

Секция «ТРАКТОРЫ, МОБИЛЬНЫЕ МАШИНЫ И КОМПЛЕКСЫ»  
УДК 629.3.027.514

СНИЖЕНИЕ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ КОЛЕС  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН НА ПОЧВЕ  
REDUCE OF RESISTING FORCE ON WHEEL ROLLING  
FOR AGRICULTURAL MACHINERY ON SOIL

Г.И. Гедроить, канд. техн. наук, доц.,  
Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
G. Gedroit, Ph.D. in Engineering, Associate professor  
Belarusian State Agrarian Technical University,  
Minsk, Republic of Belarus

*Аннотация. Предложена математическая модель расчета силы сопротивления качению ведомых пневматических колес на почве и анализ результатов аналитических исследований по влиянию на нее комплекса параметров шин. Учтена кривизна шин в поперечной плоскости.*

*Abstract. The material deals with the mathematical model for calculations of resisting force on driven pneumatic wheels on soil and with the evaluation of the results for analytical research on tire parameters set effect on it. Tire curving in roll rate is considered as well.*

*Ключевые слова: колесо, пневматическая шина, давление, сопротивление качению, машина, почва.*

*Key words: wheel, pneumatic tire, pressure, rolling resistance, machine, soil.*

## ВВЕДЕНИЕ

Шины тракторов, машин для сельского хозяйства постоянно совершенствуются. Разработки направлены на улучшение тягово-сцепных свойств шин, понижение уровня воздействия на почву, уменьшение материалоемкости. Важно использовать резервы улучшения показателей без существенного увеличения габаритов шин. Особенно это актуально для машинно-тракторных агрегатов, работающих с машинами для внесения органических и минеральных удобрений, прицепами, транспортировщиками рулонов. По одному следу

*Секция «ТРАКТОРЫ, МОБИЛЬНЫЕ МАШИНЫ И КОМПЛЕКСЫ»* проходит 4– 6 колес, давление на почву ходовых систем машин в 2– 3 раза превышает аналогичный параметр тракторов, а возможности увеличения диаметра и ширины шин ограничены условиями движения в дорожных условиях, компоновочными соображениями.

Математическое моделирование процесса взаимодействия колеса с опорной поверхностью является важным этапом при создании шин, при подборе их для конкретных машин, так как изготовление образцов шин с варьированием значений отдельных конструктивных параметров сложно и дорого. Этому вопросу посвящены работы известных ученых Гуськова В.В., Кацыгина В.В., Скотникова В.В., Бойкова В.П., Бобровника А.И., Агейкина Я.С., Русанова В.А., Орды А.Н. и др. В основном получили распространение 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, как указывалось выше, возникают ситуации, когда необходимо более точно учитывать конструктивные особенности шин и форму поверхности контакта.

Цель настоящей работы – учесть и оценить влияние увеличенного радиуса кривизны протектора в поперечной плоскости и улучшения деформационных свойств шин на изменение силы сопротивления качению колес с пневматическими шинами.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСА С ПОЧВОЙ И АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что форма пятна контакта шин с опорным основанием ближе к эллипсу, чем к прямоугольнику [1, 2, 3]. Принимаем, что поверхность контакта состоит из плоской и криволинейной зон, и что криволинейная зона представляет собой часть эллиптического параболоида, а плоская – эллипс (рисунок 1).

Уравнение поверхности этого параболоида получено в виде [4]:

$$z = h + \lambda - \frac{y^2}{b_0^2 / \Delta} - \frac{\chi^2}{2R - h - \lambda},$$

где  $b_0$ ,  $\Delta$  – характерные размеры шины, определяющие форму части ее профиля, контактирующую с опорной поверхностью,  $h$  – глубина следа;  $\lambda$  – деформация шины.

