

А. Н. ПШИНЬКО, С. В. МЯМЛИН, П. А. ЯГОДА (ДИИТ),
 А. В. ДОНЧЕНКО (Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения),
 Л. М. ЛОБОЙКО (Укрзалізниця),
 В. И. ПРИХОДЬКО, Г. С. ИГНАТОВ (ОАО «Крюковский вагоностроительный завод»)

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ПАССАЖИРСКОГО КУПЕЙНОГО ВАГОНА МОДЕЛИ 61-779

У статті наведено розрахунок основних нормуємих динамічних показників нового пасажирського вагона для швидкості 160 км/год.

В статье представлен расчет основных нормируемых динамических показателей нового пассажирского вагона для скорости 160 км/ч.

In article accounting of main standard dynamic characteristics of new passenger car for velocity of 160 km/h described.

Для оценки динамических качеств новых рельсовых экипажей на стадии проектирования, как правило, выполняют расчеты по определению основных динамических показателей в сравнении с нормируемыми величинами из нормативной литературы [1]. К нормируемым величинам относятся: коэффициент вертикальной динамики, коэффициент горизонтальной динамики, коэффициент запаса устойчивости вагона от опрокидывания, коэффициент запаса устойчивости колеса против схода с рельсов. Эти показатели оцениваются для различных вариантов загрузки. В данном случае, для пассажирского вагона – это вариант порожнего вагона и вагона с пассажирами.

Исходные данные для расчета:

- вес вагона порожнего (расчетный) $Q_B = 618$ кН;
- вес вагона с пассажирами $Q_{B,П} = 660$ кН;
- вес кузова порожнего $Q_K = 476$ кН;
- высота центра тяжести кузова порожнего от УГР $h_K = 2,163$ м;
- вес кузова с пассажирами $Q_{K,П} = 518$ кН;
- высота центра тяжести кузова с пассажирами от УГР $h_{K,П}^* = 2,119$ м;
- длина вагона по осям сцепления автосцепок $2L_C = 26,696$ м;
- высота автосцепки над УГР $h_a = 1,06$ м;
- расстояние между кругами катания колес $2S = 1,58$ м;
- скорость движения вагона $V = 160$ км/ч (44,44 м/с);
- вес надрессорной балки $Q_6 = 6$ кН;

- вес пружин центрального рессорного подвешивания одной тележки $Q_1 = 0,307$ кН;
- вертикальная жесткость центрального рессорного подвешивания одной тележки $C_{B1} = 2659,22$ кН/м;
- вес рамы тележки $Q_{p,т} = 14,68$ кН;
- вес пружин центрального рессорного подвешивания одной тележки $Q_1 = 0,307$ кН;
- вертикальная жесткость центрального рессорного подвешивания одной тележки $C_{B1} = 2659,22$ кН/м;
- вес пружин буксового рессорного подвешивания одной тележки $Q_2 = 0,312$ кН;
- вертикальная жесткость буксового рессорного подвешивания одной тележки $C_{B2} = 6567,064$ кН/м;
- вес котловой тележки $Q_{T1} = 74,0$ кН;
- вес котловой тележки $Q_{T2} = 68,0$ кН;
- высота центра тяжести тележки от УГР $h_{ц,т} = 0,6$ м;
- боковая проекция кузова $S_K = 98$ м²;
- высота центра тяжести боковой проекции кузова от УГР $h_{B,к}^* = 2,7$ м;
- боковая проекция тележки $S_T = 6,8$ м²;
- высота центра тяжести боковой проекции тележки от УГР $h_{B,т} = 0,6$ м;
- число осей вагона $n = 4$;
- расстояние между центрами рессорных комплектов $2b = 2,036$ м;

– высота от УГР до верхней плоскости центрального рессорного комплекта в свободном состоянии $h_p = 0,609$ м.

