УДК 531.01

**РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСА**

**А.В. Костарев**

*Санкт - Петербургский государственный политехнический университет.*

*Санкт – Петербург, Россия*

***Аннотация.***  *Предложены способы экспериментального определения коэффициентов трения качения и сопротивления дороги. Учет сопротивления дороги позволяет исследовать режимы движения колеса, которые не могут быть описаны в рамках традиционной модели трения качения [1-5].*

***Ключевые слова***: *трение качения, сопротивление дороги, буксование, качение, юз.*

Как показано в работе [6], при качении колеса возникает не только момент трения качения колеса, но и сила сопротивления дороги. Абсолютно твердое колесо не испытывает момента трения качения. Абсолютно твердая дорога не создает силы сопротивления. Для любой пары материалов можно составить две пары колесо – дорога, для каждой из которой могут быть экспериментально определены два коэффициента сопротивления: коэффициент трения качения *k* и коэффициент сопротивления дороги *k1*. Определить коэффициенты *k* и *k1* можно с помощью, например, следующих двух экспериментов.

Изготавливается плита из материала дороги и цилиндр из материала колеса. Подбирается смазка, обеспечивающая минимальный коэффициент трения скольжения для выбранной пары материалов колеса и дороги. Измеряется радиус колеса *r* и коэффициент трения скольжения *f* между торцом цилиндра и плитой.

**А**. Для определения коэффициента трения качения *k* неподвижная ось цилиндра нагружается силой Р. Измеряется момент М, необходимый для равномерного вращения цилиндра. Коэффициент трения качения вычисляют из условия равновесия

**В**. Для определения коэффициента сопротивления дороги *k1*вращение цилиндра

блокируется. Измеряется усилие F, необходимое для равномерного поступательного движения цилиндра. Коэффициент сопротивления дороги k1 вычисляется из условия равновесия.

Учет сопротивления дороги позволяет более полно описать режимы движения колеса.

**F**

r

r

δ1

δ

С

M, ψ

**P**

Рис.1

**N≈ P**

**Fтр**

x

Рассмотрим колесную пару с параметрами: *r* - радиус колес пары, *m* - масса (например, автомобиля или поезда), приведенная к оси пары, *J* - момент инерции пары относительно ее оси.

Нагрузка на колесную пару в общем случае состоит из вертикальной силы ***Р***, горизонтальной силы ***F***и вращательного момента *М* (Рис.1). Считаем, что коэффициенты трения скольжения *f*, трения качения *k* и сопротивления дороги определены опытным путем.

Исследуем режимы движения колесной пары, пользуясь дифференциальными уравнениями, полученными в [1]:

(3)

1. **Покой**
   1. Условия:
   2. Уравнения покоя   
        
       Определяем силу трения и смещения ,
   3. Сила трения обращается в ноль при , а также, как и следовало ожидать, для ведущего колеса (*F =* 0) на твердой дороге ( (Рис.2) и ведомого (*М =*0) твердого ( =0) колеса (Рис.3).

M

**Fтр**

F

r

r

**F**

**P**

**N**

Рис.4

**F**

**Fc**

**N**

**P**

Рис.3

Рис 2

**Mψ**

**N**

δδ

**P**

* 1. Скольжение начинается при
  2. Смещения , ри

когда деформация дороги и колеса симметрична относительно центральной вертикали и сопротивление отсутствует (Рис. 4)

1. **Буксование на месте.**

Этот практически важный режим невозможен в традиционной модели трения качения.

* 1. Условия:
  2. Уравнения движения
  3. Определяем ускорение и смещение
  4. Из условия находим ограничение на нагрузку или коэффициент трения скольжения для поддержания режима.

* 1. Вращение будет равномерным при
  2. Центр колеса начинает движение и колесо переходит в режим качения с буксованием при

1. **Движение с пробуксовкой (разгон)**
   1. Условия:
   2. Уравнения движения
   3. Равномерное движение при
   4. Режим со временем перейдет к чистому качению при
2. **Чистое качение**
   1. Условия:
   2. Уравнения движения:
   3. Определяем силу трения и ускорение
   4. Проекция силы трения меняет свой знак при
   5. Буксование начнется при
   6. Юз начнется при
   7. Колесо будет катиться равномерно при

**5. Движение с юзом (торможение).**

* 1. Условия:

5.2 Уравнения движения:

* 1. Вращение со временем прекратиться и колесо перейдет в режим юза без вращения при

**6. Юз без вращения.**

* 1. Условия:
  2. Уравнения движения:
  3. Определяем смещениеи ускорение
  4. Смещение обращается в ноль при
  5. Вращение колеса начинается при
  6. Колесо будет двигаться поступательно и равномерно при

**7. Юз с обратным вращением**

Обруч радиуса r бросают вдоль дороги с начальной скоростью центра , придав ему обратное вращение со скоростью . Коэффициент трения *f* , коэффициенты сопротивления и .

*x*

***ωо***

*m****g***

***Fтр***

***mтк***

***N***

***Vо***

***Fc***

Рис.5

Найти угловую скорость , при которой движение центра и вращение обруча прекратятся одновременно. Найти когда и где это произойдет.

Решение:

При движении обруча сила трения , момент трения качения и сила сопротивления не изменяются по модулю

Уравнения движения обруча

(6)

(7)

Интегрируя уравнения при начальных условиях , находим

В момент времени

центр обруча останавливается. Чтобы одновременно прекратилось и его вращение, нужно чтобы модуль начальной угловой скорости был равен

К этому моменту центр обруча пройдет путь:

Заметим, что при отсутствии трения скольжения обруч все же остановится на расстоянии

что в традиционной модели трения качения невозможно.

**8. Увеличение силы тяги локомотива.**

Рассмотрим колесную пару локомотива, на которую действуют: нагрузка на ось ***P,*** нормальная реакция **N,** вращательный момент *М* со стороны двигателя, приведенная сила *F* со стороны состава, сила сопротивления ***Fc*** со стороны рельсов, момент трения качения *mтк*, ведущая сила трения ***F****тр*,

Найдем при каких условиях локомотив создаст максимальную силу тяги *F*, действующую на состав в момент начала буксования ( при равномерном движении состава.

*x*

*ω*

***P***

***Fтр***

*m****тк***

***N***

***V***

***Fc***

Рис.6

***F***

*M*

Уравнения равномерного движения колесной пары:

Очевидно, что момент сопротивления качению пары без проблем преодолевается моментом *М* двигателя локомотива, который машинист должен поддерживать на уровне:

(15)

Поэтому колеса локомотива могут быть изготовлены из материала с относительно большим коэффициентом . Увеличение коэффициентов  и увеличивает площадь контакта и улучшает сцепление колеса с рельсом.

Увеличение силы тяги *F* локомотива

достигается повышением твердости рельсов, то есть уменьшением коэффициента их сопротивления .

**Литература**

1. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики, т.1. М.: Наука, 1982. 352с.
2. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. СПб: Лань, 1998. 729с.
3. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 2003, 719с.
4. Курс теоретической механики. // Под ред. Колесникова К.С. М.: МГТУ, 2000. 735с.
5. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Ч.II.М.: Высшая школа, 1971.488 с.
6. Костарев А.В. Сопротивление движению колеса // «Вестник научно-технического развития: Интернет- журнал». - № 2 (30). - 2010.- <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=391> (дата обращения: 26.04.2010). – номер гос. регистрации: 0421000120\0006