

УДК 656.032

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА «КОЛЕСО-РЕЛЬС» ПО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПУТИ НА МАШИНЕ ТРЕНИЯ**

Канд. техн. наук С.В. Воронин, инж. С.С. Карпенко, асп. Е.Н. Коростелёв

**МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТУ «КОЛЕСО-РЕЙКА» ПО БОКОВІЙ ПОВЕРХНІ КОЛІЇ НА МАШИНИ ТЕРТЯ**

Канд. техн. наук С.В. Воронін, інж. С.С. Карпенко, асп. Є.М. Коростельов

**SIMULATION OF «WHEEL-RAIL» CONTACT ON THE SIDE OF THE ROAD BY CAR FRICTION**

Candidate of techn. sciences S.V. Voronin, engineer S.S. Karpenko, graduate student Y.N. Korostelyov

*Рассмотрена задача контакта двух упругих тел, имеющих одинаковые характеристики упругости. Получены геометрические параметры моделей колеса и рельса, а также рассчитаны значения нагрузки модели колеса на модель рельса для испытаний на машине трения.*

*Ключевые слова:* контакт, модель, нормальная задача, радиус кривизны поверхности, машина трения.

*Розглянуто задачу контакту двох пружних тіл, які мають однакові характеристики пружності. Отримано геометричні параметри моделей колеса та рейки, а також розраховані значення навантаження моделі колеса на модель рейки для випробування на машині тертя.*

*Ключові слова:* контакт, модель, нормальна задача, радіус кривизни поверхні, машина тертя.

*The problem of contact of two elastic bodies that have the same characteristics of elasticity. The recalculation was made of real parameters in laboratory, which in turn will provide the dimensions of the real models of wheel and rail.*

*Derived geometric parameters of wheel and rail models, as well as the calculated load value model wheels on the rail model for car friction. The value of normal stress on roller has a real look and can serve as a proof that the studies will be maximally approximated to real conditions of loading of wheel and rail between the lateral surface of the rail and the surface of the wheel in a curvilinear section of subway.*

*Key words:* contact, task, standard model, the radius of curvature of the surface friction machine.

**Введение.** Механика контактного взаимодействия колеса и рельса – это раздел науки о связях между напряжениями, крипом и геометрическими параметрами системы «колесо - рельс». Пользуясь ранее накопленным опытом в данном разделе науки и применяя его на практике, мы смоделируем контакт, который возникает между боковой поверхностью головки рельса и гребнем колеса при движении тележки подвижного состава в криволинейном участке пути метрополитена.

Задача контакта качения двух упругих тел, имеющих одинаковые характеристики упругости, как это имеет место для колеса и рельса, может быть представлена отдельно в виде нормальной и тангенциальной задач.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ последних исследований и публикаций показал, что Г. Герц впервые рассмотрел контактную задачу и дал надёжное математическое решение нормальной контактной задачи. Результаты этих исследований широко применяются для решения контактных задач, в частности в области контакта двух упругих тел, имеющих одинаковые характеристики упругости, как это имеет место для колеса и рельса.

**Цель исследований.** Цель данной работы заключается в решении задачи контакта двух упругих тел, получении геометрических параметров моделей колеса и рельса, а также в нахождении значения нагрузки, которая

передається в умовах испытаний на машині трення, с моделі колеса на модель рельса.

**Основной материал.** Г. Герц дал перше надійне математичне рішення нормальної задачі, котра формулюється наступним образом. Два ненагруженні тіла (поверхності катання колеса і рельса) касаються в одній точці (рис. 1).

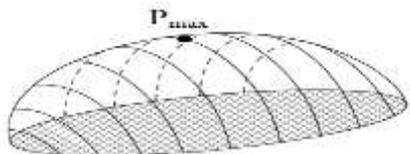


Рис. 1. Розподіл нормальних герцевських напружень на площадці контакту

Коли колесна пара рухається в кривій, при певному куті набігання колесо може контактувати з рельсом в двох різних точках [1]. Двухточечний контакт призводить до утворення двох площадок контакту: А на поверхні катання рельса і В на боковій поверхні головки рельса в районі выкружки (рис. 2).

