



Пространственные колебания вагона-платформы



Пётр АНИСИМОВ
Petr S. ANISIMOV

Геннадий ПЕТРОВ
Gennady I. PETROV



Анисимов Пётр Степанович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Петров Геннадий Иванович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Предложены расчётные схемы и дифференциальные уравнения для исследования пространственных колебаний вагона-платформы с двумя кососимметрично расположенными тяжеловесными грузами. Механическая система представлена 13 твёрдыми телами, среди которых рама вагона-платформы, упруго-диссипативные опоры, надрессорные балки, боковые рамы и колёсные пары тележек. Рассмотрены в качестве обобщенных координат показатели, характеризующие подпрыгивание, галопирование, боковую качку, вилание, поперечный относ рамы. Составлена система из 23 дифференциальных уравнений, выполняющая роль своеобразной математической модели.

Ключевые слова: транспорт, вагон-платформа, кососимметрично расположенные тяжеловесные грузы, пространственные колебания, расчётные схемы, дифференциальные уравнения, математическая модель.

Среди перевозимых на вагонах-платформах тяжеловесных грузов достаточно весомый удельный вес составляют имеющие собственное рессорное подвешивание или опирающиеся на раму платформы через вертикальные и поперечные горизонтальные упруго-диссипативные опоры с целью уменьшения динамических сил и повышения сохранности объекта перевозки. Такими грузами являются, например, автомобили, дорожные и строительные машины, грузоподъемные краны на автомобильном ходу.

При кососимметричном размещении грузов на вагоне обеспечивается более высокая степень использования грузоподъемности вагона и требуется меньшее количество вагонов определённого объёма. Однако при кососимметричном размещении грузов с определёнными характеристиками упруго-диссипативных опор можно ожидать появления амплитуд колебаний, оказывающих негативное влияние на безопасность движения вагона с точки зрения устойчивости от схода колеса с рельса и поперечного опрокидывания в кривых железнодорожного пути.

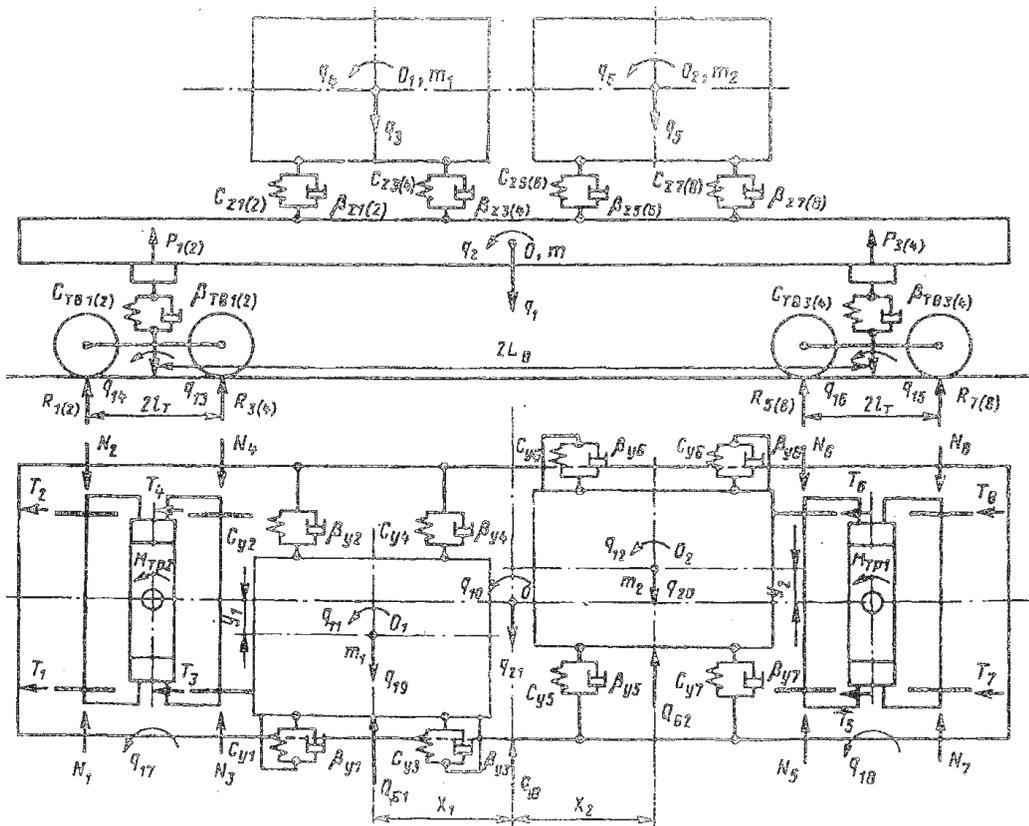


Рис. 1. Геометрическая расчётная схема вагона-платформы с двумя кососимметрично расположенными тяжеловесными грузами (вид сбоку и сверху).

