

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРНИКЕТНО-КРЕПЁЖНЫХ УСТРОЙСТВ КАТКОВОГО, ПОЛОЗКОВОГО И КЛИНОВОГО ТИПОВ

Розроблено математичну модель для дослідження динамічних впливів на довгомірні вантажі, закріплені з використанням рухливих турнікетно-кріпильних пристроїв на опорних вагонах, при різних варіантах зіткнення опорних вагонів з іншими одиницями рухомого складу. Зроблені графіки залежності максимального прискорення вантажу від основних параметрів турнікетно-кріпильних пристроїв. Наводиться аналіз закономірностей, характерних для динаміки турнікетно-кріпильних пристроїв каткового, полозкового і клинового типів.

Разработана математическая модель для исследования динамических воздействий на длинномерные грузы, закреплённые с использованием подвижных турникетно-креплёжных устройств на опорных вагонах, при различных вариантах соударения опорных вагонов с другими единицами подвижного состава. Получены графики зависимостей максимального ускорения груза от основных параметров турникетно-креплёжных устройств. Анализируются закономерности, характерные для динамики турникетно-креплёжных устройств каткового, полозкового и клинового типов.

The mathematical model is developed for research of dynamic influences on the lengthy cargoes fixed with use of mobile fixing devices on basic cars, at various variants of impact of basic cars with other units of the rolling stock. Schedules of dependences of the maximal acceleration of a cargo from key parameters of fixing devices are obtained. Relationships, characteristic for dynamics of rolling, skidding and wedge fixing devices, are analyzed.

### Введение

Необходимость снижения уровня динамических воздействий на длинномерный груз и опорные вагоны при ударном взаимодействии с другими единицами подвижного состава привела к созданию подвижных опорно-креплёжных и турникетно-креплёжных устройств (ОКУ и ТКУ).

При использовании подвижной связи инерционное воздействие на груз меньше по сравнению с абсолютно жесткой связью. Использование подвижной связи также эффективно облегчает условия соударения опорного вагона. Так, в этом случае при скоростях соударения 3...10 км/ч усилие на автосцепке уменьшается на 45...50 % по сравнению с жестким креплением груза.

Приоритет в области обоснования необходимости использования в современных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта подвижных опор для крепления грузов (в особенности длинномерных) на вагонах принадлежит А. Д. Малову [7, 8, 11]. Выводы об эффективности использования подвижной связи груза с вагоном подтверждаются и в исследованиях В. А. Каблукова, И. К. Мороза, А. В. Шатунова,

В. А. Калашника, Л. А. Манашкина, А. Д. Железнякова, Б. Г. Кеглина, Е. Ф. Стуся, Г. Б. Крайзгура [3–6, 9].

В работах зарубежных авторов не просматриваются достаточно обобщающие исследования по вопросам крепления длинномерных грузов. Это объясняется тем, что широкое применение вагонов с подвижными хребтовыми балками и менее жесткие условия эксплуатации подвижного состава не вызывают необходимости дополнительного или индивидуального амортизирования грузов. Отмечая эффективность использования в конструкции кузова вагона подвижной хребтовой балки или грузового настила, следует отметить высокую стоимость этих мероприятий.

Следует указать на недостаточность исследований динамики систем «вагон – груз» с подвижными ТКУ, поскольку при рассмотрении подобных задач прибегали к значительному упрощению расчетных схем. Развитие вычислительной техники позволяет разрешать сложные механические системы, поэтому выбор расчетных схем для моделирования процессов соударений должен реализовывать адекватные реальным условиям математические модели.

# 1. Математическая модель системы «опорные вагоны – турникетно-крепёжные устройства – груз»

Наиболее распространенным способом перевозки длинномерных и крупногабаритных грузов, в частности железобетонных строительных конструкций, является их транспортировка на одной платформе или на сцепе из двух платформ. Возможно также размещение груза на сцепе из трёх платформ.

В реальных условиях возможны различные варианты соударения вагона или сцепа вагонов с другими единицами подвижного состава. В эксплуатации наиболее вероятным является соударение набегающего вагона или сцепа с другими вагонами, находящимися в составе неподвижной группы.

На рис. 1 приведена расчётная схема для соударения сцепа из двух платформ с неподвижной группой заторможенных вагонов, далее называемых «стенкой».

