

П. М. Калашиков

РАДИУС ЗАКЛИНИВАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА УЖД

Определение радиуса заклинивания является одним из вопросов вписывания экипажей в кривые. Этот вопрос относится к так называемому геометрическому вписыванию. Определяя радиус заклинивания для экипажей, обращающихся на лесовозных железных дорогах, можно установить наименьший радиус кривой, по которой возможно пропустить состав. Наименьший геометрический радиус может быть применен на временных путях (усах) в стесненных условиях, а также на станциях. Радиус заклинивания определяется только по геометрическим размерам подвижного состава и совершенно при этом не учитывается воздействие его на путь.

При пропуске подвижного состава по кривым с радиусом, равным заклинивающему, возникают большие боковые давления, что вызывает перенапряжение в рельсах и их большое отжатие. Поэтому пропуск экипажей по кривым, равным радиусу заклинивания, возможен, но при малых скоростях и в единичных случаях. Если же учесть, что путь в кривых уложен с отступлениями от идеальной кривой, то наименьший геометрический радиус, определенный по условиям заклинивания, должен быть увеличен.

При геометрическом вписывании, кроме определения радиуса заклинивания, проверяется еще соответствие всех размеров подвижного состава друг другу. При заданном же минимальном радиусе кривой можно по формулам, по которым определяется радиус заклинивания, определить оптимальные размеры подвижного состава. Как указывалось выше, радиус заклинивания определяется только в зависимости от геометрических размеров подвижного состава, влияющих на установку его в кривой. На установку экипажа в кривой в заклиненном положении влияют почти все размеры подвижного состава вдоль его оси и поперек. Так, на геометрическое вписывание влияют следующие элементы подвижного состава:

а) база сцепа — расстояние между кониками или шкворнями отдельных платформ — $2L$;

б) база платформы — расстояние между шкворнями тележек — $2T$;

в) база тележек — расстояние между осями тележек — $2B$;

г) расстояние от шкворня тележки до точки поворота упряжного прибора или коромысла — a ;

д) длина цепей упряжных приборов — $2c$;

е) подвижность коника — $2l$;

ж) колея зазоров — 2δ .

Последний фактор — колея зазоров — зависит как от размеров подвижного состава, так и пути в кривой, в частности от величины уширения. Все эти размеры могут быть или непосредственно замерены на существующем подвижном составе или взяты из чертежей.

Кроме указанных размеров, на вписывание влияют различные углы. К ним относятся следующие углы:

а) угол поворота тележки относительно оси платформы — φ ;

б) угол поворота упряжного прибора относительно продольной оси платформы — α ;

в) угол поворота цепей упряжного прибора относительно продольной оси упряжного прибора — β ;

г) угол поворота коника или главной балки относительно оси платформы — Ψ ;

д) угол перекоса тележки в кривой — γ ;

е) угол перекоса платформы или сцепа в кривой — γ' .

Два последних угла зависят как от размеров подвижного состава, так и колеи зазоров и кривой.

Рассмотрим определение радиуса заклинивания для различных типов подвижного состава, как для одиночных, так и сцепленных, в зависимости от различных ограничивающих факторов.

1. Определение R_{\min} для одиночного четырехосного состава

Для четырехосного состава возможны три случая:

а) тележка может поворачиваться относительно оси поковки на любой угол;

б) ограничивающим фактором является угол φ ;

в) ограничивающими факторами являются угол φ и ширина колеи зазоров 2δ .

Рассмотрим все эти случаи.

Поворот тележки ничем не ограничен. В этом случае заклиненное состояние наступает, когда все четыре оси опираются на наружный рельс. Для этого случая

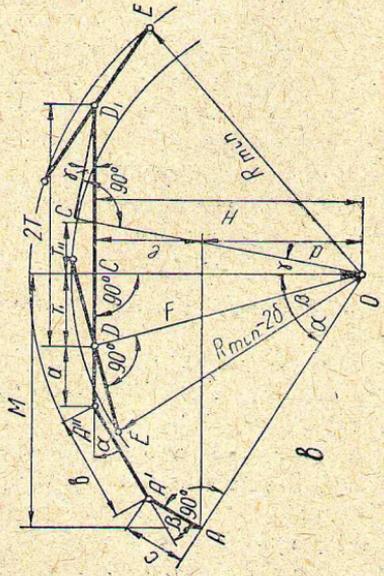
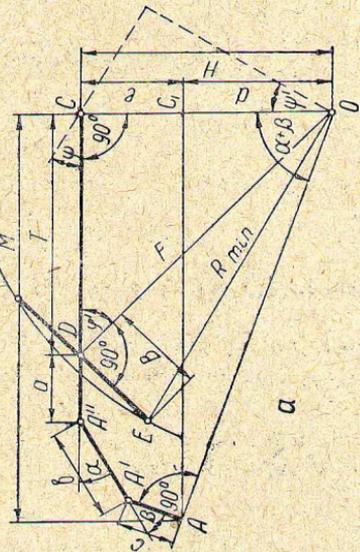
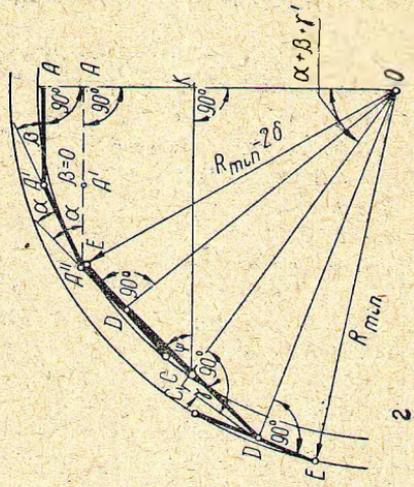
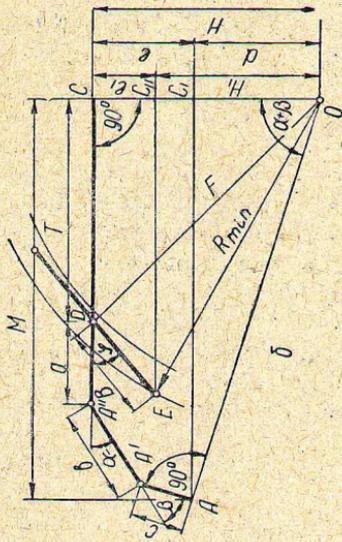