Fig. 1. Geometric design diagram of a flat car with two antisymmetrically located heavy cargoes (side and top view).

По действующим условиям погрузки [1] предусмотрены нормативы кососимметричного размещения двух жёстких тяжеловесных грузов без опирания на пол вагона-платформы через упруго-диссипативные опоры, а их общий центр масс должен совпадать с центром массы вагона или лишь незначительно смещаться от последнего. Однако эти нормативы кососимметричного размещения неприемлемы для грузов с упруго-диссипативными элементами их связи с рамой вагона-платформы. И для установления здесь более точных ориентиров возникает необходимость в теоретических исследованиях динамики вагона-платформы с кососимметрично расположенными грузами, центры масс которых смещены вдоль и поперёк вагона от его осей симметрии в разные стороны, а общий центр масс грузов одинакового веса может совпадать с центром массы платформы или смещён от него при погрузке.

Исследованиям колебаний грузовых вагонов при несимметричном размещении тяжеловесных грузов со смещением их центра массы или только вдоль, или только поперёк вагона, жёстко опирающихся на его пол, посвящены работы [2,3], а грузов, имеющих упруго-диссипативные элементы, — работы [4,5].

Для исследования пространственных колебаний вагона-платформы с двумя кососимметрично расположенными на вагоне-платформе грузами одинакового веса и с упруго-диссипативными связями (опорами), общий центр масс которых совпадает с центром масс вагона-платформы при одинаковых расстояниях центров масс грузов от центра масс вагона-платформы, разработана расчётная геометрическая схема, показанная на рис. 1, а на рис. 2, 3, 4 демонстрируются силовые расчётные схемы: соответственно вид сбоку, сверху и с торца.



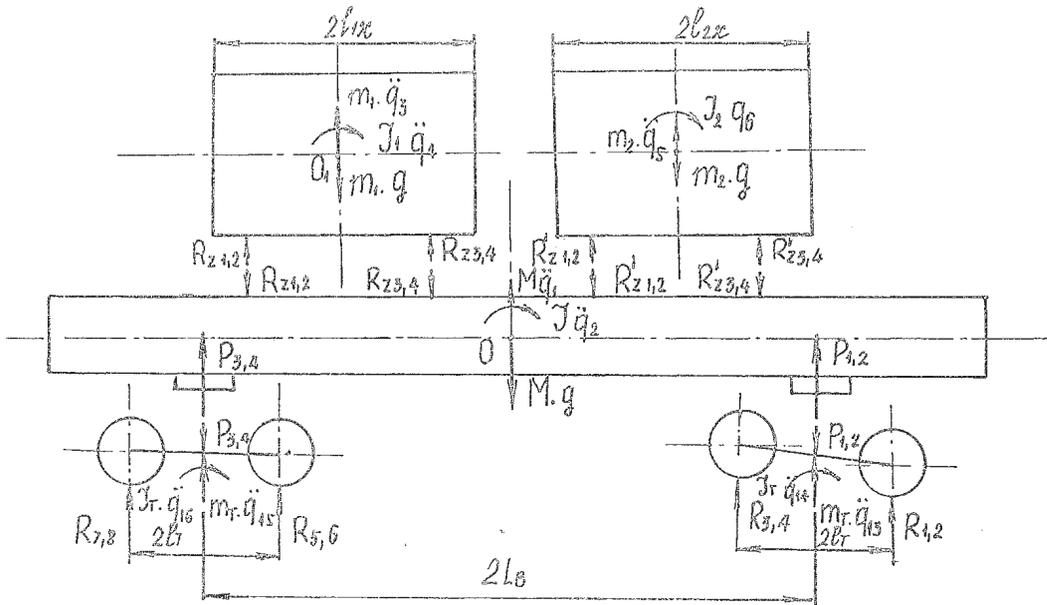


Рис. 2. Силовая расчётная схема вагона-платформы с двумя кососимметрично расположенными тяжеловесными грузами (вид сбоку).

Pic.2 Force design diagram of a flat car with two antisymmetrically located heavy cargos (side view).

