

УДК 656.136

И. А. ВОРОЖУН, А. В. ШИЛОВИЧ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

## ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНЫХ ТОРМОЖЕНИЙ ПОЕЗДА НА СМЕЩЕНИЯ ЯРУСОВ ТРАНСПОРТИРУЕМЫХ ТРУБ

Рассмотрена динамика поезда, который составлен из вагонов-платформ с трубами большого диаметра, размещенными в три яруса по высоте. Методом математического моделирования определены величины продольного смещения ярусов труб в случаях повторных торможений поезда.

**Ключевые слова:** платформа, ярусы труб, упругое крепление, смещение труб, торможение поезда.

Анализ литературных источников показал, что основной причиной, приводящей к разрушению и повреждению как перевозимых грузов, так и самих вагонов, является нарушение режимов эксплуатации подвижного состава, особенно при сортировочной работе [1, 2]. Значительные ускорения, возникающие при соударениях вагонов и экстренном торможении, становятся причиной перемещений многоярусных грузов. Данный факт имеет место, например, при упругом способе продольного крепления ярусов труб большого диаметра на платформах [3, 4]. Моделирование однократных продольных перемещений ярусов грузов, наблюдаемых при эксплуатации, представлено в работах [5, 6], однако в процессе следования по маршруту возможны случаи повторного экстренного торможения поезда как в прямом, так и в обратном направлении. Целью представленной работы является оценка продольных смещений ярусов труб в случае повторных торможений поезда.

Состав поезда представляет механическую систему со многими степенями свободы. В качестве расчетной схемы при решении рассматриваемой задачи целесообразно использование упрощенной одномерной модели, отражающей основные свойства системы [7]. Она включает движущиеся по прямому горизонтальному участку пути локомотив и вагоны, в качестве которых выступают, в том числе, платформы, загруженные  $n$  ярусами груза (рисунок 1).

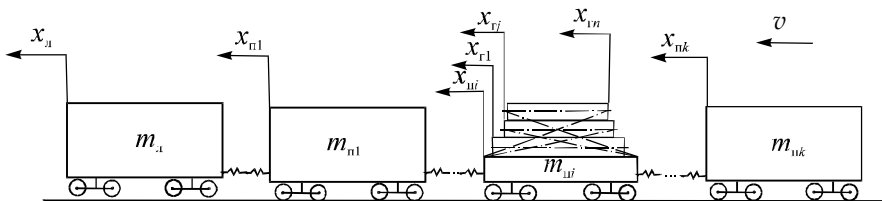


Рисунок 1 – Расчетная схема поезда с вагонами, загруженными трубами

Начало отсчета каждой из координат  $x_{\text{л}}, x_{\text{п}i}$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ), определяющих положение локомотива и платформ, соответствует их нахождению на рассматриваемом участке пути в начальный момент времени ( $t = 0$ ) при недеформированных упругих элементах автосцепок. При этом начало отсчета каждой из координат  $x_{\text{г}j}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), определяющих положение ярусов груза на платформе с номером  $i$ , соответствует их нахождению в начальный момент времени при недеформированных упругих элементах крепления.

Применение принципа Даламбера приводит к системе дифференциальных уравнений, отражающих движение локомотива,  $k$  платформ и  $n$  ярусов груза на  $i$ -й платформе:

