

УДК 622.625.28

Франчук В.П., д-р техн. наук, профессор,
Зиборов К.А., канд. техн. наук, доцент
(ГВУЗ «НГУ»)

**ФОРМИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ СВОБОДНОМ
КАЧЕНИИ РЕЛЬСОВОГО КОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТА ПО
ПЛОСКОМУ РЕЛЬСУ**

Франчук В.П., д-р техн. наук, професор,
Зиборов К.А., канд. техн. наук, доцент
(ДВНЗ «НГУ»)

**ФОРМУВАННЯ ОПОРУ ПРИ ВІЛЬНОМУ КОЧЕННІ РЕЙКОВОГО
КОЛІСНОГО ТРАНСПОРТУ ПО ПЛОСКИХ РЕЙКАХ**

Franchuk V.P., D. Sc. (Tech.), Professor,
Ziborov K.A., Ph.D (Tech.), Associate Professor
(SHEI «NMU»)

**FORMATION OF RESISTANCE FORCES DURING FREE WHEEL
TRANSPORT ROLLING ALONG THE FLAT RAILS**

Аннотация. На основе теории взаимодействия тел с подвижной точкой контакта рассмотрено формирование сопротивления при свободном качении рельсового колесного транспорта по плоскому рельсу с учетом реологических свойств материала контактирующих тел. С учетом неупругих сопротивлений при взаимодействии контактирующих тел, представленных в форме комплексного модуля упругости, получены аналитические зависимости для определения текущего значения усилия на площадке контакта; энергии, теряемой колесом за время прохождения площадки контакта; коэффициента сопротивления при свободном качении с учетом физико-механических свойств контактирующих поверхностей. Полученные результаты зависимости сопротивления движению локомотива от условий контакта выходных звеньев и рельсового пути, физико-механических свойств контактирующих поверхностей, а также определение их численных значений позволит оценить резервы повышения использования силы тяги и выработать меры, направленные на их реализацию.

Ключевые слова: сопротивление движению, пятно контакта, напряжение.

Введение. При движении колесного транспорта по рельсам (будь то вагон, шахтная вагонетка или локомотив) возникают сопротивления. Вследствие сложности явлений и наличия многочисленных и разнообразных факторов, оказывающих влияние на сопротивление движению, определение полного сопротивления движению не поддается пока удовлетворительному теоретическому решению [1], [Волотковский, С.А., 1981]. Их обычно учитывают, как произведение нормальной нагрузки на коэффициент трения, или применительно к колесному транспорту, произведение нормальной нагрузки на «коэффициент трения качения», отнесенное к радиусу (диаметру) колеса. При этом в некоторых исследованиях вводится понятие о «мостиках холодной сварки контактирующих тел» или «валике деформации», якобы воз-

никающем перед набегающим колесом [Боуден, Ф., 1960], [Крягельский, И.В., 1962]. Во-первых, говорить о трении при свободном качении колеса говорить несколько некорректно. Во-вторых, при рассмотрении взаимодействия тел с подвижной точкой контакта, особенно при учете упругих свойств контактирующих тел, можно заметить, что в пределах пятна контакта нарастание нагрузок происходит плавно с увеличением максимальных напряжений в центре пятна.

При набегании поверхности колеса на рельс обе поверхности деформируются, причем следует учесть не только упругие, но и неупругие свойства материала контактирующих тел. Это приводит к перераспределению нагрузок в пределах пятна контакта со смещением максимума относительно оси симметрии, с появлением противодействующего момента, эквивалента сопротивлению.

Цель работы. Определение сопротивления качению колеса рельсового транспортного средства.

Материал и результаты исследований. Известно [Джонсон, К., 1989], [Исаев, И.П., 1985], что сцепление таких тел, как колесо и рельс является результатом взаимодействия сил, действующих в зоне контакта.

При свободном движении колеса по рельсу отсутствуют сдвиговые деформации в точке контакта. Под действием вертикальной составляющей реакции между колесом и рельсом по площадке контакта на рельсе возникает деформация, обусловленная упругостью материалов пары. Решение статической задачи о геометрическом очертании площадки контакта двух изотропных упругих тел (сферы или цилиндры), распределении давлений и напряжений по этой поверхности при действии постоянной внешней силы, приложенной к колесу и нормальной к опорной поверхности, принадлежит Г. Герцу [Джонсон, К., 1989].

