

СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ ВЕДОМЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КОЛЕС

Г.И. Гедроить, канд. техн. наук (БГАТУ)

Аннотация

Разработана математическая модель расчета силы сопротивления качению ведомых пневматических колес на основе объемного представления поверхности контакта шины и почвы. Учтена кривизна шин в радиальной плоскости.

A mathematical model for calculating the rolling resistance to the driven pneumatic tires is developed. It is made on the basis of volumetric representation of the surface contact of tires and soil. The curvature of the tire in the radial plane was taken into consideration.

Введение

При математическом моделировании процесса взаимодействия пневматического колеса с почвой наиболее распространены плоские расчетные схемы. Процессы взаимодействия рассматриваются в продольной плоскости колеса применительно к колесу единичной ширины. Значения показателей взаимодействия по ширине колеса принимаются постоянными. Следовательно, колесо представляется в виде цилиндра, а форма проекций поверхности контакта в поперечной и опорной плоскостях – в виде прямоугольников. Использование такого подхода в ряде ситуаций оправдано ввиду того, что позволяет упростить решение задачи. Однако возникают ситуации, когда необходимо более точно учитывать конструктивные особенности шин и форму поверхности контакта. Например, в работе [1] приведены экспериментальные данные, показывающие, что при минимальной кривизне шины 400-965 в поперечной плоскости (кривизна корректировалась с помощью нерастяжимых эластичных колец) значение максимальной глубины следа на почве уменьшилось на 29%. Ни одна модель на основе плоской расчетной схемы не позволяет учесть и оценить такой факт.

Расширение использования на сельскохозяйственной технике шин с пониженным давлением на почву, качение в ряде случаев колес по следу других сопровождаются небольшими значениями глубины следа (5-50 мм). При этом горизонтальная проекция поверхности контакта близка к форме пятна контакта на жестком основании и соответственно ближе к эллипсу, чем к прямоугольнику [2].

Детально описать математическими зависимостями профиль шины, конструкцию ее беговой дорожки, протекторной части, форму поверхности контакта очень сложно. Но изготовить для эксперимен-

тальных исследований образцы шин с варьированием значений отдельных конструктивных параметров также очень сложно и дорого. Поэтому математическое моделирование процесса взаимодействия колеса с опорной поверхностью является важным этапом при создании шин, при подборе их для конкретных машин. При этом возникает потребность в более точном описании исследуемых элементов.

В работе [3] показана целесообразность уменьшения кривизны шин в радиальной плоскости для снижения воздействия колес на почву. Задача решена на основе объемного представления поверхности контакта шины с почвой. Оценим влияние формы беговой дорожки шины на сопротивление качению ведомых колес.

Употребляемые по тексту термины «продольная», «опорная», «поперечная», «радиальная» плоскости приняты по ГОСТ 17697-72 [4].

Основная часть

Рассмотрим задачу взаимодействия ведомого колеса с почвой с учетом кривизны шин в продольной и радиальной плоскостях. Расчетная схема приведена на рис. 1. Линия $BMM'B'$ изображает беговую дорожку шины, а линии BCE и $B'C'E'$ - боковины шины. На колесо действуют нормальная нагрузка G , толкающая сила P и нормальные к поверхности контакта реакции почвы q . Влиянием касательных реакций в контакте и упругих деформаций почвы пренебрежем. Принимаем, что поверхность контакта состоит из плоской и криволинейной зон и, что криволинейная зона представляет собой часть эллиптического параболоида. Уравнение поверхности этого параболоида получено в виде [3]:

$$z = h + \lambda - \frac{y^2}{b_0^2 / \Delta} - \frac{x^2}{2R - h - \lambda}, \quad (1)$$