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{л}} \ddot{x}_{\text{л}} - R_{\text{л}} + B_{\text{л}} + W_{\text{л}} &= 0; \\ m_{\text{п}1} \ddot{x}_{\text{п}1} + R_{\text{л}} - R_{\text{п}1} + B_{\text{п}1} + W_{\text{п}1} &= 0; \\ \dots \\ m_{\text{п}i} \ddot{x}_{\text{п}i} + R_{\text{п}i} - R_{\text{п}i+1} - T_{\text{п}i} - F_{\text{г}1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{\text{г}1} - \dot{x}_{\text{п}i}) + B_{\text{п}i} + W_{\text{п}i} &= 0; \\ m_{\text{г}1} \ddot{x}_{\text{г}1} + T_{\text{г}1} + F_{\text{г}1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{\text{г}1} - \dot{x}_{\text{п}i}) + F_{\text{г}2} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{\text{г}1} - \dot{x}_{\text{г}2}) &= 0; \\ \dots \\ m_{\text{г}j} \ddot{x}_{\text{г}j} + T_{\text{г}j} + F_{\text{г}j} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{\text{г}j} - \dot{x}_{\text{г}j-1}) + F_{\text{г}j+1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{\text{г}j} - \dot{x}_{\text{г}j+1}) &= 0; \\ \dots \\ m_{\text{г}n} \ddot{x}_{\text{г}n} - T_{\text{г}n} + F_{\text{г}n} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{\text{г}n-1} - \dot{x}_{\text{г}n}) &= 0; \\ \dots \\ m_{\text{п}k} \ddot{x}_{\text{п}k} + R_{\text{п}k} + B_{\text{п}k} + W_{\text{п}k} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $m_{\text{л}}, m_{\text{п}i}$  – масса соответственно локомотива и  $i$ -й платформы;  $m_{\text{г}j}$  – масса  $j$ -го яруса груза ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), размещенного на  $i$ -й платформе;  $\ddot{x}_{\text{л}}, \ddot{x}_{\text{п}i}, \ddot{x}_{\text{г}j}$  – продольное ускорение соответственно локомотива,  $i$ -й платформы поезда и  $j$ -го яруса груза;  $R_{\text{л}}, R_{\text{п}1}, R_{\text{п}k}$  – силы в междувагонных связях;  $B_{\text{л}}, B_{\text{п}1}, B_{\text{п}i}, B_{\text{п}k}$  – силы торможения;  $W_{\text{л}}, W_{\text{п}1}, W_{\text{п}i}, W_{\text{п}k}$  – силы основного сопротивления движению;  $T_{\text{п}i}$  – суммарная продольная горизонтальная сила в упругих элементах крепления ярусов груза к платформе;  $T_{\text{г}j}$  – продольная горизонтальная сила в упругих элементах крепления  $j$ -го яруса груза;  $F_{\text{г}j}$  – силы сухого трения между ярусами груза.

Система уравнений (1) справедлива также при наличии в схеме крепления поперечной обвязки и промежуточных опор между ярусами труб. В этом случае поперечную обвязку и промежуточные опоры следует рассматривать как соответствующие ярусы груза. Начальные условия имеют вид

$$\begin{aligned} x_{\text{л}}(0) = x_{\text{п}1}(0) = \dots x_{\text{п}i}(0) = \dots x_{\text{п}k}(0) = x_{\text{г}1}(0) = \dots x_{\text{г}j}(0) = \dots x_{\text{г}n}(0) &= 0; \\ \dot{x}_{\text{л}}(0) = \dot{x}_{\text{п}1}(0) = \dots \dot{x}_{\text{п}i}(0) = \dots \dot{x}_{\text{п}k}(0) = \dot{x}_{\text{г}1}(0) = \dots \dot{x}_{\text{г}j}(0) = \dots \dot{x}_{\text{г}n}(0) &= v_0, \end{aligned}$$

где  $\dot{x}_л$ ,  $\dot{x}_{ni}$  – скорости локомотива и  $i$ -го вагона;  $v_0$  – начальная скорость, соответствующая скорости движения поезда на момент начала торможения, м/с.

Силы в междувагонных соединениях с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами при перемещениях вагонов, не превышающих ход таких аппаратов, имеют вид [8]

$$R_i = c(x_{n(i+1)} - x_{ni})(1 + \mu \operatorname{sgn}((x_{n(i+1)} - x_{ni})(\dot{x}_{n(i+1)} - \dot{x}_{ni}))),$$

где  $c$  – коэффициент жесткости упругих элементов в междувагонных соединениях;  $\mu$  – коэффициент трения в междувагонных элементах.

Сила торможения локомотива (платформы) [9]

$$B = zP\varphi_{кр},$$

где  $z$  – число тормозных осей локомотива (платформы);  $P$  – расчетное нажатие тормозных колодок на ось, Н;  $\varphi_{кр}$  – расчетный коэффициент трения тормозных колодок. Его значение для чугуновых тормозных колодок определяется выражением

$$\varphi_{кр} = 0,27(v + 100)/(5v + 100),$$

где  $v$  – скорость движения, км/ч.

