

M. A. BOIKACHEV, A. O. SHIMANOVSKY

STABILITY ANALYSIS OF RECTILINEAR MOTION OF COMBINED UNIT TRANSPORTING LIQUID-FILLED CONTAINER

It was created the mathematical model for the motion of the transport aggregate with a hinged container for liquid based on the universal power vehicle "Polesie". Liquid displacement was considered by applying the solid model. With the use of Lagrange equations of the second kind there were obtained the expressions for the range of construction parameters change which ensures stability of the agricultural machines rectilinear movement.

Получено 12.09.2013

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013**

УДК 629.42

Л. Н. БОНДАРЕНКО, В. В. КОЛБУН, А. С. ОВЧИННИКОВ

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта им. акад. В. А. Лазаряна, Украина*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПОТЕРЬ ПРИ КАЧЕНИИ КОЛЕСА ПО РЕЛЬСУ

Получены формулы, позволяющие определять коэффициент трения качения колеса по новому и изношенному рельсу с использованием общепринятых механических констант и размеров, учитывая коэффициент гистерезисных потерь.

Введение. До того, как Г. Герцем в 1881–1882 было получено решение некоторых задач о контактных напряжениях и деформациях [1], существовала теория появления сопротивления качению О. Рейнольдса (1875 г.) [2], который считал, что оно связано с возникновением трения скольжения в месте контакта. Ввиду непререкаемого авторитета автора подшипники качения начали смазывать так же, как и подшипники скольжения. Это, очевидно, была одна из самых дорогих ошибок, допущенных учеными, поскольку неизвестно, сколько было потрачено лишних смазочных материалов и средств на усовершенствование подшипниковых узлов.

Только в 1955 г. Д. Табор [3] экспериментально доказал, что роль трения скольжения при качении незначительна. Он предложил аналитические зависимости для определения коэффициента трения качения, исходя из теории контактных напряжений Г. Герца. При выводе формул автор считал, что малая часть α упругой энергии рассеивается из-за гистерезиса, а результирующий момент, требующийся для поддержания движения, определяется при-

равниванием полной работы к величине рассеиваемой энергии. Например, для линейного контакта мощность, рассеиваемая при качении

$$N = \frac{2}{3\pi} \alpha P b \omega,$$

где P – сила, прижимающая катящееся тело к поверхности; b – полуширина пятна контакта в направлении движения; ω – угловая скорость колеса.

В конечном виде формулы для определения коэффициента трения качения Д. Табором записаны в виде:

– при первоначальном точечном контакте (для эллиптической площадки)

$$k = \alpha \frac{3}{16} b; \quad (1)$$

– при линейном контакте

$$k = \alpha \frac{2}{3\pi} b. \quad (2)$$

Если параметр b в формулах (1) и (2) определяется из соотношений теории контактных деформаций Г. Герца, то значения α до настоящего времени теоретически не получены. Кроме того, неизвестен способ и его экспериментального определения.

Задача исследования. Коэффициент гистерезисных потерь экспериментально может быть определен для случая растяжения–сжатия, но его значения не соответствуют аналогичным значениям при качении. Имеются хорошо апробированные экспериментальные значения относительной величины коэффициента сопротивления качению w_{TK} . По известным значениям w_{TK} и формулам (1), (2) появляется возможность нахождения сопротивления качению колеса и выделения величины гистерезисных потерь α .

Теоретический анализ.

1 Точечный контакт.

При определении сил сопротивления подвижного состава при качении колес по рельсам рекомендуется формула [4]

$$W_{TK} = w_{TK} P = \frac{kP}{R_1} = (3...4)P, \quad (3)$$

где $w_{TK} = 3...4$ Н/кН – коэффициент сопротивления качению; R_1 – радиус колеса.

Полуширина пятна контакта для двух цилиндрических поверхностей с пересекающимися осями (коничностью бандажа пренебрегаем) [5]

$$b = 1,397 n_b \sqrt[3]{\frac{P}{E} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}},$$

где n_b – коэффициент, зависящий от коэффициентов уравнения эллипса касания; R_2 – радиус закругления головки рельса; E – модуль упругости материалов колеса и рельса.

Для случая $P = 100$ кН; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $R_1 = 525$ мм; $R_2 = 300$ мм [6] имеем $n_b = 0,837$ и $b = 5,26$ мм.