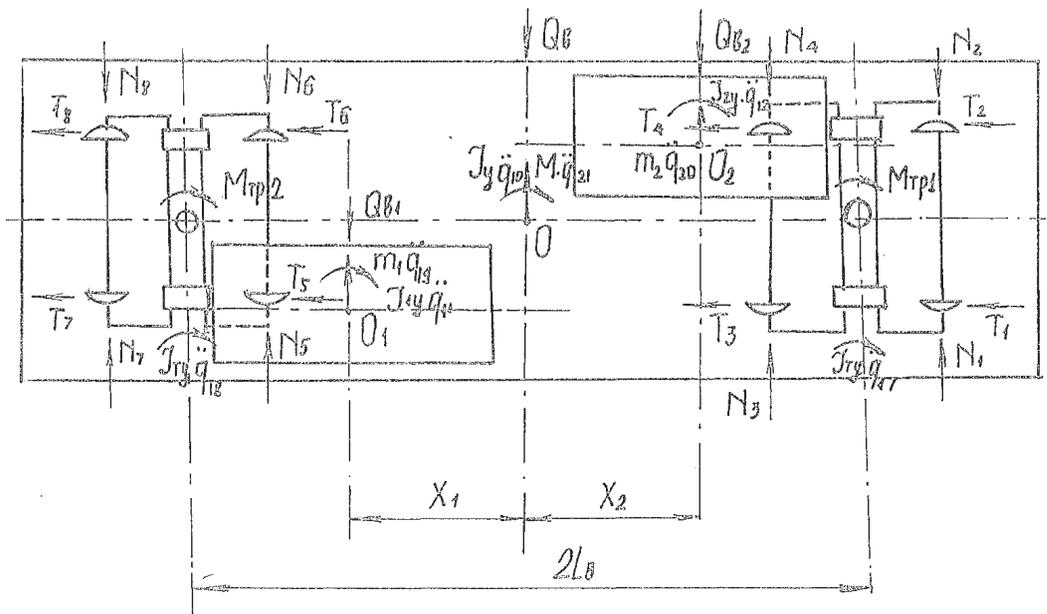


Рис. 3. Силовая расчётная схема вагона-платформы с двумя кососимметрично расположенными тяжеловесными грузами (вид сверху).

Pic. 3. Force design diagram of a flat car with two antisymmetrically located heavy cargos (top view).

Рассмотрена механическая система «вагон-платформа – грузы», состоящая из 13 твёрдых тел: рама вагона-платформы, два груза с упруго-диссипативными связями, две надрессорные балки, четыре боковые рамы

и четыре колёсные пары двух тележек. Центры масс платформы и грузов расположены в точках O , O_1 и O_2 , центры масс каждого груза смещены относительно центра массы вагона-платформы на X_1 и X_2 в продольном