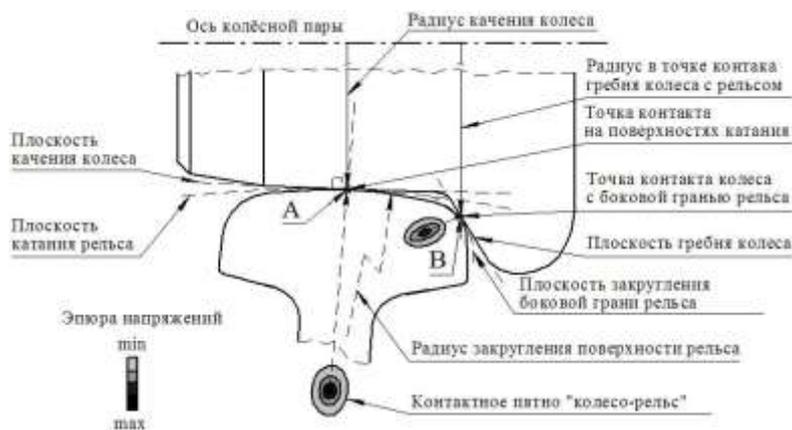


Рис. 2. Визначення радіусів взаємодіючих площадок контактування колеса і рельса

В точці контакту бокової поверхні рельса і гребня колеса во время руху по криволинійному участку шляху виникає нормальна сила реакції рельса на тиск гребня  $N_2$ , котра в силу еластичності контакту «колесо-рельс» дорівнює  $F$  – нормальній силі навантаження рельса  $N_2 = F$ . Її вертикальна складова  $V$  прагне перемістити колесо, котре рухається, вгору по боковій поверхні рельса, а горизонтальна складова

Если в області контакту має місце один радіус кривизни поверхності, то для визначення площадки контакту можна використовувати рішення Герца. Если в області контакту мають два або декілька радіусів кривизни, наприклад  $r_{11}$  і  $r_{12}$  (рис. 3), рішення Герца несправедливо, і для визначення площадки контакту слід використовувати негерцевське рішення. Это особливо важно при різноманітних комбінаціях зношених профілів колеса і рельса.

С метою отримання максимально-точних результатів, необхідно смоделивати контакт колеса і рельса так, щоб умови досліджень відповідали реальним умовам контактування колеса з рельсом во время руху подвижної одиниці в криволинійному участку шляху. Для цього в даній роботі було виконано перерахунок реальних параметрів контакту на лабораторні, що в свою чергу дасть можливість отримати розміри реальних моделей колеса і рельса.

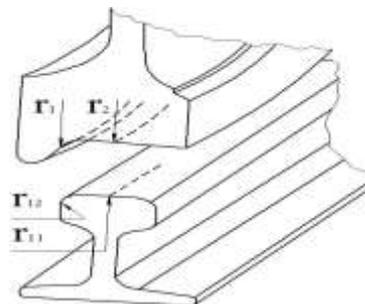


Рис. 3. Геометрія контакту колеса і рельса:  $x, y, z$  – осі системи координат;  $r_1, r_2, r_{11}, r_{12}$  – характерні радіуси контактуючих поверхностей

$Y_n$  направляє екіпаж рельсової колії і називається направляючою силою (рис. 4).

Виразення для направляючої сили через бокову силу має вигляд [2]

$$Y_n = \frac{tg\beta}{tg\beta - \mu}, \quad (1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя між колесом і рельсом (для даної схеми приймається  $\mu = 0,25$ ).

