

С. П. НАДЕЖИН

К ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНИИ КАЧЕНИЮ НА РЕЛЬСОВОМ ТРАНСПОРТЕ

(Представлено академиком В. Н. Образцовым 28 II 1949)

Величина коэффициента трения качения, принятая на рельсовом транспорте, в основном была определена эмпирическим путем, что не дает возможности учесть влияние на этот коэффициент отдельных факторов, как то: радиус колеса, радиус головки рельса, давление колеса на рельс, модуль упругости металла бандажа и рельса и т. д.

Предлагаемый способ определения коэффициента трения качения для ведомого колеса на рельсовом транспорте дает возможность учесть эти факторы.

Величина коэффициента трения качения, полученная в приводимом цифровом примере, приближается к той величине, которая получена опытным путем.

В основу определения трения качения ведомого колеса положено следующее. Известно, что каждая точка на ободе колеса, катящегося по прямой на плоскости при условии абсолютной жесткости как колеса, так и поверхности, по которой оно катится, и при отсутствии проскальзывания описывает циклоиду; в действительности же при качении колеса железнодорожного вагона или локомотива по рельсу происходит упругое сжатие как бандажа колеса, так и рельса, причем величина упругого сжатия каждого из них пропорциональна модулю упругости соответственного металла.

Величина суммарного упругого сжатия или, как называет Н. М. Беляев, „сближения“ ⁽¹⁾ определяется, по Герцу, формулой

$$\alpha = m_{\alpha} \sqrt[3]{\frac{2P^2 A}{E^2}}, \quad (1)$$

где α — суммарное упругое сжатие бандажа и рельса* в см; P — давление колеса на рельс в кг; E — модуль упругости металла в кг/см² (при малой разнице E принимается одинаковым как для стального бандажа, так и стального рельса); A определяется в зависимости от взаимного расположения поверхностей касания в см⁻¹. Для цилиндрических поверхностей, расположенных накрест, Н. М. Беляев дает $A = 1/2R$ (R — радиус колеса в см). m_{α} — коэффициент, зависящий от отношения радиусов поверхности головки рельса и колеса, может быть взят, например, из ⁽¹⁾ (табл. 19, стр. 163).

При упругом сжатии рельса и бандажа и упругом прогибе рельса, как балки, геометрическое место точек касания бандажа с рельсом,

* В дальнейших расчетах „сближение“ обозначается буквой y .

согласно экспериментальным исследованиям Васютынского, представляется в виде прямой BC , как это указано на рис. 1: рельс сжимается на величину δ_1 , а бандаж колеса на величину δ_2 .

Предполагаем, что каждая точка на ободе колеса движется по циклоиде, отнесенной к прямой MN . Рассмотрим следующие три положения некоторой точки a на ободе колеса при его качении:

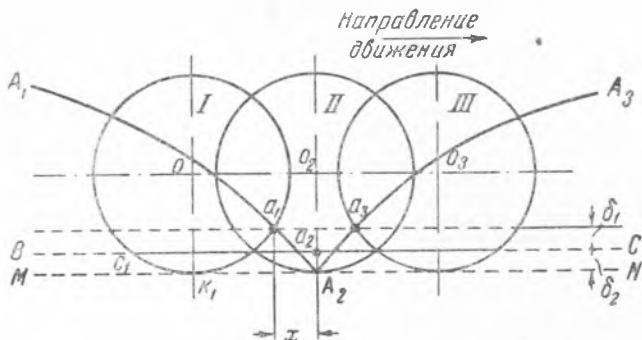


Рис. 1

а) В положении колеса I точка a необжатого бандажа подходит к необжатой головке рельса в точке a_1 .

б) В положении колеса II точка a колеса окажется в соприкосновении с головкой рельса в точке a_2 . На протяжении a_1a_2 происходит сжатие бандажа колеса на величину δ_2 , а головки рельса на величину δ_1 .

в) В положении III при упругом сжатии по закону Гука точка a бандажа оказывается в точке a_3 .

Делаем предположение, что упругое сжатие головки рельса и бандажа происходит под действием некоторой реактивной силы D , возникающей при надвигании колеса на деформированный рельс, действующей вдоль направления a_3a_1 (рис. 1).

Вертикальная составляющая силы D равна и противоположно направлена весу, действующему на рельс в точке касания колес, горизонтальная составляющая F представляет

силу трения качения, приложенную на ободе колеса.

Из треугольника сил (рис. 2)

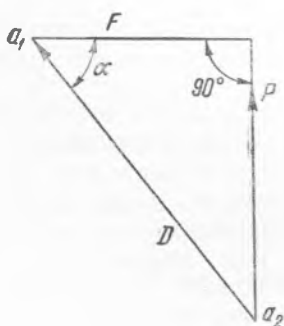


Рис. 2

$$F = P \operatorname{ctg} \alpha; \quad (2)$$

величина α находится из отношения половины горизонтального перемещения (проскальзывания) точки a по рельсу x (см. рис. 1) к величине сжатия головки рельса δ_1 :

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{x}{\delta_1}. \quad (3)$$

Величина x определяется как абсцисса циклоиды, причем положительное направление считается влево от начала координат в точке A_2 :

$$x = R \arccos \frac{R-y}{R} - \sqrt{y(2R-y)}, \quad (4)$$

где R — радиус колеса; y — суммарное сжатие рельса и бандажа колеса $\delta_1 + \delta_2$, определяемое по формуле (1).

При равенстве модуля упругости рельса и бандажа $\delta_1 = \delta_2$, т. е.

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{2x}{y}. \quad (5)$$

Таким образом,

$$F = P \frac{2x}{y} \text{ кг.} \quad (6)$$

Действующая на ободу колеса сила трения качения совместно с равной ей по величине и противоположно направленной силой тяги, приложенной в центре тяжести колеса, составляют пару сил, вращающую ведомое колесо.

Момент этой пары

$$M = P \frac{2x}{y} R.$$

Коэффициент трения качения

$$f = \frac{2x}{y} R \text{ см} \quad (7)$$

(здесь R обыкновенно принимается в см).

В качестве примера приводится расчет коэффициента трения качения для колесной пары (с цилиндрическими бандажами) с колесом радиуса $R = 500$ мм, статической нагрузкой, при полной разгрузке одного из колес пары (²).

Модуль упругости как рельса, так и бандажа $E = 2\,100\,000$ кг/см². Величина суммарного сжатия (сближения)

$$y = 1,30 \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 4 \cdot 10^8}{10^2 \cdot 21^2 \cdot 10^{10}}} = 0,01622 \text{ см.}$$

Величина абсциссы x циклоиды вычисляется по формуле (4):

$$x = 50 \arccos \frac{50 - 0,01622}{51} - \sqrt{0,01622 (2 \cdot 50 - 0,01622)} = 0,00001 \text{ см.}$$

Коэффициент трения качения (формула (7))

$$f = \frac{2 \cdot 0,00001}{0,01622} \cdot 50 = 0,062 \text{ см.}$$

Поступило
28 II 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. М. Беляев, Сопротивление материалов, гл. IX, 1945. ² М. А. Короткевич, Расчет и конструирование вагонов, ч. III, 1939, стр. 48.