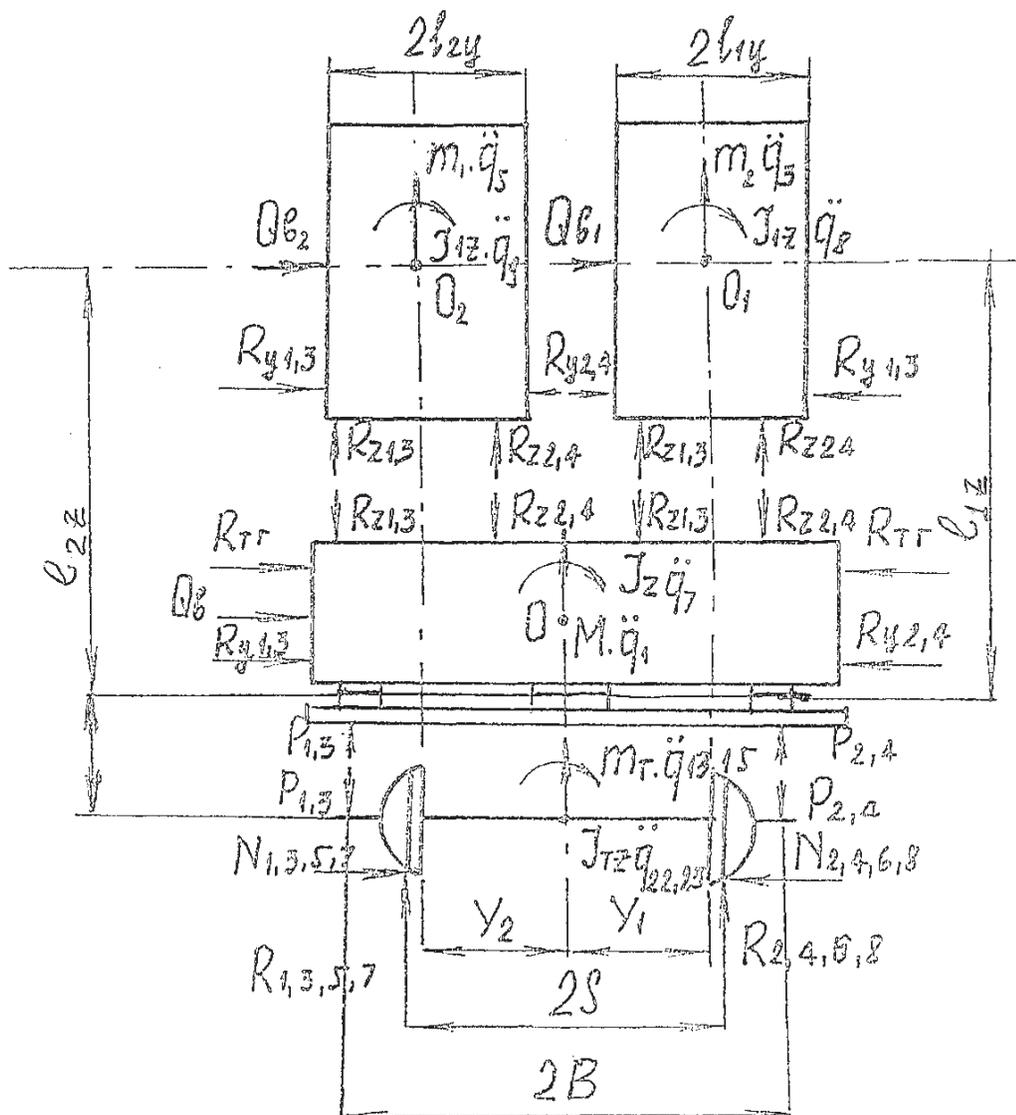


Рис. 4. Силовая расчётная схема вагона-платформы с двумя кососимметрично расположенными тяжеловесными грузами (вид с торца).

Fig. 4. Force design diagram of a flat car with two antisymmetrically located heavy cargoes (end view).

направлении и на Y_1 и Y_2 – в поперечном.

В качестве обобщённых координат приняты: q_1 – подпрыгивание рамы вагона-платформы, q_3 и q_5 – подпрыгивание соответственно первого и второго грузов, q_2 – галомирование рамы вагона-платформы, q_4 и q_6 – галомирование соответственно первого и второго грузов, q_7 – боковая качка рамы вагона-платформы, q_8 и q_9 – боковая качка соответственно первого и второго грузов, q_{10} – виляние рамы вагона-платформы, q_{11} и q_{12} – виляние соответственно первого и второго грузов, q_{13} и q_{15} –

подпрыгивание боковых рам тележек, q_{14} и q_{16} – галомирование боковых рам тележек, q_{17} и q_{18} – виляние тележек, q_{19} и q_{20} – боковой относ соответственно первого и второго грузов, q_{21} – боковой относ рамы вагона-платформы, q_{22} и q_{23} – боковая качка боковых рам тележек.

Относительные вертикальные деформации рессорных комплектов равны:

$$\begin{aligned} \Delta_{KB1} &= q_1 - q_2 L_B - q_7 B + q_{22} B - q_{13}, \\ \Delta_{KB2} &= q_1 - q_2 L_B + q_7 B - q_{22} B - q_{13}, \\ \Delta_{KB3} &= q_1 + q_2 L_B - q_7 B + q_{22} B - q_{15}, \\ \Delta_{KB4} &= q_1 + q_2 L_B + q_7 B - q_{22} B - q_{15}. \end{aligned}$$





Относительные горизонтальные деформации рессорных комплектов равны:

$$\begin{aligned} \Delta_{\kappa r1} &= q_{21} - q_{10} L_b - 1/2 (\eta_{r1,2} + \eta_{r3,4}), \\ \Delta_{\kappa r2} &= -q_{21} + q_{10} L_b + 1/2 (\eta_{r1,2} + \eta_{r3,4}), \\ \Delta_{\kappa r3} &= q_{21} + q_{10} L_b - 1/2 (\eta_{r5,6} + \eta_{r7,8}), \\ \Delta_{\kappa r4} &= -q_{21} - q_{10} L_b + 1/2 (\eta_{r5,6} + \eta_{r7,8}), \end{aligned}$$

где η_{ri} – амплитуда горизонтальной неровности железнодорожного пути вида $\eta = \eta_0 \sin \omega t$.

