

## СТАТИЧЕСКОЕ ВПИСЫВАНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЛЕСОВОЗНЫХ УЖД В КРИВЫЕ

При статическом вписывании подвижного состава в кривые в основном рассматривается вопрос определения сил взаимодействия пути и подвижного состава во время движения экипажа с различной скоростью. Основными силами, которые определяются при этом, являются: направляющее усилие  $Y_1$ , рамное усилие  $Y_p$  и боковое давление  $Y'$ .

Обычно для определения направляющих усилий применяется метод, разработанный на основе теорий проф. Цеглинского [1]. В указанном методе имеется ряд допущений. Основными из них являются.

1. Все строение экипажа располагается в одной горизонтальной плоскости, проходящей через головку рельса. Благодаря этому не учитывается, во-первых, изменение нагрузок на колеса, имеющее место при езде в кривой, и, во-вторых, фактическое направление сил в точках контакта.

2. Бандажи предполагаются цилиндрическими.

3. Не принимается во внимание предварение точки набегания колеса на рельс, т. е. считается, что точка контакта колеса с рельсом находится на вертикали, проходящей через центр колеса.

4. Коэффициент трения между колесом и рельсом принимается постоянным.

5. Рельс считается абсолютно жестким, уложенным без отступлений от окружности.

6. Нагрузки от всех колес предполагаются одинаковыми.

7. Перегрузки и разгрузки колес от колебаний рессорного подвешивания, от наклона строений экипажа и неровностей пути не учитываются.

8. Принимается, что центробежная сила приложена перпендикулярно оси тележки и посередине базы экипажа.

9. Не учитывается поперечная составляющая усилий, передающихся через упряжные приборы.

10. Не учитываются продольные уклоны пути.

11. Весь расчет ведется в предположении о равенстве линейной скорости  $\omega r$  на поверхности бандажа в относительном вращательном движении колеса вокруг собственной оси и скорости  $\Omega R$  переносного кругового поступательного движения экипажа.

12. Поворот экипажа происходит вокруг точки, называемой центром поворота (полюсом).

13. Центр поворота (полюс) располагается на продольной оси экипажа и геометрически определяется как точка пересечения перпендикуляра, опущенного из центра кривой на про-

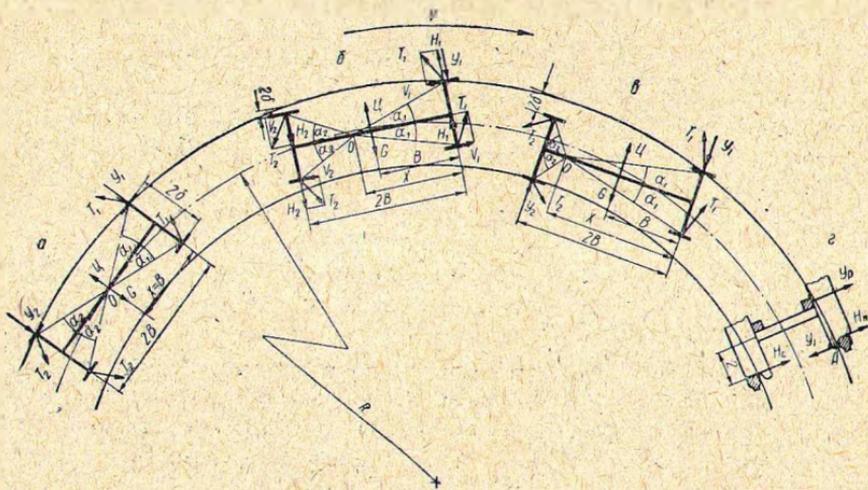


Рис. 1

дольную ось экипажа (или ее продолжение). Положение центра поворота обуславливается действием сил, приложенных к экипажу.

Так как подвижной состав узкоколейных лесовозных железных дорог опирается на ряд двухосных тележек, то за основу вписывания в кривые принимаем вписывание двухосной тележки.