При экстренном торможении поезда расчетное нажатие тормозных колодок на ось  $P$ , Н, принимают:

- для шестиосного тепловоза – 120000;
- для четырехосных груженых платформ – 70000.

Сила основного сопротивления движению локомотива (платформы) определяется выражением

$$W = mgw,$$

где  $m$  – масса локомотива (платформы), т;  $g$  – ускорение свободного падения;  $w$  – удельная сила сопротивления движению локомотива (платформы), Н/т.

Значение удельной силы сопротивления движению принимают:

- для локомотива на холостом ходу

$$w = 24 + 0,11v + 0,0035v^2;$$

– для четырехосных груженых платформ ( $q > 6$  т) на роликовых подшипниках при бесстыковом пути

$$w = 7 + (30 + 0,9v + 0,02v^2)/q,$$

где  $q$  – масса платформы, приходящаяся на ось колесной пары, т,

$$q = m/4.$$

Представленная математическая модель позволяет провести расчеты при различных способах продольного крепления ярусов труб на платформе. Все эти способы крепления труб можно свести к двум основным [10, 11]:

– с продольным креплением труб всех ярусов непосредственно к раме платформы;

– с продольным креплением труб нижнего яруса к раме платформы, а труб каждого последующего яруса – к трубам предыдущего яруса (ярусное крепление).

Возможен также комбинированный способ продольного крепления ярусов труб, совмещающий названные выше.

С целью конкретизации модели рассмотрен процесс экстренного торможения поезда на тепловозной тяге, включающего 16 четырехосных платформ. Каждая платформа загружена пятью трубами в три яруса (рисунок 2).

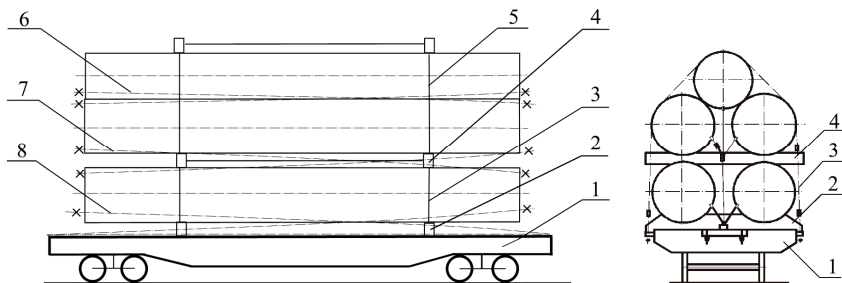


Рисунок 2 – Продольное крепление к раме платформы пяти труб:

1 – платформа; 2 – опоры для труб нижнего яруса; 3 – тяжи крепления промежуточных опор; 4 – промежуточные опоры для труб среднего яруса; 5 – поперечная обвязка; 6 – элементы продольного крепления трубы верхнего яруса к трубам среднего яруса; 7 – крепления среднего яруса к трубам нижнего яруса; 8 – нижнего яруса к раме платформы

Суммарная продольная горизонтальная сила в упругих элементах крепления ярусов груза к платформе определяется выражением

$$T_{pi} = T_{r1} + T_{r2} \cdot \sin \alpha_2 + T_{r5} \cdot \sin \alpha_1,$$

где  $T_{r1}$ ,  $T_{r2}$ ,  $T_{r5}$  – силы в упругих элементах продольного крепления труб нижнего яруса, крепления промежуточных опор и поперечной обвязки к раме платформы (см. рисунок 2) определяются выражениями

$$T_{r1} = c_1(x_{r1} - x_{pi}); \quad T_{r2} = c_2(\sqrt{h_2^2 + (x_{r2} - x_{pi})^2} - h_2);$$

$$T_{r5} = c_5(\sqrt{h_1^2 + (x_{r5} - x_{pi})^2} - h_1),$$

$c_1, \dots, c_5$  – соответственно коэффициенты жесткости упругих элементов: продольного крепления труб нижнего яруса, крепления промежуточных опор, продольного крепления труб среднего и верхнего ярусов, поперечной обвязки;  $h_1, h_2$  – соответственно длины канатов крепления поперечной обвязки и промежуточных опор в свободном (недеформированном) состоянии;  $\alpha_1, \alpha_2$  – соответственно отклонения канатов крепления поперечной обвязки и промежуточных опор от вертикали.