Относительные вертикальные деформации упругих опор грузов определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta_{\Gamma B1} &= q_3 - q_1 + q_4 l_{1x} - q_2 (X_1 - l_{1x}) - q_8 l_{1y} + q_7 (Y_1 + l_{1y}), \\ \Delta_{\Gamma B2} &= q_3 - q_1 + q_4 l_{1x} - q_2 (X_1 + l_{1x}) + q_8 l_{1y} + q_7 (Y_1 - l_{1y}), \\ \Delta_{\Gamma B3} &= q_3 - q_1 - q_4 l_{1x} - q_2 (X_1 - l_{1x}) - q_8 l_{1y} + q_7 (Y_1 + l_{1y}), \\ \Delta_{\Gamma B4} &= q_3 - q_1 - q_4 l_{1x} - q_2 (X_1 + l_{1x}) + q_8 l_{1y} + q_7 (Y_1 - l_{1y}), \\ \Delta_{\Gamma B5} &= q_5 - q_1 + q_6 l_{2x} + q_2 (X_2 - l_{2x}) - q_9 l_{2y} - q_7 (Y_2 - l_{2y}), \\ \Delta_{\Gamma B6} &= q_5 - q_1 + q_6 l_{2x} + q_2 (X_2 - l_{2x}) + q_9 l_{2y} - q_7 (Y_2 + l_{2y}), \\ \Delta_{\Gamma B7} &= q_5 - q_1 - q_6 l_{2x} + q_2 (X_2 + l_{2x}) - q_9 l_{2y} - q_7 (Y_2 - l_{2y}), \\ \Delta_{\Gamma B8} &= q_5 - q_1 - q_6 l_{2x} + q_2 (X_2 + l_{2x}) + q_9 l_{2y} - q_7 (Y_2 + l_{2y}). \end{aligned}$$

Относительные горизонтальные деформации упругих опор для грузов определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta_{\Gamma r1} &= q_{19} - q_{21} + q_{11} l_{1x} - q_{10} (X_1 + l_{1x}) + q_8 l_{1z}, \\ \Delta_{\Gamma r2} &= -q_{19} + q_{21} - q_{11} l_{1x} + q_{10} (X_1 + l_{1x}) - q_8 l_{1z}, \\ \Delta_{\Gamma r3} &= q_{19} - q_{21} - q_{11} l_{1x} - q_{10} (X_1 - l_{1x}) + q_8 l_{1z}, \\ \Delta_{\Gamma r4} &= -q_{19} + q_{21} + q_{11} l_{1x} + q_{10} (X_1 - l_{1x}) - q_8 l_{1z}, \\ \Delta_{\Gamma r5} &= q_{20} - q_{21} + q_{12} l_{2x} - q_{10} (X_2 - l_{2x}) - q_9 l_{2z}, \\ \Delta_{\Gamma r6} &= -q_{20} + q_{21} - q_{12} l_{2x} + q_{10} (X_2 - l_{2x}) + q_9 l_{2z}, \\ \Delta_{\Gamma r7} &= q_{20} - q_{21} - q_{12} l_{2x} - q_{10} (X_2 + l_{2x}) - q_9 l_{2z}, \\ \Delta_{\Gamma r8} &= -q_{20} + q_{21} + q_{12} l_{2x} + q_{10} (X_2 + l_{2x}) + q_9 l_{2z}, \end{aligned}$$

где l_{1z}, l_{2z} – высота центра массы соответственно первого и второго грузов над опорой пятника вагона-платформы.

Вертикальные деформации железнодорожного пути определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta_{R1} &= q_{13} + q_{22} S - \eta_1, \Delta_{R2} = q_{13} - q_{22} S - \eta_2, \\ \Delta_{R3} &= q_{13} + q_{22} S - \eta_3, \\ \Delta_{R4} &= q_{13} - q_{22} S - \eta_4, \Delta_{R5} = q_{15} + q_{23} - \eta_5, \Delta_{R6} = q_{15} - q_{23} S - \eta_6, \\ \Delta_{R7} &= q_{15} + q_{23} S - \eta_7, \Delta_{R8} = q_{15} + q_{23} S - \eta_8. \end{aligned}$$

Вертикальные силы, действующие на упруго-диссипативные опоры для пере-

возимых грузов, равны: $R_{zi} = C_{zi} \Delta_{\Gamma vi} + \beta_{\Gamma i} \cdot \Delta_{zei}$ ($i = 1-8$),

где C_{zi} – вертикальная жёсткость i -го упруго-диссипативного элемента груза, Δ_{zei} – относительные вертикальные перемещения i -го упруго-диссипативного элемента груза,

$\beta_{\Gamma i}$ – эквивалентный коэффициент вязкого трения i -го упруго-диссипативного элемента груза в вертикальной плоскости.

Поперечные горизонтальные силы в упруго-диссипативных элементах между грузом и рамой вагона-платформы равны:

$$R_{ym} = C_{ym} \Delta_{\Gamma m} + \beta_{\Gamma m} \Delta_{zem}, \quad (m = 1-8),$$

где C_{ym} – поперечная горизонтальная жёсткость m -го упруго-диссипативного элемента груза,

$\Delta_{\Gamma m}$ – относительные поперечные перемещения упруго-диссипативного элемента груза,

$\beta_{\Gamma m}$ – эквивалентный коэффициент вязкого трения m -го упруго-диссипативного элемента груза в поперечной горизонтальной плоскости.