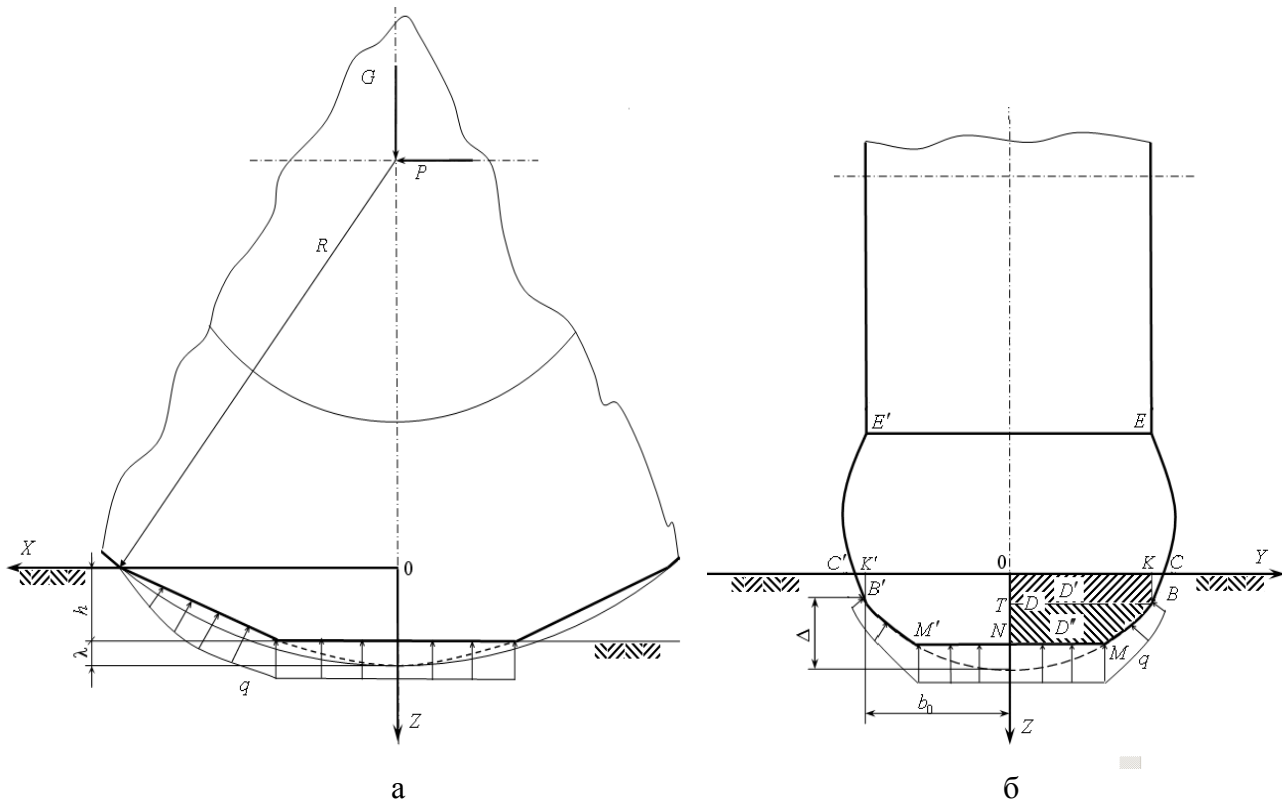


Рисунок 1. Расчетная схема взаимодействия колеса с почвой:
а – в продольной плоскости колеса; б – в радиальной плоскости колеса

где b_0 , Δ – характерные размеры шины, определяющие форму части ее профиля, контактирующую с опорной поверхностью. Для большинства шин $2b_0$ – ширина беговой дорожки, Δ – стрела дуги протектора (высота беговой дорожки). Для торообразных, оболочковых шин $2b_0$ – ширина профиля шины, Δ – половина высоты профиля шины. В частных случаях могут быть приняты промежуточные значения названных параметров:

- h – глубина следа;
- λ – деформация шины.

Силу сопротивления качения колеса представим в виде двух составляющих P_{fn} и P_{fsh} , учитывающих соответственно потери на деформацию почвы и шины:

$$P_f = P_{fn} + P_{fsh} \quad (2)$$

Составляющую сил сопротивления качению P_{fn} , обусловленную затратами на деформацию почвы, исходя из принятой расчетной схемы, найдем путем суммирования проекций нормальных реакций почвы на ось X:

$$P_{fn} = \iint_F q \cos \gamma_x dF,$$

где γ_x – угол, составляемый нормальными к поверхности контакта и осью X;

F – площадь криволинейной зоны контакта.