Горизонтальные силы в упругих элементах продольного крепления труб среднего яруса к трубам нижнего яруса и трубы верхнего яруса к трубам среднего яруса определяются выражениями

$$T_{r3} = c_3(x_{r3} - x_{r1}); \quad T_{r4} = c_4(x_{r4} - x_{r3}).$$

Силы сухого трения между поверхностями труб нижнего яруса и опор платформы, а также промежуточных опор, труб среднего яруса и промежуточных опор, а также трубы верхнего яруса, трубы верхнего яруса и элементов поперечной обвязки определяются выражениями

$$F_{r1} = f_1((m_{r1} + m_{r2} + m_{r3} + m_{r4} + m_{r5})g + T_{r2} \cos \alpha_2 + T_{r5} \cos \alpha_1);$$

$$F_{r2} = f_2((m_{r2} + m_{r3} + m_{r4} + m_{r5})g + T_{r2} \cos \alpha_2 + T_{r5} \cos \alpha_1);$$

$$F_{r3} = f_3((m_{r3} + m_{r4} + m_{r5})g + T_{r5} \cos \alpha_1);$$

$$F_{r4} = f_4((m_{r4} + m_{r5})g + T_{r5} \cos \alpha_1);$$

$$F_{r5} = f_5(m_{r5}g + T_{r5} \cos \alpha_1),$$

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

Тригонометрические функции углов  $\alpha_1, \alpha_2$  определяются с учетом размеров труб и устройства их крепления, а также смещения ярусов труб относительно платформы в процессе торможения поезда:

$$\sin \alpha_1 = (x_{r5} - x_{ni}) / \sqrt{h_1^2 + (x_{r5} - x_{ni})^2}; \quad \cos \alpha_1 = h_1 / \sqrt{h_1^2 + (x_{r5} - x_{ni})^2};$$

$$\sin \alpha_2 = (x_{r2} - x_{ni}) / \sqrt{h_2^2 + (x_{r2} - x_{ni})^2}; \quad \cos \alpha_2 = h_2 / \sqrt{h_2^2 + (x_{r2} - x_{ni})^2}.$$

Численное интегрирование уравнений системы (1) проводилось для скорости 100 км/ч на момент начала торможения поезда, состоящего из тепловоза и 16 платформ с трубами. Расчеты проводились в среде MathCAD [12] при следующих исходных данных:  $m_n = 129000$  кг;  $m_{n1} = \dots = m_{n(i-1)} = m_{n(i+1)} = \dots = m_k = 56610$  кг;  $m_{ni} = 22000$  кг;  $m_{r1} = m_{r3} = 13800$  кг;  $m_{r2} = 100$  кг;  $m_{r4} = 6900$  кг;  $m_{r5} = 10$  кг;  $c = 11$  МН/м;  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 2$  МН/м;  $\mu = 0,55$ ;  $h_1 = 4,2$  м;  $h_2 = 1,6$  м;  $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 0,35$ .

Результаты расчета смещения ярусов труб относительно платформы приведены на рисунках 3 и 4. Из представленных графиков видно, что после первого торможения (см. рисунок 3, а) и после повторного торможения в направлении предыдущего (см. рисунок 3, б) конечные смещения ярусов труб относительно платформы остаются практически неизменными.

Приведенные результаты расчетов (см. рисунки 3, а и 4) свидетельствуют о том, что смещения ярусов труб относительно платформы после повторного торможения в направлении, противоположном предыдущему, также практически не изменяются.