Вертикальные силы, действующие на рессорные комплекты вагона-платформы, равны:

$$R_{\Gamma vi} = C_z \Delta_{\Gamma vi} + \beta_{\Gamma vi} \Delta_{mvi} \quad (i = 1-4),$$

где C_z – жёсткость i -го рессорного комплекта в вертикальной плоскости,

Δ_{mvi} – относительные вертикальные перемещения (прогиб) i -го рессорного комплекта вагона-платформы,

β_{mvi} – эквивалентное вязкое трение i -го рессорного комплекта в вертикальной плоскости.

Поперечные горизонтальные силы, действующие на рессорные комплекты вагона-платформы, равны:

$$R_{\Gamma m} = C_{\Gamma m} \Delta_{\Gamma m} + \beta_{\Gamma m} \Delta_{\Gamma m}, \quad (m = 1-4),$$

где $C_{\Gamma m}$ – поперечная горизонтальная жёсткость m -го рессорного комплекта вагона-платформы,

$\Delta_{\Gamma m}$ – относительные поперечные перемещения рессорного комплекта,

$\beta_{\Gamma m}$ – эквивалентное вязкое трение m -го рессорного комплекта в горизонтальной поперечной плоскости.

Момент сил трения в пятниках, возникающих при повороте тележек в горизонтальной плоскости, определяется из формулы:

$$M_{\Gamma 1,2} = \frac{(M + m_1 + m_2)}{2} g d \mu_{\Gamma},$$

где d – диаметр пятника,

$\mu_{\text{п}}$ – коэффициент трения между пятником вагона-платформы и подпятником тележки.

Вертикальные реакции рессорных комплектов определяются из формулы:

$$P_i = C_{\text{тв}} (f - \Delta_{\text{mai}}) + F_{\text{тви}} \text{Sign } \Delta_{\text{mai}}, \quad (I = 1-4), \\ (f + \Delta_{\text{mai}}) > 0, \\ P_i = 0 (f + \Delta_{\text{mai}}) < 0,$$

где Δ_{mai} – вертикальные деформации рессорных комплектов тележек,

f – статический прогиб рессорного комплекта тележек,

$C_{\text{тв}}$ – вертикальная жёсткость рессорного комплекта,

$F_{\text{тви}}$ – сила сухого трения.

Для определения горизонтальной поперечной реакции рессорных комплектов в эту формулу вместо $C_{\text{тв}}$ надо подставить $C_{\text{тр}}$ – горизонтальная поперечная жёсткость рессорного комплекта.

Вертикальные $R_{\text{ив}}$ и горизонтальные поперечные $R_{\text{ир}}$ реакции рельса на воздействия колёс при наличии в железнодорожном пути гасящих сил вязкого трения и односторонней связи между колесом и рельсом равны:

$$R_{\text{ив,р}} = C(x) [f(x) + \Delta_i] + F_{\text{п}} \frac{f(x) + \delta_i}{f(x)} \text{Sign } \Delta_i,$$

($i = 1-8$), при $[f(x) + \Delta_i] \geq 0$ и

$$R_i = 0 [f(x) + \Delta_i] < 0,$$

где $C(x)$ – вертикальная жёсткость железнодорожного пути под колёсами вагона-платформы,

$f(x)$ – статический прогиб железнодорожного пути под колёсами,

Δ_i – динамическая деформация железнодорожного пути в вертикальной плоскости,

$F_{\text{п}}$ – сила сухого трения, соответствующая статической деформации железнодорожного пути от колеса.

Величина сил вязкого трения между колесом и рельсом определена по формуле, приведенной в научно-исследовательской работе [6]:

$$T_i = \frac{\mu R_i}{\text{Cosd}_i(t)} \text{Sig } q_{17,18} \quad (i = 1-8),$$

где μ – коэффициент трения между колесом и рельсом.

Величина горизонтальных проекций рельсов равна: $N_i = R_i \text{tg } \alpha_i$

где α_i – угол наклона полной реактивной силы со стороны железнодорожного пути от вертикали, определяемый линейной интерполяцией из таблицы траектории точки контакта колеса и рельса в зависимости от величины бокового смещения колеса относительно головки рельса [6].

