

УДК 656.212.6.073.22.002.5

*А. В. ЗАВОРОТНЫЙ*, кандидат технических наук, *И. А. ВОРОЖУН*, старший преподаватель, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ВЛИЯНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ КРЕПЛЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ПРОДОЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ТРУБ

Рассмотрена схема крепления пяти труб большого диаметра на железнодорожной платформе с использованием стальных канатов и натяжных устройств, позволяющих создать предварительное натяжение канатов. Методом математического моделирования исследовано влияние ослабления натяжения канатов продольного крепления на величину смещения труб в процессе соударения вагонов. Установлено, что незначительное ослабление канатов продольного крепления, позволяющее пакету труб свободно перемещаться вдоль платформы, сопровождается увеличением продольного смещения труб относительно платформы в процессе соударения вагонов практически на величину этого свободного перемещения. Однако увеличение свободного перемещения пакета труб, обусловленное расстройством крепления, сопровождается соответствующим увеличением остаточного смещения труб вдоль платформы после соударения вагонов. Свободное перемещение пакета труб вдоль платформы, обусловленное ослаблением канатов продольного крепления, оказывает влияние на величину наибольших сил в канатах крепления промежуточных опор при соударении вагонов.

**И**нтенсификация перевозочного процесса на железнодорожном транспорте неразрывно связана с улучшением использования грузоподъемности вагонов при транспортировании грузов. Эффективность использования грузоподъемности достигается применением специализированных вагонов, а также оснащением существующих вагонов дополнительными устройствами для размещения и крепления грузов. Следует отметить дороговизну оснащения вагонного парка достаточным количеством специализированных вагонов. Кроме того, узкая специализация уменьшает возможность замены одних типов вагонов другими, усложняет регулировочную работу на железных дорогах, повышает порожний пробег вагонов. Поэтому оборудование существующих вагонов устройствами для размещения и крепления отдельных грузов является наиболее предпочтительным вариантом решения указанной проблемы.

Многочисленные исследования показывают, что основной причиной, приводящей к разрушению и повреждению как перевозимых грузов, так и самих вагонов, является нарушение режимов эксплуатации подвижного состава при сортировочной работе. Анализ результатов исследований ускорений и перемещений грузов показал, что при абсолютно жесткой связи груза с вагоном инерционное воздействие на груз больше по сравнению с подвижной или гибкой связью. Авторы работ [1, 2] отмечают высокую эффективность применения амортизаторов удара при креплении груза на вагонах, особенно использование крепёжных устройств, обладающих способностью обеспечивать грузу при ударе возможность перемещения относительно вагона на достаточно большое расстояние. Одним из возможных путей решения этой задачи является применение в конструкции ваго-

на подвижной хребтовой балки. Достаточный опыт использования такого технического решения накоплен в зарубежных странах. Так, в США для перевозки труб применяют платформы с упругими торцевыми 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.

Действующие технические условия предусматривают размещение в полувагоне четырех труб диаметром 1420 мм и трех труб указанного диаметра на железнодорожной платформе с применением для крепления деревянных брусков и проволочных обвязок, причем деревянные бруски должны прибиваться к полу платформы гвоздями. Авторами работ [3, 4] рассмотрены многооборотные устройства для размещения и крепления на платформе четырех и даже пяти труб указанного диаметра как с полиэтиленовым покрытием так и без него.

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. Совершенствование методики расчёта таких устройств является актуальной прикладной задачей, имеющей значение не только для железнодорожного транспорта Беларуси, но и России и других стран СНГ. Важность и актуальность данной задачи объясняется тем, что применение таких устройств позволит использовать грузоподъемность платформ более полно и даже пре-

высить использование грузоподъёмности полувагонов за счёт размещения пяти труб диаметром 1420 мм вместо четырёх.