При контакте колеса с рельсом, согласно теории Герца-Беляева, образуется пятно контакта, которое в идеальном случае имеет форму эллипса с полуосями a и b . В случае, если колесо движется по плоскому рельсу, пятно контакта имеет вид прямоугольника с полушириной b , определяемых геометрией контактирующих тел, и длиной $2a$, зависящей от параметров контактирования.

Для реальных условий, учитывая снижение жесткости конструкций, наличие шероховатостей, контактирование тел не по всей поверхности, площадка контакта может измениться в большую сторону [Джонсон, К., 1985], [2]. Усредненное давление на площадке контакта определится как

$$p_c = \frac{Q}{4ab}$$

где a и b – полудлина и полуширина площадки контакта; Q – общая нормальная нагрузка; p_c – усредненное давление.

Параметры полученного пятна контакта определяются из выражения

$$a = 1,6 \sqrt{\frac{Q}{2b} D_1 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}$$

где D_1 – диаметр колеса; E_1, E_2, μ_1, μ_2 – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала колеса и рельса.

Максимальные возникающие при этом напряжения будут равны

$$p_0 = 0,798 \sqrt{\frac{Q}{2b D_1 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}}$$

Текущее значение напряжений на пятне контакта будет

$$p = p_0 \sqrt{1 - \xi_a^2}$$

где ξ_a – отношение $\xi_a = \frac{x}{a}$ ($-a \leq x \leq a$).

На рис. 1 представлена теоретическая зависимость распределения нормальных напряжений на площадке контакта.

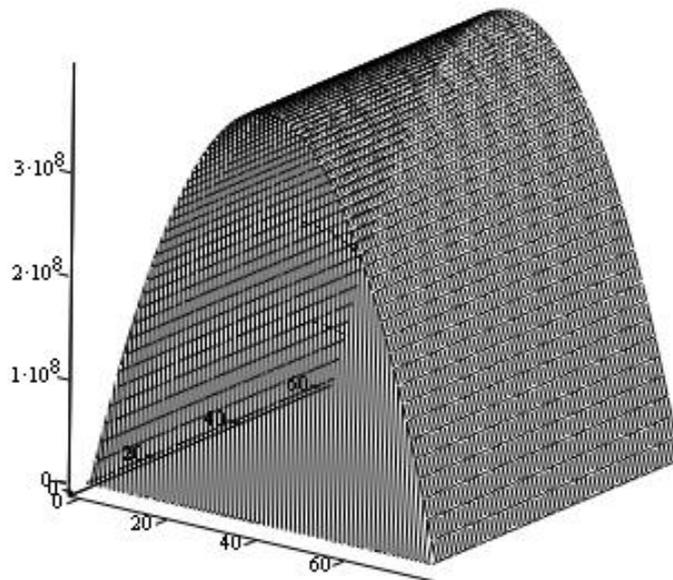


Рисунок 1 – Распределение нагрузки на площадке контакта

Усредненное значение давления

$$p_c = \frac{1}{2} p_0 \int_{-1}^1 \sqrt{1 - \xi_a^2} d\xi \quad \text{или} \quad p_c = \frac{\pi}{2} p_0$$

Это в идеальном случае. На самом деле при движении колесного транспорта (например, шахтного локомотива) вследствие упругих несовершенств материала контактирующих тел, картина несколько изменится [2, 3].

На рис. 2 представлена расчетная схема нагружения двух тел без учета тягового или тормозного усилия.