Двухосная тележка при своем движении по кривой радиусом  $R$  может занимать в зависимости от скорости движения  $v$  следующие три положения (см. рис. 1, а, б, в): хордальное (рис. 1, а) — когда тележка обеими осями прижата к наружному рельсу (такое положение возможно при высоких скоростях); промежуточное (рис. 1, б) — первая ось тележки по ходу прижата к наружному рельсу, а вторая ось находится в зазоре (такое положение возможно при средних скоростях

движения); перекосное (рис. 1, в) — первая ось тележки по ходу прижата к наружному рельсу, а задняя ось прижата к внутреннему рельсу (такое положение возможно при очень малых скоростях, близких к нулю).

При всех положениях тележки предполагается, что к ней приложены силы трения  $T$ , возникающие в точках контакта колес и рельс при повороте, центробежная сила  $C$  и составляющая веса экипажа от возвышения наружного рельса  $G$ .

Силы трения  $T$  направлены перпендикулярно лучам, соединяющим точку приложения силы (точка касания реборды колеса с рельсом) с центром поворота (полюсом) тележки  $O$ , и направлены в сторону, противоположную движению.

Экипаж, набегающий какими-либо осями на рельс, вызывает в точке контакта гребня и рельса  $A$  их реакции, которые и называются направляющими усилиями  $Y_1$  (см. рис. 1, г).

При определении этих реакций учитываются и собственные силы трения колес набегающей оси. Набегающая колесная пара находится под действием сил трения обоих колес, вызванных наличием вертикальной нагрузки и скольжением при повороте, сил  $Y_p$ , передающихся на колесную пару рамой экипажа, которые мы назовем рамными усилиями (рис. 1, г), и реакции, приложенной к гребню.

Рассмотрим для каждого положения тележки систему сил, действующих на нее. Сначала остановимся на рассмотрении промежуточного положения, как наиболее общего случая, затем — на остальных.

### Промежуточное положение

На рис. 1, б показана схема приложения всех сил, действующих на тележку при промежуточном ее положении в кривой. Принятые на рис. 1, б обозначения:

$T$  — сила трения колеса о рельс (для всех колес одинакова при одинаковой нагрузке);

$H_1$  — поперечная составляющая силы трения на передних колесах;

$H_2$  — поперечная составляющая силы трения на вторых колесах;

$V_1$  — продольная составляющая силы трения на первых колесах;

$V_2$  — продольная составляющая силы трения на вторых колесах;

$Y_1$  — направляющее усилие на первом по ходу направляющем колесе;

$Y_2$  — направляющее усилие на втором по ходу направляющем колесе;

$X$  — расстояние до центра поворота  $O$  от первой по ходу направляющей оси;

$\zeta$  — центробежная сила;

$G$  — составляющая веса экипажа от возвышения наружного рельса;

$2B$  — база тележки;

$2S$  — ширина колесной колеи.

Как указывалось выше, положение тележки в кривой при ее движении зависит от скорости движения  $v$ , а положение центра поворота  $O$ , в свою очередь, зависит от положения тележки.

Величина направляющего усилия  $Y_1$  также зависит от положения тележки в кривой.

Тележка при движении под действием всех сил находится в равновесии, поэтому для нахождения направляющего усилия достаточно составить два уравнения равновесия.

1. Уравнение проекций сил на ось, перпендикулярную к продольной оси тележки

$$\zeta - G + 2T(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) - Y_1 = 0. \quad (1)$$

2. Уравнение моментов относительно какой-либо из точек (мы будем брать относительно точки  $O$ ), лежащей на продольной оси экипажа,

$$2T\left(\frac{X}{\cos \alpha_1} + \frac{2B - X}{\cos \alpha_2}\right) + (\zeta - G)(X - B) - Y_1 X = 0. \quad (2)$$

Входящие в уравнения (1) и (2) величины определяются по следующим формулам:

$$T = f\Pi_{\text{ст}}, \quad (3)$$

где  $f$  — коэффициент трения, который принимается равным 0,25;

$\Pi_{\text{ст}}$  — нагрузка на колею.

$$\zeta = \frac{4\Pi_{\text{ст}}}{g} \cdot \frac{v^2}{R}, \quad (4)$$

где  $v$  — скорость движения тележки;

$R$  — радиус кривой;

$g$  — ускорение свободно падающего тела.

$$G = 4\Pi_{\text{ст}} \frac{h}{2S}, \quad (5)$$

где  $h$  — возвышение наружного рельса.

$$\cos \alpha_1 = \frac{X}{\sqrt{X^2 + S^2}}; \quad (6)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{2B - X}{\sqrt{(2B - X)^2 + S^2}}; \quad (7)$$

$$X = \frac{R + 2\delta_1}{2B} + \frac{2B}{2} \quad \text{или} \quad X = \frac{R\delta_1}{B} + B, \quad (8)$$

где  $2\delta_1$  — величина отклонения задней по ходу оси тележки от наружного рельса, характеризующая положение тележки в кривой.