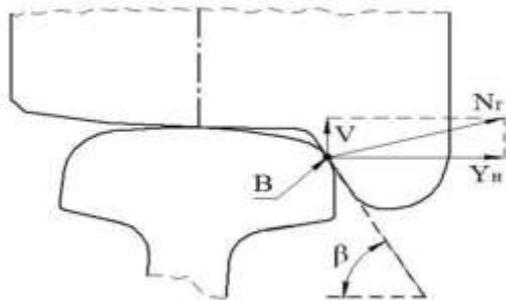


Рис. 4. Схема сил взаємодії між колесом і рейсом в точці В

Во время движения вагонов метро в криволинейных участках пути на внешний рельс действуют боковые силы  $Y_b$ , величина которых зависит от центростремительного непогашенного ускорения  $\alpha_{нп}$  [3]:

$$Y_b = \alpha + B_{нп} \cdot \alpha_{нп}, \quad (2)$$

где  $\alpha = 4200$  кгс – эмпирическая величина с графика-паспорта действия боковых сил тележки вагона метро;

$B_{нп} = 1700$  кгс/см<sup>2</sup> – эмпирический коэффициент;

$\alpha_{нп}$  – величина непогашенного центростремительного ускорения [ $\alpha_{нп}$ ] = 0,7 м/с<sup>2</sup>.

Пользуясь формулой (2) получим

$$Y_b = 5390 \text{ кгс} = 52857,84 \text{ Н.}$$

Величина направляющей силы

$$Y_n = 61774,48 \text{ Н.}$$

Из рис. 4. следует, что нормальную силу реакции рельса на давление гребня  $N_r$  получим, решив следующее уравнение:

$$N_r = \frac{Y_n}{\sin \beta}. \quad (3)$$

Нормальная сила реакции рельса на давление гребня колеса вагона метро  $N_r = 71333$  Н.

Максимальное контактное напряжение  $P_{max}$  может быть рассчитано по формуле [4]:

$$P_{max} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F \cdot E^2}{2 \cdot \pi^3 \cdot r_e^2 \cdot (1 - \nu^2)^2}}, \quad (4)$$

где  $F$  – нормальная сила нагружения колеса и

рельса, которая равна нормальной силе реакции рельса на давление гребня  $F = N_r = 71333$  Н;

$E$  – модуль упругости материала,  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па;

$r_e$  – эквивалентный радиус, зависящий от характерных радиусов взаимодействия колеса и рельса в месте контакта;

$\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\nu = 0,3$ .

Вычислим эквивалентный радиус контактирующих поверхностей по формуле:

$$r_e = \sqrt{r_k \cdot r_p^{гол}}, \quad (5)$$

где  $r_k$  – радиус кривизны поверхности катания колеса [5],  $r_k = 0,400$  м;

$r_p^{гол}$  – радиус кривизны поверхности катания головки рельса,  $r_p = 0,015$  м.

Эквивалентный радиус поверхностей  $r_e = 0,0775$  м.

Подставляя полученное значение эквивалентного радиуса поверхностей в (1) имеем  $P_{max} = 3129,49$  МПа.

Зная величину максимального напряжения, можно решить обратную задачу. В этом случае, если задать величину нагрузки усилием, которое развивает машина трения СМЦ-2, то мы сможем рассчитать величину эквивалентного радиуса кривизны контактирующих поверхностей.

В случае обратной задачи формула (1) будет иметь следующий вид:

$$r_e = \sqrt[2]{\frac{3 \cdot F \cdot E^2}{P_{max}^3 \cdot 2 \cdot \pi^3 \cdot (1 - \nu^2)^2}}. \quad (6)$$

Принимая для расчётов усилие нагрузки равное  $F = 1500$  Н, имеем  $r_e = 0,011$  м.

Положим, что отношение радиусов кривизны контактирующих поверхностей составляет 26,67 ( $r_k/r_p = 0,400/0,015 = 26,67$ ), то можно решить данное уравнение обозначив один из радиусов переменной  $x$ .

$$r_e^2 = x \cdot 26,67 \cdot x, \text{ откуда } x = 0,002 \text{ м.}$$

Рассчитаем радиус ведущей модели (поверхность гребня колеса)  $r_k = 0,053$  м, а радиус поверхности ведомой модели (боковая поверхность головки рельса)  $r_p^r = 0,002$  м.