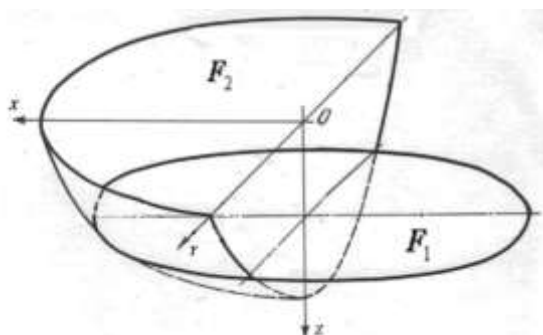


Рисунок 1 – Поверхность контакта шины с почвой

Для большинства шин  $2b_0$  – ширина беговой дорожки,  $\Delta$  – стрела дуги протектора (высота беговой дорожки). Для торообразных, оболочковых шин  $2b_0$  – ширина профиля шины,  $\Delta$  – половина высоты профиля шины. В частных случаях могут быть приняты промежуточные значения названных параметров;

На колесо действуют нормальная нагрузка  $G$ , толкающая сила и нормальные к поверхности контакта реакции почвы  $q$ . При этом допускаем, что нормальные давления распределены по поверхности контакта в соответствии с функцией гиперболического тангенса [5]:

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

где  $\sigma_0$  – несущая способность почвы;  $K$  – коэффициент объемного смятия почвы, приведенный к размерам колеса [6].

Влиянием касательных реакций в контакте и упругих деформаций почвы пренебрегаем.

Секция «ТРАКТОРЫ, МОБИЛЬНЫЕ МАШИНЫ И КОМПЛЕКСЫ»

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

$$P_f = P_{fп} + P_{fш} \quad (1)$$

Составляющую силы сопротивления качению  $P_{fш}$ , обусловленную затратами на деформацию почвы находим путем суммирования проекций нормальных реакций почвы на ось  $X$ :

$$P_{fш} = \iint_{F_2} q \cos \gamma_x dF,$$

где  $\gamma_x$  – угол, составляемый нормальными к поверхности контакта и осью  $X$ ;  $F$  – площадь криволинейной зоны контакта.

После подстановки значений исходя из принятых условий и вычисления интеграла получено выражение для расчета составляющей силы сопротивления качению  $P_{fш}$ :

$$P_{fш} = 2 \frac{b_0 \sigma_0^2}{K} \ln ch \frac{K}{\sigma_0} (h + \lambda - \Delta) + \chi K b_0 \sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}}, \quad (2)$$

где  $\chi$  – коэффициент, зависящий от параметров шин и контакта [4].

Необходимые для вычисления значения  $h$  и  $\lambda$  определим при совместном решении уравнений [4]:

$$h = \frac{\sigma_0}{K} \operatorname{arth} \frac{G_{nl}}{\pi b_0 \sigma_0 \lambda} \sqrt{\frac{\Delta}{2R - \lambda}}; \quad (3)$$

$$G = \frac{\pi b_0 \sigma_0^2}{2K} \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \ln ch \frac{K}{\sigma_0} h + G_{nl} - b_0 \sigma_0 \left( \sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}} - 1 \right) \sqrt{(2R - h - \lambda)(h + \lambda - \Delta)} th \frac{5}{9} \frac{K}{\sigma_0} (h + \lambda - \Delta), \quad (4)$$

где  $G_{nl}$  – часть нагрузки, воспринимаемая в плоской части контакта. Определяется по характеристикам шин на жестком основании. Ее

Секция «ТРАКТОРЫ, МОБИЛЬНЫЕ МАШИНЫ И КОМПЛЕКСЫ» значение зависит от размеров шины, нормальной нагрузки на колесо, давления воздуха в шине. Для некоторых шин, используемых на сельскохозяйственных машинах, необходимые сведения приведены в работе [4].

Формулы (2), (3), (4) 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  $h + \lambda - \Delta = 0$ .

Значение составляющей силы сопротивления качению  $P_{fш}$  в выражении (1) найдем при допущении, что значение этой составляющей при качении по почве равняется силе сопротивления качению на жестком основании при деформации шины на величину  $\lambda$ . Значение  $P_{fш}$  определим по формуле, учитывающей основные факторы, оказывающие влияние на силу сопротивления качению колес по твердому основанию [3]:

$$P_{fш} = K_{ш} \cdot B_{к} \cdot \lambda,$$

где  $B_{к}$  – ширина плоской зоны контакта,  $K_{ш}$  – давление шины на дорогу при нулевом значении давления воздуха в шине.