Так как элемент площади dF в проекции на плоскость YOZ дает элемент площади области D, то $\cos \gamma_x dF = dydz$.

Следовательно

$$P_{fn} = \iint_D q dydz,$$

где D – проекция криволинейной зоны контакта шины с почвой на плоскость YOZ.

На рис. 1,б область D определяется контуром KBMM'B'K' и ограничена прямыми линиями $z=0$, $z=h$ и параболой, уравнение которой исходя из выражения (1), в рассматриваемом случае имеет вид:

$$z = h + \lambda - \frac{y^2}{\frac{b_0^2}{\Delta}} \quad (3)$$

Разделим половину области D на области D', D'', определяемые соответственно контурами OKBT и TBMN.

Тогда

$$P_{fn} = \iint_D q dy dz = 2 \iint_{D'} q dy dz + 2 \iint_{D''} q dy dz. \quad (4)$$

В области D' переменные y и z изменяются в пределах:

$$0 \leq z \leq h + \lambda - \Delta;$$

$$0 \leq y \leq b_0.$$

В области D'' пределы изменения переменных следующие:

$$h + \lambda - \Delta \leq z \leq h;$$

$$0 \leq y \leq b_0 \sqrt{\frac{h + \lambda - z}{\Delta}}.$$

Найдем интегралы выражения (4). При этом предполагаем, что нормальные давления распределены по поверхности контакта в соответствии с функцией гиперболического тангенса [5]:

$$q = \sigma_0 th \frac{K}{\sigma_0} z,$$

где σ_0 – несущая способность почвы;

K – коэффициент объемного смятия почвы, приведенный к размерам колеса [6].

По области D' имеем:

$$\begin{aligned} \iint_{D'} q dy dz &= \int_0^{b_0} dy \int_0^{h + \lambda - \Delta} \sigma_0 th \frac{K}{\sigma_0} z dz = \\ &= \frac{b_0 \sigma_0^2}{K} \ln ch \frac{K}{\sigma_0} (h + \lambda - \Delta). \end{aligned}$$

По области D'' имеем:

$$\begin{aligned} \iint_{D''} q dy dz &= \int_{h + \lambda - \Delta}^h dz \int_0^{b_0 \sqrt{\frac{h + \lambda - z}{\Delta}}} \sigma_0 th \frac{K}{\sigma_0} z dy = \\ &= \frac{b_0 \sigma_0^2}{\sqrt{\Delta}} \int_{h + \lambda - \Delta}^h th \frac{K}{\sigma_0} z (h + \lambda)^{1/2} \left(1 - \frac{z}{h + \lambda}\right)^{1/2} dz. \end{aligned}$$

Используя разложение подынтегральных функций в сходящиеся степенные ряды и ограничиваясь двумя членами каждого ряда, приходим к выражению:

$$\iint_{D''} q dy dz = Kb_0 \sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}} \left(\begin{aligned} &h^2 - A^2 - \\ &\frac{h^3 - A^3}{3(h + \lambda)} - \frac{1}{6} \frac{K^2}{\sigma_0^2} (h^4 - A^4) + \\ &+ \frac{1}{15} \frac{K^2}{\sigma_0^2} \frac{h^5 - A^5}{h + \lambda} \end{aligned} \right),$$

где $A = h + \lambda - \Delta$.

