

УДК 629.44

И.А. ВОРОЖУН

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРОДОЛЬНОГО КРЕПЛЕНИЯ ТРУБ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПЛАТФОРМЕ

Разработана математическая модель процесса соударения платформы, загруженной ярусами труб, с группой неподвижных вагонов. Рассмотрено устройство для размещения и крепления трех ярусов труб большого диаметра на железнодорожной платформе, обеспечивающее эффективное использование грузоподъемности вагонов. Исследовано влияние жесткости упругих элементов крепления на величину продольного смещения ярусов труб, а также динамических сил в элементах крепления труб к раме платформы при разных скоростях ее соударении с группой из трех неподвижных вагонов. Проведен сравнительный анализ динамических показателей устройства при трех способах продольного крепления ярусов труб. Установлено, что величина динамических сил, возникающих в элементах крепления и междувагонных связях в процессе соударения платформы с группой неподвижных вагонов, меньше при ярусном способе продольного крепления труб.

Ключевые слова: платформа, трубы, крепление, силы, соударение вагонов

Введение. 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 [1, 2]. В перспективе такая ситуация будет сохраняться, поскольку наблюдается тенденция отставания совершенствования конструкций поглощающих аппаратов автосцепного оборудования вагонов от изменений требований к ним, обусловленных увеличением массы груженых вагонов и интенсификацией их использования. Необходимо отметить также дороговизну оснащения вагонного парка достаточным количеством специализированных вагонов или применения в конструкциях существующих вагонов более эффективных поглощающих аппаратов и подвижных хребтовых балок, обеспечивающих надежность вагонов и сохранность перевозимых грузов. Все это указывает на необходимость проведения работ по оснащению существующих вагонов оборудованием, позволяющим уменьшить динамические силы, действующие как на вагон, так и на перевозимый груз путем дополнительного поддрессирования груза относительно вагона в продольном направлении. Поэтому проведение исследований, позволяющих обосновать возможность и пути снижения повреждаемости грузов и вагонов за счет применения специальных устройств для размещения и крепления грузов весьма актуально, а решаемые при этом задачи имеют важное прикладное значение для железнодорожного транспорта.

Размещение и крепление грузов на открытом подвижном составе регламентируется Техническими условиями [3]. Для перевозки груза, способ размещения и крепления которого не предусмотрен техническими условиями, грузоотправитель обязан разработать чертежи размещения и крепления груза, а также выполнить прочностные рас-

четы в соответствии с требованиями, изложенными в [3]. Однако авторы работ [4, 5] отмечают, что используемые в существующей методике расчета крепления грузов на открытом подвижном составе такие понятия, как удельные продольные и поперечные горизонтальные инерционные силы, а также удельное значение вертикальной инерционной силы на 1 т веса груза не имеют физического смысла. Например, в приведенных в [3] формулах для определения продольной инерционной силы при упругом креплении груза не отражены ни скорость соударения вагонов, ни жесткость упругого крепления. В то же время, они оказывают существенное влияние на величину динамических сил, действующих на груз, элементы его крепления и вагоны при их соударении. Например, в [3] предусмотрен способ размещения и крепления на платформе трех труб диаметром 1420 мм. Способ размещения и крепления четырех труб указанного диаметра приведен в [6, 7]. Однако габарит погрузки позволяет разместить на платформе пять таких труб в три яруса. Поэтому целью представленной работы является выбор рационального способа продольного крепления ярусов труб на железнодорожной платформе.

Математическая модель системы. При разработке устройства для размещения и крепления труб на железнодорожной платформе важным этапом является выбор расчетной схемы, позволяющей оценить силы, действующие на трубы, платформу и элементы крепления. Платформа, загруженная трубами, представляет механическую систему со многими степенями свободы. Для исследований эту сложную систему целесообразно заменить более простой расчетной схемой с ограниченным числом степеней свободы, но отражающей основные свойства исходной схемы и соответствующей поставленной цели. В связи с этим при рассмотрении процесса соударения платформы, загруз-

женной k ярусами труб, с группой из n неподвижных вагонов (далее называемых «стенкой»), введем следующие основные предпосылки и допущения (рисунок 1):

- вагоны, платформа с тележками и трубы считаются абсолютно твердыми телами;
- движение рассматривается на прямом горизонтальном участке пути;
- трубы размещены на платформе симметрично относительно ее продольной и поперечной плоскостей симметрии;
- упругие элементы устройства крепления труб на платформе имеют линейные характеристики;
- откат платформы после соударения ограничивается автосцепными устройствами;
- зазоры в междувагонных связях отсутствуют;
- массы вагонов, платформы и труб сосредоточены в их центрах масс;
- центры масс всех тел перемещаются по параллельным прямым;
- вертикальными, а также угловыми перемещениями вагонов, платформы и труб пренебрегаем;
- начало отсчета каждой из координат x_{gi} (x_{vj}), определяющих положение элементов системы, соответствует моменту соприкосновения платформы с вагонами стенки.

