

3 **Кобяков, О. С.** Поверхностное упрочнение сталей при микродуговом нагреве металла / О. С. Кобяков, Е. Г. Гинзбург // *Машиностроение*. – Минск, 1985. – Вып.10. – С. 127–130.

4 **Карслоу, Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.

5 **Chadwick, P.** Thermoelasticity. The dynamical theory / P. Chadwick // *Progress in solid mechanics*. – 1960. – Vol. 1. – № 6. – P. 263–328.

6 **Кундас, С. П.** Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей : монография / С. П. Кундас. – Минск : Бестпринт, 2005. – 313 с.

7 **Теплофизические свойства веществ**: справочник / под ред. Н. Б. Варгафтика. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.

A. I. VEREMEJCHIK, M. I. SAZONOV, V. M. HVISEVICH, S. JAKUSHEVICH
**HIGH CONCENTRATED BODY HEATING SOURCE
TEMPERATURE FIELDS DEFINITION TEST**

The technique for experimental surface plasma hardening temperature fields determination with the help of highly sensitive sensor instrument system has been developed. The algorithm for numerical problem of local moving sources of heating thermal conductivity solutions with the help of finite elements method has been worked out. The computations give the possibility for different surface thermal process quality variations (by traverse speed of sources, arc current, etc.) for the purpose of obtaining necessary machine and mechanism construct surface characteristics.

Получено 27.05.2008

**ISBN 978-985-468-565-6. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 3. Гомель, 2009**

УДК 656.212.6.073.22.002.5

И. А. ВОРОЖУН, А. В. ЗАВОРОТНЫЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

**АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В ЭЛЕМЕНТАХ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБ
К ПЛАТФОРМЕ**

В работе на основе принципа Даламбера составлена система 9 дифференциальных уравнений, описывающих движение железнодорожной платформы с пятью поярусно закрепленными на ней трубами. В результате решения выведенной системы уравнений получены расчетные оценки сил в элементах крепления труб при соударении платформы с неподвижными вагонами.

Технические условия на крепления грузов [1] предусматривают размещение четырех металлических труб диаметром 1420 мм в полувагоне и трех труб

указанного диаметра на платформе с применением крепежных реквизитов одноразового пользования. Особенностью перевозки таких труб на железнодорожном подвижном составе, в соответствии с действующими правилами, является невозможность полного использования грузоподъемности вагонов.

Предложенная в работе [2] схема размещения пяти труб предусматривает крепление труб каждого яруса продольными канатами непосредственно к железнодорожной платформе. Следовательно, с укладкой каждого последующего яруса труб угол наклона продольных канатов к полу платформы будет возрастать, что приведет к дополнительному их нагружению при соударении вагонов.

Автором работы [3] рассмотрена схема размещения и крепления на железнодорожной платформе пяти труб диаметром 1420 мм с креплением верхней трубы к трубам среднего яруса. Методом математического моделирования исследовано влияние жесткости элементов продольного крепления верхней трубы на величину динамических сил в канатах продольного крепления ярусов труб в процессе соударения вагонов.

В настоящей работе рассмотрена схема размещения и крепления на железнодорожной платформе пяти труб диаметром 1420 мм с продольным креплением каждого последующего яруса труб к предыдущему. Целью работы является установление влияния жесткости канатов продольного крепления труб к железнодорожной платформе на величину динамических сил в процессе соударения вагонов.

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).

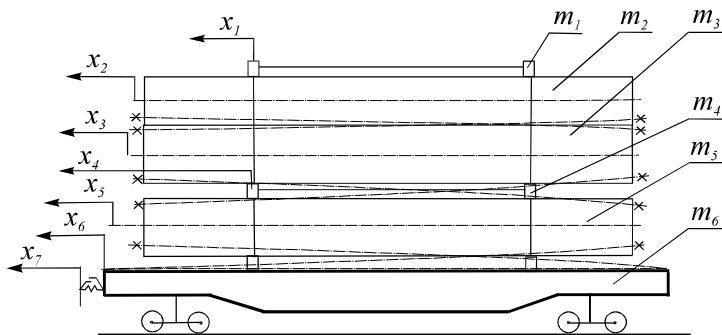


Рисунок 1 – Расчетная схема

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 ним. Поперечная обвязка охватывает три верхние трубы и прикреплена к

промежуточным опорам. Трубы среднего яруса прикреплены к трубам нижнего яруса посредством продольных канатов. От продольного смещения трубы нижнего яруса удерживаются канатами, закрепленными на торцах рамы платформы.