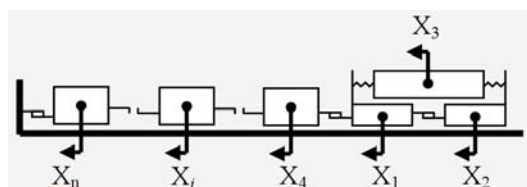


Рис. 1. Расчётная схема соударения для сцепа из двух платформ

Пользуясь принципом Даламбера, запишем математическую модель соударения в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} -m_1 x_1'' = P_{12} + P_{14} + N_{13} \\ -m_2 x_2'' = P_{21} + N_{23} \\ -m_3 x_3'' = N_{31} + N_{32} \\ -m_4 x_4'' = P_{41} + P_{45} + F_4 \cdot \text{sign} x_4' \\ \dots \\ -m_i x_i'' = P_{i,i-1} + P_{i,i+1} + F_i \cdot \text{sign} x_i' \\ \dots \\ -m_n x_n'' = P_{n,n-1} + P_{n,n+1} + F_n \text{sign} x_n' \end{cases}$$

где  $m_1, m_2$  – массы первого и второго по ходу движения вагонов сцепа;  $m_3$  – масса груза;  $m_4$  – масса первого вагона стенки;  $m_i$  – масса  $i$ -го вагона стенки, начиная со второго;  $x_i$  – координата центра масс  $i$ -го элемента системы, отсчитываемая от его положения в начальный момент соударения;  $P$  – сила реакции межвагонных связей;  $N_{31}, N_{32}$  – сила продольной реакции опор на вагонах 1 и 2 соответственно;  $F_i$  – сила сопротивления перемещению  $i$ -го вагона, образующего

стенку;  $\text{sign } x_4'$  – знак скорости, равный +1 при  $x_i' > 0$  и –1 при  $x_i' < 0$ .

В предложенной модели соударения имеются силовые связи, имитирующие работу гравитационных ТКУ (катковых, полозковых либо клиновых), и силовые связи, имитирующие работу поглощающих аппаратов вагонов.

Ввиду того, что в подвижных гравитационных опорах консервативная возвращающая сила при перемещениях груза относительно опорных вагонов в продольном направлении возникает вследствие подъёма груза, задачей аналитического определения силовых характеристик подвижной опоры является задача установления количественной зависимости между законом движения центра тяжести груза в вертикальной продольной плоскости и продольными силами, сообщаемыми грузу через эту опору. Полученные уравнения динамических силовых характеристик подвижных опор каткового, полозкового и клинового типов приведены в работах [1, 2].

Моделирование силовой характеристики межвагонной связи можно осуществить в соответствии с [10].

Эффективность ТКУ оценивается с позиций их главного назначения – обеспечения 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.

Расчёты показывают, что для анализа влияния параметров крепёжных устройств на повреждаемость вагонов и длинномерных грузов целесообразно использовать расчётную схему соударения, в которой груз, укрепленный на сцепе из двух вагонов, соударяется с тремя последовательно соединёнными вагонами с упором. Дальнейшее увеличение числа вагонов «стенки» в расчётной схеме не даёт значимого уточнения результатов моделирования, а только увеличивает количество расчётов.

## 2. Влияние параметров катковых устройств на повреждаемость длинномерных грузов

На рис. 2–5 представлены результаты моделирования при различных значениях основных параметров катковых ТКУ, начальной скорости соударения и массы груза. Массы платформ сцепа – 22400 кг, массы вагонов «стенки» – 60000 кг.

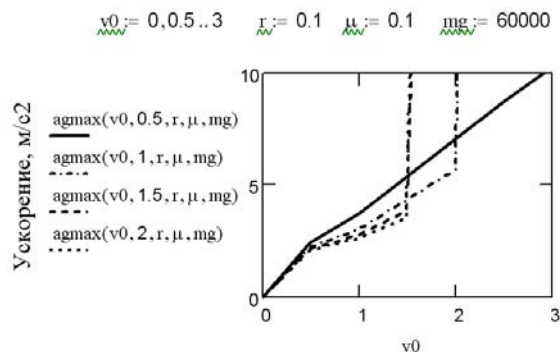


Рис. 2. Зависимость максимального ускорения груза от начальной скорости соударения  $v_0$  (катковые ТКУ)

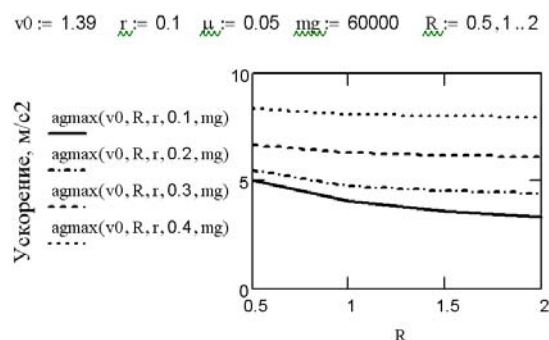


Рис. 3. Зависимость максимального ускорения груза от радиуса опорных поверхностей  $R$  (катковые ТКУ)