Коэффициент вертикальной динамики

Коэффициент вертикальной динамики $K_{д.в}$ рассматривается в [1, п. 2.2.2] как случайная функция с вероятностным распределением вида:

$$P(k_{д.в}) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \cdot \frac{k_{д.в}^2}{k_{д.в}^2} \cdot \beta^2\right).$$

Коэффициент $k_{д.в}$ определяется как квантиль этой функции при расчетной односторонней вероятности $P(k_{д.в})$ по формуле:

$$k_{д.в} = \frac{\overline{k_{д.в}}}{\beta} \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \ln \frac{1}{1 - P(k_{д.в})}},$$

где $\overline{k_{д.в}}$ – среднее вероятное значение коэффициента вертикальной динамики

$$\overline{k_{д.в}} = a + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot \frac{V - 15}{f_{ст}^i},$$

где a – коэффициент, равный для элементов кузова 0,05; b – коэффициент, учитывающий влияние числа осей $n = 2$ в тележке или группе тележек под одним концом экипажа

$$b = \frac{n + 2}{2n} = \frac{2 + 2}{2 \cdot 2} = 1,$$

V – расчетная скорость движения; $f_{ст}^{(1)}$ – статический прогиб рессорного подвешивания вагона с пассажирами

$$\begin{aligned} f_{ст}^{(1)} &= \frac{Q_{к.п} + 2(Q_6 + 1/3Q_1)}{2C_{в1}} + \\ &+ \frac{Q_{к.п} + 2(Q_6 + Q_1 + Q_{р.т} + 1/3Q_2)}{2C_{в2}} = \\ &= \frac{518 + 2(6 + 1/30,307)}{2 \cdot 2659,22} + \\ &+ \frac{518 + 2(6 + 0,307 + 14,68 + 1/3 \cdot 0,312)}{2 \cdot 6567,064} = \\ &= 0,142 \text{ м,} \end{aligned}$$

где $f_{ст}^{(2)}$ – статический прогиб рессорного подвешивания порожнего вагона

$$\begin{aligned} f_{ст}^{(2)} &= \frac{Q_k + 2(Q_6 + 1/3Q_1)}{2C_{в1}} + \\ &+ \frac{Q_k + 2(Q_6 + Q_1 + Q_{р.т} + 1/3Q_2)}{2C_{в2}} = \\ &= \frac{476 + 2(6 + 1/30,307)}{2 \cdot 2659,22} + \\ &+ \frac{476 + 2(6 + 0,307 + 14,68 + 1/3 \cdot 0,312)}{2 \cdot 6567,064} = \\ &= 0,131 \text{ м.} \end{aligned}$$

- для вагона с пассажирами

$$\overline{k_{д.в}} = 0,05 + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot \frac{44,44 - 15}{0,142} = 0,125;$$

- для порожнего вагона

$$\overline{k_{д.в}} = 0,05 + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot \frac{44,44 - 15}{0,131} = 0,131.$$

β – параметр распределения, уточняется по экспериментальным данным, для деталей пассажирских вагонов при существующих условиях эксплуатации $\beta = 1$; $P(k_{д.в})$ – при расчетах на прочность по допускаемым напряжениям принимается 0,97;

- для вагона с пассажирами

$$k_{д.в} = \frac{0,125}{1} \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{1 - 0,97}} = 0,264;$$

- для порожнего вагона

$$k_{д.в} = \frac{0,131}{1} \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{1 - 0,97}} = 0,277.$$

Для шкворневых узлов рамы значение расчетного коэффициента вертикальной динамики определяется с учетом влияния перевалки кузова вагона по формуле:

$$k_{дв1}^{шк.в} = k_{дв} (1 + \gamma),$$

где γ – коэффициент, который рекомендуется принимать $\gamma = 0,2$.

Для груженого вагона

$$k_{дв1}^{шк.в} = 0,264(1+0,2) = 0,316.$$

Для порожнего вагона

$$k_{дв1}^{шк.в} = 0,277(1+0,2) = 0,332.$$

Таблица 1

Нормативные значения $k_{д.в}$	
Оценка хода вагона	Коэффициент вертикальной динамики кузова
Отличный	0,1
Хороший	0,15
Удовлетворительный	0,20
Допустимый	0,35
Непригодный	0,70

В соответствии с [1, п. 3.4.1]:

- для вагона с пассажирами $k_{д.в} = 0,264$, ход вагона допустимый;
- для порожнего вагона $k_{д.в} = 0,277$, ход вагона допустимый.