При  $2\delta_1 = 0$  тележка занимает хордальное положение и центр поворота  $O$  находится посередине тележки  $X = B$ , что видно из формулы (8).

При  $2\delta_1 = 2\delta$  тележка занимает перекосное положение.

В уравнениях (1) и (2) неизвестными являются полюсное расстояние  $X$ , или координата центра поворота (полюса)  $O$ , скорость движения  $v$  и направляющее усилие  $Y_1$ .

Следовательно, чтобы решить систему двух уравнений с тремя неизвестными, необходимо задаваться значениями одной из неизвестных величин для отыскания двух других. Так как нас в конечном счете интересует величина направляющего усилия при определенной скорости движения (расчетной) и в меньшей мере интересует положение тележки в кривой (за исключением случая проверки на всползание колеса на рельс), то желательно было бы задаваться величиной скорости  $v$ , а по ней находить  $Y_1$  и  $X$ . При заданном значении  $v$  решение системы уравнений (1) и (2) очень трудоемко и в практике расчетов задаются не величиной  $v$ , а различными значениями  $X$  и по ним определяют  $v$  и  $Y_1$ . Подставим в уравнения (1) и (2) входящие в них величины по формулам (3), (4), (5), (6), (7) и решим их сначала относительно  $v$ , а затем  $Y_1$ .

$$v = \sqrt{\frac{gR \cdot f}{2B} \left[ \sqrt{X^2 + S^2} + \sqrt{(2B - X)^2 + S^2} - \frac{X^2}{\sqrt{X^2 + S^2}} + \frac{(2B - X)X}{\sqrt{(2B - X)^2 + S^2}} \right] + \frac{gRh}{2S}}; \quad (9)$$

$$Y_1 = 2f\Pi_{\text{ст}} \left( \frac{X}{\sqrt{X^2 + S^2}} - \frac{2B - X}{\sqrt{(2B - X)^2 + S^2}} \right) + \left( \frac{4\Pi_{\text{ст}}v^2}{gR} - \frac{4\Pi_{\text{ст}}h}{2S} \right). \quad (10)$$

Полученное по формуле (9) значение  $v$  подставляем в уравнение (10) и находим значение  $Y_1$ .

Выражение  $2f\Pi_{\text{ст}} \frac{X}{\sqrt{X^2 + S^2}}$  — поперечная составляющая сил трения первой оси  $2H_1$ .

Выражение же  $2f\Pi_{\text{ст}} \frac{2B - X}{\sqrt{(2B - X)^2 + S^2}}$  — поперечная составляющая сил трения второй оси  $2H_2$ .

В результате решения уравнения (10) определяется величина направляющего усилия.

Позднее, при проектировании паровоза ФД, в расчетах динамического вписывания [2], а затем и других паровозов [3] А. В. Сломьянский обратил внимание на необоснованность применения оценки вписываемости по величине направляющего усилия. Он предложил основным видом усилий, возникающих при вписывании в кривые, считать боковые давления на рельс. Боковое давление будет мерой воздействия на боковую устойчивость рельса и оно же войдет в определение условия безопасности от всползания колеса на рельс.

Рассматривая рис. 1, 2, мы можем написать, что боковое давление  $Y'$  на направляющий рельс (на который давит реборда колеса набегающей оси) будет равно

$$Y' = Y_p + H_1^в. \quad (11)$$

В формуле (11) величина  $H_1^в$  — поперечная составляющая силы трения на другом колесе оси (не набегающем).

Если же выразить величину бокового давления через направляющее усилие  $Y_1$ , то получим

$$Y' = Y_1 - H_1^н. \quad (12)$$

Здесь  $H_1^н$  — поперечная составляющая силы трения набегающего колеса.

Таким образом, способ расчета остается по схеме Цеглинского, но определяемыми величинами становятся  $Y_p$  и  $Y'$ .