Одним из этапов при разработке устройства для размещения и крепления грузов на подвижном составе является выбор расчетной схемы, позволяющей оценить силы, действующие на перевозимый груз, транспортирующее средство и элементы крепления. Наиболее неблагоприятные воздействия транспортирующее средство, грузы и элементы их крепления испытывают при соударениях вагонов во время проведения маневровых работ, особенно при роспуске с сортировочных горок. В работе [4] исследовалось влияние предварительного натяжения упругих элементов поперечной обвязки на продольное перемещение труб, которое 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 данной работы является установление влияния ослабления натяжения канатов для продольного крепления труб к железнодорожной платформе на величину смещения пакета труб в процессе соударения вагонов.

Платформа, загруженная трубами, представляет динамическую систему со многими степенями свободы. В процессе исследования эту сложную систему заменим более простой расчетной схемой с ограниченным числом степеней свободы, но отражающей основные свойства исходной схемы и соответствующей поставленной цели.

В принятой схеме пять труб диаметром 1420 мм размещены на железнодорожной платформе в три яруса, а реквизиты крепления содержат стальные канаты с натяжными устройствами (рисунок 1).

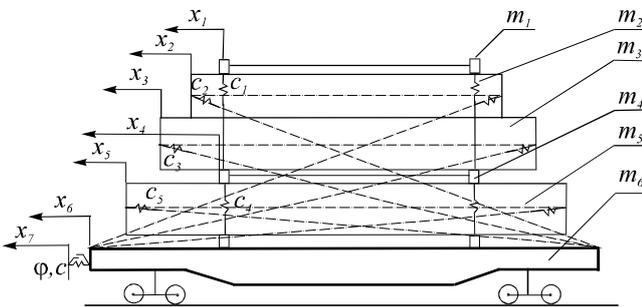


Рисунок 1 – Расчетная схема воздействия платформы и труб при соударении вагонов

Нижний ярус труб уложен на опоры, закрепленные на раме платформы. Между нижним и средним ярусами труб установлены промежуточные опоры, которые посредством канатов прикреплены к раме платформы. Труба верхнего яруса размещена в седловине между трубами среднего яруса и прикреплена к раме платформы по

средством продольных канатов. Поперечная обвязка охватывает три верхние трубы и прикреплена к промежуточным опорам. От продольного смещения трубы нижнего и среднего ярусов удерживаются канатами, закрепленными на торцах рамы платформы.

В рассматриваемой математической модели процесса соударения платформы, загруженной тремя ярусами труб, с группой из трех неподвижных вагонов все тела считаются абсолютно твердыми, а канаты продольного крепления труб и поперечной обвязки обладают упругими свойствами и имеют линейные характеристики. Элементы поперечной обвязки и промежуточные опоры объединены в отдельные блоки с соответствующими массами. Движение механической системы рассматривается в продольной вертикальной плоскости на прямом горизонтальном участке пути. Продольные линейные перемещения поперечной обвязки, трубы верхнего яруса, двух труб среднего яруса, промежуточных опор, двух труб нижнего яруса, платформы и трех вагонов стенки обозначим через  $x_1, \dots, x_9$  соответственно. Начало отсчета каждой из координат  $x_i$ , определяющих положение элементов системы, соответствует моменту соприкосновения платформы с вагоном стенки. Таким образом, при принятых допущениях рассматриваемая система будет иметь девять независимых координат. Применим способ Германа – Даламбера и запишем систему дифференциальных уравнений, отражающих движение ярусов труб, поперечной обвязки, промежуточных опор, платформы и трех вагонов:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + T_1 \sin \alpha_1 - F_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 + T_{2n} \cos \alpha_{2n} - T_{2n} \cos \alpha_{2n} + F_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \\ &+ F_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 + T_{3n} \cos \alpha_{3n} - T_{3n} \cos \alpha_{3n} - F_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + \\ &+ F_3 \operatorname{sgn}(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) = 0; \\ m_4 \ddot{x}_4 - T_1 \sin \alpha_1 + T_4 \sin \alpha_4 - F_3 \operatorname{sgn}(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - \\ &- F_4 \operatorname{sgn}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) = 0; \\ m_5 \ddot{x}_5 + T_{5n} \cos \alpha_{5n} - T_{5n} \cos \alpha_{5n} + F_4 \operatorname{sgn}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + \\ &+ F_5 \operatorname{sgn}(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) = 0; \\ m_6 \ddot{x}_6 - T_{2n} \cos \alpha_{2n} + T_{2n} \cos \alpha_{2n} - T_{3n} \cos \alpha_{3n} + \\ &+ T_{3n} \cos \alpha_{3n} - T_4 \sin \alpha_4 - T_{5n} \cos \alpha_{5n} + T_{5n} \cos \alpha_{5n} - \\ &- F_5 \operatorname{sgn}(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) + R_1 = 0; \\ m_7 \ddot{x}_7 - R_1 + R_2 &= 0; \\ m_8 \ddot{x}_8 - R_2 + R_3 &= 0; \\ m_9 \ddot{x}_9 - R_3 + R_4 &= 0, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $m_1, \dots, m_9$  – соответственно массы поперечной обвязки, верхней трубы, двух труб среднего яруса, промежуточных опор, двух труб нижнего яруса, платформы и трех вагонов;  $T_1, T_{2n}, T_{2n}, T_{3n}, T_{3n}, T_4, T_{5n}, T_{5n}$  – соответственно силы упругости канатов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления труб сред-

него яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса;  $\alpha_1, \alpha_{2n}, \alpha_{2n}, \alpha_{3n}, \alpha_{3n}, \alpha_4, \alpha_{5n}, \alpha_{5n}$  – соответственно углы отклонения канатов поперечной обвязки от вертикали, наклона канатов продольного крепления верхней трубы и труб среднего яруса к горизонту;  $F_1, \dots, F_5$  – соответственно силы сухого трения между элементами поперечной обвязки и верхней трубой, верхней трубой и трубами среднего яруса, трубами среднего яруса и промежуточными опорами, трубами нижнего яруса и промежуточными опорами, а также опорами платформы;  $R_1, \dots, R_4$  – силы в междувагонных связях.

Силы упругости канатов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы и труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса определяются следующими выражениями:

$$T_1 = c_1(\sqrt{(l_{01} + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_4)^2} - l_{01});$$

$$T_{2n,2n} = c_2(\sqrt{(\sqrt{(l_{02} + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_3))^2 + h_1^2} - l_{02}),$$

если

$$(\sqrt{(\sqrt{(l_{02} + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_3))^2 + h_1^2} - l_{02}) > 0;$$

$$T_{2n,2n} = 0, \text{ если}$$

$$(\sqrt{(\sqrt{(l_{02} + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_3))^2 + h_1^2} - l_{02}) \leq 0;$$

$$T_{3n,3n} = c_3(\sqrt{(\sqrt{(l_{03} + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2} - l_{03}),$$

$$\text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_{03} + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2} - l_{03}) > 0;$$

$$T_{3n,3n} = 0, \text{ если}$$

$$(\sqrt{(\sqrt{(l_{03} + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2} - l_{03}) \leq 0;$$

$$T_4 = c_4(\sqrt{(l_{04} + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2} - l_{04});$$

$$T_{5n,5n} = c_5(\sqrt{(\sqrt{(l_{05} + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2} - l_{05}),$$

если

$$(\sqrt{(\sqrt{(l_{05} + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2} - l_{05}) > 0;$$

$$T_{5n,5n} = 0, \text{ если}$$

$$(\sqrt{(\sqrt{(l_{05} + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2} - l_{05}) \leq 0,$$

где  $c_1, \dots, c_5$  – соответственно жесткости канатов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса;  $l_{01}, \dots, l_{05}$  – соответственно длины канатов попереч-

ной обвязки, продольного крепления верхней трубы, труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса в свободном (недеформированном) состоянии;  $\lambda_1, \dots, \lambda_5$  – соответственно величины предварительного натяжения канатов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса;  $h_1, h_2, h_3$  – расстояния от пола платформы до крюков на концах канатов продольного крепления труб соответственно верхнего, среднего и нижнего ярусов по вертикали.

Символ « $l$ » и знак « $+$ » соответствуют силам, приложенным к левым торцам труб, а символ « $n$ » и знак « $-$ » – силам, приложенным к правым торцам труб на расчетной схеме (см. рисунок 1).