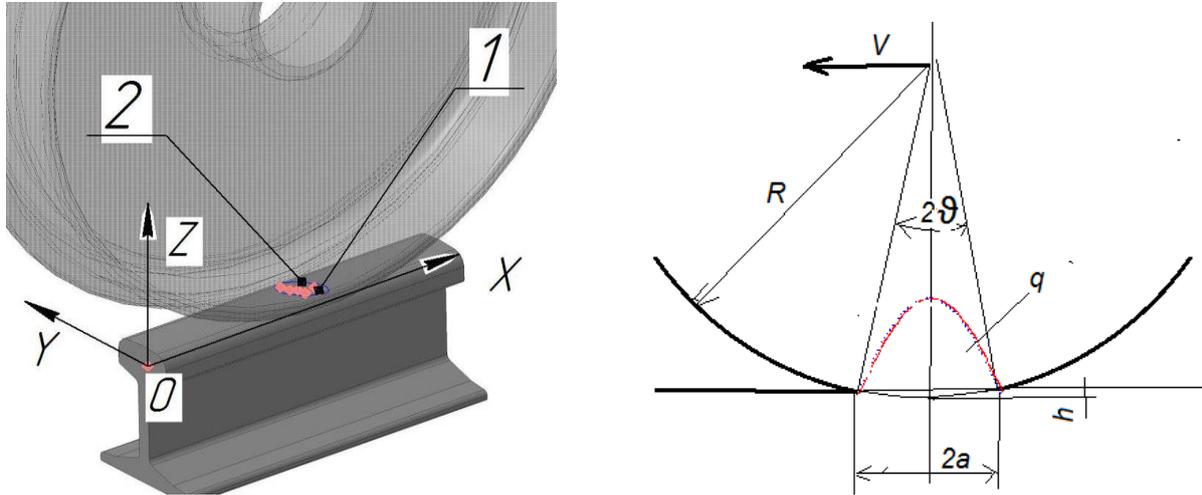


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения нагрузок при контакте двух тел

Колесо радиусом R контактирует с рельсом деформируясь и вдавливаясь на глубину h , при этом площадка контакта будет в форме прямоугольника с размерами $2a$ и $2b$.

Неупругие сопротивления при взаимодействии принимаем в форме, предложенной Е.В. Сорокиным, в форме комплексного модуля упругости [Сорокин, Е.С., 1960]

$$E = E_0(1 + i\gamma)$$

где γ – циклический коэффициент поглощения энергии, связанный с коэффициентом поглощения энергии и декрементом затуханий соотношением

$$\gamma = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{\delta_3}{\pi}$$

где $\psi = \frac{\Delta W}{W}$ – коэффициент поглощения энергии, W – энергия цикла колебаний, ΔW – рассеянная энергия, δ_3 – декремент затуханий.

Считается, что учет неупругих сопротивлений в форме [Сорокин, Е.С., 1960] для стали лучше согласуется с экспериментом, чем учет согласно гипотезе Фохта.

Для нашего случая взаимодействия это будет выглядеть как

$$p = p_0(1 + i\gamma)\sqrt{1 - \xi_a^2}$$

Поскольку считаем, что в поперечном направлении движение колеса отсутствует, проинтегрируем уравнение. Кроме того, принимая движение вдоль оси x гармоническим и приведя комплексную форму к гармоническому виду, получим текущее значение усилия на площадке контакта

$$q = 2p_0(1+i\gamma)ba\sqrt{1-\xi_a^2}$$

Заменяя $\sqrt{1-\xi_a^2}$ приближенным значением $\sin \varphi$ ($\varphi \in 0.. \pi$), приведя комплексное число к гармоническому виду, получим

$$q = 2p_0ab\sqrt{(1+\gamma^2)}\sin(\varphi+\theta); \theta = \operatorname{atan}\left(\frac{\gamma}{1}\right); \varphi \in 0.. \pi$$

Набегание колеса на рельс в пределах площадки контакта происходит по закону

$$y = h\sin \varphi$$

где, как следует из рис. 2,

$$h = R(1 - \cos \varphi) \quad \vartheta = \arcsin\left(\frac{a}{R}\right)$$

Энергия, теряемая колесом за время прохождения площадки контакта

$$A = \int_0^\pi q dy = 2p_0abh\sqrt{1+\gamma^2} \int_0^\pi \sin(\varphi+\theta) \cos \varphi d\varphi$$

Или после интегрирования и преобразований

$$A = \pi p_0abh\sqrt{1+\gamma^2} \sin \theta$$

Продолжительность цикла нагружения площадки контакта

$$T = \frac{2a}{V_1}$$

где V_1 – поступательная скорость движения оси колеса.

Тогда энергия, теряемая в единицу времени

$$N = \frac{A}{T} = \frac{\pi}{2} p_0 V_1 b h \gamma \sqrt{1+\gamma^2} \sin \theta$$

Дополнительно учет расходуемой колесом энергии определяется сдвиговыми нагрузками на пятне контакта (тяговое усилие локомотива, сопротивление в подшипниковых узлах колес).

В практике расчетов сопротивлений получило распространение понятие коэффициента сопротивлений

$$f = \frac{NR}{V_1 Q}$$

Подставляя значения a и h , получим

$$f = 36,19\gamma \sqrt{\frac{Q}{2b} D_1 \frac{1-\mu^2}{E_{np.}}}$$

где D_1 - диаметр колеса; $E_{np.}$ – приведенный модуль упругости материала колеса и рельса; μ – приведенный коэффициент Пуассона.

Тогда сопротивление движению колес будет

$$S = \frac{fQ}{R}$$

Для случая, когда колесо катится по рельсу, головка которого имеет выпуклую форму, площадка контакта будет иметь эллиптическую форму, а выражения для максимальных нагрузок (напряжений), для полудлины и полуширины площадки контакта будут иметь иной вид.

