

Рисунок 2 – Зависимость длины тормозного пути автомобиля от скорости движения:  
1 – при жестком креплении груза; 2 – при упругом креплении груза

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Динамика высокоскоростного транспорта** / пер. с англ. А. В. Попова; под ред. Т. А. Тибилова. – М.: Транспорт, 1988. – 215 с.

2 **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.

*I. A. VOROZHUN, A. V. ZAVOROTNY, E. S. KOROTKEVICH*

### STUDY OF “MOTOR CAR-PIPE TIERS” SYSTEM DYNAMICS AT BRAKING

In the paper on the basis of d’Alembert’s principle the system of differential equations of second order has been formulated. It describes the motion of a motor car with four-tiered pipes fixed on it. Its solution values the motor car braking distance subject to the mounting elasticity.

Получено 10.12.2009

**ISBN 978-985-468-707-0. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 4. Гомель, 2010**

УДК 656.212.6.073.22.002.5

*И. А. ВОРОЖУН, А. В. ЗАВОРОТНЫЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ ЗАГРУЖЕННОЙ ТРУБАМИ В ТРИ ЯРУСА ПЛАТФОРМЫ С ВАГОНАМИ СТЕНКИ

В работе методом математического моделирования исследовано влияние жесткости элементов крепления на величину продольного смещения ярусов труб, а также динамических сил в элементах крепления труб к раме платформы при ее соударении с группой неподвижных вагонов. Дана оценка полученных результатов.

Наиболее полное использование грузоподъемности железнодорожных платформ неразрывно связано с совершенствованием способов размещения и крепления перевозимых грузов. Анализ литературных источников позволил установить, что при размещении труб на железнодорожной платформе с наибольшим использованием габарита погрузки их количество в ярусах может быть разным.

Цель исследований – установление влияния жесткости элементов продольного крепления на значения сил в них и смещения ярусов труб в процессе соударения вагонов.

Для проведения исследований платформу с закрепленными на ней трубами представим в виде системы, показанной на рисунке 1. В принятой схеме пять труб диаметром 1420 мм размещены на железнодорожной платформе в три яруса, а реквизиты крепления оснащены натяжными устройствами. Нижний ярус труб уложен на опоры 2, закрепленные на раме платформы 1. Между нижним и средним ярусами труб установлены промежуточные опоры 4, которые посредством тяжей 3 прикреплены к раме платформы 1. Труба верхнего яруса размещена в седловине между трубами среднего яруса. Весь комплект труб посредством поперечной обвязки 5 прикреплен к раме платформы 1. От продольного смещения (в направлении движения платформы) трубы всех ярусов удерживаются элементами крепления 6–8, охватывающими блоки 9 натяжных устройств, закрепленные на торцах рамы платформы 1. В исходном положении оси тяжей поперечной обвязки и крепления промежуточных опор вертикальны, а оси элементов продольного крепления труб верхнего, среднего и нижнего ярусов составляют с полом платформы соответственно углы  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_5$ . Возвращение платформы и труб в исходное положение осуществляется за счет упругих свойств элементов междувагонных связей и натяжных устройств продольного крепления труб. Опоры 2 и 4 снабжены обрезиненными ложементами для предохранения от повреждений полиэтиленового покрытия труб и повышения коэффициента сухого трения.

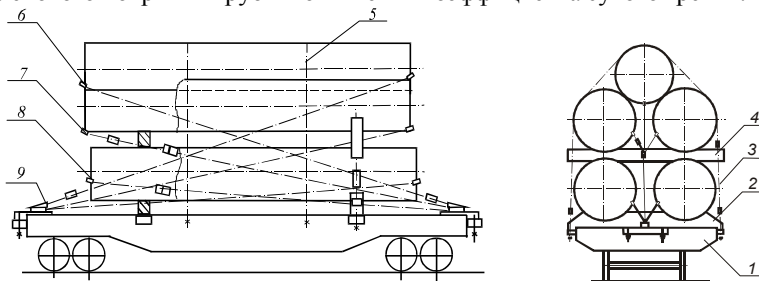


Рисунок 1 – Схема с продольным креплением труб всех ярусов и поперечной обвязки непосредственно к раме платформы:

- 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 платформе; 7 – элементы продольного крепления труб среднего яруса к платформе; 8 – элементы продольного крепления труб нижнего яруса к платформе; 9 – блоки натяжных устройств

Оценку динамических качеств такого устройства выполним, используя схему, представленную на рисунке 2. В рассматриваемой математической модели все тела считаются абсолютно твердыми, а элементы 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. Обозначим массы и продольные линейные перемещения: поперечной обвязки  $m_1, x_1$ ; трубы верхнего яруса  $m_2, x_2$ ; двух труб среднего яруса  $m_3, x_3$ ; промежуточных опор  $m_4, x_4$ ; двух труб нижнего яруса  $m_5, x_5$ ; платформы  $m_6, x_6$ ; трех вагонов стенки  $m_7, \dots, m_9, x_7, \dots, x_9$ . 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.