Исходя из конструкционных соображений, необходимо принять рациональное значение моделей:  $r_k = 0,04$  м,  $r_p^r = 0,010$  м.

Выполним перерасчёт нагрузок для проведения исследований на машине трения:

$$r_p^r = 0,01 \text{ м.}; \quad r_k = 26,67 \cdot 0,01 = 0,267 \text{ м.}$$

$$r_e = \sqrt{0,010 \cdot 0,267} = 0,052 \text{ м.}$$

Формула для определения нагрузки на машине трения будет иметь вид:

$$F_m = \frac{P_{\max}^2 \cdot 2 \cdot \pi^3 \cdot r_e^2 \cdot (1 - \nu^2)^2}{3 \cdot E^2}, \quad (7)$$

Полученное значение нормальной нагрузки на ролик  $F_m = 31740$  Н имеет реальный вид и может послужить доказательством того, что проведённые исследования будут максимально приближёнными к реальным условиям нагружения колеса и рельса между боковой

выкружкой рельса и гребнем колеса в криволинейном участке пути метрополитена.

### Выводы:

1. Исходя из геометрии контакта колеса и рельса при расчете действующих напряжений для рассмотренных условий контактирования гребня колеса и боковой выкружки рельса может быть использовано решение контактной задачи Герца. В этом случае рассматривается контакт упругих цилиндрических тел, одно из которых имеет радиус кривизны боковой поверхности рельса в точке контакта, а другое – радиус кривизны поверхности гребня колеса.

2. В ходе решения герцевской задачи были рассчитаны значения действующих напряжений в контакте «колесо-рельс» в криволинейном участке пути метрополитена.

3. Полученные результаты расчетов позволяют смоделировать исследуемый точечный контакт на машине трения СМЦ-2. Также были рассчитаны геометрические параметры моделей колеса и рельса и величина внешней нагрузки прикладываемой в зоне контакта колеса и рельса.

### Список использованных источников

1. Коган, А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом [Текст] / А.Я.Коган. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с.
2. Даніленко, Е.І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом [Текст]: підручник для вищих навчальних закладів; у 2-х т. / Е.І. Даніленко. – К.: Інпрес, 2010. – Том 2. – 456 с.
3. Овчинников, О.О. Підвищення ресурсу підрейкових підкладок на криволінійних ділянках залізничної колії метрополітену шляхом застосування пластичного змащення [Текст]: дис... канд. техн. наук 05.22.06 / О.О. Овчинников. – К.: ДЕГУТ, 2012. – 200 с.
4. Харрис, У. Дж. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса [Текст]: пер. с англ. / У. Дж. Харрис, С. М. Захаров, Дж. Ландарен, Х. Торне, В. Эберсен. – М.: Интеест, 2002. – 408 с.
5. Сементовский, Э.А. Устройство и ремонт электропоездов метрополитена [Текст] / Э.А. Сементовский, А.А. Богданов, В.С. Гусев, Ю.Я. Могильнер. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор Н.П. Ремарчук

Карпенко Сергій Степанович, перший заступник генерального директора КП «Харківський метрополітен».

Тел.: (057) 731-59-83.

Воронін Сергій Володимирович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Української державної академії залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-66. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Коростельов Євген Миколайович, аспірант кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-25.

Karpenko Sergey, First deputy general director KP "Kharkov metropoliten". Tel.: (057) 731-59-83

Voronin Sergey, cand. techn. sciences, associate professor, manager of department of build, travel and freight-unloading machines. Ukrainian state academy of railway transport. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Korostelyov Eugenie, graduate student of department of build, travel and freight-unloading machines. Ukrainian state academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-25.