Применяя принцип Даламбера, систему дифференциальных уравнений, отражающих движение k ярусов груза, платформы и n вагонов стенки (см. рисунок 1) можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} m_{g1} \ddot{x}_{g1} + T_{g1} + F_{g1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{g1} - \dot{x}_{g2}) &= 0; \\ \dots \\ m_{gi} \ddot{x}_{gi} + T_{gi} - F_{gi-1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{gi-1} - \dot{x}_{gi}) + F_{gi} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{gi} - \dot{x}_{gi+1}) &= 0; \\ \dots \\ m_{gk} \ddot{x}_{gk} + T_{gk} - F_{gk-1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{gk-1} - \dot{x}_{gk}) + F_{gk} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{gk} - \dot{x}_p) &= 0; \\ m_p \ddot{x}_p - T_p - F_{gk} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{gk} - \dot{x}_p) + R_{v1} &= 0; \\ m_{v1} \ddot{x}_{v1} - R_{v1} + R_{v2} &= 0; \\ \dots \\ m_{vj} \ddot{x}_{vj} - R_{vj} + R_{vj+1} &= 0; \\ \dots \\ m_{vn} \ddot{x}_{vn} - R_{vn} + R_{vn+1} &= 0, \end{aligned} \right\} (1)$$

где m_{g1} , m_{gi} , m_{gk} , m_p — масса соответственно первого, i -го, k -го яруса груза ($i = 2, 3, \dots, k$) и платфор-

мы; m_{v1} , m_{vj} , m_{vn} — масса соответственно первого, j -го, n -го вагона «стенки» ($j = 2, 3, \dots, n$); \ddot{x}_{g1} , \ddot{x}_{gi} , \ddot{x}_{gk} , \ddot{x}_p , \ddot{x}_{v1} , \ddot{x}_{vj} , \ddot{x}_{vn} — продольное ускорение соответственно первого, i -го, k -го яруса груза, платформы, первого, j -го, n -го вагона «стенки»; T_{g1} , T_{gi} , T_{gk} — продольная горизонтальная сила в упругих элементах крепления соответственно первого, i -го, k -го яруса груза; T_p — суммарная продольная горизонтальная сила в упругих элементах крепления ярусов груза к платформе; F_{g1} , F_{gi} , F_{gk} — силы сухого трения между ярусами груза; R_{v1} , R_{vj} , R_{vn} — силы в междувагонных связях.

Система уравнений (1) справедлива также при наличии в устройстве поперечной обвязки и промежуточных опор между ярусами груза. В этом случае поперечную обвязку и промежуточные опоры следует рассматривать как дополнительные ярусы груза.

При выполнении расчетов в качестве начальных условий соударения принимаем, что при $t = 0$:

$$\begin{aligned} x_{g1}(0) = \dots x_{gi}(0) = \dots x_{gk}(0) = x_p(0) = x_{v1}(0) &= \\ = \dots x_{vj}(0) = \dots x_{vn}(0) &= 0; \end{aligned}$$

$$\dot{x}_{g1}(0) = \dots \dot{x}_{gi}(0) = \dots \dot{x}_{gk}(0) = \dot{x}_p(0) = v_0;$$

$$\dot{x}_{v1}(0) = \dots \dot{x}_{vj}(0) = \dots \dot{x}_{vn}(0) = 0,$$

где v_0 — начальная скорость соударения, соответствующая скорости движения платформы с грузом в момент соприкосновения с первым вагоном стенки.

Приведенная система уравнений может быть использована для анализа различных способов крепления груза к платформе, при этом лишь изменяются выражения для определения сил T_{g1} , T_{gi} , T_{gk} , T_p , F_{g1} , F_{gi} , F_{gk} .