В рассматриваемом случае:

$$\text{при } \lambda \leq \Delta, B_{к} = 2b_0 \sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}},$$

$$\text{при } \lambda > \Delta, B_{к} = 2b_0.$$

Значение  $K_{ш}$  определяется из выражения, полученного эмпирическим путем [3]:

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

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

Оценим изменение силы сопротивления качению колеса в зависимости от значения основных параметров шин. Необходимые для расчетов данные по шинам можно определить из нормативной документации, путем несложных замеров или задать для прогнозируемых шин с учетом сложившихся соотношений. Показатели свойств почв для типичных почвенных фонов приведены в [5, 6]. Расчет выполнен

Секция «ТРАКТОРЫ, МОБИЛЬНЫЕ МАШИНЫ И КОМПЛЕКСЫ» для случая качения колеса с шиной типа 22/70-20 (исходные параметры) по слежавшейся пахоте при нормальной нагрузке на колесо 30 кН.

На рисунке 2 показано изменение силы сопротивления качению от значения стрелы дуги протектора. Этот параметр существенно влияет на радиус кривизны шины в поперечной плоскости. Последний определяется из выражения:

$$r = \frac{b_0^2 + \Delta^2}{2\Delta}.$$

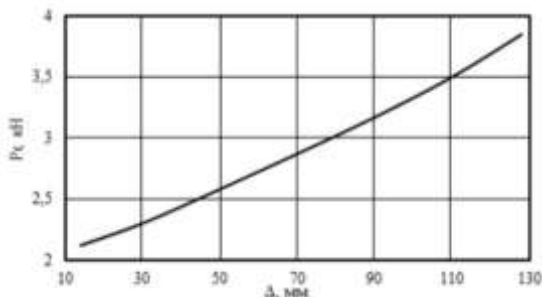


Рисунок 2 – Зависимость силы сопротивления качению колеса от стрелы дуги протектора

Видно, что с уменьшением стрелы дуги протектора почти линейно снижается сила сопротивления качению. Уменьшение стрелы дуги протектора с 70 мм до 10 мм позволило бы снизить силу сопротивления качению, в рассмотренных условиях, примерно в 1,3 раза. Аналогичные по характеру экспериментальные данные приведены в работе [7].

Неоднозначно и влияние увеличения ширины шины на силу сопротивления качению (рисунок 3).

Увеличение ширины профиля шины при постоянном значении стрелы дуги протектора  $\Delta$ , равном 0,07 м, позволяет уменьшить силу сопротивления качению. Например, увеличение ширины профиля шины  $B$  в два раза (с 600 до 1200 мм) приводит к снижению силы сопротивления качению примерно в 1,4 раза. В то же время увеличе-

Секция «ТРАКТОРЫ, МОБИЛЬНЫЕ МАШИНЫ И КОМПЛЕКСЫ»  
 ние ширины шины при одновременном увеличении стрелы дуги протектора по закономерности  $\Delta/B = 0,13 = \text{const}$  незначительно влияет на силу сопротивления качению. Такой характер кривых объясняется тем, что при росте значений стрелы дуги протектора деформация шины меньше этого значения и в сечении следа уменьшается доля плоской зоны контакта. Из-за роста объема деформируемой почвы сила сопротивления качению при этом растет.

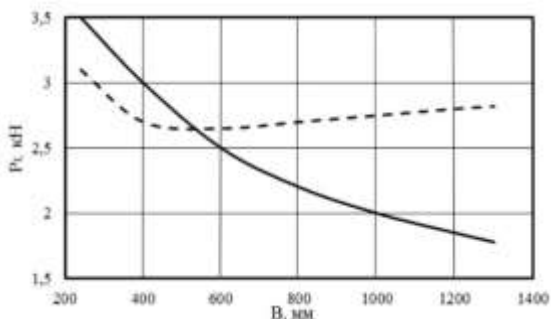
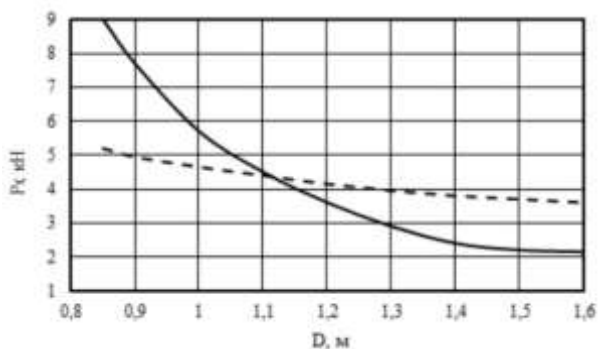