Проф. К. П. Королев в своей работе [4] предложил определять величину боковых давлений в следующем порядке. По найденной величине направляющего усилия  $Y_1$  и поперечных составляющих сил трения  $H$  из выражения  $Y_p = Y_1 - 2H$  определяются горизонтальные силы, передающиеся через раму тележки усилия  $Y_p$ , а затем и дополнительные вертикальные нагрузки на колеса.

$$\pm \Delta Y_p = \frac{Y_p \cdot r}{2S}, \quad (13)$$

где  $r$  — радиус колеса.

Определив дополнительные вертикальные нагрузки  $\Delta Y_p$ , находят полные вертикальные нагрузки на колеса

$$P = P_{ст} \pm \Delta Y_p \quad (P_n = P_{ст} + \Delta Y_p, P_b = P_{ст} - \Delta Y_p)$$

и фактические (при принятых для данного метода допущениях) поперечные составляющие сил трения для наружного рельса  $H_n$  и внутреннего  $H_b$ :

$$H_n = \frac{2H_1 P_n}{2P_{ст}} \quad (14)$$

и

$$H_b = \frac{2H_1 P_b}{2P_{ст}} \quad (15)$$

и, наконец, боковые давления

$$Y'_n = Y_p + H_b. \quad (16)$$

После этого определяется величина отношения  $Y'_n : P_n$ . Та максимальная скорость, при которой отношение  $Y'_n : P_n$  не превышает единицы, и будет максимально допустимой для данного радиуса кривой.

### Хордальное положение

Как говорилось выше, хордальное положение тележка может занять только при высоких скоростях движения. При хордальном положении расстояние  $X$  до центра поворота (полюса) от передней оси согласно формуле (8) равно  $B$ , т. е. центр поворота находится посередине базы тележки. В связи с этим поперечные составляющие сил трения обеих осей равны нулю, что видно из рис. 1, а, и уравнение моментов сил относительно точки  $O$  нам даст, что  $Y_1 = Y_2$ . Остается только одно уравнение статики — сумма проекций сил на поперечную ось. В этом случае уравнение будет иметь вид:

$$Ц - G - Y_1 - Y_2 = 0, \text{ но так как } Y_1 = Y_2,$$

$$\text{то } Y_1 = Y_2 = \frac{Ц - G}{2} = 2P_{ст} \left( \frac{v^2}{gR} - \frac{h}{2S} \right). \quad (17)$$

Величины же  $2H_1$  и  $2H_2$  определим по формуле

$$2H_1 = 2H_2 = \frac{2P_{ст} f \cdot B}{\sqrt{B^2 + S^2}}. \quad (18)$$

Для определения значений  $Y_1$ ,  $Y_p$  и  $Y'_n$  мы должны задаваться скоростями выше минимальной скорости, при

которой тележка занимает хордальное положение, до требуемой нами скорости. Для достижения тележкой хордального положения требуются очень высокие скорости, которые не приняты на лесовозном узкоколейном транспорте.

### Перекусное положение тележки

Перекусное положение тележка занимает в кривой при малых скоростях. Схема сил, действующих на тележку в перекусном положении, показана на рис. 1, в.

Для определения направляющих усилий  $Y_1$  и  $Y_2$  составим два уравнения суммы моментов: одно — относительно точки приложения силы  $Y_1$ , а второе — силы  $Y_2$ .

$$Y_1 = 2f\Pi_{\text{ст}} \frac{X}{\sqrt{X^2 + S^2}} + \frac{f\Pi_{\text{ст}}S}{B} \left( \frac{S}{\sqrt{X^2 + S^2}} + \frac{S}{\sqrt{(2B-X)^2 + S^2}} \right) - 2\Pi_{\text{ст}} \left( \frac{v^2}{gR} - \frac{h}{2S} \right); \quad (19)$$

$$Y_2 = 2f\Pi_{\text{ст}} \frac{2B-X}{\sqrt{(2B-X)^2 + S^2}} + \frac{f\Pi_{\text{ст}}S}{B} \left( \frac{S}{\sqrt{X^2 + S^2}} + \frac{S}{\sqrt{(2B-X)^2 + S^2}} \right) - 2\Pi_{\text{ст}} \left( \frac{v^2}{gR} - \frac{h}{2S} \right), \quad (20)$$

где

$$\frac{S}{\sqrt{X^2 + S^2}} = \sin \alpha_1, \quad (21)$$

а

$$\frac{S}{\sqrt{(2B-X)^2 + S^2}} = \sin \alpha_2. \quad (22)$$

При этом для определения направляющих усилий мы задаемся различными значениями скорости, при которой наступает перекусное положение, до скорости  $v = 0$ .