Методика проведения расчетов и результаты исследования. Продольное крепление ярусов труб на платформе может осуществляться двумя способами: - креплением труб всех ярусов непосредственно к платформе; - креплением труб нижнего яруса к платформе, а труб каждого последующего яруса к трубам предыдущего яруса (ярусное крепление).

Возможен и способ продольного крепления ярусов труб, полученный комбинированием названных вариантов.

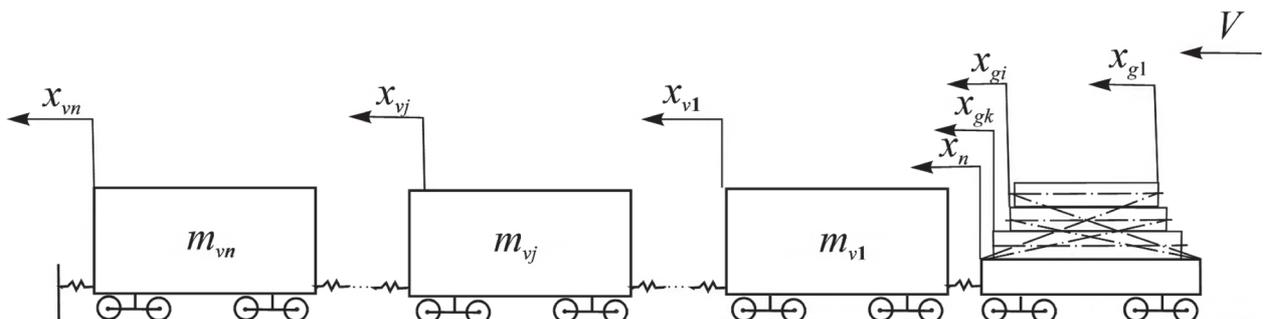


Рисунок 1 — Схема соударения платформы, нагруженной ярусами труб, с группой неподвижных вагонов

Исследования устройств с комбинированным и ярусным способами крепления труб на платформе приведены в [8, 9]. Представляет интерес рассмотрение способа крепления труб всех ярусов непосредственно к платформе и сравнение динамических показателей трех указанных устройств.

Схема размещения и крепления пяти труб диаметром 1420 мм в три яруса с продольным креплением приведена на рисунке 2.

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, 7, 8 с натяжными устройствами 9. 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 горизонтом соответствующие углы. Возвращение платформы и труб в исходное положение осуществляется за счет упругих свойств элементов междувагонных связей и устройства продольного крепления труб.

Оценку динамических качеств такого устройства выполним, используя схему, представленную на рисунке 3.

Элементы поперечной обвязки и промежуточные опоры объединены в отдельные блоки с соответствующими массами. 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 $m_7, \dots, m_9, x_7, \dots, x_9$. При принятых обозначениях система уравнений (1) примет вид:

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

где $T_1, T_{2л}, T_{2п}, T_{3л}, T_{3п}, T_4, T_{5л}, T_{5п}$ — соответственно силы упругости элементов 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 поперечной обвязки от вертикали, наклона элементов продольного крепления верхней трубы и труб среднего яруса к горизонту, отклонения тяжей крепления промежуточных опор от вертикали и наклона элементов продольного крепления труб нижнего яруса к горизонту.

Входящие в уравнения системы (2) силы упругости элементов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления труб среднего яруса, крепления про-

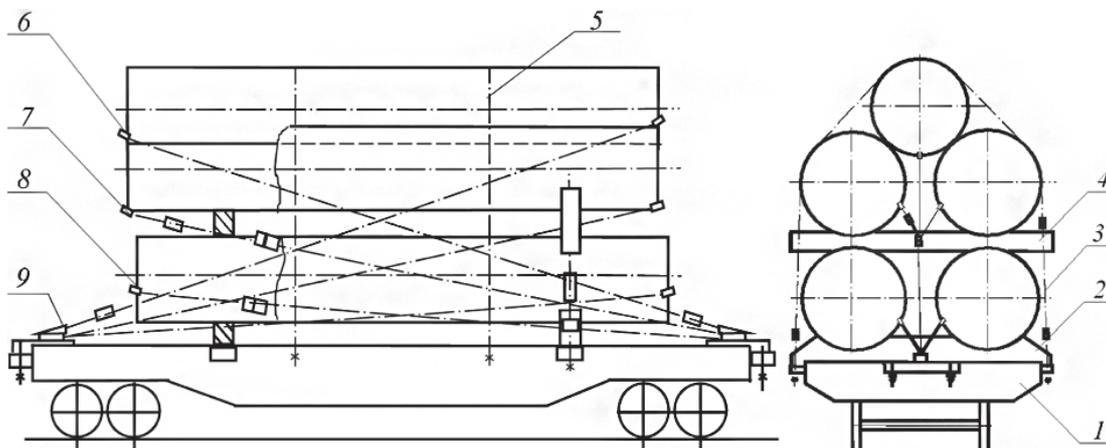


Рисунок 2 — Схема устройства с продольным креплением труб всех ярусов и поперечной обвязки непосредственно к раме платформы