Рисунок 3 – Зависимость силы сопротивления качению колеса от ширины профиля шины:  
 сплошная линия –  $\Delta = \text{const}$ , штриховая линия –  $\Delta/B = \text{const}$

При изменении диаметра шины результат также зависит от способа его увеличения (рисунок 4).



сплошная линия – увеличение  $D$  путем изменения  $H$  ( $d = \text{const}$ ),  
 штриховая линия – увеличение  $D$  путем изменения  $d$  ( $H = \text{const}$ )  
 Рисунок 4 – Зависимость силы сопротивления качению колеса от диаметра шины

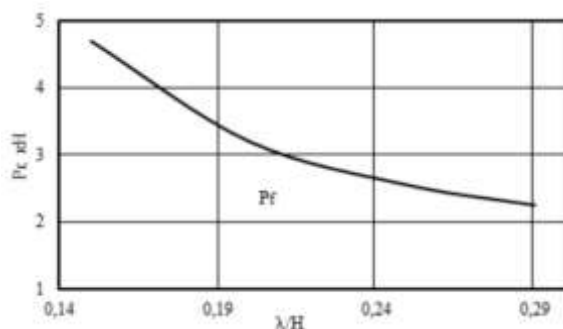


Рисунок 5 – Зависимость силы сопротивления качению колеса от относительной деформации шины ( $D = \text{const}$ ,  $d = \text{const}$ )

Увеличение диаметра путем повышения высоты профиля шины  $H$  ( $H/B = 0,3 \dots 0,9$ ) приводит к существенному снижению  $P_f$ . Это связано с тем, что при принятой в расчетах постоянной относительной деформации шины ( $\lambda/H = 0,23$ ) увеличение высоты профиля шины позволяет повысить и абсолютное значение её деформации, т.е. увеличить размеры пятна контакта и снизить жёсткость шины. Если высота профиля не изменяется, а рост диаметра шины происходит из-за увеличения посадочного диаметра  $d$ , то интенсивность уменьшения силы сопротивления качению примерно в 2,5 раза ниже. Это можно объяснить тем, что удлинение пятна контакта при равной деформации шины компенсируется уменьшением приведенного коэффициента объемного смятия почвы, зависящего от размеров колеса. Отметим, что эффект от увеличения относительной деформации шины при постоянных её размерах соизмерим с результатом от увеличения габаритов шины (рисунок 5). У известных шин относительная деформация профиля преимущественно находится в пределах 0,15–0,30 от его высоты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель расчета позволяет определять силу сопротивления качению ведомого колеса в зависимости от значений диаметра и ширины профиля шины, формы профиля, деформации шины, нормальной нагрузки на колесо, давления воздуха в шине,



*Секция «ТРАКТОРЫ, МОБИЛЬНЫЕ МАШИНЫ И КОМПЛЕКСЫ»* свойств почвы. Результат по снижению силы сопротивления качению сельскохозяйственных машин в полевых условиях путем увеличения радиуса кривизны шин в поперечной плоскости и относительной деформации шин соизмерим с получаемым при изменении их диаметра и ширины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гедроить, Г.И. Опорные свойства шин для сельскохозяйственной техники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2009, № 4. – С. 23–27.
2. Бойков, В.П. Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин / В.П. Бойков, В.Н. Белковский. – М.: Агропромиздат, 1988. – 240 с.
3. Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
4. Горин, Г.С. Исследование колеобразования при качении ведомого колеса / Г.С. Горин, Г.И. Гедроить, И.Е. Юреть // Воздействие ходовых систем сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов на почву: сб. науч. трудов. – Горки, 1991. – С. 11–18.
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. – 384 с.
7. Тягово-сцепные качества высокоэластичных шин сверхнизкого давления / С.Д.Зайцев [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008, № 9. – С. 29–31.

Представлено 20.05.2019