Для облегчения подсчетов величины

$$\left( \frac{4\Pi_{\text{ст}}v^2}{gR} - \frac{4\Pi_{\text{ст}}h}{2S} \right) = \Pi - G$$

можно воспользоваться графиком (рис. 2). Расчет по графику производится в следующем порядке. От величины веса состава ( $4\Pi_{\text{ст}}$ ) восставляем перпендикуляр до линии требуемого радиуса ( $R$ ), далее по горизонтали ведем линию до линии требуемой скорости ( $v$ ), после чего опускаем вертикаль на горизонтальную линию ( $\Pi$ ). После этого возвращаемся опять в точку веса состава, опускаем вертикаль до линии требуемого возвышения рельса ( $h$ ) и далее ведем

горизонтально линию до вертикальной оси ( $G$ ), от оси же  $G$  под углом  $45^\circ$  ведем линию до линии  $\zeta$ . Разность между первой точкой и второй даст требуемую разность  $\zeta - G$ .

Общий порядок определения направляющих и других усилий заключается в следующем. Сначала ведем расчет сил

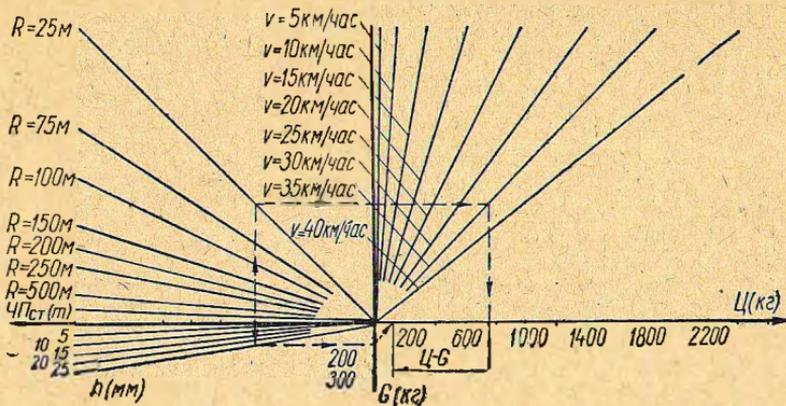


Рис. 2

по формулам (9) и (10) (как для промежуточного положения), задаваясь значением  $2\delta_1$  от нуля до  $2\delta_1 = 2\delta$ . После того как мы установили, что при  $2\delta_1 = 0$ , т. е. в хордальном положении, скорость  $v$  достигает небольшой величины, продолжем вести расчет уже по формулам (17) и (18), задаваясь значением скорости  $v$  от скорости, полученной при  $2\delta_1 = 0$ , до требуемой нами величины.

Если мы установили, что при  $2\delta_1 = 2\delta$ , т. е. в перекошенном положении тележки, скорость  $v$  остается еще значительно великой, дальнейший расчет ведем уже только по формулам (19) и (20), задаваясь скоростью  $v$  от скорости, полученной при  $2\delta_1 = 2\delta$ , до нуля.

Так как определение величин  $2N_1, 2N_2, Y_1, Y_p$  и  $Y_n$  очень трудоемко, то с целью облегчения расчетов нами составлены таблицы и графики вышеуказанных величин для тележек с базой  $2B$ , равной 1020, 1150, 1200, 1300, 1400 и 1500 мм при вписывании их в кривые радиусом  $R$ , равным 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 и 200 м при возвышении наружного рельса  $h$ , равном 0, 5, 10, 15, 20 и 25 мм.