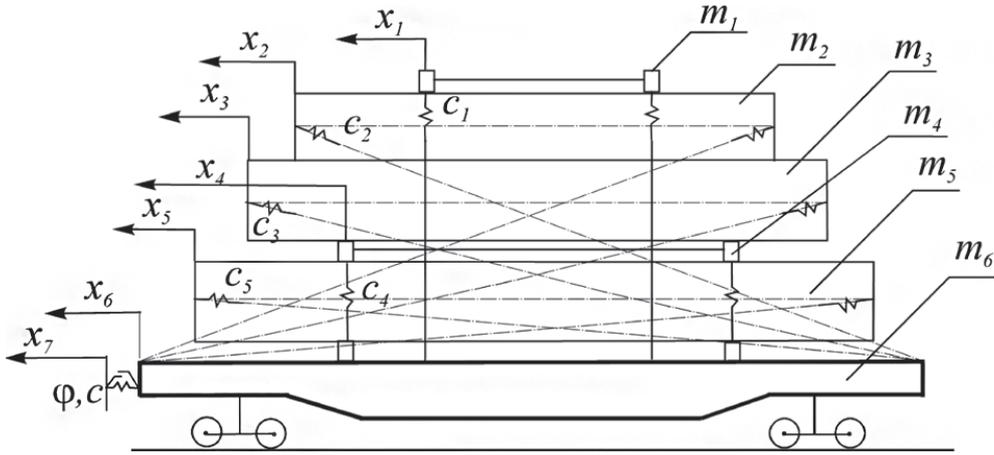


Рисунок 3 — Расчетная схема платформы с трубами

межуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса определяются следующими выражениями:

$$T_1 = c_1(\sqrt{(l_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_6)^2} - l_1);$$

$$T_{2л,2п} = c_2(\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_6))^2 + h_1^2} - l_2),$$

$$\text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_6))^2 + h_1^2} - l_2) > 0;$$

$$T_{2л,2п} = 0, \text{ если}$$

$$(\sqrt{(\sqrt{(l_2 + \lambda_2)^2 - h_1^2} \pm (x_2 - x_6))^2 + h_1^2} - l_2) \leq 0;$$

$$T_{3л,3п} = c_3(\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2} - l_3),$$

$$\text{если } (\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2} - l_3) > 0;$$

$$T_{3л,3п} = 0, \text{ если}$$

$$(\sqrt{(\sqrt{(l_3 + \lambda_3)^2 - h_2^2} \pm (x_3 - x_6))^2 + h_2^2} - l_3) \leq 0;$$

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

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

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

$$T_{5л,5п} = 0, \text{ если}$$

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

где c_1, \dots, c_5 — коэффициенты жесткости упругих элементов соответственно 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 — длина элементов соответственно поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса в свободном (недеформированном) состоянии;

$\lambda_1, \dots, \lambda_5$ — величина предварительного натяжения упругих элементов соответственно 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 — расстояния по вертикали от пола платформы до крюков на концах элементов продольного крепления труб соответственно верхнего, среднего и нижнего ярусов.

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 следующими выражениями:

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

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

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

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

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

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, определяются выражениями [10]:

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

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

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

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

где c — жесткость упругих элементов междувагонных связей; φ — коэффициент трения в элементах междувагонных связей.

Тригонометрические функции углов отклонения поперечной обвязки от вертикали, наклона элементов продольного крепления верхней трубы и труб среднего яруса к горизонту, отклонения тяжей крепления промежуточных опор от вертикали и наклона элементов продольного крепления труб нижнего яруса к горизонту определяются следующими выражениями:

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

Аналогичные преобразования системы уравнений (1) для ярусного и комбинированного способов продольного крепления ярусов труб к платформе приведены в работах [8, 9].