Рис I

R_{\min} определяется очень просто (см. рис. 1, а). Из треугольника CDE видим, что R_{\min} является гипотенузой прямоугольного треугольника, а отсюда следует, что

$$R_{\min} = \sqrt{T^2 + B^2}. \quad (1)$$

Ограничивающим фактором является угол φ . В этом случае экипаж находится в заклиненном состоянии тогда, когда он опирается крайними осями на наружный рельс; при этом внутренние оси находятся в зазоре, т. е. не опираются ни на наружный, ни на внутренний рельсы. Угол φ является ограничивающим фактором в том случае, когда он по величине меньше 90° , но больше $90^\circ - \gamma$. При $\varphi \geq 90^\circ$ угол φ не является ограничивающим фактором. Если же $\varphi < 90^\circ - \gamma$, то ограничивающим фактором становится также и ширина колеи зазоров 2δ (случай в). Определим R_{\min} по теореме косинусов из треугольника CDE' (см. рис. 1, а — построения пунктиром).

$$R_{\min}^2 = T^2 + B^2 - 2TB \cos(180^\circ - \varphi)$$

или

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + T^2 + 2BT \cos \varphi}. \quad (2)$$

При $\varphi = 90^\circ$ $\cos \varphi = 0$ и формула (2) превращается в формулу (1).

Ограничивающими факторами являются угол поворота φ и 2δ . Заклиненное состояние наступает тогда, когда крайние оси экипажа опираются на наружный рельс, а внутренние — на внутренний рельс. Так как угол $\gamma = 5' \div 10'$, а угол φ в основном меньше, чем $90^\circ - \gamma$, то рассматриваемый случай является основным из трех рассматриваемых случаев.

Из треугольника ODE (см. рис. 1, б) по теореме косинусов определим значение величины R_{\min}

$$R_{\min}^2 = F^2 + B^2 - 2FB \cos(90^\circ + \gamma),$$

но так как $\cos(90^\circ + \gamma) = -\sin \gamma$, то $R_{\min}^2 = F^2 + B^2 + 2FB \sin \gamma$.

В свою очередь, из треугольника OCD найдем значение величины F .

$$F = \frac{T}{\sin(\varphi + \gamma)}. \quad (3)$$

Подставим найденное значение F в предыдущую формулу и найдем окончательное значение R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + \frac{T^2}{\sin^2(\varphi + \gamma)} + 2BT \frac{\sin \gamma}{\sin(\varphi + \gamma)}}. \quad (4)$$

Третьим членом подкоренного выражения можно пренебречь, как очень малой величиной, что составит ошибку меньше 0,25%, и тогда получим более простое выражение R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + \frac{T^2}{\sin^2(\varphi + \gamma)}} \quad (5)$$

Проф. К. П. Королев [1] предлагает R_{\min} для четырехосного одиночного экипажа определять по формуле

$$R_{\min} = \frac{T}{\sin(\varphi + \gamma)}$$

(обозначения приведены соответственно принятым в настоящей работе). Эта формула аналогична формуле (3) настоящей работы, так как им R_{\min} принят приближенно равным F , что также не вызывает большой ошибки.

II. Определение R_{\min} для четырехосных сцепленных экипажей

Для сцепленных четырехосных экипажей заклиненное состояние наступает тогда, когда экипажи в основном опираются крайними тележками на крайний рельс, а внутренними тележками — на внутренний рельс, т. е. состав находится в перекосном состоянии. Для составов, имеющих в сцепке большое количество четырехосных экипажей, заклиненное состояние наступает в положении, близком к хордальному, т. е. в этом случае все тележки опираются на наружный рельс.

Рассмотрим определение R_{\min} для двух этих основных положений.

Хордальное положение. Заклиненное состояние экипажей в хордальном положении возможно в трех случаях.

Ограничивающим фактором является угол β . В этом случае экипажи заклинены тогда, когда они всеми своими осями опираются на наружный рельс. R_{\min} определим, произведя следующие расчеты (см. рис. 1, в). Из треугольника OCD определим сторону $OD = F$

$$F^2 = H^2 + T^2,$$

а из треугольника ODE определим R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{F^2 + B^2} = \sqrt{H^2 + T^2 + B^2}. \quad (6)$$

Величину же H определим из следующих расчетов:

$$H = d + e, \quad (7)$$

где $e = c \sin \beta$, а $d = \frac{M}{\operatorname{tg} \beta}$, но $M = T + a + c \cos \beta$.

Подставив все эти значения в формулу (7), получим

$$H = \frac{T + a + c \cos \beta}{\operatorname{tg} \beta} + c \sin \beta = \frac{(T + a) \cos \beta + c}{\sin \beta}.$$

Подставим полученное выражение H в формулу (6) и найдем окончательное значение R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + T^2 + \left[\frac{(T + a) \cos \beta + c}{\sin \beta} \right]^2}. \quad (8)$$

Ограничивающим фактором является только угол β в том случае, когда $\varphi \geq 90^\circ - \varphi'$. Угол φ' определим из треугольника OCD (рис. 1, в):

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \frac{H}{T}.$$

Подставив значение H , получим

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \frac{(T + a) \cos \beta + c}{T \cdot \sin \beta}. \quad (9)$$

Если же $90^\circ - \varphi' - \gamma < \varphi < 90^\circ - \varphi'$, то ограничивающими факторами являются одновременно углы φ и β .