Обозначив выражение в скобках через χ , получим:

$$\begin{aligned} P_{fn} &= 2 \frac{b_0 \sigma_0^2}{K} \ln ch \frac{K}{\sigma_0} (h + \lambda - \Delta) + \\ &+ \chi Kb_0 \sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Необходимые для вычисления значения h и λ определим при совместном решении уравнений [3]:

$$h = \frac{\sigma_0}{K} arth \frac{G_{nl}}{\pi b_0 \sigma_0 \lambda} \sqrt{\frac{\Delta}{2R - \lambda}}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} G &= \frac{\pi b_0 \sigma_0^2}{2K} \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \ln ch \frac{K}{\sigma_0} h + G_{nl} - \\ &- b_0 \sigma_0 \left(\sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}} - 1 \right) \sqrt{(2R - h - \lambda)(h + \lambda - \Delta)}. \end{aligned} \quad (7)$$

$$+ th \frac{5K}{9\sigma_0} (h + \lambda - \Delta),$$

где G_{nl} – часть нагрузки, воспринимаемая в плоской части контакта. Определяется по характеристикам шин на жестком основании. Ее значение зависит от размеров шины, нормальной нагрузки на колесо, давления воздуха в шине. Для некоторых шин, используемых на сельскохозяйственной технике, необходимые сведения приведены в работе [2].

Формулы (5), (6), (7) справедливы при $h + \lambda > \Delta$ и $\lambda \leq \Delta$. Если $h + \lambda \leq \Delta$, т. е. когда беговая дорожка шины не полностью погружается в почву, в указанных формулах принимается $h + \lambda - \Delta = 0$.

При $\lambda > \Delta$ плоская часть контакта имеет вид усеченного эллипса. В этом случае глубина следа и деформация шины определяются при решении уравнений, приведенных для аналогичного случая в работе [3]:

$$h = \frac{\sigma_0}{K}.$$

$$\cdot arth \frac{G_{nl}}{2b_0 \sigma_0 \sqrt{(2R - \lambda)\Delta} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}} - 1 + \frac{\lambda}{\Delta} \arcsin \sqrt{\frac{\Delta}{\lambda}} \right)}; \quad (8)$$

$$G = \frac{\alpha b_0 \sigma_0^2}{K} \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \ln ch \frac{K}{\sigma_0} h + G_{nl}, \quad (9)$$

где

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\begin{aligned} &arctg \frac{b_0}{\sqrt{(2R - h - \lambda)(h + \lambda - \Delta)}} + \\ &+ arctg \frac{b_0}{\sqrt{(2R - h - \lambda)(\lambda - \Delta)}} \end{aligned} \right).$$

Составляющая силы сопротивления качению P_{fn} в рассмотренном случае равняется:

$$P_{fn} = 2 \int_0^{b_0} dy \int_0^h \sigma_0 th \frac{K}{\sigma_0} zdz = \frac{2b_0\sigma_0^2}{K} \ln ch \frac{K}{\sigma_0} h. \quad (10)$$

Таким образом, значение составляющей силы сопротивления качению при $\lambda \leq \Delta$ определяется по формуле (5), при $\lambda > \Delta$ по формуле (10), а необходимые для расчетов значения глубины следа и деформации шины находим соответственно при решении уравнений (6), (7) и (8), (9).

Значение составляющей силы сопротивления качению $P_{fш}$ в выражении (2) найдем при допущении, что значение этой составляющей при качении по почве равняется силе сопротивления качению на жестком основании при деформации шины на величину λ . На основании рекомендаций [7] значение $P_{fш}$ определим по формуле:

$$P_{fш} = K_{ш} B_k \lambda, \quad (11)$$

где B_k – ширина плоской зоны контакта;

$K_{ш}$ – давление шины на дорогу при нулевом значении давления воздуха в шине.

Значение $K_{ш}$ определяется из выражения, полученного эмпирическим путем [7]:

$$K_{ш} = (0,1 \dots 0,15) P_w, \quad (12)$$

где P_w – давление воздуха в шине для дорог с твердым покрытием при допустимой деформации шин.

