.82 № 2094.

13 **Спиридонов, Б. К.** Применение подвижных турникетно-крепежных устройств для перевозки длинномерных строительных конструкций железнодорожным транспортом / Б. К. Спиридонов, А. Д. Железняков, Л. П. Целковицова;

БелИИЖТ. – Гомель, 1982. – 13 с. – Библиогр. : с. 13. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 10.09.82, № 2093.

14 **Спиридонов, Б. К.** Определение оптимальных характеристик противоударных катковых устройств, используемых для перевозки длинномерных грузов на сцепе платформ / Б. К. Спиридонов, А. Д. Железняков, Л. П. Целковицова // Пути повышения эффективности использования подвижного состава : тез. докл. науч.-техн. конф. БелИИЖТа. – Гомель, 1983. – С. 87–88.

Получено 18.10.2010

S. M. Vasilyeu. Definition of rational parameters of the roller turnstile-fastening device.

A mathematical model of the mechanical system is developed, which includes cargo, fixed on the adhesion of two or three platforms with mobile TFD, and a group of several cargos. The quantitative relationship defined between the basic parameters of roller-type TFD and longitudinal acceleration acting on the cargo, fortified with their use on rolling stock. The rational parameters of the roller turnstile-fastening device are defined, that reduce damage of cargo and carriages during transportation.