Ограничивающими факторами являются углы φ и β . Заклиненное состояние наступает, когда крайние оси экипажей опираются на наружный рельс, а внутренние оси экипажей находятся в промежуточном положении. R_{\min} найдем (см. рис. 1, в) из треугольника OCD

$$R_{\min} = \sqrt{H_1^2 + M_1^2}, \quad (10)$$

но $H_1 = H - e_1$; $M_1 = T + B \cos \varphi$, а $e_1 = B \sin \varphi$.

Значение H возьмем из предыдущей задачи. Тогда подставим полученные выражения в формулу (10) и, произведя некоторые преобразования, получим

$$R_{\min} = \sqrt{\underbrace{B^2 + T^2 + \left[\frac{(T + a) \cos \beta + c}{\sin \beta} \right]^2}_I + \underbrace{+ 2BT \cos \beta - 2B \sin \varphi \left[\frac{(T + a) \cos \beta + c}{\sin \beta} \right]}_{II}} \quad (11)$$

Подкоренное выражение можно разбить на две части. До тех пор, пока II часть имеет положительное значение, до тех пор и угол φ является ограничивающим фактором и его нужно учитывать. Но как только II часть становится отрицательной величиной, угол φ уже не является ограничивающим фактором и R_{\min} следует определять только

извлекая корень из I части формулы (11), которая превращается в формулу (8).

Ограничивающими факторами являются угол φ и ширина колеи зазоров 2δ (угол γ). Экипажи заклинены, когда их крайние оси опираются на наружный рельс, а внутренние оси — на внутренний рельс каждого экипажа.

При $\varphi < 90^\circ - \varphi' - \gamma$ ограничивающим фактором является только ширина колеи зазоров 2δ и угол φ , угол же β не является ограничивающим фактором. В этом случае R_{\min} для четырехосных сцепленных экипажей определяется так же, как и для одиночного, т. е. по формуле (4) или (5). Так как в основном угол φ' больше 65° и угол φ больше 25° , а угол $\gamma = 5' \div 10'$, то для сцепленных экипажей в отличие от одиночного четырехосного экипажа основным ограничивающим фактором является угол β , а не углы φ и γ .

Перекосное положение. Для перекосного положения также имеем три случая заклинивания в зависимости от различных ограничивающих факторов.

Ограничивающим фактором является угол β . В этом случае заклиненное состояние экипажей наступает тогда, когда крайние тележки своими двумя осями опираются на наружный рельс, а внутренние — на внутренний рельс. R_{\min} определим, произведя следующие расчеты (см. рис. 1, 2). Из рисунка видно, что

$$F_1^2 = H_1^2 + T_1^2, \quad (12)$$

где $T_1 = T - T_{II}$,

но так как $T_{II} = H_1 \operatorname{tg} \gamma'$, то $T_1 = T - H_1 \operatorname{tg} \gamma'$.

В свою очередь

$$H_1 = d_1 + e_1,$$

где $e_1 = c \sin \beta$, а $d_1 = \frac{M_1}{\operatorname{tg} \beta}$, но так как

$$M_1 = c \cos \beta + a + T - H_1 \operatorname{tg} \gamma',$$

то

$$H_1 = \frac{T + a + c \cos \beta - H_1 \operatorname{tg} \gamma'}{\operatorname{tg} \beta} + c \sin \beta.$$

Подставив в формулу (12) значение входящих в нее величин и произведя некоторые преобразования, получим новое выражение F_1^2

$$F_1^2 = T^2 + \left[\frac{(T + a) \cos \beta + c}{\sin(\beta + \gamma')} \right]^2 - 2T \sin \gamma' \left[\frac{(T + a) \cos \beta + c}{\sin(\beta + \gamma')} \right].$$

Из треугольника OD_1E_1 (рис. 2) видим, что

$$R_{\min} - 2\delta = \sqrt{F_1^2 + B^2} \quad \text{или} \quad R_{\min} = 2\delta + \sqrt{F_1^2 + B^2}. \quad (13)$$

Подставив в формулу (13) значение F_{12} получим, что

$$R_{\min} = 2\delta + \sqrt{B^2 + T^2 + \left[\frac{(T+a)\cos\beta + c}{\sin(\beta + \gamma')} \right]^2 - 2T \sin \gamma' \left[\frac{(T+a)\cos\beta + c}{\sin(\beta + \gamma')} \right]} \quad (14)$$

При $\gamma' = 0$ формула (14) превращается в формулу (8).

Угол β является ограничивающим фактором в том случае, когда $\varphi \geq 90^\circ - \varphi'_1$. В свою очередь

$$\varphi'_1 = \arctg \frac{H_1}{T - T_{II}}.$$

Подставив в эту формулу значения H_1 и T_{II} и произведя преобразования, получим

$$\varphi'_1 = \arctg \frac{[(T+a)\cos\beta + c] \cos \gamma'}{T \sin(\beta + \gamma') - [(T+a)\cos\beta + c] \sin \gamma'}. \quad (15)$$

При $\gamma' = 0$ формула (15) превращается в формулу (9), а угол $\varphi'_1 = \varphi'$.

Если угол $90^\circ - \varphi'_1 - \gamma' < \varphi < 90^\circ - \varphi'_1$, то в заклиненном состоянии внутренние тележки занимают хордальное положение и своими двумя осями опираются на внутренний рельс, а наружные оси наружных тележек — на наружный рельс. В этом случае ограничивающим фактором является только угол φ . При $\varphi < 90^\circ - \varphi'_1 - \gamma'$ в заклиненном состоянии внутренние тележки также занимают хордальное положение и своими обеими осями опираются на внутренний рельс, крайние же тележки своими внутренними осями опираются на внутренний рельс, а наружными осями — на наружный рельс. Если мы рассмотрим формулы (14) и (15) и значения $\sin \gamma'$, то увидим, что углом γ' можно пренебречь, как величиной очень малой. Следовательно, нет необходимости учитывать перекосное состояние экипажей в кривых. По этой причине мы в дальнейшем перекосное состояние не будем рассматривать.