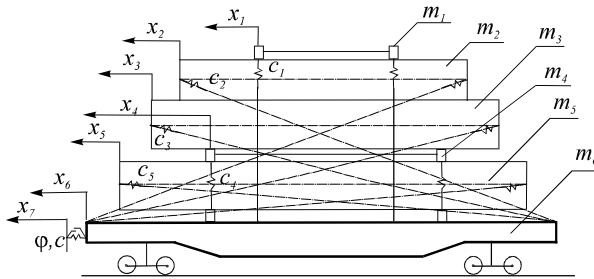


Рисунок 2 – Расчетная схема платформы с трубами

Применим способ Германа – Даламбера и запишем систему дифференциальных уравнений, отражающих движение ярусов труб, поперечной обвязки, промежуточных опор, платформы и трех вагонов:

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

где  $T_1, T_{2л}, T_{2п}, T_{3л}, T_{3п}, T_4, T_{5л}, T_{5п}$  – соответственно силы упругости устройств поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса;  $F_1, \dots, F_5$  – 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;  $\alpha_1, \alpha_{2л}, \alpha_{2п}, \alpha_{3л}, \alpha_{3п}, \alpha_4, \alpha_{5л}, \alpha_{5п}$  – соответственно углы отклонения элементов поперечной обвязки от вертикали, наклона устройств продольного крепления верхней трубы и труб среднего яруса к полу платформы, отклонения тяжей крепления промежуточных опор от вертикали и наклона устройств продольного крепления труб нижнего яруса к полу платформы.

Входящие в уравнения системы (1) силы упругости элементов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса определяются выражениями:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= c_1(\sqrt{(l_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_6)^2} - l_1); \\
 T_{2л,2п} &= c_2(\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_6))^2 + h_1^2} - l_2), \\
 &\text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_6))^2 + h_1^2} - l_2) > 0; \\
 T_{2л,2п} &= 0, \text{ если } (\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_6))^2 + h_1^2} - l_2) \leq 0; \\
 T_{3л,3п} &= c_3(\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2} - l_3), \\
 &\text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2} - l_3) > 0; \\
 T_{3л,3п} &= 0, \text{ если } (\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2} - l_3) \leq 0; \\
 T_4 &= c_4(\sqrt{(l_4 + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2} - l_4); \\
 T_{5л,5п} &= c_5(\sqrt{(\sqrt{(l_5 + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2} - l_5), \\
 &\text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_5 + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2} - l_5) > 0; \\
 T_{5л,5п} &= 0, \text{ если } (\sqrt{(\sqrt{(l_5 + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2} - l_5) \leq 0,
 \end{aligned}$$

где  $c_1, \dots, c_5$  – соответственно коэффициенты жесткости элементов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления

труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса;  $l_1, \dots, l_5$  – соответственно длины элементов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления 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 элементов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса;  $h_1, h_2, h_3$  – соответственно расстояния от пола платформы до крюков на концах устройств продольного крепления труб верхнего, среднего и нижнего ярусов по вертикали.

Символ «л» и знак «+» соответствуют силам, приложенным к левым торцам труб, а символ «п» и знак «-» – силам приложенным к правым торцам труб на расчетной схеме (см. рисунок 2).