Коэффициент горизонтальной динамики

Коэффициент горизонтальной динамики $K_{д.г}$ рассматривается в [1, п. 2.3.1] как случайная функция с вероятностным распределением вида:

$$P(k_{д.г}) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \cdot \frac{k_{д.г}^2}{k_{д.г}^2}\right),$$

Коэффициент $k_{д.г}$ определяется как квантиль этой функции при расчетной односторонней вероятности $P(k_{д.г}) = 0,97$ по формуле:

$$k_{д.г} = \overline{k_{д.г}} \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \ln \frac{1}{1 - P(k_{д.г})}} = 0,099 \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \ln \frac{1}{1 - 0,97}} = 0,21,$$

где $\overline{k_{д.г}}$ – среднее вероятное значение коэффициента горизонтальной динамики

$$\overline{k_{д.г}} = b\delta(5 + V) = 1 \cdot 0,002(5 + 44,44) = 0,099,$$

где b – коэффициент, учитывающий влияние числа осей n в тележке или группе тележек под одним концом экипажа, δ – коэффициент, учитывающий тип ходовых частей вагона, для пассажирских вагонов – $\delta = 0,002$; V – расчетная скорость движения.

Таблица 2

Нормативные значения $k_{д.г}$

Оценка хода вагона	Коэффициент вертикальной динамики кузова
Отличный	0,05
Хороший	0,10
Удовлетворительный	0,15
Допустимый	0,25
Непригодный	0,40

В соответствии с [1, п. 3.4.1]:

- для пассажирского вагона $k_{д.г} = 0,21$, ход вагона допустимый.

Коэффициент запаса поперечной устойчивости вагона от опрокидывания под действием боковых сил $k_{y.o}$

При оценке устойчивости вагона от опрокидывания рассматривается его движение с максимальной скоростью. При этом учитываются центробежные и ветровые нагрузки, поперечные смещения от центрального положения оси вагона центров тяжести кузова и тележки в результате относительных поперечных зазоров между ними и боковых наклонов кузова за счет односторонних просадок рессорных комплектов при действии боковых опрокидывающих моментов.

Коэффициент запаса устойчивости вагона от опрокидывания определяется по формуле

$$k_{y.o} = \frac{P_{ст}}{P_{дин}} \geq [k_{y.o}],$$

где $P_{ст}$ – статическая вертикальная сила давления колеса на рельс; $P_{дин}$ – динамическая вертикальная сила давления колеса на рельс, вызванная действием поперечных сил с учетом перемещений центров тяжести кузова и тележки; $[k_{y.o}]$ – допускаемый коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания.

Силы $P_{ст}$ и $P_{дин}$ определяются по формулам:

- вагон порожний

$$P_{\text{ст}} = \frac{Q_{\text{в}}}{2n},$$

$$P_{\text{дин}} = \frac{F_{\text{к}} h_{\text{к}} + F_{\text{т}} h_{\text{ц,т}} + F_{\text{в,к}} h_{\text{в,к}}^* + F_{\text{в,т}} h_{\text{в,т}}}{n2S} + \frac{Q_{\text{к}} \Delta_{\text{к}} + (Q_{\text{т1}} + Q_{\text{т2}}) \Delta_{\text{т}}}{n2S}; \quad (*)$$

- вагон с пассажирами

$$P_{\text{ст}} = \frac{Q_{\text{в,п}}}{2n},$$

$$P_{\text{дин}} = \frac{F_{\text{к}} h_{\text{к,п}} + F_{\text{т}} h_{\text{ц,т}} + F_{\text{в,к}} h_{\text{в,к}}^* + F_{\text{в,т}} h_{\text{в,т}}}{n2S} + \frac{Q_{\text{к,п}} \Delta_{\text{к}} + (Q_{\text{т1}} + Q_{\text{т2}}) \Delta_{\text{т}}}{n2S}; \quad (*)$$

где $F_{\text{к}}$, $F_{\text{т}}$ – боковые силы, действующие на кузов и тележку, равные разности центробежных сил и поперечных составляющих сил тяжести, возникающих вследствие возвышения наружного рельса, для пассажирских вагонов принимается 10 % от силы тяжести;

- для груженого кузова

$$F_{\text{к}} = Q_{\text{кн}} \cdot 0,1 = 518 \cdot 0,1 = 51,8 \text{ кН};$$

- для порожнего кузова

$$F_{\text{к}} = Q_{\text{к}} \cdot 0,1 = 476 \cdot 0,1 = 47,6 \text{ кН};$$

- для груженого и порожнего вагона

$$F_{\text{т}} = (Q_{\text{т1}} + Q_{\text{т2}}) 0,1 = (68 + 74) \cdot 0,1 = 14,2 \text{ кН}.$$

$F_{\text{в,к}}$, $F_{\text{в,т}}$ – силы давления ветра на кузов и тележку:

- для кузова

$$F_{\text{в,к}} = S \cdot p_{\text{в}} = 98 \cdot 0,500 = 49 \text{ кН};$$

- для тележки

$$F_{\text{в,т}} = S_{\text{т}} \cdot p_{\text{в}} = 6,8 \cdot 0,500 = 3,4 \text{ кН};$$

$S_{\text{к}}$, $S_{\text{т}}$ – площадь боковой проекции кузова вагона и боковой проекции тележки соответственно; $p_{\text{в}} = 0,500$ кПа – удельное давление ветра; $h_{\text{к,п}}$, $h_{\text{к}}$, $h_{\text{ц,т}}$ – высота от уровня головок рельсов до центров тяжести кузова с пассажирами, порожнего и тележки соответственно, при прогибе рессорного комплекта от статической нагрузки:

- для груженого вагона

$$h_{\text{к,п}} = h_{\text{к,п}}^* - (f_{\text{ст}}^{(1)} - f_{\text{ст}}^{(2)}) =$$

$$= 2,119 - (0,142 - 0,131) = 2,188 \text{ м},$$

$h_{\text{в,к}}$, $h_{\text{в,т}}$ до геометрических центров боковых проекций кузова и тележки соответственно при прогибе рессорного комплекта от статической нагрузки:

- для груженого вагона

$$h_{\text{в,к}} = h_{\text{в,к}}^* - (f_{\text{ст}}^{(1)} - f_{\text{ст}}^{(2)}) =$$

$$= 2,7 - (0,142 - 0,131) = 2,689 \text{ м},$$

$h_{\text{а}}$ – высота от уровня головок рельсов до продольной оси автосцепок; $\Delta_{\text{к}}$, $\Delta_{\text{т}}$ – суммарные, параллельные плоскости головок рельсов перемещения центров тяжести кузова и тележки относительно центрального положения продольной оси вагона.

Суммарное смещение центра тяжести кузова $\Delta_{\text{к}}$ в общем случае образуется за счет: $\Delta_1 = 7$ мм – поперечного одностороннего перемещения из центрального положения рам тележек относительно букс колесных пар; $\Delta_2 = 43$ мм – то же для наддресорных балок относительно рам тележек; $\Delta_3 = 3$ мм – то же для пятников (шкворневых устройств) рамы кузова относительно наддресорных балок; Δ_4 – установочного (технологического) поперечного смещения (отклонения) продольной оси кузова относительно продольной оси, проходящей через центры пятников (шкворневых устройств). Для вагонов длиной до 16 м допускается принимать равной 10 мм, для более длинных вагонов – с увеличением пропорционально длине $\Delta_4 = 26,1(10/16) = 16$ мм; Δ_5 – смещения центра тяжести кузова при боковом наклоне кузова за счет зазоров между скользящими кузовом и тележками, при жесткой опоре на скользуны $\Delta_5 = 0 = 0$ мм; Δ_6 – смещение центра тяжести кузова при боковом наклоне кузова за счет одностороннего прогиба рессор при действии боковых сил

$$\Delta_6 = \frac{\Delta f}{b} (h_{\text{к}} - h_{\text{ресс}}),$$

где Δf – дополнительный прогиб рессор с догружаемой стороны вагона и такой же подъем рессор с разгружаемой стороны при

действии боковых сил; $2b$ – поперечное расстояние между центрами рессорных комплектов; $h_{\text{ресс}}$ – высота от уровня головок рельсов до верхней плоскости центров рессорных комплектов:

- для груженого вагона

$$h_{\text{ресс}} = h_p - f_{\text{ст}}^{(1)} = 0,609 - 0,142 = 0,467 \text{ м};$$

$$\Delta f = 0,0955 \text{ м},$$

$$\begin{aligned} \Delta_6 &= \frac{\Delta f}{b} (h_k - h_{\text{ресс}}) = \\ &= \frac{0,0955}{2,036/2} (2,188 - 0,467) = 0,161 \text{ м}; \end{aligned}$$

- для порожнего вагона

$$h_{\text{ресс}} = h_p - f_{\text{ст}}^{(2)} = 0,609 - 0,131 = 0,478 \text{ м}.$$

$$\Delta f = 0,0888 \text{ м};$$

$$\begin{aligned} \Delta_6 &= \frac{\Delta f}{b} (h_k - h_{\text{ресс}}) = \\ &= \frac{0,0888}{2,036/2} (2,163 - 0,478) = 0,147 \text{ м}; \end{aligned}$$

- для груженого вагона

$$\begin{aligned} \Delta_k &= \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6 = \\ &= 7 + 43 + 3 + 0 + 161 = 214 \text{ мм}; \end{aligned}$$

- для порожнего вагона

$$\begin{aligned} \Delta_k &= \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6 = \\ &= 7 + 43 + 3 + 0 + 147 = 200 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Значение Δ_T для всех типовых вагонов рекомендуется принимать равным 8 мм.

При расчете необходимо проверить соответствие опрокидывающего момента, создаваемого действующими на кузов силами (числитель формулы (*)), реактивному моменту рессорного подвешивания определенному по формуле:

$$M_{\text{реакт}} = \frac{\Delta f}{b} \mathcal{J}_{\text{угл}} = \Delta f \cdot 2b \cdot C_B,$$

где $\mathcal{J}_{\text{угл}} = 2b^2 C_B$ – угловая жесткость рессорных комплектов вагона; C_B – вертикальная жесткость рессорных комплектов одной стороны вагона

$$\begin{aligned} C_B &= \frac{C_{B1} \times C_{B2}}{(C_{B1} + C_{B2})} = \\ &= \frac{2659,22 \cdot 6567,064}{(2659,22 + 6567,064)} = 1892,774 \text{ кН/м}; \end{aligned}$$

Проверяем соответствие опрокидывающего момента, создаваемого действующими на кузов силами (числитель формулы (*)), реактивному моменту рессорного подвешивания:

- для груженого вагона

$$\begin{aligned} M_{\text{опр}} &= F_K h_{K.П} + F_T h_{\text{ЦТ}} + F_{B.K} h_{B.K} + F_{B.T} h_{B.T} + \\ &+ Q_{K.П} \Delta_K + (Q_{T1} + Q_{T2}) \Delta_T = \\ &= 51,8 \cdot 2,188 + 14,2 \cdot 0,6 + 49 \cdot 2,689 + 3,4 \cdot 0,6 + \\ &+ 518 \cdot 0,214 + (74 + 68) 0,008 = 368 \text{ кН} \cdot \text{м}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{реакт}} &= \Delta f \cdot 2b \cdot C_B = \\ &= 0,0955 \cdot 2,036 \cdot 1892,774 = 368 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Данное условие выполняется:

- для порожнего вагона

$$\begin{aligned} M_{\text{опр}} &= F_K h_K + F_T h_{\text{ЦТ}} + F_{B.K} h_{B.K}^* + F_{B.T} h_{B.T} + \\ &+ Q_{K.П} \Delta_K + (Q_{T1} + Q_{T2}) \Delta_T = \\ &= 47,6 \cdot 2,163 + 14,2 \cdot 0,6 + 49 \cdot 2,7 + \\ &+ 3,4 \cdot 0,6 + 476 \cdot 0,200 + (74 + 68) 0,008 = \\ &= 342,2 \text{ кН} \cdot \text{м}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{реакт}} &= \Delta f \cdot 2b \cdot C_B = \\ &= 0,0888 \cdot 2,036 \cdot 1892,774 = 342,2 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Данное условие выполняется.

Формула для определения Δ_6 действительна при соблюдении условия

$$\Delta f \leq K \cdot f_{\text{ст}}$$

(значение K и $f_{\text{ст}}$ принимается согласно [1, п. 7.3.3.]), где K – коэффициент конструктивного запаса для пассажирских вагонов равен 1,5;

$$\Delta f = 0,0955 \leq 1,5 \cdot 0,142 = 0,213 \text{ мм}$$

(условие выполняется);

$$\Delta f = 0,0888 \leq 1,5 \cdot 0,131 = 0,196 \text{ мм}$$

(условие выполняется).

Данное условие выполняется во всех случаях при определении Δ_6 .

Определение коэффициента устойчивости груженого вагона от опрокидывания:

$$P_{ст} = \frac{660}{2 \cdot 4} = 82,5 \text{ кН};$$

$$P_{дин} = \frac{51,8 \cdot 2,188 + 14,2 \cdot 0,6 + 49 \cdot 2,689}{4 \cdot 1,58} +$$

$$+ \frac{3,4 \cdot 0,6 + 518 \cdot 0,214 + (74 + 68) \cdot 0,008}{4 \cdot 1,58} = 58,17 \text{ кН},$$

$$k_{y.o} = \frac{P_{ст}}{P_{дин}} = \frac{82,5}{58,17} = 1,42 \geq [k_{y.o}] = 1,4$$

(выполняется).

Определение коэффициента устойчивости порожнего вагона от опрокидывания:

$$P_{ст} = \frac{618}{2 \cdot 4} = 77,25 \text{ кН}$$

$$P_{дин} = \frac{47,6 \cdot 2,163 + 14,2 \cdot 0,6 + 49 \cdot 2,7}{4 \cdot 1,58} +$$

$$+ \frac{3,4 \cdot 0,6 + 476 \cdot 0,200 + (74 + 68) \cdot 0,008}{4 \cdot 1,58} = 54,04 \text{ кН},$$

$$k_{y.o} = \frac{P_{ст}}{P_{дин}} = \frac{77,25}{54,04} = 1,43 \geq [k_{y.o}] = 1,4.$$

Оценка устойчивости колеса против схода с рельсов

Оценка устойчивости колеса против схода с рельсов проводится в соответствии с [1, п. 3.4.3], исходя из независимости процессов вертикальных и горизонтальных колебаний и колебаний боковой качки вагона

Коэффициент устойчивости колесной пары против схода с рельса (по условию вкатывания) определяется по формуле:

$$K_{y.c} = \varepsilon \cdot \frac{P_{в1}}{P_6},$$

где

$$\varepsilon = \frac{\text{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \cdot \text{tg} \beta} = \frac{\text{tg} 60^\circ - 0,25}{1 + 0,25 \cdot \text{tg} 60^\circ} = 1,034,$$

где β – угол наклона образующей конусообразной поверхности гребня колеса к горизонтальной оси ($\beta = 60^\circ$); μ – коэффициент трения ($\mu = 0,25$); $P_{в1}$ – вертикальная составляющая силы реакции набегающего колеса на головку рельса

$$P_{в1} = 2Q_{ш}^{ст} \left[\frac{b - a_2}{l} (1 - \bar{k}_{дв1}) - \frac{b}{l} k_{дбк} \right] +$$

$$+ H_p \frac{r}{l} + q_{кп} \frac{b - a_2}{l};$$

$P_{в2}$ – вертикальная составляющая силы реакции ненабегающего колеса на головку рельса;

$$P_{в2} = 2Q_{ш}^{ст} \left[\frac{b - a_1}{l} (1 - \bar{k}_{дв1}) + \frac{b}{l} k_{дбк} \right] -$$

$$- H_p \frac{r}{l} + q_{кп} \frac{b - a_1}{l};$$

P_6 – горизонтальная составляющая силы реакции набегающего колеса на головку рельса, действующая одновременно с $P_{в1}$ и $P_{в2}$

$$P_6 = H_p + \mu P_{в2},$$

$q_{кп}$ – сила тяжести необрессоренных частей, входящих на колесную пару $q_{кп} = 13,768$ кН (колесная пара с буксами); $Q_{ш}^{ст}$ – сила тяжести обрессоренных частей вагона, действующая на шейку оси колесной пары:

- порожний вагон

$$Q_{ш}^{ст} = \frac{Q_v - nq_{кп}}{2n} = \frac{618 - 4 \cdot 13,768}{2 \cdot 4} = 70,356 \text{ кН},$$

- вагон с пассажирами

$$Q_{ш}^{ст} = \frac{Q_v - nq_{кп}}{2n} = \frac{660 - 4 \cdot 13,768}{8} = 75,606 \text{ кН};$$

$\bar{k}_{дв1}$ – среднее значение коэффициента вертикальной динамики, приближенно принимается $\bar{k}_{дв1} = 0,75 \bar{k}_{дв}$ для обрессоренных частей:

- порожний вагон

$$\bar{k}_{дв1} = 0,75 \bar{k}_{дв} = 0,75 \cdot 0,131 = 0,098,$$

- вагон с пассажирами

$$\bar{k}_{дв1} = 0,75 \bar{k}_{дв} = 0,75 \cdot 0,125 = 0,094;$$

$\bar{k}_{дбк}$ – среднее значение коэффициента вертикальной динамики, приближенно принимается $\bar{k}_{дбк} = 0,25 \bar{k}_{дв}$:

- порожний вагон

$$\overline{k_{д.бк}} = 0,25\overline{k_{д.в}} = 0,25 \cdot 0,131 = 0,033,$$

- вагон с пассажирами

$$\overline{k_{д.бк}} = 0,25\overline{k_{д.в}} = 0,25 \cdot 0,125 = 0,031;$$

H_p – среднее значение рамной силы, вычисляется при среднем значении $\overline{k_{д.г}}$,

$$H_p = P_0 \cdot \overline{k_{д.г}},$$

P_0 – осевая нагрузка

- порожний вагон

$$P_0 = \frac{Q_{в}}{n} = \frac{618}{4} = 154,5 \text{ кН}$$

$$H_p = P_0 \cdot \overline{k_{д.г}} = 154,5 \cdot 0,099 = 15,295 \text{ кН},$$

- вагон с пассажирами

$$P_0 = \frac{Q_{вп}}{n} = \frac{660}{4} = 165 \text{ кН}$$

$$H_p = P_0 \cdot \overline{k_{д.г}} = 165 \cdot 0,099 = 16,335 \text{ кН};$$

$2b$ – расстояние между серединами шеек оси ($2b = 2,036$ м); l – расстояние между точками контакта колес с рельсами ($l = 1,555$ м); a_1 – расстояние от точки контакта колеса с рельсом до середины шейки со стороны набегающего колеса ($a_1 = 0,264$ м); a_2 – расстояние от точки контакта колеса с рельсом до середины шейки со стороны сбегающего колеса ($a_2 = 0,217$ м); r – радиус колеса ($r = 0,45$ м);

- порожний вагон

$$P_{в1} = 2Q_{ш}^{ст} \left[\frac{b-a_2}{l} (1-\overline{k_{д.в1}}) - \frac{b}{l} k_{д.бк} \right] +$$

$$+ H_p \frac{r}{l} + q_{к.п} \cdot \frac{b-a_2}{l} = 2 \cdot 70,356 \times$$

$$\times \left[\frac{1,018-0,217}{1,555} \cdot (1-0,098) - \frac{1,018}{1,555} \cdot 0,033 \right] +$$

$$+ 15,295 \cdot \frac{0,45}{1,555} + 13,768 \cdot \frac{1,018-0,217}{1,555} =$$

$$= 73,873 \text{ кН},$$

$$P_{в2} = 2Q_{ш}^{ст} \left[\frac{b-a_1}{l} (1-\overline{k_{д.в1}}) + \frac{b}{l} k_{д.бк} \right] -$$

$$- H_p \frac{r}{l} + q_{к.п} \frac{b-a_1}{l} = 2 \cdot 70,35 \times$$

$$\times \left[\frac{1,018-0,264}{1,555} \cdot (1-0,098) + \frac{1,018}{1,555} \cdot 0,033 \right] -$$