III. R_{\min} для восьмиосного одиночного состава (типа «Лесосудмашстрой» и ЭМ-60)

Для одиночного восьмиосного экипажа могут быть различные случаи заклинивания. Рассмотрим следующие три случая:

Отсутствуют ограничения поворота тележек и полусцепов. Заклиненное состояние наступает тогда, когда экипаж всеми своими осями опирается на

наружный рельс. В этом случае R_{\min} определится следующим образом (см. рис. 2). Из треугольника DCK найдем значение F

$$F = \sqrt{L^2 + T^2},$$

а из треугольника DEK найдем значение величины R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{F^2 + B^2}.$$

Подставив значение F^2 , получим

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + T^2 + L^2}. \quad (16)$$

Такое положение возможно, когда $\psi' \geq 90^\circ$, а $\varphi \geq 90^\circ - \varphi''$.

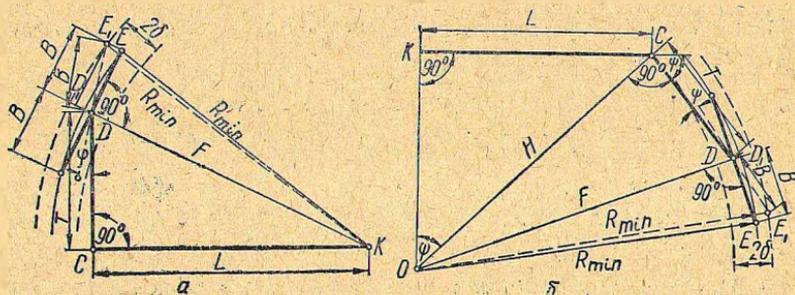


Рис. 2

В свою очередь

$$\varphi'' = \arctg \frac{L}{T}. \quad (17)$$

Ограничивающим фактором является угол φ . Рассмотрим два случая определения R_{\min} :

1) Ограничивающим фактором является только угол φ . Заклинивание наступает тогда, когда крайние оси всех тележек будут опираться на наружный рельс, а внутренние оси будут находиться в зазоре. В этом случае R_{\min} определим следующим образом (см. рис. 2, a — пунктиром). Из треугольника DCK определим длину прямой $OK = F$

$$F = \sqrt{T^2 + L^2}.$$

Продолжим прямую DK дальше за точку D . Из точки E_1 опустим перпендикуляр на продолжение прямой KD и получим точку D_1 (пересечение перпендикуляра с продолжением прямой DK). Определим длину прямой $KD_1 = F_1$

$$F_1 = F + B \sin \varphi = \sqrt{T^2 + L^2} + B \sin \varphi.$$

Определим длину прямой $D_1E_1 = B_1$

$$B_1 = B \cos \varphi.$$

После этого определим R_{\min} из треугольника D_1E_1K

$$R_{\min} = \sqrt{F_1^2 + B_1^2}. \quad (18)$$

В формулу (18) подставим значения F_1 и B_1 и, произведя некоторые преобразования, получим окончательное выражение R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + T^2 + L^2 + 2B \sin \varphi \sqrt{T^2 + L^2}}. \quad (19)$$

Такое состояние возможно, когда $\Psi \geq 90^\circ$ и $90^\circ - \varphi'' - \gamma \leq \varphi < 90^\circ - \varphi''$. φ'' , как и ранее, определяется по формуле (17).

Когда $\varphi = 90^\circ - \varphi'' - \gamma$, то в заклиненном состоянии экипаж всеми своими крайними осями опирается на наружный рельс, а всеми своими внутренними осями касается внутреннего рельса.

2) Ограничивающими факторами являются угол поворота φ и ширина колеи зазоров 2δ (угол γ) одновременно. В этом случае $\Psi \geq 90^\circ$, а $\varphi < 90^\circ - \varphi'' - \gamma$. R_{\min} следует, как и для одиночного четырехосного экипажа, определять по формуле (4) или (5).

Найдем значение угла Ψ . Из треугольника OCD по теореме синусов найдем, что

$$\frac{T}{\sin(\varphi + \gamma)} = \frac{H}{\sin(90^\circ - \varphi - \gamma)},$$

но в то же время из треугольника $OСК$ находим, что $H = \frac{L}{\sin \psi}$. Подставим полученное выражение в первое уравнение и найдем значение $\sin \psi$.

$$\sin \psi = \frac{L \sin(\varphi + \gamma)}{T \cdot \sin(90^\circ - \varphi - \gamma)} = \frac{L \sin(\varphi + \gamma)}{T \cdot \cos(\varphi + \gamma)} = \frac{L}{T} \operatorname{tg}(\varphi + \gamma).$$

Итак

$$\psi = \arcsin \frac{L}{T} \operatorname{tg}(\varphi + \gamma). \quad (20)$$

При $\Psi < \arcsin \frac{L}{T} \operatorname{tg}(\varphi + \gamma)$ ограничивающим фактором становится угол Ψ .

Ограничивающим фактором является угол Ψ . При этом может быть два случая: когда ограничивающим фактором является только угол Ψ и когда ограничивающими факторами являются углы Ψ и φ .

Рассмотрим оба эти случая.