В разрабатываемой математической модели процесса соударения платформы, нагруженной тремя ярусами труб, с группой из трех неподвижных вагонов все тела считаются абсолютно твердыми, а элементы продольных и поперечных обвязок, а также междувагонных связей обладают упругими свойствами и имеют линейные характеристики. Движение механической системы рассматривается в вертикальной плоскости на прямом горизонтальном участке пути. Рассматриваемая схема характеризуется девятью независимыми координатами x_1, \dots, x_9 . С учетом принятых допущений и использованием принципа Даламбера составлены дифференциальные уравнения движения системы:

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

где 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; $T_1, T_{2л}, T_{2п}, T_{3л}, T_{3п}, T_4, T_{5л}, T_{5п}$ – соответственно силы упругости в элементах поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса; $\alpha_1, \alpha_{2л}, \alpha_{2п}, \alpha_{3л}, \alpha_{3п}, \alpha_4, \alpha_{5л}, \alpha_{5п}$ – соответственно углы отклонения элементов поперечной обвязки от вертикали, наклона элементов продольного крепления верхней трубы и труб среднего яруса к горизонту, отклонения элементов крепления промежуточных опор от вертикали и наклона элементов продольного крепления труб нижнего 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 элементов поперечной обвязки, крепления промежуточных опор, продольного крепления трубы верхнего яруса, труб среднего и нижнего ярусов определяются следующими выражениями:

$$- \text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_3))^2 + h_1^2} - l_2) > 0,$$

$$T_1 = c_1(\sqrt{(l_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_4)^2} - l_1);$$

$$T_{2л,2п} = c_2(\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_3))^2 + h_1^2} - l_2),$$

$$- \text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_3))^2 + h_1^2} - l_2) \leq 0, T_{2л,2п} = 0;$$

$$- \text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_5))^2 + h_2^2} - l_3) > 0,$$

$$T_{3л,3п} = c_3(\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_5))^2 + h_2^2} - l_3);$$

$$- \text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_5))^2 + h_2^2} - l_3) \leq 0, T_{3л,3п} = 0;$$

$$- \text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_5 + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2} - l_5) > 0,$$

$$T_4 = c_4(\sqrt{(l_4 + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2} - l_4);$$

$$T_{5л,5п} = c_5(\sqrt{(\sqrt{(l_5 + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2} - l_5),$$

$$- \text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_5 + \lambda_5)^2 - h_3^2} \pm (x_5 - x_6))^2 + h_3^2} - l_5) \leq 0, T_{5л,5п} = 0,$$

где c_1, \dots, c_5 – жесткости упругих элементов крепления; l_1, \dots, l_5 – длины элементов крепления в свободном (недеформированном) состоянии; $\lambda_1, \dots, \lambda_5$ – величины предварительного натяжения упругих элементов крепления; h_1, h_2, h_3 – высота от пола платформы до крепления канатов на торцах труб верхнего, среднего и нижнего ярусов соответственно.

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 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 следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
F_1 &= f_1(m_1 g + T_1 \cos \alpha_1); \\
F_2 &= f_2((m_1 + m_2)g + T_1 \cos \alpha_1 + T_{2л} \sin \alpha_{2л} + T_{2п} \sin \alpha_{2п}); \\
F_3 &= f_3((m_1 + m_2 + m_3)g + T_1 \cos \alpha_1 + T_{3л} \sin \alpha_{3л} + T_{3п} \sin \alpha_{3п}); \\
F_4 &= f_4((m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g + T_{3л} \sin \alpha_{3л} + T_{3п} \sin \alpha_{3п} + T_4 \cos \alpha_4); \\
F_5 &= f_5((m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)g + T_4 \cos \alpha_4 + T_{5л} \sin \alpha_{5л} + T_{5п} \sin \alpha_{5п}),
\end{aligned}$$

где f_1, \dots, f_5 – коэффициенты трения; g – ускорение свободного падения.

Силы в междувагонных связях с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами при перемещениях вагонов, не превышающих ход поглощающих аппаратов, приняты в виде:

$$R_1 = c(x_6 - x_7)[1 + \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}_6 - \dot{x}_7)]; \quad R_2 = c(x_7 - x_8)[1 + \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}_7 - \dot{x}_8)];$$

$$R_3 = c(x_8 - x_9)[1 + \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}_8 - \dot{x}_9)]; \quad R_4 = cx_9(1 + \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_9),$$

где c – коэффициент жесткости упругих элементов междувагонных связей; μ – коэффициент трения в элементах междувагонных связей.