Исходя из выражения (3), получим:

$$\text{при } \lambda \leq \Delta \quad B_k = 2b_0 \sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}},$$

$$\text{при } \lambda > \Delta \quad B_k = 2b_0.$$

Расчеты по формулам (11), (12) достаточно приближенные. Так, например, отклонение значений $K_{ш}$ может достигать 50 %. Однако потери на деформацию шин при качении пневматических колес по почве значительно меньше потерь на деформацию почвы. Согласно [6], затраты мощности на деформацию шин составляют 5-6 % от общей мощности на качение эластичного колеса по грунту. По нашей оценке для ходовых систем с пониженным давлением на почву, при качении колес по следу

эти потери могут увеличиваться до 25-30 %. Однако в этой части нужны дополнительные исследования.

В то же время, выражения (11), (12) учитывают основные факторы, оказывающие влияние на силу сопротивления качению колес по твердому основанию [7]. Они не содержат эмпирических коэффициентов, для определения которых требуется специальное оборудование, например, стенды, позволяющие определять гистерезисные потери в шине при ее деформации [8]. Причем, полученные в таких опытах данные будут требовать адаптации к реальным условиям качения и другим шинам.

Оценим изменение силы сопротивления качению колеса в зависимости от значения стелы дуги протектора, характеризующей кривизну шин в радиальной плоскости. На рис. 2 приведен график указанной зависимости для шин типа 22/70-20. Расчет выполнен для случая качения колеса по слежавшейся пахоте при нормальной нагрузке на колесо 30 кН.

График показывает, что с уменьшением стрелы дуги протектора почти линейно снижается сила сопротивления качению. Уменьшение стрелы дуги протектора с 70 мм (серийная шина 22/70-20 мод. Ф-118) до 10 мм (почти плоская шина) позволило бы снизить силу сопротивления качению, в рассмотренных условиях, примерно в 1,3 раза.

Изложенные теоретические положения подтверждаются экспериментом. Выполненные исследования по определению силы сопротивления качению четырехколесной машины МТТ – 13 на шинах 1140x700 мод. Я-369 показали, что значение коэффициента сопротивления качению указанной машины в полевых условиях (слежавшаяся зябь, средний суглинок, влажность почвы 19,6 %) составляет 0,075. Значение

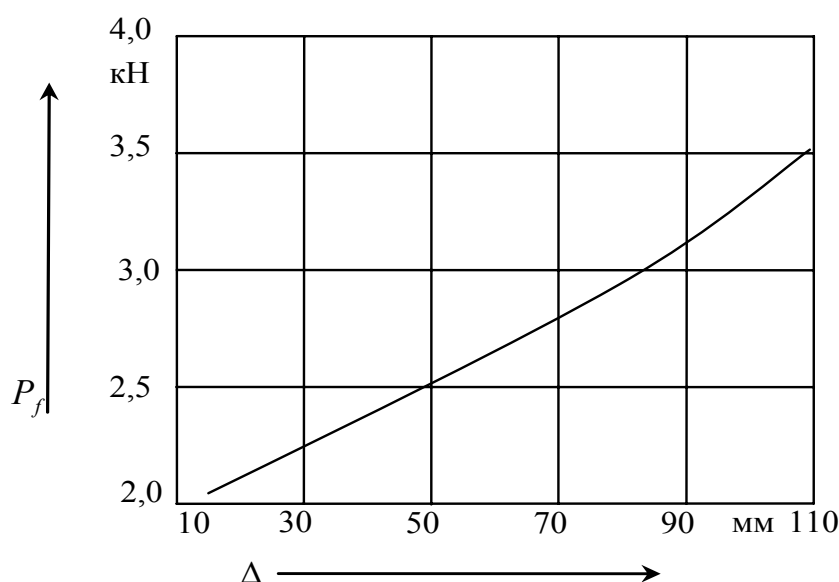


Рисунок 2. Зависимость силы сопротивления качению колеса от стрелы дуги протектора

коэффициента сопротивления качению для этой же машины на шинах 1140x700 мод. Я-170А составило 0,104, т.е. выше в 1,39 раза. Соответственно значение буксования агрегируемого трактора составило 8 и 11%. Шины имеют равные диаметр и ширину, но радиус кривизны беговой дорожки в радиальной плоскости у последней в 1,6 раза меньше. Значение стрелы дуги протектора для шины мод. Я-369 составляет 62 мм, для шины мод. Я-170А – 110 мм, т.е. форма беговой дорожки первой значительно ближе к плоской. Отметим, что у шин есть отличия в рисунке протектора, жесткости.

Аналогичные по характеру экспериментальные данные приведены в работе [9]. Установлено, что значение коэффициента сопротивления качению на рыхлой почве шины ANTOROS 49x23,5-21 LT меньше, чем шины Бел ОШ-1 1300x530-533 в 1,25 раза. Хотя шины отличались несколькими параметрами, авторы считают, что на результат преимущественно повлияла кривизна профиля в поперечном сечении шин. У шины ANTOROS указанная кривизна почти отсутствовала.

Приведенные экспериментальные данные подтверждают также высказанные во введении предположения о важности математического моделирования процесса взаимодействия шин с почвой, т.к. сложно подобрать объекты для «чистого» эксперимента, а изменение одного параметра шины, например, рисунка протектора, неизбежно влечет изменение других: жесткости, формы профиля и прочих.

Все необходимые для расчетов данные по шинам определяются из нормативной документации, путем несложных замеров или задаются для прогнозируемых шин. Сведения о значениях показателей свойств почвы для основных фонов приведены в [5,6].

Заключение

Разработанная математическая модель взаимодействия пневматического колеса с почвой позволяет определять силу сопротивления качению ведомого колеса в зависимости от значений диаметра шины, параметров профиля шины в радиальном сечении, нагрузки на ко-

лесо, деформации шины, давления воздуха, свойств почвы. Модель построена на основе объемного представления поверхности контакта шины с почвой.

Использование на сельскохозяйственной технике шин с плоской беговой дорожкой – эффективный путь снижения затрат на передвижение машин в полевых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Водяник, И.И. Улучшение работы тракторных шин / И.И. Водяник // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985, № 9. – С. 10-12.
2. Гедроить, Г.И. Опорные свойства шин для сельскохозяйственной техники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2009, № 4. – С. 23-27.
3. Горин, Г.С. Исследование колесобразования при качении ведомого колеса / Г.С. Горин, Г.И. Гедроить, И.Е. Юрты // Воздействие ходовых систем сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов на почву: сб. науч. трудов. – Горки, 1991. – С. 11-18.
4. Автомобили. Качение колеса. Термины и определения: ГОСТ 17697-72. – М.: Из-во стандартов, 1972. – 24 с.
5. Кацыгин, В.В. Основы теории выбора оптимальных параметров сельскохозяйственных машин и орудий / В.В. Кацыгин // Вопросы сельскохозяйственной механики. – Мн.: Урожай, 1964. – Т.13. – С.5-147.
6. Гуськов, В.В. Теория трактора/ В.В. Гуськов. – Мн.: Машиностроение, 1977. – 384с.
7. Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители/ Я.С. Агейкин. – М. Машиностроение, 1972. – 184с.
8. Скотников, В.А. Проходимость машин/ В.А. Скотников, А.В. Пономарев, А.В. Климанов. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 328с.
9. Тягово-цепные качества высокоэластичных шин сверхнизкого давления / С.Д. Зайцев [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2008. – №9. – С.29-31

Установка для очистки и обеззараживания воздуха БСУ-900



Установка предназначена для очистки воздуха от газовых примесей органического и неорганического происхождения в помещениях предприятий АПК, медицинских, общественных и других помещениях, в которых необходимо обеспечивать требования СНиП (аммиак, сероводород, углекислый газ и др.). Фильтр производит непрерывную очистку и обеззараживание помещений в присутствии обслуживающего персонала со степенью очистки по уровню общей загрязненности до 60%, по индексу Колли до 70%, по вирусам до 80%, позволяет экономить до 50% энергии на отопление помещений. Наиболее эффективен при использовании в помещениях для содержания молодняка птицы, свиней и крупного рогатого скота.

Производительность составляет 900 м³/ч.

Автор: Николаенков А.И., доктор сельскохозяйственных наук, доцент