1) Ограничивающим фактором является только угол Ψ . В заклиненном состоянии экипаж всеми своими осями опирается на внутренний рельс. В этом случае R_{\min} определится следующим образом (см. рис. 2, б). Из треугольника OKC найдем H

$$H = \frac{L}{\sin \psi}.$$

После чего из треугольника OCD определим длину линии $OD = F$

$$F = \sqrt{H^2 + T^2} = \sqrt{T^2 + \frac{L^2}{\sin^2 \psi}}$$

и из треугольника ODE находим значение R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + F^2}$$

или

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + T^2 + \frac{L^2}{\sin^2 \psi}}. \quad (21)$$

Ограничивающим фактором является только угол Ψ в том случае, когда угол $\varphi > 90^\circ - \varphi_1''$. Найдем значение угла φ_1''

$$\varphi_1'' = \arctg \frac{H}{T},$$

где

$$H = \frac{L}{\sin \psi}.$$

Тогда

$$\varphi_1' = \arctg \frac{L}{T \cdot \sin \psi}. \quad (22)$$

2) Ограничивающими факторами являются углы Ψ и φ . В этом случае заклиненное состояние наступает, когда крайние оси крайних и внутренних тележек опираются на наружный рельс, а внутренние оси находятся в промежутке. При этом угол $90^\circ - \varphi_1'' - \gamma < \varphi < 90^\circ - \varphi_1''$.

При $\varphi < 90^\circ - \varphi_1'' - \gamma$ угол Ψ не является уже ограничивающим фактором и радиус заклинивания определяется по формуле (4) или (5).

Для существующих экипажей основным является случай, когда ограничивающим фактором является только угол Ψ .

Для этого случая R_{\min} найдем так (см. рис. 2, б — построения пунктиром): сначала из прямоугольного треугольника найдем длину гипотенузы $OC = H$

$$H = \frac{L}{\sin \psi}.$$

Затем из треугольника ODC определим длину прямой $OD = F$

$$F = \sqrt{T^2 + H^2} = \sqrt{T^2 + \frac{L^2}{\sin^2 \psi}}$$

После этого продолжим прямую OD дальше за точку D , а из точки E_1 опустим на эту линию перпендикуляр. Пересечение перпендикуляра с продолжением прямой OD даст нам точку D_1 . Определим длину линии $OD_1 = F_1$

$$F_1 = F + B \sin \varphi = \sqrt{T^2 + \frac{L^2}{\sin^2 \psi}} + B \sin \varphi.$$

Далее определим длину прямой $TE_1D_1 = B_1$

$$B_1 = B \cos \varphi.$$

После всего этого из прямоугольного треугольника OD_1E_1 можно определить значение R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{F_1^2 + B_1^2} =$$

$$= \sqrt{T^2 + \frac{L^2}{\sin^2 \psi} + 2B \sin \varphi \sqrt{T^2 + \frac{L^2}{\sin^2 \psi}} + B^2 \sin^2 \varphi + B^2 \cos^2 \varphi}$$

или

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + T^2 + \frac{L^2}{\sin^2 \psi} + 2B \sin \varphi \sqrt{T^2 + \frac{L^2}{\sin^2 \psi}}}. \quad (23)$$

IV. R_{\min} для сцепленных восьмиосных экипажей (типа «Лесосудмашстрой» и ЭМ-60)

Когда в сцепе находятся два экипажа, то радиус заклинивания происходит при перекосном положении экипажей; если же в сцепе находится большое количество экипажей, то заклинивание происходит при нахождении экипажей в положении, близком к хордальному. Так как угол γ' имеет малое значение, то радиус заклинивания, определенный с учетом угла γ' , очень мало отличается от R_{\min} , определенного без учета угла γ' . На основании этого определение R_{\min} будем производить только для хордального положения экипажей.

Рассмотрим в отдельности определение R_{\min} для сцепов из платформ «Лесосудмашстрой» и ЭМ-60.

R_{\min} для сцепов из платформ «Лесосудмашстрой»

Для этих экипажей заклинивание может произойти от различных ограничивающих факторов. Рассмотрим все возможные случаи заклинивания.

Угол Ψ не является ограничивающим фактором. 1) Ограничивающим фактором является угол β . В этом случае заклинивание происходит тогда, когда все оси экипажей опираются на наружный рельс.

Ограничивающим фактором является только угол β в том случае, когда $\Psi' \geq \Psi''$, а угол $\varphi \geq 90^\circ - \varphi'$, где угол φ' определяется по формуле (9), а угол $\Psi' = \arcsin \frac{L}{H}$, но так как

$$H = \frac{(T+a) \cos \alpha + c}{\sin \beta}, \text{ то } \psi' = \arcsin \frac{L \cdot \sin \beta}{(T+a) \cos \beta + c}. \quad (24)$$

В этом случае R_{\min} определяется по формуле (8) или по формуле (21).

2) Ограничивающими факторами могут быть углы β и φ , а также 3) углы φ и γ . Для этих случаев R_{\min} определяем по тем же формулам, что и для сцепленных четырехосных экипажей, находящихся в хордальном положении.

Ограничивающим фактором является угол Ψ . Угол Ψ' является ограничивающим в том случае, когда $\Psi' \leq \Psi''$. При этом может быть два случая. Рассмотрим каждый из них в отдельности.

1) Ограничивающим фактором является только угол Ψ' . Заклинивание наступает, когда экипажи всеми осями опираются на наружный рельс. Для этого случая R_{\min} определяется по формуле (21); угол β меньше своего максимального значения. Величину угла β можно определить из величины H , выраженного через угол β и угол Ψ'

$$\frac{(T+a) \cos \beta + c}{\sin \beta} = \frac{L}{\sin \psi'}.$$

Отсюда можно найти величину угла β . Если пренебречь величиной $c \sin \beta$, как очень малой по отношению к другим величинам, то угол β будет равен

$$\beta = \arcsin \frac{T+a}{L} \sin \psi'. \quad (25)$$

2) Ограничивающими факторами являются углы Ψ' и φ . Для этого случая R_{\min} определяем по тем же формулам, что и для одиночного восьмиосного состава при тех же ограничениях, т. е. по формуле (23).