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 выражениями:

$$F_1 = f_1(m_1g + T_1 \cos \alpha_1);$$

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

$$F_3 = f_3((m_1 + m_2 + m_3)g + T_1 \cos \alpha_1 + T_{2л} \sin \alpha_{2л} + T_{2п} \sin \alpha_{2п} + T_{3л} \sin \alpha_{3л} + T_{3п} \sin \alpha_{3п});$$

$$F_4 = f_4((m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g + T_1 \cos \alpha_1 + T_{2л} \sin \alpha_{2л} + T_{2п} \sin \alpha_{2п} + T_{3л} \sin \alpha_{3л} + T_{3п} \sin \alpha_{3п} + T_4 \cos \alpha_4);$$

$$F_5 = f_5((m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)g + T_1 \cos \alpha_1 + T_{2л} \sin \alpha_{2л} + T_{2п} \sin \alpha_{2п} + T_{3л} \sin \alpha_{3л} + T_{3п} \sin \alpha_{3п} + T_4 \cos \alpha_4 + T_{5л} \sin \alpha_{5л} + T_{5п} \sin \alpha_{5п}),$$

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, представлены в виде:

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

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

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

$$R_4 = cx_9(1 + \phi \operatorname{sgn}(x_9 \dot{x}_9)),$$

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

Тригонометрические функции углов отклонения элементов поперечной обвязки от вертикали, наклона устройств продольного крепления верхней трубы и труб среднего яруса к полу платформы, отклонения тяжелой крепления промежуточных опор от вертикали и наклона устройств продольного крепления труб нижнего яруса к полу платформы определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_1 &= \frac{x_1 - x_6}{\sqrt{(l_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_6)^2}}; \quad \cos \alpha_1 = \frac{l_1 + \lambda_1}{\sqrt{(l_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_6)^2}}; \\ \sin \alpha_{2л,2п} &= \frac{h_1}{\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_6))^2 + h_1^2}}; \\ \cos \alpha_{2л,2п} &= \frac{\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_6)}{\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_6))^2 + h_1^2}}; \\ \sin \alpha_{3л,3п} &= \frac{h_2}{\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2}}; \\ \cos \alpha_{3л,3п} &= \frac{\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6)}{\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2}}; \\ \sin \alpha_4 &= \frac{x_4 - x_6}{\sqrt{l_4 + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2}}; \quad \cos \alpha_4 = \frac{l_4 + \lambda_4}{\sqrt{(l_4 + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2}}; \\ \sin \alpha_{5л,5п} &= \frac{h_3}{\sqrt{(\sqrt{(l_5 + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2}}; \\ \cos \alpha_{5л,5п} &= \frac{\sqrt{(l_5 + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6)}{\sqrt{(\sqrt{(l_5 + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2}}. \end{aligned}$$

Численное интегрирование уравнений системы (1) проводилось для скоростей соударения вагонов 5–9 км/ч 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;  $l_1 = 4,2$  м;  $l_2 = 12,9$  м;  $l_3 = 12,7$  м;  $l_4 = 1,4$  м;  $l_5 = 12,6$  м;  $h_1 = 2,8$  м;  $h_2 = 1,6$  м;  $h_3 = 0$ ;  $c = 11 \cdot 10^6$  Н/м;  $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 0,35$ ;  $\varphi = 0,55$ ;  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0$ ;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

На данном этапе проводилось исследование влияния жесткости элементов продольного крепления на величину сил в них и смещения ярусов труб в про-

цессе соударения вагонов. При этом коэффициенты жесткости элементов продольного крепления труб среднего ( $c_3$ ) и нижнего ( $c_5$ ) ярусов принимались равными и варьировались в пределах 0,1–5 МН/м, а коэффициент жесткости элементов продольного крепления трубы верхнего ( $c_2$ ) яруса принимался в два раза меньше. Коэффициенты жесткости элементов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор принимались равными  $c_1 = c_4 = 2$  МН/м.

Результаты расчетов для скорости соударения вагонов 5 км/ч представлены в виде графиков на рисунке 3. Как показывают расчеты, (см. рисунок 3, а), смещения труб всех ярусов практически одинаковы, а силы в элементах продольного крепления труб среднего и нижнего ярусов одинаковы и в два раза превышают силы в элементах продольного крепления трубы верхнего яруса. При одинаковой жесткости ( $c_2 = c_3 = c_5 = 1$  МН/м) элементов продольного крепления труб верхнего, среднего и нижнего ярусов (см. рисунок 3, б) смещения труб всех ярусов и силы в элементах крепления практически одинаковы.