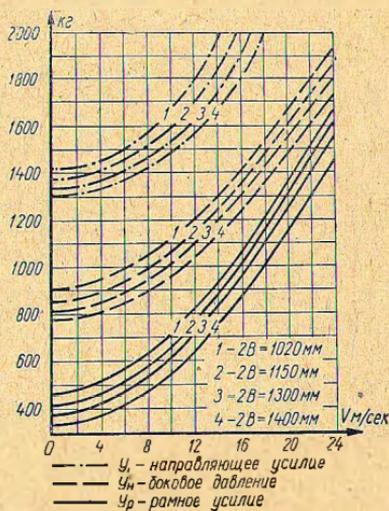


Рис. 3

и графики вышеуказанных величин для тележек с базой  $2B$ , равной 1020, 1150, 1200, 1300, 1400 и 1500 мм при вписывании их в кривые радиусом  $R$ , равным 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 и 200 м при возвышении наружного рельса  $h$ , равном 0, 5, 10, 15, 20 и 25 мм.

$R = 200 \text{ м}$ 

$2\delta_1$ , мм	$X$ , м	$v$ , м/сек при $h$ , мм			$2H_1$ , кг	$2H_2$ , кг	$Y_1$ , кг	$Y_D$ , кг	$Y'_H$ , кг
		0	10	20					

 $2B=1020 \text{ мм}$ 

0,00	0,5100	24,90	25,39	25,87	790	790	2530	1739	2026
2,00	0,9022	19,95	20,56	21,16	902	286	2255	1340	1700
3,10	1,1178	11,38	12,43	13,39	943	240	1712	769	1183
3,30	1,1570	8,94	10,24	11,38	946	328	1600	654	1078
3,50	1,1963	5,75	7,61	9,09	950	408	1492	543	977
3,61	1,2178	2,96	5,79	7,64	951	448	1435	484	923
3,63	1,2218	2,11	5,41	7,35	952	455	1425	473	913
3,65	1,2257	0,44	5,00	7,06	952	462	1415	463	904

 $2B=1150 \text{ мм}$ 

0,00	0,5750	24,38	24,88	25,38	824	824	2426	1602	1910
2,00	0,9228	21,36	21,94	22,50	919	498	2284	1364	1725
4,00	1,2706	8,23	9,62	10,84	955	292	1524	569	1003
4,20	1,3054	5,09	7,12	8,69	957	366	1429	472	915
4,31	1,3246	1,99	5,36	7,32	958	404	1379	420	868
4,33	1,3280	0,25	4,99	7,05	959	411	1370	411	859

 $2B=1300 \text{ мм}$ 

0,00	0,6500	23,95	24,46	24,96	855	855	2340	1486	1813
2,00	0,9577	22,14	22,69	23,23	924	655	2270	1346	1710
4,00	1,2654	15,34	16,13	16,88	955	87	1828	874	1285
5,10	1,4346	4,73	6,87	8,48	964	322	1378	414	864
5,22	1,4531	0,90	5,06	7,10	965	361	1330	365	819

 $2B=1400 \text{ мм}$ 

0,00	0,7000	23,72	24,24	24,74	871	871	2296	1425	1763
2,00	0,9857	22,39	22,94	23,48	928	724	2251	1323	1690
4,00	1,2714	18,00	18,68	19,33	955	310	1968	1013	1414
5,10	1,4286	11,81	12,81	13,75	964	72	1605	641	1074
5,30	1,4571	10,14	11,30	12,34	965	143	1528	563	1003
5,50	1,4857	8,17	9,57	10,79	966	212	1451	484	930
5,70	1,5143	5,61	7,50	9,01	968	278	1374	407	859
5,81	1,5300	3,56	6,12	7,89	968	313	1333	364	821
5,83	1,5329	3,05	5,84	7,68	968	319	1325	357	814
5,85	1,5357	2,44	5,55	7,46	969	325	1318	349	807
5,87	1,5386	1,62	5,23	7,23	970	331	1310	342	800
5,90	1,5429		4,74	6,88	969	340	1300	330	790



$Ц_x$  — центробежная сила от веса пачки хлыстов (для сцепов ЭМ-60 — от веса пачки хлыстов и веса хребтовой балки);

$Ц_p$  — центробежная сила от веса платформы;

$Ц_T$  — центробежная сила от веса тележки;

$2L$  — база сцепа — расстояние между кониками;

$2T$  — база полусцепа (платформы) — расстояние между шкворнями тележки.

Сила  $Ц_x$  приложена перпендикулярно оси пачки хлыстов;  $Ц_p$  — оси полусцепа (платформы);  $Ц_T$  — оси тележки. Перенесем силы  $Ц_x$  и  $Ц_p$  в центр тележки. На каждую тележку придется по  $0,25 Ц_x$  и  $0,5 Ц_p$ , которые будут направлены к оси тележки под соответствующими углами.

Вес, приходящийся на одну ось, определим по формуле

$$2P_{ст} = \frac{P_x}{8} + \frac{P_p}{4} + \frac{P_T}{2}, \quad (23)$$

где  $P_x$  — вес пачки хлыстов (или пачки хлыстов и хребтовой балки);

$P_p$  — вес платформы (или полусцепа);

$P_T$  — вес тележки.

Далее обозначим отношения:

$$\frac{P_x}{8} : 2P_{ст} = \xi_1; \quad \frac{P_p}{4} : 2P_{ст} = \xi_2; \quad \frac{P_T}{2} : 2P_{ст} = \xi_3.$$

Тогда получим  $2P_{ст}$  в новом выражении

$$2P_{ст} = \xi_1 2P_{ст} + \xi_2 2P_{ст} + \xi_3 2P_{ст} \quad (24)$$

или

$$2P_{ст} = 2P_{ст} (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3). \quad (25)$$

Определим значение углов  $\alpha'$ ,  $\theta'$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma'$  и  $\gamma'_1$  (рис. 4).

Пользуясь теоремой косинусов для определения углов косоугольного треугольника по трем его известным сторонам, мы определим значение угла  $\Psi'_1$ .

Исходя из изложенного, будем иметь (см. рис. 4)

$$\psi'_1 = \arccos \left( \frac{4B^2 + R^2 - R^2 + 4R\delta_1 - 4\delta_1^2}{4BR} \right)$$

или

$$\psi'_1 = \arccos \left( \frac{B^2 + R\delta_1 - \delta_1^2}{BR} \right). \quad (26)$$

По найденному значению угла  $\Psi'_1$ , используя ту же теорему косинусов, найдем расстояние  $F$  от центра кривой  $O$  до центра тележки (шкворня)  $D$

$$F = \sqrt{B^2 + R^2 - 2BR \cos \psi'_1}$$

или, подставив значение косинуса угла  $\psi'_1$ , будем иметь

$$F = \sqrt{B^2 + R^2 - 2BR \frac{B^2 + R\delta_1 - \delta_1^2}{RB}}$$

или

$$F = \sqrt{R^2 - B^2 - 2R\delta_1 + 2\delta_1^2}. \quad (27)$$

Найдем угол поворота тележки относительно платформы

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{T}{F}\right).$$

Подставив значение  $F$ , будем иметь

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{T}{\sqrt{R^2 - B^2 - 2R\delta_1 + 2\delta_1^2}}\right). \quad (28)$$

Расстояние  $H$  от центра кривой  $O$  до центра поворота платформы определим из прямоугольного треугольника  $OCD$ .

$$H = \sqrt{F^2 - T^2} \quad \text{или} \quad H = \sqrt{R^2 - B^2 - T^2 - 2R\delta_1 + 2\delta_1^2}. \quad (29)$$

Найдем угол поворота платформы относительно оси пачки хлыстов  $\beta'$ :

$$\beta' = \arcsin\left(\frac{L}{H}\right)$$

или

$$\beta' = \arcsin\left(\frac{L}{\sqrt{R^2 - B^2 - T^2 - 2R\delta_1 + 2\delta_1^2}}\right). \quad (30)$$

Угол  $\gamma'$  определим по формуле

$$\gamma' = \arcsin\left(\frac{2\delta_1}{2B}\right) \quad \text{или} \quad \gamma' = \arcsin\left(\frac{\delta_1}{B}\right), \quad (31)$$

где  $2\delta_1$  — отклонение второй оси от наружного рельса.