На основании проведенных выше математических выкладок составлена следующая система из 23 дифференциальных уравнений, описывающих пространственные колебания вагона-платформы с двумя кососимметрично расположенными на нём двумя тяжеловесными грузами с упруго-диссипативными элементами связи с вагоном- платформой:

$$M \ddot{q}_1 - (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4}) - (R_{z1}^1 + R_{z2}^1 + R_{z3}^1 + R_{z4}^1) + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - Mg = 0,$$

$$J_x \ddot{q}_2 + (P_3 + P_4 - P_1 - P_2) L_B + (R_{z1}^1 + R_{z2}^1) \cdot (x_2 - l_{2x}) + (R_{z3}^1 + R_{z4}^1) (x_2 + l_{2x}) - (R_{z1} + R_{z2}) (x_1 + l_{1x}) - (R_{z3} + R_{z4}) (x_1 - l_{1x}) = 0,$$

$$m_1 \ddot{q}_3 = R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} - m_1 g = 0,$$

$$J_{1x} \ddot{q}_4 + (R_{z1} + R_{z2}) l_{1x} - (R_{z3} + R_{z4}) l_{1x} = 0,$$

$$m_2 \ddot{q}_5 + R_{z1}^1 + R_{z2}^1 + R_{z3}^1 + R_{z4}^1 - m_2 g = 0,$$

$$J_{2x} \ddot{q}_6 + (R_{z1}^1 + R_{z2}^1) l_{2x} - (R_{z3}^1 + R_{z4}^1) l_{2x} = 0,$$

$$J_z \ddot{q}_7 - (P_2 + P_4) B + (p_1 + P_3) B - (R_{z1} + R_{z3}) \cdot (Y_1 + l_{1y}) + (R_{z2} + R_{z4}) (Y_1 - l_{1y}) - (R_{z1}^1 + R_{z3}^1) \cdot (Y_2 - l_{2y}) + (R_{z2}^1 + R_{z4}^1) (Y_2 + l_{2y}) = 0,$$

$$J_{1z} \ddot{q}_8 - (R_{z2} + R_{z4}) l_{1y} + (R_{z1} + R_{z3}) l_{1y} + (R_{y1} + R_{y3}) l_{1z} - (R_{y2} + R_{y4}) l_{1z} + Q_{b1} h_{b1} = 0,$$

$$J_{2z} \ddot{q}_9 - (R_{z2}^1 + R_{z4}^1) l_{2y} + (R_{z1}^1 + R_{z3}^1) l_{2y} + (R_{y1}^1 + R_{y3}^1) l_{2z} - (R_{y2}^1 + R_{y4}^1) l_{2z} + Q_{b2} h_{b2} = 0,$$

$$J_y \ddot{q}_{10} - (R_{y1} - R_{y2}) (x_1 + l_{1x}) - (R_{y3} - R_{y4}) (x_1 - l_{1x}) + (R_{y4}^1 - R_{y3}^1) (x_2 + l_{2x}) + (R_{y2}^1 - R_{y1}^1) (x_2 - l_{2x}) - (N_2 - N_1) (L_B + l_T) - (N_4 - N_3) (L_B - l_T) + (N_6 - N_5) x + (L_B - l_T) + (N_8 - N_7) (L_B + l_T) = 0,$$

$$J_{1y} \ddot{q}_{11} + (R_{y1} + R_{y4}) l_{1x} - (R_{y2} + R_{y3}) l_{1x} = 0,$$

$$J_{2y} \ddot{q}_{12} + (R_{y1}^1 + R_{y4}^1) l_{2x} - (R_{y2}^1 + R_{y3}^1) l_{2x} = 0,$$

$$m_T \ddot{q}_{13} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 - P_1 - P_2 - m_T g = 0,$$

$$J_{Tx} \ddot{q}_{14} + (R_3 + R_4) l_T - (R_1 + R_2) l_T - (P_1^1 - P_1^{11}) l_{\text{пк}} - (P_2^1 - P_2^{11}) l_{\text{пк}} = 0,$$

$$m_T \ddot{q}_{15} + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 - P_3 - P_4 - m_T g = 0,$$





$$J_{T_4} \ddot{q}_{16} + (R_7 + R_8) l_T - (R_5 + R_6) l_T - (P_3^1 - P_3^{11}) l_{PK} - (P_4^1 - P_4^{11}) l_{PK} = 0,$$

$$J_{T_5} \ddot{q}_{17} + (T_1 + T_3) S - (T_2 - T_4) S + (N_2 + N_3) l_T + M_{T_1} \text{Sign } \dot{q}_{17} = 0,$$

$$J_{T_6} \ddot{q}_{18} + (T_5 + T_7) S + (N_6 + N_7) l_T - (N_5 + N_3) l_T + M_{T_2} \text{Sign } \dot{q}_{18} = 0,$$