Согласно (1) $k = 0,986 \alpha$, и сила сопротивления качению колеса $W_{\text{ТК}} = \frac{kP}{R_1} = 187,8 \alpha$. С другой стороны, по формуле (3) при том же значении силы P находим $W_{\text{ТК}} = (3 \dots 4) \cdot 100 = 300 \dots 400$ Н. Приравняв приведенные выражения, получим $\alpha = 1,6 \dots 2,1$.

Обычно считается, что потери типа гистерезисных связаны с размерами по экспоненциальному закону. Если принять за основу среднее значение $\alpha = 1,85$, то можно предположить, что справедлива эмпирическая зависимость $\alpha = e^{\mu R_1}$, в которой $\mu = 1,2 \text{ м}^{-1}$.

Таким образом, при точечном контакте

$$k = \frac{3}{16} b e^{1,2 R_1}.$$

2 Линейный контакт.

В эксплуатации профиль поверхности катания бандажей приближается к очертанию головок рельсов. В этом случае эллиптическая площадка контакта вырождается в прямоугольную, ширина которой B определяется шириной головки рельса, а длина площадки вдоль рельса $2b$ определяется из формулы контактных деформаций Г. Герца

$$b = 1,526 \sqrt{\frac{P R_1}{B E}}.$$

Если принять среднее значение ширины площадки контакта изношенных бандажей и рельсов $B = 35$ мм [6], то при $P = 100$ кН и $R_1 = 525$ мм получим $b = 4,07$ мм.

К сожалению, отсутствуют экспериментальные данные о величине сопротивления качению при изношенных бандажах. Однако имеются хорошо апробированные значения коэффициентов трения качения для крановых колес при плоской и скругленной головках рельс. Так, известно, что при ширине головки $B = 50$ мм и $R_2 = 300$ мм сопротивление качению в 1,2 раза меньше, чем при скругленной головке. Таким образом, можно принять $w_{\text{ТК}} = 2,5 \dots 3,3$ Н/кН.

Согласно (2) $k = 0,212\alpha b$, и сила сопротивления качению колеса $W_{\text{TK}} = 164,4\alpha$. Также при $P = 100$ кН $W_{\text{TK}} = (2,5...3,3) \cdot 100 = 250...330$ Н. Поступив аналогично приведенному выше случаю, получим $\alpha = 1,52...2,01$. Отталкиваясь от среднего значения $\alpha = 1,765$, получаем зависимость от радиуса через показательную функцию $\alpha = e^{1,1R_1}$.

Таким образом, при линейном контакте коэффициент трения качения с учетом коэффициента гистерезисных потерь

$$k = \frac{2}{3\pi} b e^{1,1R_1}.$$

Заключение. Известно, что величина сопротивления качению колеса радиусом $R_1 = 525$ мм при нормальной силе $P = 100$ кН, одинаковых модулях упругости материалов колеса и рельса для нового рельса Р43 составляет 43,7 % от общего сопротивления, а для изношенного рельса (ширина изношенного бандажа 35 мм) – 46,7 %. Полученные соотношения позволяют уже на стадии проектирования оценить гистерезисные потери при качении колес новых локомотивов и вагонов с иными радиусами поверхности катания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Hertz, H.** Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // Journal für die reine und angewandte Mathematik. – 1881. – Bd. 92. – S. 156–171.
- 2 **Reynolds, O.** On rolling friction / O. Reynolds // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1875. – Vol. 166. – P. 155–174.
- 3 **Tabor, D.** The mechanism of rolling friction: the elastic range / D. Tabor // Proceeding of the Royal Society of London. A. – 1955. – Vol. 229, № 1177. – P. 198–220.
- 4 **Подвижной состав и тяга поездов** / А. П. Третьяков [и др.]. – М.: Транспорт, 1979. – 368 с.
- 5 **Писаренко, Г. С.** Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
- 6 **Конструкция и динамика тепловозов** / под ред. В. Н. Иванова. – М.: Транспорт, 1974. – 336 с.

L. N. BONDARENKO, V. V. KOLBUN, A. S. OVCHINNIKOV

EXPERIMENTAL-ANALYTICAL EVALUATION OF THE HYSTERESIS LOSSES COEFFICIENT DURING WHEELS ROLLING ON RAILS

The formulas for defining the wheel rolling friction coefficient for the cases of new and worn rail usage were created considering the conventional mechanical constants and sizes and the coefficient of the hysteresis losses.

Получено 07.04.2013