Значения тригонометрических функций углов отклонения от вертикали канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор определяются соответственно выражениями:

$$\begin{aligned}
\sin \alpha_1 &= \frac{x_1 - x_4}{\sqrt{(l_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_4)^2}}; & \cos \alpha_1 &= \frac{l_1 + \lambda_1}{\sqrt{(l_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_4)^2}}; \\
\sin \alpha_4 &= \frac{x_4 - x_6}{\sqrt{(l_4 + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2}}; & \cos \alpha_4 &= \frac{l_4 + \lambda_4}{\sqrt{(l_4 + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2}}.
\end{aligned}$$

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; $l_1 = 2,4$ м; $l_4 = 1,4$ м; $c = 11$ МН/м; $c_1 = c_3 = c_4 = c_5 = 2$ МН/м; $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 0,35$; $\mu = 0,55$; $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0$; $\alpha_{2п} = \alpha_{2л} = \alpha_{3л} = \alpha_{3п} = \alpha_{5л} = \alpha_{5п} = 0$.

В рамках данной работы проводилось исследование влияния жесткости элементов продольного крепления верхней трубы к трубам среднего яруса на величину динамических сил в канатах крепления труб к платформе при разных скоростях соударения вагонов. Величина c_2 варьировалась в пределах 1–2000 МН/м. Расчеты проводились в среде MathCAD. Результаты расчетов для скорости соударения вагонов 2,5 м/с представлены в виде графиков изменения сил в упругих элементах продольного крепления труб (рисунок 2).

Как показывают расчеты, увеличение жесткости элементов продольного крепления верхней трубы сопровождается снижением динамических сил в этом креплении. При этом наблюдается рост динамических сил в канатах продольно-

го крепления труб среднего яруса, а величина динамических сил в канатах продольного крепления труб нижнего яруса практически не изменяется.

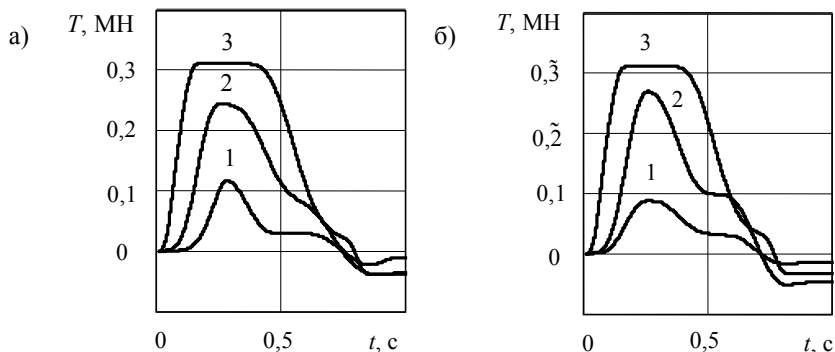


Рисунок 2 – Динамика изменения сил в элементах продольного крепления верхней трубы (1), труб среднего (2) и нижнего (3) ярусов:
a – при $c_2 = 2$ МН/м; *б* – при $c_2 = 2000$ МН/м

Сравнительный анализ динамических сил по принятой схеме и схеме приведенной в [3], позволяет сделать вывод о том, что при поярусном креплении труб наблюдается увеличение сил в канатах продольного крепления труб нижнего яруса и снижение сил в канатах продольного крепления труб среднего и верхнего ярусов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. – М. : Юртранс, 2003. – 544 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.
- 3 Ворожун, И. А. Влияние жесткости крепления труб к платформе на величину динамических сил / И. А. Ворожун // 36. наук. праць. – Харків : УкрДАЗТ. – 2007. – Вып. 82. – С. 88–93.

I. A. VOROZHUN, A. V. ZAVOROTNY

FLATCAR AND PIPE FASTENING HARDWARE DYNAMIC FORCE ANALYSES

In the paper the system of 9 differential equations has been worked out. It is based on d'Alembert Principle and describes the movement of the flatcar with five pipes tiered up to it. In the issue of the results for this system of equations the calculated evaluation of pipe fastening hardware forces when the flatcar and motionless wagons collision has been estimated.

Получено 05.11.2008