R_{\min} для сцепов ЭМ-60

Рассмотрим влияние различных ограничивающих факторов.

Ограничивающими факторами являются углы α и β . В этом случае при заклинивании экипажей

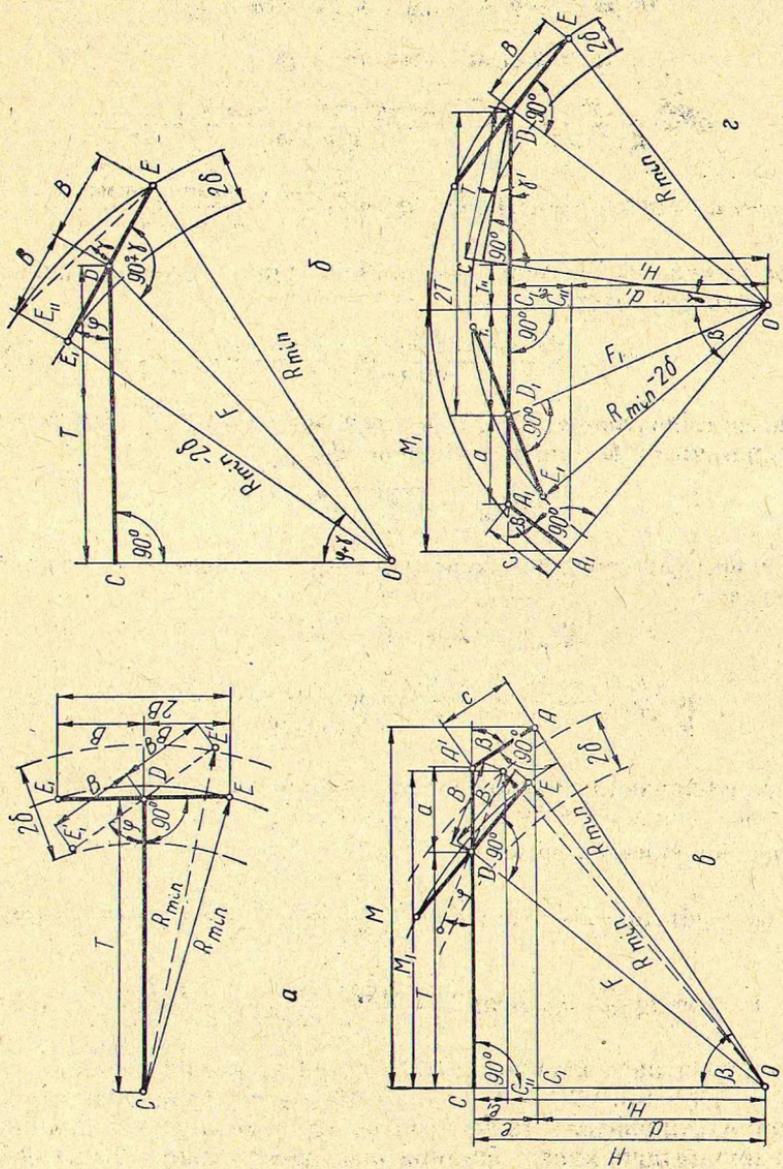


Рис. 3

все оси экипажей опираются на наружный рельс. Радиус заклинивания определится следующим образом (см. рис. 3, а).

Найдем выражения величин M , e , d , H :

$$M = T + a + b \cos \alpha + c \cos (\alpha + \beta);$$

$$e = b \sin \alpha + c \sin (\alpha + \beta);$$

$$d = \frac{M}{\operatorname{tg} (\alpha + \beta)} = \frac{T + a + b \cos \alpha + c \cos (\alpha + \beta)}{\operatorname{tg} (\alpha + \beta)} ;$$

$$H = e + d = b \sin \alpha + c \sin (\alpha + \beta) + \frac{T + a + b \cos \alpha + c \cos (\alpha + \beta)}{\operatorname{tg} (\alpha + \beta)} .$$

Выражение H приведем к общему знаменателю и произведем преобразования

$$H = \frac{(T + a) \cos (\alpha + \beta) + b \cos \beta + c}{\sin (\alpha + \beta)} . \quad (26)$$

Далее из треугольника DCO найдем, что $F = \sqrt{T^2 + H^2}$, а из треугольника EDO найдем значение R_{\min} .

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + F^2} .$$

Подставим в полученное выражение R_{\min} значение F^2 , а также H^2 . Тогда

$$\begin{aligned} R_{\min} &= \sqrt{B^2 + T^2 + H^2} = \\ &= \sqrt{B^2 + T^2 + \left[\frac{(T + a) \cos (\alpha + \beta) + b \cos \beta + c}{\sin (\alpha + \beta)} \right]^2} . \end{aligned} \quad (27)$$

Ограничивающими факторами являются только углы α и β в том случае, если $\Psi \geq \Psi'_1$, а $\varphi \geq 90^\circ - \varphi'''$.

Найдем значения Ψ'_1 и φ'''

$$\Psi'_1 = \arcsin \frac{L}{H} = \arcsin \frac{L \cdot \sin (\alpha + \beta)}{(T + a) \cos (\alpha + \beta) + b \cos \beta + c} , \quad (28)$$

а

$$\varphi''' = \arcsin \frac{H}{T} = \arcsin \frac{(T + a) \cos (\alpha + \beta) + b \cos \beta + c}{T \cdot \sin (\alpha + \beta)} . \quad (29)$$

Ограничивающими факторами являются углы α , β и φ . При $90^\circ - \varphi''' - \gamma \leq \varphi \leq 90^\circ - \varphi'''$ ограничивающим фактором становится также угол φ . В этом случае заклинивание происходит, когда крайние оси всех тележек экипажей опираются на наружный рельс, а внутренние оси находятся в промежуточном положении (или касаются внутреннего рельса при $\varphi = 90^\circ - \varphi''' - \gamma$ или наружного при $\varphi = 90^\circ - \varphi'''$).