Силы сухого трения между элементами поперечной обвязки и верхней трубой, верхней трубой и трубами среднего яруса, трубами среднего яруса и промежуточными опорами, трубами нижнего яруса и промежуточными опорами, а также опорами платформы определяются по уравнениям

$$F_1 = f_1(m_1 g + T_1 \cos \alpha_1);$$

$$F_2 = f_2((m_1 + m_2) g + T_1 \cos \alpha_1 + T_{2n} \sin \alpha_{2n} + T_{2n} \sin \alpha_{2n});$$

$$F_3 = f_3((m_1 + m_2 + m_3) g + T_1 \cos \alpha_1 + T_{3n} \sin \alpha_{3n} + T_{3n} \sin \alpha_{3n});$$

$$F_4 = f_4((m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g + T_{3n} \sin \alpha_{3n} + T_{3n} \sin \alpha_{3n} + T_4 \cos \alpha_4);$$

$$F_5 = f_5((m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5) g + T_{3n} \sin \alpha_{3n} + T_{3n} \sin \alpha_{3n} + T_4 \cos \alpha_4 + T_{5n} \sin \alpha_{5n} + T_{5n} \sin \alpha_{5n}),$$

где  $f_1, \dots, f_5$  – соответственно коэффициенты трения между элементами поперечной обвязки и верхней трубой, верхней трубой и трубами среднего яруса, трубами среднего яруса и промежуточными опорами, трубами нижнего яруса и промежуточными опорами, а также опорами платформы;  $g$  – ускорение свободного падения.

Силы в междувагонных связях с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами при перемещениях вагонов, не превышающих ход поглощающих аппаратов, выражаются зависимостями

$$R_1 = c(x_6 - x_7)[1 + \varphi \operatorname{sgn}(\dot{x}_6 - \dot{x}_7)];$$

$$R_2 = c(x_7 - x_8)[1 + \varphi \operatorname{sgn}(\dot{x}_7 - \dot{x}_8)];$$

$$R_3 = c(x_8 - x_9)[1 + \varphi \operatorname{sgn}(\dot{x}_8 - \dot{x}_9)];$$

$$R_4 = c x_9(1 + \varphi \operatorname{sgn} \dot{x}_9),$$

где  $c$  – коэффициент жесткости упругих элементов междувагонных связей;  $\varphi$  – коэффициент трения в элементах междувагонных связей.

Тригонометрические функции углов отклонения канатов поперечной обвязки и крепления про-

межуточных опор от вертикали определяются соответственно выражениями

$$\sin \alpha_1 = \frac{x_1 - x_4}{\sqrt{(l_{01} + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_4)^2}};$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{l_{01} + \lambda_1}{\sqrt{(l_{01} + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_4)^2}};$$

$$\sin \alpha_4 = \frac{x_4 - x_6}{\sqrt{(l_{04} + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2}};$$

$$\cos \alpha_4 = \frac{l_{04} + \lambda_4}{\sqrt{(l_{04} + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2}}.$$

Численное интегрирование уравнений системы (1) проводилось для диапазона скоростей соударения вагонов 0,5–3 м/с при следующих исходных данных:  $m_1 = 10$  кг;  $m_2 = 6800$  кг;  $m_3 = m_5 = 13600$  кг;  $m_4 = 100$  кг;  $m_6 = 21000$  кг;  $m_7 = m_8 = m_9 = 84000$  кг;  $l_{01} = 2,46$  м;  $l_{02} = 12,8$  м;  $l_{03} = 12,7$  м;  $l_{04} = 1,36$  м;  $l_{05} = 12,6$  м;  $h_1 = 2,4$  м;  $h_2 = 1,5$  м;  $h_3 = 0$ ;  $c = 11$  МН/м;  $c_2 = 1$  МН/м;  $c_1 = c_3 = c_4 = c_5 = 2$  МН/м;  $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 0,35$ ;  $\varphi = 0,55$ .