Эта зависимость необходима для расчета сцепления колеса с рельсом, режимов тяги и торможения, условий схода колесных пар с рельсов, возникновения боковых сил при прохождении кривых малого радиуса, прогнозирования темпов изнашивания и т.д.

Выводы. Установление зависимостей сопротивления движению локомотива от условий контакта выходных звеньев и рельсового пути, физико-механических свойств и формы контактирующих поверхностей, а также определение их численных значений позволит оценить резервы повышения использования силы тяги и выработать меры, направленные на их реализацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Біліченко, М.Я. Транспорт на гірничих підприємствах / М.Я. Біліченко, Г.Г. Півняк, О.О. Ренгевич [та ін.]. Підручник для вузів. – 3-є вид. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 636 с.
2. Скріпченко, М.Б. Контактна взаємодія складнопрофільних деталей машинобудівних конструкцій з урахуванням локальної податливості поверхневого шару: автореф. дис.... к-та техн. наук: 05.02.09: захищена 16.03.16 / Н.Б. Скріпченко – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – 24 с.
3. Франчук, В.П. Фрикционные свойства пары колесо-рельс / В.П. Франчук, К.А. Зиборов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції 31 травня – 3 червня 2016 р. – Краматорськ: ДДМА, 2016. – С. 91.

REFERENCES

1. Bilichenko, M. Ja., Pivnyak, G.G., Rengevich, O.O. [and others] (2005), *Transport na girnychykh pidpryemstvakh* [Transport on mine enterprises], NMU, Dnipropetrovsk, UA.
2. Skripchenko, M.B. (2016), «Contact co-operation of complex-profile details of machine-building constructions taking into account local pliability of superficial layer», Abstract of Ph.D. dissertation, 05.02.09, NTU «KhPI», Kharkiv, UA.

3. Franchuk, V.P. and Ziborov, K.A. (2016), «Friction properties of pair wheel-rail», *Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku* [Heavy engineering. Problems and prospects of development], *Materialy XIV Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* [Materials of the XIV International scientific and technical conference], Kramatorsk, UA, 31 May – 3 June 2016, p. 91.

Об авторах

Франчук Всеволод Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и инжиниринга, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепр, Украина, franchuk@nmu.org.ua

Зиборов Кирилл Альбертович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой основ конструирования механизмов и машин, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепр, Украина, ziborov@nmu.org.ua

About the authors

Franchuk Vsevolod Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Professor of the Department of Mining Machines and Engineering, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepr, Ukraine, franchuk@nmu.org.ua

Ziborov Kirill Albertovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor, Head of Department of Machinery Design Fundamentals, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepr, Ukraine, ziborov@nmu.org.ua

Анотація. На основі теорії взаємодії тіл з рухомою точкою контакту розглянуто формування опору при вільному коченні рейкового колісного транспорту по плоскому рейці з урахуванням реологічних властивостей матеріалу контактуючих тіл. З урахуванням непружних опорів при взаємодії контактуючих тіл, представлених у формі комплексного модуля пружності, отримано аналітичні залежності для визначення поточного значення зусилля на плямі контакту; енергії, що втрачається колесом за час проходження площадки контакту; коефіцієнта опору при вільному коченні з урахуванням фізико-механічних властивостей контактуючих поверхонь. Отримані результати залежності опору руху локомотива від умов контакту вихідних ланок і рейкового шляху, фізико-механічних властивостей контактуючих поверхонь, а також визначення їх чисельних значень дозволить оцінити резерви підвищення використання сили тяги і розробити заходи, спрямовані на їх реалізацію.

Ключові слова: опір руху, пляма контакту, напруження.

Abstract. Based on the theory of rigid bodies interaction with a contact moving point the formulation of the rolling wheel resistance along flat rail is studied. Taking into account the rheological properties of the contacting bodies material, the obtained inelastic resistance within interaction area of contacting bodies presented in the form of complex elastic modulus. The analytical dependences for determining the current value of resistance in the contact area is obtained. The energy loss during wheel skid in the contact area, friction coefficient while free rolling are calculated taking into account the physical and mechanical properties of the contacting surfaces. The relations of the motion resistance in dependence on on the contacting bodies and the track, physical and mechanical properties of the contact surfaces, as well as the determination of their numerical values allow evaluating the reserve of the tractive effort and allow implementing the results.

Keywords: motion resistance, contact patch, stress, strain.

Статья поступила в редакцию 15.12.2016

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым