РАЗДЕЛ II. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Заднепровский Р.П.

О коэффициентах трения качения тел различного физического состояния

НИИ инновационных технологий
(Россия, Волгоград)

doi: 10.18411/gdsn-25-12-2018-02

idsp: scienceconf-25-12-2018-02

Аннотация

Даны основы теории трения качения тел различного физического состояния с расчетными формулами определения коэффициентов трения качения для некоторых важнейших практических случаев.

Ключевые слова: коэффициент трения качения, адгезионно-когезионное взаимодействие тел, коэффициент буксования.

По Ш. Кулону сопротивление качению определяется соотношением Q_k/R , где Q нагрузка на цилиндрический каток радиусом R и k – коэффициент, называемый им плечом трения второго рода. Физически этот размерный коэффициент (м) отражает смещение силы тяжести (нагрузки) относительно оси вращения катка.

В ряде учебников и монографий величину k называют коэффициентом трения качения, что некорректно, поскольку коэффициент трения, как параметр механического КПД, может быть только безразмерной величиной. Величина R также не является физическим радиусом катка, вследствие его деформации.

Коэффициент трения качения f_k определяется для плоского движения как функция прочностных и реологических свойств пары качения (поверхность качения – каток) и величины площади контакта. Решение задач подобного рода [2-5] приводит к необходимости значительных упрощений при использовании уравнений связи прочностных, реологических и деформационных характеристик и потерь энергии при качении при наличии трудноопределимых опытных коэффициентов, в том числе и лишенных явного физического смысла. Неоднозначное влияние скорости V на трение качения не нашло достаточного объяснения (хотя увеличение V значительно изменяет величину коэффициента трения качения $-f_k$).

Деформационный подход [1] к решению задачи определения f_k на основании опытной величины – максимальной деформации Δ (взаимного сближения контактирующих тел или погружения катка в полупространство) требует уточнения для некоторых ранее выведенных зависимостей и предположений и может быть упрощен для практического использования. Эти вопросы рассматриваются ниже.

Первопричиной сопротивления трению является геометрическая неоднородность: изменение высоты и частоты неровностей (микрорельефа поверхностей тел качения как естественных, так и получаемых при деформациях качения). Только для абсолютно гладких поверхностей на первый план выступают адгезионно-когезионные силы ионно-молекулярного взаимодействия.

При числе идеализированных физических состояний контактирующих тел качения $m=5$: твердое (недеформируемое) – Т, пластичное – П, вязкое – В, упругое или эластичное – У(Э), - число наиболее важных практических состояний (при двух сочетающихся элементах: каток-1 и поверхность -2) $z=12$: У1-У2, Т1-У2, Т1-ВП2, Т1-П2, У1-ПУ2, УЭ1-Т2, УЭ1-П2, Т1-УП2, ПУ1-Т2, Т1-Т2, У1-У2. Известны варианты решения задач для пар качения Т1-Т2, ВУ-ВУ, Т1-УП2, У-УЭ, УЭ1-УП2, [1-6]. При наличии несжимаемой смазки структура уравнений трения качения не изменяется, а ограничения накладываются резким изменением трения скольжения - f . Важным

элементом теории качения является буксование (полное тли частичное). Коэффициентом буксования можно считать соотношение линейного пути центра вращения катка- L и числа оборотов n катка диаметром D за одно и тоже время t . Величина $L = \pi D n t$ и коэффициент буксования

$$K = L / \pi D n t \quad (1)$$

Величина $0 < K < 1$. Значение $K = 0$ соответствует полному буксованию. Буксование связано с коэффициентом трения скольжения.

Рассмотрим общий подход к определению f_k . В общем случае коэффициент трения качения включает геометрическую- составляющую f_0 , деформационно-скоростную- f_d и адгезионно-когезионную f_a (при существенном ионно-молекулярном или электромагнитном взаимодействии системы каток – поверхность качения).

При качении тела произвольной формы в любом сечении равновесное соотношение моментов движущей силы P и силы Q (нагрузки на каток) зависит от совместной деформации поверхности и катка- Δ_1 и Δ_2 при общей деформации Δ . Соотношение этих частных деформаций зависит от типа вышеуказанных физических состояний. При качении колесных движителей истинный радиус R колеса (вследствие деформации) отличается от среднего значения (при отсутствии нагрузки Q). Фактический радиус качения $R = R_0 - \Delta$, где величина Δ определяет точку приложения силы сопротивления трения (как опорную реакцию)– T параллельную движущей использованной силе - P , приложенной к центру колеса (см. рис.1). При трогании с места колесного агрегата общая сила $P = T + P_u$, где $P_u = ma$ - сила на преодоление инерции агрегата, зависящая от характеристики двигателя и режима его работы при запуске.

Например, при массе $Q/g = m = 200$ кг и времени разгона до скорости

$V = 5$ м/с, $t = 1-5$ с получаем ускорение $a = 1-5$ м/с² и инерционное слагаемое $P_u = 200 - 1000$ кг (максимальная мощность двигателя при трогании с места – около 5 кВт). При трогании с места необходимая сила трения скольжения- T должна иметь некоторое минимальное значение для исключения пробуксовки колеса. Из общего уравнение моментов относительно точки начального движения (см. рис.1) следует, что минимально необходимая движущая сила $P = T(\Delta + \Delta_1 \beta) / (R - \Delta) = T f_c$, откуда статический коэффициент трения качения P/T равен

$$f_c = (\Delta + \Delta_1 \beta) / (R - \Delta) \quad (2)$$

Коэффициент β - учитывает смещение координаты приложения силы трения. $T = Qf = qSf$ - сила трения скольжения, обеспечивающая начальный импульс силы сопротивления при трогании с места колесного движителя, q – удельное давление на плоскость в зоне контакта, Q - вес колесного агрегата, S - осредненная площадь контакта колесо- поверхность. В общем случае сила трения с учетом адгезионного контакта) $T = (qS_k + P_a S)f$, где S и S_k - площади истинного и кажущегося контакта, p_a = удельное значение адгезионно-когезионных сил, имеющих существенное значение, особенно при буксовании и трогании с места. Отметим, что при наличии выступов и специальных грунтозацепов на поверхности колес трение носит в основном когезионный характер, т.е. сопротивление трения, по существу определяется сопротивлением сдвига тонкого слоя поверхности грунта близко к середине Δ_1 - величины деформации поверхности ($\beta = 0,3 - 0,5 \Delta_1$). При достаточно прочной поверхности качения эта величина мала и, в основном, действуют адгезионные силы (прилипание за счет ионно-молекулярных и электромагнитных сил в тесном контакте). Адгезионная составляющая трения качения $f_a = p_a S / P$.

При трогании с места необходимая движущая сила и соответствующее относительное ускорение разгона a/g не может превышать, указанной выше силы трения скольжения- fQ . С учетом уравнения (2), получаем из соотношения трения от силы тяжести – Q и усилия для преодоления сил инерции - $P_{II} = ma$, (зависящей от времени разгона до заданной скорости движения) величину необходимого ускорения колесного агрегата :

$a = gff_c$. Если принять коэффициент трения скольжения $f = 0,2 - 0,5$, основной коэффициент трения качения $f_c = 0,01 - 0,05$ (при радиусе колеса $0,25 - 0,3$ м и деформациях Δ в пределах 1-2см), величина ускорения разгона

$$a = 0,1 - 0,5 \text{ м/с}^2.$$

Возможное проскальзывание при старте движения происходит по дуге АВ. При этом, полное проскальзывание происходит если $tg\alpha \geq f$ - коэффициента трения качения. Необходимое трение скольжения при трогании агрегата с места определяет время разгона $-t$ и ускорение a . Общая величина трения качения после разгона

$$f_k = (f_c + f_a)f + f_d, \quad (3)$$

где f_a - адгезионная и f_d - динамическая составляющая коэффициента трения качения. При равномерном движении величина $a=0$, но, периодически, ускорение может иметь существенную величину ввиду неровностей плоскости . Наличие аperiodических неровностей вызывает еще один вид сопротивления качению, из-за наличия микроударов выпуклостей обода колеса о выступы и частичное вертикальное виброперемещение

(фрикционные колебания, рассмотренные в работе [6]).

При стремлении катка выйти из колеи, задняя часть катка теряет связь с поверхностью, происходит его микроподъем с динамическим смещением реакции – N . При скорости $V=const$ минимальная величина коэффициента трения качения $f_c = x/(R - \Delta_1)$, а $f_c > x/y$. При движении со смещенной реакцией от давления на поверхность (см. рис.1) соотношение

$N/P = (f_c y - x)/(R - \Delta) = g/a$, где ускорение является мерой неравномерности колесного агрегата: $a = g(R - \Delta)/(f_c y - x)$, здесь g – ускорение земного притяжения.

При качении катка с произвольной формой сечения следует знать закон изменения координат центра тяжести

$$x_0 = \frac{1}{M} \int_{-\frac{b}{2}}^{x_0} dm x_j, \quad y_0 = \frac{1}{M} \int_{-\frac{a}{2}}^{y_0} dm y_j, \quad \text{где } M - \text{масса катка}.$$

Для цилиндрического катка угол $\varphi = \arccos(1 - \Delta/R)$ определяет величину общей деформации и соответствующую глубину колеи, когда происходит полное буксование – при $tg\varphi \geq f$. Передняя часть колеса непрерывно деформирует поверхность при образовании колеи глубиной - Δ , а часть этой деформации восстанавливается. Для абсолютно упругого тела обе деформации (вызывающие напряжение противоположного знака) взаимно компенсируются.

При движении по неровностям происходит дополнительное сопротивление движению, а частное дополнительное динамическое слагаемое коэффициента трения качения определяется средневероятностным соотношением [1]:

$$f_{d1} = (\lambda V)^2 (2\Delta R - \Delta^2) / gR^2 \quad (4)$$

Фактическое изменение окружной скорости - λV . Здесь λ - коэффициент потерь энергии при движении по существенных неровностях поверхности качения, Δ - осредненная глубина неровностей.

Золотаревская Д.И. [4] отмечает значительное снижение сопротивления движению при росте скорости от 1 до 5 м/с (в 2-2,5 раза). Опыты Кузнецова Н.Г.[3]

наоборот, показали рост сопротивления движению трактора МТЗ-52 при $V > 6 \text{ м/с}$ (при $V < 6 \text{ м/с}$ – сопротивление движению постоянно). Это связано с дополнительной потерей при преодолении существенных неровностей (что особенно заметно при больших скоростях) а также с ростом коэффициента буксования α при повышении скорости. Интенсивность роста α особенно значительно при увеличении тягового усилия. Для грунтовых поверхностей с величиной несущей способности $P_1 = (0,5 \div 3) 10^5 \text{ Н/м}^2$ коэффициент буксования $\alpha = 0,4 - 0,7$. Для твердых дорожных покрытий несущая способность на порядок выше. Колебания могут снизить коэффициент сцепления (трения) в 1,5-2 раза. Для влажных суглинков опытные значения силы прилипания (адгезии) $P_a \approx (1-100) 10^2 \text{ Н/м}^2$. При $P_a < 10 \text{ Н/м}^2$ величиной f_a можно пренебречь. Коэффициент трения с учетом буксования:

$$f = f_k(1-K) + f_c K \quad (5)$$

При полном буксовании ($K=1$) трение определяется только сопротивление скольжению обода колеса вокруг неподвижной оси.

Примерные значения частных коэффициентов с учетом формул (2-5)

для лолуэластичных колес транспортных агрегатов (для радиуса $R = 25-30 \text{ см}$) при деформациях колеса и поверхности качения 1- 2см, величине трения скольжения $f = 0,2-0,5$, $f_a = 0,3 - 0,07$, $f_d = 0,01-0,1$ и смещении $x = 1-2 \text{ см}$) дают итоговое значение коэффициента трения качения в диапазоне

0,08 -0,25 (большие значения для грунтовых поверхностей с неровностями). Расчетные значения f_k удовлетворительно согласуются с опытными данными автора и других исследователей [1-6]. В эластично-упругом колесе следует учесть деформацию закручивания обода – f_z . Величина $f_z \approx \mu f_k$. Опытное значение коэффициента $\mu = 0,02 \div 0,04$ (для стандартных шин).

Рис.1. К теории трения качения для деформирующихся пар колесо- поверхность качения

1. Заднепровский Р.П. Энергозатраты при движении катка и колесных движителей// Тракторы и сельхозмашины, 2011, №10.С.29-32
2. Ишлинский А.Ю. Механика. Идеи, задачи. приложения. М.:Наука, 1985. с.272-279.
3. Кузнецов Н.Г. Теория тягового баланса энергонасыщенных колесных тракторов при работе на тяжелых почвах засушливых зон. Волгоград: ВГСХА, 2004. с. 9-46.
4. Золотаревская Д.И. Контактные напряжения и деформации шин при качении эластичных колес.// Тракторы и с/х машины, 1989. №3. с. 19-23
5. Горячева И.Г. Контактная задача качения вязкоупругого цилиндра по основанию из того же материала//Прикладная математика и механика, 1973, т.37., вып.5
6. Заднепровский Р.П. О фрикционных колебаниях // Тракторы и сельхоз машины, 2009, №12. С.42-46