На данном этапе проводилось исследование влияния ослабления натяжения канатов продольного крепления на величину смещения труб в процессе соударения вагонов. Расчеты проводились в среде MathCAD 2001 Professional при разных скоростях соударения вагонов. При этом значения  $x$  предварительного смещения труб всех ярусов принимались одинаковыми и варьировались в пределах 0, ... , 0,1 м. Результаты расчетов для скорости соударения вагонов 1,5 м/с и  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0$  представлены в виде графиков на рисунке 2.

Как показывают расчеты, незначительное ослабление канатов продольного крепления, позволяющее пакету труб свободно перемещаться вдоль платформы, сопровождается увеличением продольного смещения труб относительно платформы в процессе соударения вагонов практически на величину этого свободного перемещения.

В ходе исследования установлено, что увеличение свободного перемещения пакета труб, обусловленное расстройством крепления, сопровождается соответствующим увеличением остаточного смещения труб вдоль платформы после соударения вагонов. Кроме того свободное перемещение пакета труб вдоль платформы, обусловленное ослаблением канатов продольного крепления, оказывает влияние на величину наибольших сил в канатах крепления промежуточных опор при соударении вагонов.

Получено 10.10.2007

**A. V. Zavarotny, I. A. Vorojun.** Influence of easing of fastening on size of longitudinal displacement of pipes.

In clause the circuit of fastening of five pipes of the big diameter on a railway platform with use of steel ropes and the tension devices is considered, allowing to create a preliminary tension of ropes. The method of mathematical modelling investigates influence of easing of a tension of ropes of longitudinal fastening on size of displacement of pipes during impact of cars. Insignificant easing of ropes of the longitudinal fastening is established, that, allowing a package of pipes freely to move along a platform, is accompanied by increase in longitudinal displacement of pipes concerning a platform during impact of cars practically on size of this free moving. However the increase in free moving of a package of the pipes, caused by frustration of fastening, is accompanied by corresponding increase in residual displacement of pipes along a platform after impact of cars. Free moving of a package of pipes along a platform, caused by easing of ropes of longitudinal fastening, influences size of the greatest forces in ropes of fastening of intermediate support at impact of cars.

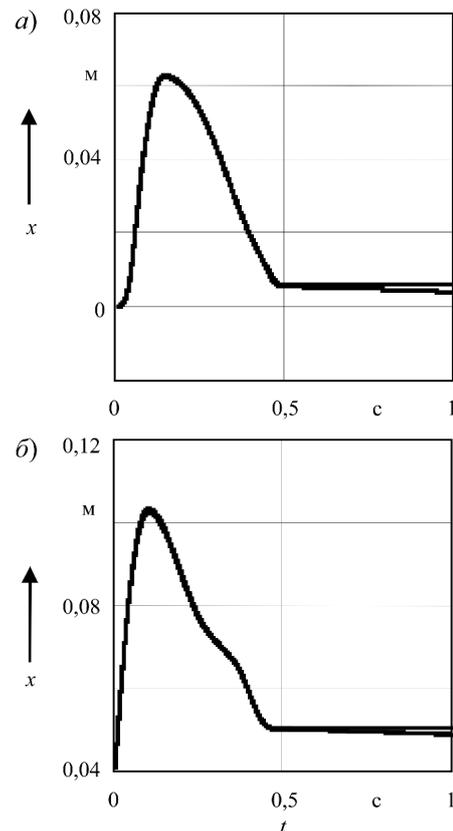


Рисунок 2 – Предварительное смещение пакета труб в процессе соударения вагонов: а –  $x = 0$ ; б –  $x = 0,04$  м

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет на стадии проектирования устройств для размещения и крепления труб на железнодорожных платформах более рационально подойти к выбору канатов крепления.

#### Список литературы

- 1 **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.
- 2 Моделирование взаимных продольных перемещений ярусов штабельных грузов с учетом сил трения / А. Н. Бондаренко [и др.] // Механика и трибология транспортных систем – 2003: материалы докл. междунар. конгр. – Ростов н/Д, 2003. – С. 126–130.
- 3 Устройство для крепления труб на транспортном средстве : а. с. 1296454 СССР, МКИ 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.
- 4 **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.