R_{\min} найдем, произведя следующие расчеты (см. рис. 3, б).
Найдем значение величин M_1, e_1, H_1 :

$$M_1 = T + B \cos \varphi; \quad e_1 = B \sin \varphi; \quad H_1 = H - e_1.$$

Подставим значение H , полученное выше (формула 27), и e_1 в последнюю формулу

$$H_1 = \frac{(T + a) \cos(\alpha + \beta) + b \cos \beta + c}{\sin(\alpha + \beta)} - B \sin \varphi.$$

Далее из треугольника EC_1O найдем выражение R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{M_1^2 + H_1^2}.$$

Подставим в это выражение значения M_1 и H_1

$$R_{\min} = \sqrt{(T + B \cos \varphi)^2 + \left[\frac{(T + a) \cos(\alpha + \beta) + b \cos \beta + c}{\sin(\alpha + \beta)} - B \sin \varphi \right]^2}.$$

Возведя в квадрат подкоренные выражения и делая преобразования, получим окончательное значение R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + T^2 + \left[\frac{(T + a) \cos(\alpha + \beta) + b \cos \beta + c}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 + 2TB \cos \beta - 2B \sin \varphi \left[\frac{(T + a) \cos(\alpha + \beta) + b \cos \beta + c}{\sin(\alpha + \beta)} \right]}. \quad (30)$$

Ограничивающими факторами являются углы φ и γ (ширина колеи зазоров 2δ). Ограничивающими факторами становятся углы φ и γ в том случае, когда $\varphi < 90^\circ - \varphi''' - \gamma$; в заклиненном состоянии крайние оси всех тележек экипажей опираются на наружный рельс, а внутренние оси всех внутренних тележек — на внутренний рельс. Для этого случая R_{\min} определяется, как и для одиночного четырехосного экипажа, при тех же ограничениях, т. е. по формуле (4) или (5).

Ограничивающими факторами являются углы φ и γ в том случае, когда $\psi \geq \psi'''$. В свою очередь

$$\psi'' = \arcsin \frac{L}{T} \operatorname{tg}(\varphi + \gamma). \quad (31)$$

При $\psi < \psi'''$ ограничивающим фактором становится угол ψ .

Ограничивающим фактором является угол ψ . В этом случае R_{\min} определяется по формуле (21).

Ограничивающими факторами являются углы φ и Ψ . Для этого случая R_{\min} определяется по формуле (23).

V. Определение R_{\min} для одиночного восьмиосного экипажа типа сцепов ЦНИИМЭ-ДВЗ

Для одиночного восьмиосного экипажа типа сцепов марки ЦНИИМЭ-ДВЗ заклинивание наступает при перекоском положении отдельных полусцепов в кривой. В связи с этим рассмотрим определение R_{\min} для экипажей, находящихся в перекоском состоянии при различных ограничивающих факторах.

Ограничивающими факторами являются углы α и β . В этом случае при заклинивании крайние оси экипажа опираются на наружный рельс, а внутренние оси — на внутренний рельс. Для определения R_{\min} произведем следующие расчеты (см. рис. 3, в). Определим величины M , d , e и H :

$$M = T - H \operatorname{tg} \gamma' + a + b \cos \alpha + c \cos (\alpha + \beta);$$

$$d = \frac{M}{\operatorname{tg} (\alpha + \beta)} = \frac{T - H \operatorname{tg} \gamma' + a + b \cos \alpha + c \cos (\alpha + \beta)}{\operatorname{tg} (\alpha + \beta)};$$

$$e = b \sin \alpha + c \sin (\alpha + \beta);$$

$$H = d + e = \frac{T - H \operatorname{tg} \gamma' + a + b \cos \alpha + c \cos (\alpha + \beta)}{\operatorname{tg} (\alpha + \beta)} + b \sin \alpha + c \sin (\alpha + \beta).$$

Последнее выражение приведем к общему знаменателю и определим, чему равно H

$$H = \frac{\left[T + a + \frac{b \cos \beta}{\cos (\alpha + \beta)} + \frac{c}{\cos (\alpha + \beta)} \right] \cos (\alpha + \beta) \cos \gamma'}{\sin (\alpha + \beta + \gamma')} = \frac{[(T + a) \cos (\alpha + \beta) + b \cos \beta + c] \cos \gamma'}{\sin (\alpha + \beta + \gamma')}.$$

Далее из треугольника COD найдем значение величины F^2

$$F^2 = H^2 + (T + H \operatorname{tg} \gamma')^2 = H^2 + T^2 + 2TH \operatorname{tg} \gamma' + H^2 \operatorname{tg}^2 \gamma' = H^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma') + T^2 + 2TH \operatorname{tg} \gamma'.$$

В полученное выражение F^2 подставим выражение H и произведем преобразования

$$\begin{aligned}
 F^2 &= T^2 + \left[\frac{(T+a) \cos(\alpha+\beta) + b \cos\beta + c}{\sin(\alpha+\beta+\gamma')} \right]^2 \cos^2\gamma' (1 + \operatorname{tg}^2\gamma') + \\
 &+ 2T \frac{\sin\gamma'}{\cos\gamma'} \cos\gamma' \left[\frac{(T+a) \cos(\alpha+\beta) + b \cos\beta + c}{\sin(\alpha+\beta+\gamma')} \right] = \\
 &= T^2 + \left[\frac{(T+a) \cos(\alpha+\beta) + b \cos\beta + c}{\sin(\alpha+\beta+\gamma')} \right]^2 - \\
 &- 2T \sin\gamma' \left[\frac{(T+a) \cos(\alpha+\beta) + b \cos\beta + c}{\sin(\alpha+\beta+\gamma')} \right].
 \end{aligned}$$