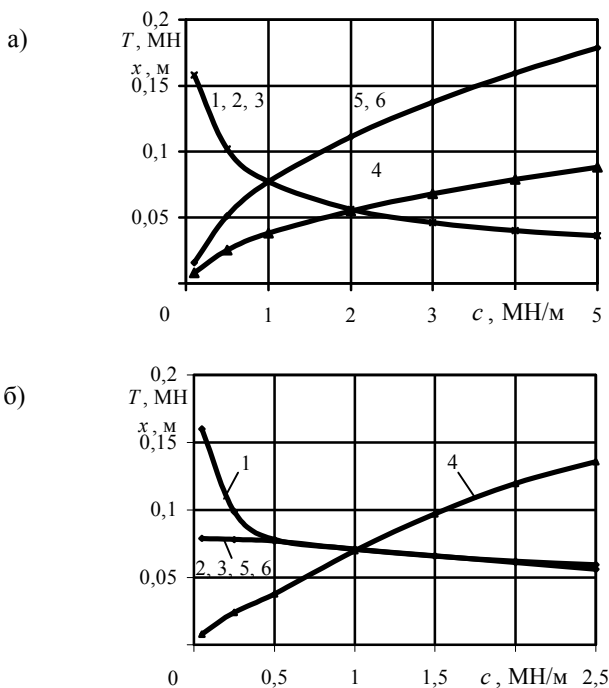


Рисунок 3 – Смещения верхнего (1), среднего (2) и нижнего (3) ярусов труб и соответствующие им силы (4, 5, 6) в канатах продольного крепления:

а – при жесткости элементов крепления верхнего яруса, отличающейся от жесткости креплений среднего и нижнего ярусов; б – при одинаковых коэффициентах жесткости элементов крепления всех ярусов

На рисунках 4–6 представлены результаты расчетов для скорости соударения вагонов 5 км/ч при одинаковой жесткости ( $c_3 = c_5 = 2$  МН/м) элементов продольного крепления труб среднего и нижнего ярусов. Коэффициент жесткости  $c_2$  элементов продольного крепления трубы верхнего яруса варьировался в пределах 0,5–2,5 МН/м.

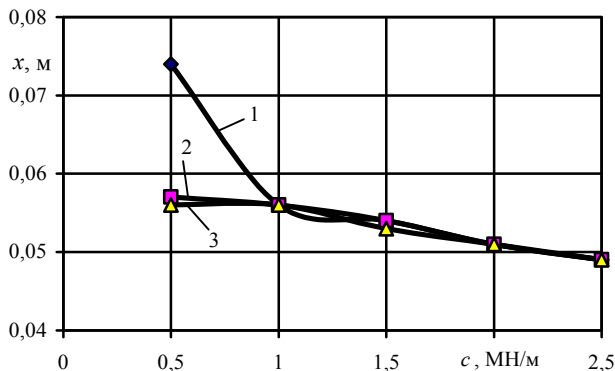


Рисунок 4 – Графики зависимости наибольшего продольного смещения трубы верхнего (1), труб среднего (2) и труб нижнего (3) ярусов от коэффициента жесткости  $c_2$  элементов продольного крепления трубы верхнего яруса

Как показывают расчеты, увеличение жесткости  $c_2$  элементов продольного крепления трубы верхнего яруса с 0,5 до 1 МН/м (см. рисунок 4) сопровождается уменьшением смещения трубы верхнего яруса относительно труб среднего яруса. С увеличением жесткости  $c_2$  от 1 до 2,5 МН/м смещение труб всех ярусов относительно рамы платформы практически одинаково.

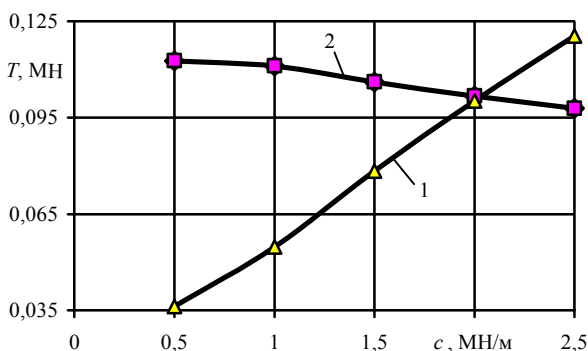


Рисунок 5 – Графики зависимости наибольшего усилия в элементах продольного крепления трубы верхнего (1), труб среднего (2) и труб нижнего (3) ярусов от коэффициента жесткости  $c_2$  элементов продольного крепления трубы верхнего яруса



С увеличением коэффициента жесткости  $c_2$  от 0,5 до 1 МН/м (см. рисунок 5) силы в элементах продольного крепления трубы верхнего яруса увеличиваются на 50 %, а силы в элементах продольного крепления труб среднего и нижнего ярусов уменьшаются незначительно. Увеличение коэффициента жесткости  $c_2$  с 1 до 2,5 МН/м сопровождается увеличением сил в элементах крепления верхней трубы в 2,2 раза и уменьшением сил в элементах крепления труб среднего и нижнего ярусов в 1,1 раза.