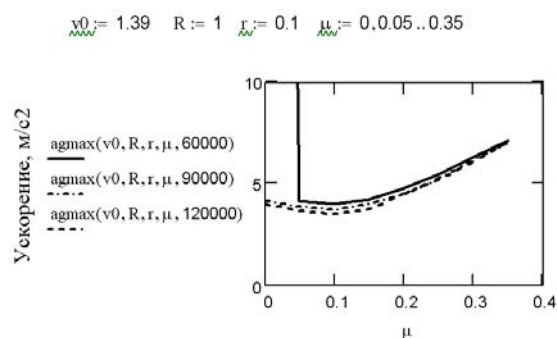


Рис. 4. Зависимость максимального ускорения груза от коэффициента трения  $\mu$  (катковые ТКУ)

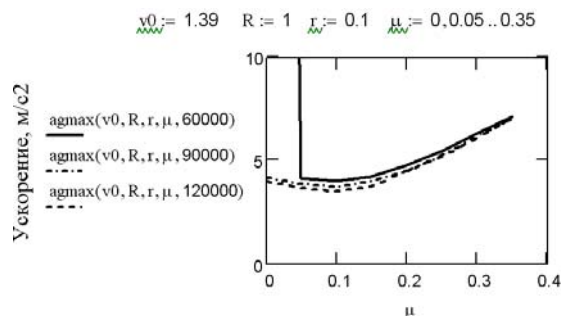


Рис. 5. Зависимость максимального ускорения груза от массы груза  $mg$  (катковые ТКУ)

Исходя из проведенных расчетов, можно выделить следующие закономерности, характерные для ТКУ каткового типа. Из рис. 2 вид-

но, что увеличение начальной скорости соударения приводит к увеличению ускорения груза. При превышении определённой начальной скорости соударения, линии ускорения на графиках уходят резко вверх. Это отражает те случаи, когда полностью использован рабочий ход ТКУ и происходит удар об ограничитель. Ускорение груза при таком ударе об ограничитель значительно выше, чем ускорение в пределах рабочего хода ТКУ. Из графиков видна закономерность, 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. Таким образом, при стремлении уменьшить коэффициент трения и увеличить радиус опорных поверхностей с целью уменьшения ускорения груза, необходимо помнить, что удар об ограничитель наступает при меньших начальных скоростях соударения, и может привести к тому, что груз получит при ударе не меньшее, а многократно большее ускорение. Исходя из ожидаемой на пути транспортировки груза максимальной скорости соударения, можно подобрать коэффициент трения и радиус опорной поверхности, при которых будет обеспечено минимальное ускорение груза при ударе и работа ТКУ в пределах рабочего хода.

На графиках зависимости максимального ускорения груза от коэффициента трения (рис. 4) видно, что по мере увеличения коэффициента трения  $\mu$  с 0 до 0,1 максимальное ускорение груза уменьшается, а затем, при дальнейшем увеличении  $\mu$  с 0,1 до 0,4, ускорение увеличивается, т. е. на графике виден минимум функции. Такую форму графика можно объяснить, исходя из силовой характеристики каткового ТКУ, тем, что на ускорение груза влияет как коэффициент трения  $\mu$ , так и радиусы опорных поверхностей  $R$  и катка  $r$ .

Геометрическая форма нижней рабочей поверхности каткового ТКУ такова, что чем дальше каток отклоняется из равновесного положения, тем «круче» поверхность по которой он катится и тем больше продольное ускорение. Если коэффициент трения  $\mu$  относительно мал, тогда решающее влияние на ускорение груза оказывает радиус опорных поверхностей ТКУ. По мере увеличения коэффициента трения (при прочих неизменных параметрах) каток всё меньше откатывается от равновесного положения до более «отвесной» части нижней рабочей поверхности, где мог бы достичь наибольшего

ускорения, т.е. на графике видно, что ускорение снижается. При дальнейшем увеличении коэффициента трения  $\mu$  влияние радиуса опорных поверхностей  $R$  становится всё менее заметным, и ускорение груза закономерно увеличивается по мере увеличения коэффициента трения  $\mu$ .

Таким образом, можно для конкретных условий определить такие сочетания значений  $\mu$  и  $R$ , при которых продольное ускорение груза минимальное.

Из рис. 5 видно, что увеличение массы груза приводит к уменьшению ускорения груза.

### **3. Влияние параметров ползковых устройств на повреждаемость длинномерных грузов**

Ползковые ТКУ по своим геометрическим свойствам схожи с катковыми. Поэтому для ползковых ТКУ характерны те же закономерности, что и для катковых (см. п. 2), различие лишь в численных значениях.