$$- 15,295 \cdot \frac{0,45}{1,555} + 13,768 \cdot \frac{1,018-0,264}{1,555} =$$

$$= 66,802 \text{ кН},$$

$$P_0 = H_p + \mu P_{в2} =$$

$$= 15,295 + 0,25 \cdot 66,802 = 31,996 \text{ кН},$$

- вагон с пассажирами

$$P_{в1} = 2Q_{ш}^{ст} \left[\frac{b-a_2}{l} (1-\overline{k_{д.в1}}) - \frac{b}{l} k_{д.бк} \right] +$$

$$+ H_p \frac{r}{l} + q_{к.п} \frac{b-a_2}{l} = 2 \cdot 75,606 \times$$

$$\times \left[\frac{1,018-0,217}{1,555} \cdot (1-0,094) - \frac{1,018}{1,555} \cdot 0,031 \right] +$$

$$+ 16,335 \cdot \frac{0,45}{1,555} + 13,768 \cdot \frac{1,018-0,217}{1,555} =$$

$$= 79,325 \text{ кН},$$

$$P_{в2} = 2Q_{ш}^{ст} \left[\frac{b-a_1}{l} (1-\overline{k_{д.в1}}) + \frac{b}{l} k_{д.бк} \right] -$$

$$- H_p \frac{r}{l} + q_{к.п} \frac{b-a_1}{l} = 2 \cdot 75,606 \times$$

$$\times \left[\frac{1,018-0,264}{1,555} \cdot (1-0,094) + \frac{1,018}{1,555} \cdot 0,031 \right] -$$

$$- 16,335 \cdot \frac{0,45}{1,555} + 13,768 \cdot \frac{1,018-0,264}{1,555} =$$

$$= 71,499 \text{ кН},$$

$$P_0 = H_p + \mu P_{в2} =$$

$$= 16,335 + 0,25 \cdot 71,499 = 34,21 \text{ кН}.$$

Допустимый коэффициент устойчивости колеса против схода с рельсов для пассажирских вагонов $[K_{y.c}] = 2$.

Коэффициент устойчивости колеса против схода с рельсов:

- порожний вагон

$$K_{y,c} = \varepsilon \cdot \frac{P_{в1}}{P_6} = 1,034 \cdot \frac{73,873}{31,996} = 2,388 > [K_{y,c}] = 2,$$

условие выполняется;

- вагон с пассажирами

$$K_{y,c} = \varepsilon \cdot \frac{P_{в1}}{P_6} = 1,034 \cdot \frac{79,325}{34,210} = 2,398 > [K_{y,c}] = 2,$$

условие выполняется.

Выводы

Коэффициент вертикальной динамики:

- вагон с пассажирами

$$k_{д.в} = 0,264,$$

оценка хода вагона – допустимый [0,35];

- вагон порожний

$$k_{д.в} = 0,277,$$

оценка хода вагона – допустимый [0,35].

Коэффициент горизонтальной динамики:

$$k_{д.г} = 0,21,$$

оценка хода вагона – допустимый [0,25].

Условие по запасу устойчивости вагона выполнено.

Коэффициент запаса устойчивости вагона с пассажирами от опрокидывания

$$k_{y,o} = 1,42 > [k_{y,o}] = 1,4.$$

Коэффициент устойчивости порожнего вагона от опрокидывания

$$k_{y,o} = 1,43 > [k_{y,o}] = 1,4.$$

Условие по запасу устойчивости колеса против схода с рельсов выполнено.

Устойчивость колеса против схода с рельсов вагона с пассажирами

$$K_{y,o} = 2,398 > [K_{y,o}] = 2.$$

Устойчивость колеса против схода с рельсов порожнего вагона

$$K_{y,o} = 2,388 > [K_{y,o}] = 2.$$

Таким образом, все нормируемые динамические показатели пассажирского вагона модели 61-779 не превышают допускаемые величины, а показатели устойчивости имеют достаточный запас, что свидетельствует о хороших качествах хода вагона. Проведенные в дальнейшем динамические ходовые испытания полностью подтверждают выполненные расчеты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных): ВНИИВ-ВНИИЖТ. – 1983.

Поступила в редколлегию 07.02.2005.