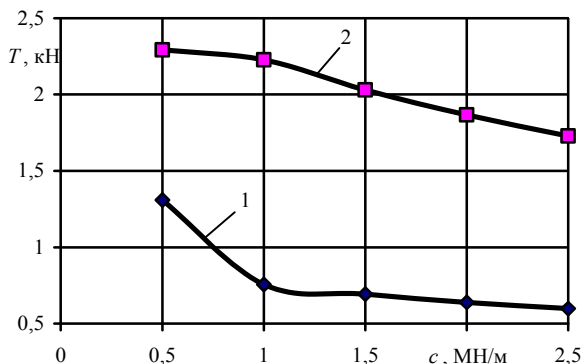


Рисунок 6 – Графики зависимости наибольшего суммарного усилия в элементах поперечной обвязки (1) и крепления промежуточных опор (2) от коэффициента жесткости  $c_2$  элементов продольного крепления трубы верхнего яруса

При увеличении коэффициента жесткости  $c_2$  от 0,5 до 1 МН/м (см. рисунок 6) силы в элементах поперечной обвязки и крепления промежуточных опор уменьшаются соответственно на 42 и 3 %. Увеличение коэффициента жесткости  $c_2$  с 1 до 2,5 МН/м сопровождается уменьшением указанных сил на 21 и 22 % соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Вершинский, С.В.** Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов; под ред. С. В. Вершинского. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.
- 2 **Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах.** – М.: Юридическая фирма «Юртранс», 2003. – 544 с.
- 3 **Устройство для крепления труб на раме транспортного средства:** пат. 10789 С1 Респ. Беларусь, МПК (2006): В 60Р 7/00 И. А. Ворожун, А. В. Заворотный; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № а 20051196; заявл. 12.05.05; опубл. 30.06.08 // Афіцыйны бюл. / Вынаходства карысныя мадэлі прамысловыя узоры. – 2008. – № 3. – С. 87.
- 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.

*I. A. VOROZHUN, A. V. ZAVOROTNY*

## **MATHEMATICAL COLLISION SIMULATION OF PLATFORM WITH THREE-TIERED TUBES AND CAR WALL**

In this paper using the method of mathematical simulation the influence of fastening element rigidity on the longitudinal displacement of tube tiers and the dynamic forces in tube mounting to the platform frame during its collision with a group of stationary cars has been investigated. The estimated results are given.

Получено 07.12.2009

**ISBN 978-985-468-707-0. Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. Вып. 4. Гомель, 2010**

---

УДК 612.76

*Д. В. ГЛИНСКИЙ, Д. А. ЧЕРНОУС*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

### **АНАЛИЗ РАВНОВЕСИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА**

Разработана новая биомеханическая модель руки человека в виде стержневого двухзвенника, содержащего две упругие связи, соответствующие мышцам бицепса и трицепса. На основе соотношений статики твердого тела произведен анализ данной модели при выполнении физического упражнения – «подъем груза». Получены расчетные зависимости координат звеньев модели, силы натяжения в пассивной мышце и реакций в суставах от значения сжимающей силы, генерируемой в одной из мышц при активизации сократительной функции.

**Введение.** Снижение травматизма, повышение уровня безопасности и комфортности производственных процессов подразумевает не только оптимизацию конструкции технических систем, но и возможность прогнозировать нагрузки, действующей на организм человека при выполнении различных операций. Подобранный прогноз может быть осуществлен на основе биомеханических моделей опорно-двигательного аппарата [1–3]. Данные модели представляют собой системы шарнирно соединенных абсолютно жестких массивных стержней. В большинстве известных биомеханических моделей [2, 3] действие мышц и соединительных тканей сводится к активным и реактивным парам сил, приложенным в суставах. В отдельных публикациях [4] анализируемые стержневые системы содержат упругие связи, моделирующие мышцы в пассивном состоянии. Однако в известных работах отсутствует описание элементов опорно-двигательного аппарата при комплексном учете упругости мышц в пассивном состоянии и генерации в мышце сжимающей силы при активизации сократительной активности. Учет этих явлений позволит существенно повысить информативность результатов использования биомеханических моделей.