Численное интегрирование для каждого способа крепления проводилось в диапазоне скоростей соударения вагонов 5–9 км/ч. Исследовалось влияние жесткости упругих элементов крепления на величину динамических сил в них и смещения ярусов труб в процессе соударения вагонов. При этом коэффициенты жесткости упругих элементов продольного крепления труб, поперечной обвязки и крепления промежуточных опор варьировались в пределах 0,1–5 МН/м. Расчеты проводились в среде MathCAD.

В качестве критерия для выбора коэффициента жесткости упругих элементов продольного крепления труб может быть принята, например, величина наибольшего продольного смещения труб относительно рамы платформы.

Результаты расчетов представлены в таблице для 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; $c = 11 \cdot 10^6$ 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/с²; $c_1 = c_3 = c_4 = c_5 = 2$ МН/м; $c_2 = 1$ МН/м.

Расчеты проведены при скорости соударения вагонов 5 км/ч (верхняя строка) и 9 км/ч (нижняя строка) для трех способов продольного крепления труб: - креплением труб всех ярусов непосредственно к платформе (схема 1); - креплением труб нижнего и среднего ярусов непосредственно к платформе, а трубы верхнего яруса к трубам среднего яруса (схема 2); - креплением труб нижнего яруса к платформе, а труб каждого последующего яруса к трубам предыдущего яруса (схема 3).

Заключение. Выполненный анализ показывает, что силы в упругих элементах крепления труб нижнего яруса к платформе при ярусном способе продольного крепления труб (схема 3) меньше соответственно в 2 и 1,7 раза по сравнению со способом продольного крепления труб трех ярусов непосредственно к платформе (схемы 1) и комбинированным способом продольного крепления труб (схема 2).

При увеличении скорости соударения вагонов с 5 км/ч до 9 км/ч динамические силы в упругих элементах продольного крепления труб всех ярусов к платформе возрастают в 2,2 раза. При комбинированном и ярусном способах крепления динамические силы в упругих элементах продольного крепления труб к платформе возрастают в 2,3.

Список обозначений

$m_{g1}, m_{gi}, m_{gk}, m_p$ — масса соответственно первого, i -го, k -го яруса груза ($i = 2, 3, \dots, k$) и платформы; m_{v1}, m_{vj}, m_n — масса соответственно первого, j -го, n -го вагона «стенки» ($j = 2, 3, \dots, n$); $\ddot{x}_{g1}, \ddot{x}_{gi}, \ddot{x}_{gk}, \ddot{x}_p, \ddot{x}_{v1}, \ddot{x}_{vj}, \ddot{x}_{vn}$ — продольное ускорение соответственно первого, i -го, k -го яруса груза, платформы, первого, j -го, n -го вагона «стенки»; T_{g1}, T_{gi}, T_{gk} — продольная горизонтальная сила в упругих элементах крепления соответственно первого, i -го, k -го яруса груза;

Таблица — Динамические показатели

Наименование показателей	Значения параметров		
	схема 1	схема 2	схема 3
Наибольшее продольное смещение верхней трубы, м	0,056	0,104	0,145
	0,125	0,233	0,367
Наибольшее продольное смещение труб среднего яруса, м	0,056	0,058	0,112
	0,125	0,132	0,272
Наибольшее продольное смещение труб нижнего яруса, м	0,056	0,057	0,067
	0,125	0,130	0,155
Наибольшее значение сил в упругих элементах продольного крепления верхней трубы, МН	0,05471	0,04577	0,03359
	0,1225	0,1282	0,095
Наибольшее значение сил в упругих элементах продольного крепления труб среднего яруса, МН	0,1112	0,1174	0,09013
	0,2488	0,266	0,234
Наибольшее значение сил в упругих элементах продольного крепления труб нижнего яруса, МН	0,1111	0,1148	0,1336
	0,2496	0,2591	0,311
Наибольшее значение сил в упругих элементах крепления промежуточных опор, кН	2,226	2,384	3,588
	11,15	12,030	17,620
Наибольшее значение сил в упругих элементах крепления поперечной обвязки, кН	0,757	2,571	2,252
	3,756	12,93	17,87
Наибольшее сжатие поглощающих аппаратов, м	0,049	0,049	0,049
	0,085	0,085	0,084
Наибольшее значение сил в автосцепке платформы, МН	0,8399	0,8385	0,8385
	1,447	1,444	1,438

T_p — суммарная продольная горизонтальная сила в упругих элементах крепления ярусов груза к платформе;