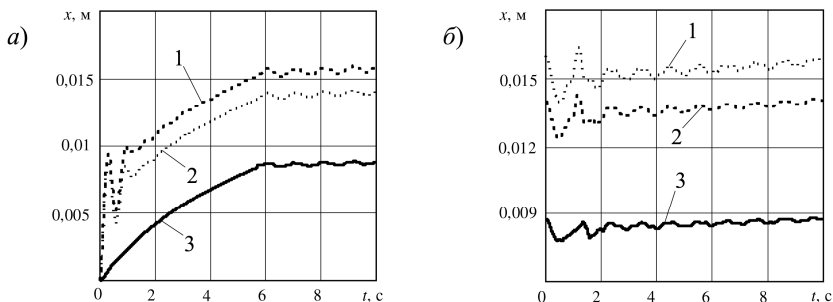


Рисунок 3 – Смещение ярусов труб относительно платформы после первого торможения (а) и повторного в направлении предыдущего (б):  
1 – верхний ярус; 2 – средний ярус; 3 – нижний ярус

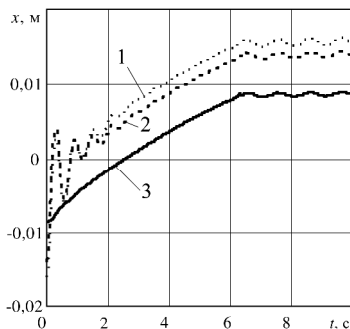


Рисунок 4 – Смещение ярусов труб относительно платформы после повторного торможения в направлении, противоположном предыдущему:  
1 – верхний ярус; 2 – средний ярус; 3 – нижний ярус

**Заключение.** Полученные в результате проведенных исследований данные свидетельствуют о том, что при повторных торможениях поезда в одинаковых или разных направлениях величины конечных смещений ярусов труб относительно платформы по отношению к их положению после погрузки в обоих направлениях остаются практически неизменными. Расхождение конечных величин смещений ярусов труб не превышает 2 мм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Королёва, Д. Ю. Совершенствование метода расчета крепления грузов при соударениях вагонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Д. Ю. Королёва. – Новосибирск : СГУПС, 2001. – 23 с.

2 **Костина, Н. А.** Уточнение характеристик нагруженности вагона продольными силами через автосцепку / Н. А. Костина // Вестник ВНИИЖТ, 1981. – № 4. – С. 36–39.

3 **Заворотный, А. В.** Влияние ослабления крепления на величину продольного смещения труб / А. В. Заворотный, И. А. Ворожун // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2008. – № 1 – С. 81–84.

4 **Псеровская, Е. Д.** Изучение динамики многоярусного груза и воспринимаемых креплениями нагрузок при маневровых соударениях вагонов / Е. Д. Псеровская, С. Ю. Хорунжин // Известия Транссиба. – 2010. – № 1 (1). – С. 106–112.

5 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.

6 **Chaganova, O. S.** Fastenings parameters determination for highly deformative cargo, taking into account its durability during transportation in cars and trains / O. S. Chaganova, I. A. Varazhun // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2018. – Vol. 7, no. 3. – P. 218–222.

7 **Ворожун, И. А.** Моделирование взаимодействия ярусов груза и платформы при торможении поезда / И. А. Ворожун, А. В. Шилович // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 52–58.

8 **Вершинский, С. В.** Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.

9 **Рудов, П. К.** Расчет тормозов вагонов : учеб.-метод. пособие по курсовому проектированию / П. К. Рудов. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 90 с.

10 **Ворожун, И. А.** Метод определения динамических сил при соударении вагонов / И. А. Ворожун, А. В. Заворотный, А. В. Шилович // Горная механика и машиностроение. – 2011. – № 1. – С. 65–72.

11 **Varazhun, I.** Determination of Longitudinal Forces in the Cars Automatic Couplers at Train Electrodynamic Braking / I. Varazhun, A. Shimanovsky, A. Zavarotny // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 415–421.

12 **Поршнев, С. В.** Компьютерное моделирование физических систем с использованием пакета MathCAD / С. В. Поршнев. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2015. – 320 с.

*I. A. VARAZHUN, A. V. SHILOVICH*

*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **INFLUENCE OF REPEATED TRAIN BRAKES ON DISPLACEMENTS OF PIPES LAYERS**

The dynamics of a train composed of flatcars loaded by large diameter pipes placed in three tiers in height is considered. The longitudinal displacement values for the tiers of pipes in cases of the train repeated braking are determined by the method of mathematical modeling.

**Keywords:** platform, tiers of pipes, elastic fastening, displacement of pipes, train braking.

Получено 15.10.2022