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. Исходя из ожидаемой на пути транспортировки груза максимальной скорости соударения, можно подобрать коэффициент трения и радиус опорной поверхности, при которых будет обеспечено минимальное ускорение груза при ударе и работа ТКУ в пределах рабочего хода (более подробное объяснение в п. 2 для катковых ТКУ).

На графиках зависимости максимального ускорения груза от коэффициента трения видно, что по мере увеличения коэффициента трения  $\mu$  максимальное ускорение груза сначала уменьшается, а затем, при дальнейшем увеличении  $\mu$ , ускорение увеличивается, т. е. на графике виден минимум функции. Таким образом, можно для конкретных условий определить такие сочетания значений  $\mu$  и  $R$ , при которых продольное ускорение груза минимальное (более подробное объяснение в п. 2 для катковых ТКУ).

Увеличение массы груза приводит к уменьшению ускорения груза.

### **4. Влияние параметров клиновых устройств на повреждаемость длинномерных грузов**

Для клиновых опор характерным является то, что на длине их рабочего хода ускорение груза как на одной платформе, так и на сцепе из

двух или трёх платформ практически не зависит от начальной скорости соударения и от массы груза, а зависит только от угла наклона опорных поверхностей к горизонту и величины коэффициента трения на этих поверхностях. Чем больше угол наклона рабочих поверхностей и чем больше коэффициент трения, тем больше ускорение груза.

Соответственно сила, действующая на груз, не зависит от скорости соударения и возрастает с увеличением массы груза, коэффициента трения и угла наклона рабочих поверхностей ТКУ, оставаясь постоянной в течение всего перемещения груза.

Анализ зависимости максимального ускорения груза от начальной скорости соударения показывает, что при превышении определённой начальной скорости соударения горизонтальные линии ускорения на графиках уходят резко вверх. Это отражает те случаи, когда полностью использован рабочий ход ТКУ и происходит удар об ограничитель (аналогично, как и в катковых и ползковых ТКУ).

Из графиков видна закономерность, что чем меньше угол наклона 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. Таким образом, при стремлении уменьшить угол наклона опорных поверхностей и коэффициент трения с целью уменьшения ускорения груза, необходимо помнить, что удар об ограничитель наступает при меньших начальных скоростях соударения, и может привести к тому, что груз получит при ударе не меньшее, а многократно большее ускорение. Исходя из ожидаемой на пути транспортировки груза максимальной скорости соударения, можно подобрать угол наклона рабочих поверхностей и коэффициент трения, при которых будет обеспечено минимальное ускорение груза при ударе и работа ТКУ в пределах рабочего хода.

### **Заключение**

Катковые и ползковые ТКУ в некоторой степени схожи по своим геометрическим свойствам и поэтому имеют некоторые общие закономерности.

Для ТКУ каткового и ползкового типов 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) за-

канчивается рабочий ход ТКУ и наступает удар об ограничители, сопровождающийся значительным ускорением. Исходя из ожидаемой на пути транспортировки груза максимальной скорости соударения, можно подобрать коэффициент трения и радиус опорной поверхности, при которых будет обеспечено минимальное ускорение груза при ударе и работа ТКУ в пределах рабочего хода

Для ТКУ каткового и ползкового типов 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 виден минимум функции. Это объясняется тем, что на ускорение груза влияет как коэффициент трения, так и радиусы опорных поверхностей. Таким образом, можно для конкретных условий определить такие сочетания значений коэффициента трения и радиуса опорных поверхностей, при которых продольное ускорение груза минимальное.

Для ТКУ каткового и ползкового типов характерно, что увеличение массы груза приводит к уменьшению ускорения груза.

Для клиновых ТКУ характерным является то, что на длине их рабочего хода ускорение груза как на одной платформе, так и на сцепе из двух или трёх платформ практически не зависит от начальной скорости соударения и от массы груза, а зависит только от угла наклона опорных поверхностей к горизонту и величины коэффициента трения на этих поверхностях. Чем больше угол наклона рабочих поверхностей и чем больше коэффициент трения, тем больше ускорение груза.

Соответственно сила, действующая на груз, не зависит от скорости соударения и возрастает с увеличением массы груза, коэффициента трения и угла наклона рабочих поверхностей ТКУ, оставаясь постоянной в течение всего перемещения груза.

Для ТКУ клинового типа характерно, что чем меньше угол наклона 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. Исходя из ожидаемой на пути транспортировки груза максимальной скорости соударения, можно подобрать угол наклона рабочих поверхностей и коэффициент трения, при которых будет обеспечено минимальное ускорение груза при ударе и работа ТКУ в пределах рабочего хода.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

Поступила в редколлегию 22.05.2008.