F_{g1}, F_{g2}, F_{gk} — силы сухого трения между ярусами груза;

R_{v1}, R_{vj}, R_{vn} — силы в междугагонных связях;

$T_1, T_{2л}, T_{2п}, T_{3л}, T_{3п}, T_4, T_{5л}, T_{5п}$ — соответственно силы упругости элементов 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 междугагонных связях;

$\alpha_1, \alpha_{2л}, \alpha_{2п}, \alpha_{3л}, \alpha_{3п}, \alpha_4, \alpha_{5л}, \alpha_{5п}$ — соответственно углы отклонения поперечной обвязки от вертикали, на-

клона элементов продольного крепления верхней трубы и труб среднего яруса к горизонту, отклонения тяжёлых крепления промежуточных опор от вертикали и наклона элементов продольного крепления труб нижнего яруса к горизонту;

c_1, \dots, c_5 — коэффициенты жесткости упругих элементов соответственно 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 — длина элементов соответственно поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса в свободном (недеформированном) состоянии;

$\lambda_1, \dots, \lambda_2$ — величина предварительного натяжения упругих элементов соответственно 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 — расстояния по вертикали от пола платформы до крюков на концах элементов продольного крепления труб соответственно верхнего, среднего и нижнего ярусов;

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;

c — жесткость упругих элементов междувагонных связей;

φ — коэффициент трения в элементах междувагонных связей.

Список литературы

1. Королева, Д.Ю. Совершенствование метода расчета крепления грузов при соударениях вагонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / Д.Ю. Королева; Сиб. гос. ун-т путей сообщ. — Новосибирск, 2001. — 23 с.
2. Костина, Н.А. Уточнение характеристик нагруженности вагона продольными силами через автосцепку / Н.А. Костина // Вестн. ВНИИЖТ, 1981. — № 4. — С. 36–39.
3. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. — М.: Юртранс, 2003. — 544 с.
4. Бутор, А.И. Предложения по пересмотру ТУ погрузки и крепления грузов / А.И. Бутор // Совершенствование способов перевозки железобетонных конструкций железнодорожным транспортом. — Новосибирск, 1978. — С. 3–4.
5. Псеровская, Е.Д. Совершенствование способов перевозки и методов расчета крепления грузов с плоским основанием на открытом подвижном составе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / Е.Д. Псеровская; Сиб. гос. ун-т путей сообщ. — Новосибирск, 2000. — 17 с.
6. Ворожун, И.А. Оценка динамических сил в элементах крепления труб на железнодорожной платформе / И.А. Ворожун // Вестн. БелГУТ, 2008. — № 1. — С. 60–64.
7. 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 «БелГУТ». — № а 20051196; заявл. 12.05.05; опубл. 30.06.08 // Афіцыйны бюл. Вынаходства. Карысныя мадэлі. Прамысловыя узоры. — 2008. — № 3. — С. 87.
8. Ворожун, И.А. Устройство для размещения и крепления труб большого диаметра на железнодорожной платформе / И.А. Ворожун, А.В. Заворотный, А.В. Шилович // Горная механика. — 2011. — № 1. — С. 56–64.
9. Ворожун, И.А. Метод определения динамических сил при соударении вагонов / И.А. Ворожун, А.В. Заворотный, А.В. Шилович // Горная механика. — 2011. — № 1. — С. 65–72.
10. Вершинский, С.В. Динамика вагонов / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов; под ред. С.В. Вершинского. — М.: Транспорт, 1991. — 360 с.

Vorozhun I.A.

Choice of rational scheme for longitudinal fastening pipes on railway platforms

A mathematical model of the collision process platform loaded tiered pipe fixed with a group of cars. Considered a device for placing and securing the three tiers of large diameter pipes on the railway platform, ensuring efficient use of capacity of the wagons. The influence of the stiffness of elastic elements fixing the amount of longitudinal displacement tiers of pipes, as well as dynamic forces in the means of attachment to the frame tube platform at different speeds its collision with a group of three stationary cars. A comparative analysis of the dynamic characteristics of a device with three tiers of fastening methods longitudinal pipes. Established that the dynamic forces arising fixings and trainline receptacles in the collision with a group of fixed platform wagons, less than the longline method longitudinal connecting tubes.

Keywords: platform, pipes, fastening, forces, collision of wagons

Поступила в редакцию 01.04.2014.