$$m_1 \ddot{q}_{19} + R_{y1} + R_{y3} - R_{y2} - R_{y4} - Q_{B1} = 0,$$

$$m_2 \ddot{q}_{20} + R_{y1}^1 + R_{y3}^1 - R_{y2}^1 - R_{y4}^1 - Q_{B2} = 0,$$

$$M \ddot{q}_{21} - R_{y1} - R_{y3} + R_{y2} + R_{y4} - R_{y1}^1 - R_{y3}^1 + R_{y2}^1 + R_{y4}^1 + (N_1 + N_3 + N_5 + N_7) - (N_2 + N_4 + N_6 + N_8) - Q_B = 0,$$

$$J_{zr} \ddot{q}_{22} + (P_4 - P_3) B + (R_5 + R_7) S - (R_6 + R_8) \cdot S - (N_1 + N_3 - N_5 - N_7) \frac{D_k}{2} = 0,$$

$$J_{zr} \ddot{q}_{23} + (P_2 - P_1) S + (R_1 + R_3) S - (R_2 - R_4) \cdot S - (N_2 + N_4 - N_1 - N_3) \frac{D_k}{2} = 0,$$

где q_i – обобщённые координаты,

M – масса обрессоренных элементов вагона-платформы (рама, надрессорные балки тележек),

m_1, m_2 – масса соответственно первого и второго грузов,

m_T – масса необрессоренных элементов тележек,

J_x, J_y, J_z – моменты инерции обрессоренных элементов вагона-платформы соответственно относительно осей X, Y и Z ,

J_{1x}, J_{1y}, J_{1z} – моменты инерции первого груза соответственно относительно осей X, Y, Z ,

J_{2x}, J_{2y}, J_{2z} – моменты инерции второго груза соответственно относительно осей X, Y, Z ,

X_1, X_2, Y_1, Y_2 – расстояния между центрами масс соответственно первого и второго грузов,

$2l_{1x}, 2l_{1y}, 2l_{1z}, 2l_{2x}, 2l_{2y}, 2l_{2z}$ – геометрические размеры соответственно первого и второго грузов,

$2L_B$ – база вагона-платформы,

$2l_T$ – база тележки,

$2B$ – расстояние между центрами ресорных комплектов тележек,

$2S$ – расстояние между кругами катания колёс колёсной пары,

Q_B – сила ветра, действующая на раму вагона-платформы,

Q_{B1}, Q_{B2} – сила ветра, действующая на боковую поверхность грузов,

R_i – реакции, действующие на колёса со стороны железнодорожного пути,

T_i – продольные силы трения при проскальзывании колёс по рельсам.

Разработанные расчётные схемы и дифференциальные уравнения (математическая модель), описывающие пространственные колебания вагона-платформы с двумя кососимметрично расположенными тяжеловесными грузами с упруго-диссипативными элементами связи с рамой вагона-платформы, позволяют исследовать динамические (ходовые) качества четырёхосного вагона-платформы, оценивать безопасность движения её с точки зрения устойчивости колёса от схода с рельса и поперечного опрокидывания вагона-платформы в кривых железнодорожного пути при различных параметрах перевозимых кососимметрично расположенных тяжеловесных грузов и их упруго-диссипативных связей (опор) с рамой вагона-платформы, а также устанавливать предельно допустимые в эксплуатации продольные и поперечные смещения центров масс грузов от осей симметрии вагона-платформы в зависимости от их массы и скорости движения, при которых обеспечивается безопасность движения вагона.

Решение составленной системы дифференциальных уравнений можно провести, например, известным эффективным разностно-итерационным методом численного интегрирования с автоматическим выбором шага интегрирования, разработанным профессором В. Д. Хусидовым, с использованием современных персональных компьютеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технические условия погрузки и крепления грузов. – М.: Транспорт, 1990. – 408 с.

2. Львов А. А., Грачёва Л. О. Современные методы исследования динамики вагонов. – М.: Транспорт, 1972. – 159 с.

3. Львов А. А., Музыкин В. А. Динамика четырёхосного полувагона при несимметричном его загрузке // Вестник ВНИИЖТ. – 1965. – № 4. – С. 8–12.

4. Анисимов П. С. Пространственные колебания грузового вагона при несимметричном размещении крупногабаритных грузов с упруго-диссипативными элементами // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 7. – С. 29–31.

5. Данович В. Д., Анисимов П. С.. Колебания в горизонтальной плоскости четырёхосной платформы с несимметрично расположенным тяжеловесным грузом // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 3. – С. 5–9.

6. Анисимов П. С. Модель пространственных колебаний платформы с длинномерным грузом // Мир транспорта. – 2013. – № 4. – С. 6–13. ●