Угол  $\gamma'_1$  определим по формуле

$$\gamma'_1 = 90 - \psi'_1. \quad (32)$$

Определим величины  $\Pi_x$ ,  $\Pi_n$  и  $\Pi_T$ , приходящиеся на ось:

$$\Pi_x = \frac{4\Pi_{ст}\xi_1 v^2}{gR}, \quad (33)$$

$$\Pi_n = \frac{4\Pi_{ст}\xi_2 v^2}{gR}, \quad (34)$$

$$\Pi_T = \frac{4\Pi_{ст}\xi_3 v^2}{gR}. \quad (35)$$

Спроектировав полученные силы на ось, перпендикулярную оси тележки, получим для первой тележки:

$$L_x \cos(\beta' + \theta' - \gamma') + L_n \cos(\theta' - \gamma') + L_r = L' \quad (36)$$

В это уравнение подставим значения величин, выраженных формулами (33—35)

$$\frac{4\Pi_{ст}\xi_1 v^2}{gR} \cos(\beta' + \theta' - \gamma') + \frac{4\Pi_{ст}\xi_2 v^2}{gR} \cos(\theta' - \gamma') + \frac{4\Pi_{ст}\xi_3 v^2}{gR} = L'$$

или

$$\frac{4\Pi_{ст}v^2}{gR} [\xi_1 \cos(\beta' + \theta' - \gamma') + \xi_2 \cos(\theta' - \gamma') + \xi_3] = L' \quad (37)$$

Выражение в квадратных скобках обозначим через коэффициент  $n_1$

$$n_1 = \xi_1 \cos(\beta' + \theta' - \gamma') + \xi_2 \cos(\theta' - \gamma') + \xi_3 \quad (38)$$

Соответственно для тележек 2, 3 и 4 коэффициенты будут равны:

$$n_2 = \xi_1 \cos(\beta' - \theta' + \gamma') + \xi_2 \cos(\theta' + \gamma') + \xi_3; \quad (39)$$

$$n_3 = \xi_1 \cos(\beta' - \theta' - \gamma') + \xi_2 \cos(\theta' - \gamma') + \xi_3; \quad (40)$$

$$n_4 = \xi_1 \cos(\beta' + \theta' + \gamma') + \xi_2 \cos(\theta' + \gamma') + \xi_3 \quad (41)$$

Нумерация тележек производится по ходу движения. В табл. 2 приведены значения коэффициента  $\xi$ .

Т а б л и ц а 2

Коэффициент	ЭМ-60 2B=1300	ЭМ-51		„Лесосудмашстрой“	
		2B=1300	2B=1150	торм. 2B=1020	неторм. 2B=1020
$\xi_1$	0,735	0,640	0,740	0,656	0,715
$\xi_2$	0,125	0,218	0,123	0,197	0,142
$\xi_3$	0,140	0,142	0,137	0,147	0,143

Если в составленные уравнения (1) и (2) введем вместо  $L$  значение  $L n_i$ , то вместо формулы (9) получим новую формулу для определения  $v_i$

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{n_i}} \sqrt{\frac{gRf}{2B} \left[ \sqrt{X^2 + S^2} + \sqrt{(2B - X)^2 + S^2} \right] + \frac{gRh}{2S}} \quad (42)$$

Формула же (10) для определения направляющего усилия  $Y_1$  остается в силе, так как после подстановки значения  $v_i^2$  коэффициент  $n_i$  сократится. На основании этого можно легко пересчитать с таблиц, составленных без учета действительного направления центробежной силы, все необходимые усилия с учетом действительного направления и величины центробежной силы.

На основании формул (9) и (42) можно записать

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{n_i}} v \quad (43)$$

или

$$v = \sqrt{n_i} v_i. \quad (44)$$

Если нужно определить усилия при заданной скорости  $v_i$ , то следует по формуле (44) определить величину  $v$  и по полученному значению  $v$  взять значения сил, которые и будут соответствовать скорости  $v_i$ .

Приведенный метод расчета хотя и несколько усложняет работу, но зато значительно приближает расчетную схему к действительной. Использование же графиков и таблиц значительно упростит расчет по предлагаемому методу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. Ю. Цеглинский. Железнодорожный путь в кривых. М., 1903.
2. А. В. Сломьянский и др. Паровоз «Феликс Дзержинский». (Расчеты, конструкция, постройка). 1934.
3. А. В. Сломьянский. Вписывание в кривые паровоза серии И. С. «Транспортное машиностроение», № 11, 1938.
4. К. П. Королев. Вписывание паровозов в кривые участки пути. Труды ВНИИЖД. Вып. 37. Трансжелдориздат, 1950.