Из треугольника OD_1E_1 найдем, чему равно R_{\min}

$$R_{\min} = \sqrt{B^2 + F^2}.$$

В полученное выражение R_{\min} подставим значение F^2 и получим окончательное выражение R_{\min}

$$\begin{aligned}
 R_{\min} &= \sqrt{B^2 + T^2 + \left[\frac{(T+a) \cos(\alpha+\beta) + b \cos\beta + c}{\sin(\alpha+\beta+\gamma')} \right]^2 -} \\
 &- 2T \sin\gamma' \left[\frac{(T+a) \cos(\alpha+\beta) + b \cos\beta + c}{\sin(\alpha+\beta+\gamma')} \right]}. \quad (32)
 \end{aligned}$$

Ограничивающими факторами являются углы α и β при $\psi \geq \alpha + \beta$ и при $\varphi \geq 90^\circ - \varphi_1''$, где

$$\varphi_1''' = \operatorname{arc\,tg} \frac{H}{T - H \operatorname{tg}\gamma'}.$$

Подставим значение H и проведем некоторые преобразования

$$\varphi_1''' = \operatorname{arc\,tg} \frac{[(T+a) \cos(\alpha+\beta) + b \cos\beta + c] \cos\gamma'}{T \cdot \sin(\alpha+\beta+\gamma') - \sin\gamma' [(T+a) \cos(\alpha+\beta) + b \cos\beta + c]}. \quad (33)$$

Ограничивающими факторами являются углы φ и γ . При $\varphi < 90^\circ - \varphi_1''' - \gamma$ ограничивающими факторами становятся углы φ и γ . Для этого случая R_{\min} определяется по формуле (4) или (5).

Ограничивающим фактором является угол Ψ . Угол Ψ является ограничивающим фактором в том случае, когда $\Psi < \alpha + \beta$ и $\varphi \geq 90^\circ - \varphi_1'''$. В заклиненном состоянии крайние тележки своими двумя осями опираются на наруж-

ный рельс, а внутренние тележки своими двумя осями — на внутренний рельс. При этом возможно два случая:

$$\alpha < \psi \leq \alpha + \beta \quad \text{и} \quad \psi \leq \alpha.$$

Так как угол $\Psi = \alpha + \beta$ (см. рис. 3, з), то, следовательно, $\beta = \Psi - \alpha$ в первом случае и $\alpha = \Psi$ — во втором. Рассмотрим их.

1. Когда $\Psi = \alpha + \beta$, а следовательно, и при $\Psi < \alpha + \beta$, для определения R_{\min} можем воспользоваться формулой (32), подставив в нее вместо максимального значения β значение β , определенное по формуле $\beta = \Psi - \alpha$, или же вместо $\alpha + \beta$ угол Ψ , а вместо β его значение $\Psi - \alpha$.

2. $\Psi \leq \alpha$. В этом случае $\beta = 0$, а $\alpha = \Psi$ (см. рис. 3, з — пунктирное построение). Для определения R_{\min} воспользуемся также исходной формулой (32), подставив вместо $\alpha + \beta$ значение Ψ или α , определенное по формуле $\Psi = \alpha$.

Ограничивающими факторами являются углы Ψ и φ . При $90^\circ - \varphi_1'' - \gamma \leq \varphi < 90^\circ - \varphi_1''$ ограничивающим фактором становится также угол φ . Угол

$$\varphi_{II}''' = \arctg \frac{H}{T - H \operatorname{tg} \gamma'}.$$

Подставим значение H для общих случаев и произведем преобразования.

1-й случай — $\alpha < \Psi \leq \alpha + \beta$:

$$\varphi_{II}''' = \arctg \frac{[(T + a) \cos \psi + b \cos(\psi - \alpha) + c] \cos \gamma'}{T \sin(\psi + \gamma') - \sin \gamma' [(T + a) \cos \psi + b \cos(\psi - \alpha) + c]} \quad (34)$$

2-й случай — $\Psi \leq \alpha$:

$$\varphi_{II}''' = \arctg \frac{[(T + a) \cos \psi + b + c] \cos \gamma'}{T \cdot \sin \psi - \sin \gamma' [(T + a) \cos \psi + b + c]} \quad (35)$$

VI. R_{\min} для восьмиосных сцепленных экипажей типа ЦНИИМЭ-ДВЗ

Для сцепленных экипажей типа ЦНИИМЭ-ДВЗ имеют место те же ограничения, что и для сцепленных экипажей типа ЭМ-60. Так как для сцепленных экипажей заклинивание происходит в положении экипажей, близком к хордальному, поэтому R_{\min} будем определять только для хордального положения. R_{\min} для сцепленных экипажей типа ЦНИИМЭ-ДВЗ, при ограничивающих факторах α и β , α , β и φ и φ и γ определяется по тем же формулам, при соответствующих ограничивающих факторах, что и для сцепленных экипажей

типа ЭМ-60, т. е. по формулам (27), (30), (5), (28), (29), (31).

При ограничивающих факторах Ψ' , Ψ'' и φ для определения R_{\min} можно воспользоваться формулами (32), (34) и (35), принимая угол $\gamma' = 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. П. Королев. Вписывание паровозов в кривые участки пути. Труды ВНИИЖТ, вып. 37. Трансжелдориздат, 1950.

2. П. М. Калашников. Геометрическое вписывание подвижного состава УЖД в кривые при возке леса в хлыстах. Сборник научных работ Белорусского технологического института имени С. М. Кирова. (Серия общетехническая.) Изд-во Министерства высшего, среднего специального и профессионального образования БССР, 1963.
