

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПОЧВОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН ВЕДОМЫХ КОЛЁС

Г. И. ГЕДРОИТЬ, С. В. ЗАНЕМОНСКИЙ, В. Г. КОСТЕНИЧ

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220023, e-mail: kaf.tia@bsatu.by

В. А. БЕЛОУСОВ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: ktrauto@tut.by

(Поступила в редакцию 01.06.2022)

В условиях современного сельского хозяйства увеличиваются площади сельскохозяйственных предприятий, мощность используемых тракторов, расширяется номенклатура используемых машин. Опорные колёса последних работают в ведомом режиме. При этом нагрузка на них может достигать нескольких тонн. У транспортных и транспортно-технологических агрегатов по одному следу может проходить 4...5 колёс, давление в контакте колёс машин с опорным основанием может в несколько раз превышать аналогичное давление под трактором. При этом возможности увеличения размеров колёс ограничены. Поэтому важно оценить наиболее доступные способы улучшения показателей взаимодействия пневматических шин сельскохозяйственных машин с почвой.

Исследования выполнены на базе аналитической модели, учитывающей свойства почвы (несущая способность, коэффициент объёмного смятия), нормальную нагрузку на колёса, ширину, диаметр, высоту профиля шин, кривизну шин в поперечной плоскости, их деформацию. Модель может быть применена для расчёта параметров взаимодействия с почвой одиночного колеса, совершающего первый проход, а также любого колеса, движущегося по следу предшествующих. Анализируется изменение глубины следа, силы сопротивления качению. В последнем случае учитываются составляющие силы сопротивления качению от деформации почвы и шины.

Установлено, что увеличение диаметра шин рациональнее проводить путём увеличения высоты профиля, а не изменением посадочного диаметра. Увеличение ширины шин целесообразно осуществлять при сохранении значения стрелы дуги протектора. При заданной ширине протектора необходимо стремиться сделать беговую дорожку шин более плоской. Без изменения размеров шин существенные результаты даёт увеличение относительной деформации шин. Конструкция известных шин допускает деформацию профиля в пределах 0,15...0,30 от его высоты.

Ключевые слова: шина, деформация почв, сопротивление качению, параметры шин.

In the conditions of modern agriculture, the areas of agricultural enterprises are increasing, the power of the tractors used is increasing, the range of used machines is expanding. The support wheels of the latter work in a driven mode. In this case, the load on them can reach several tons. For transport and transport-technological units, 4 ... 5 wheels can pass along one track, the pressure in the contact of wheels of the machines with the support base can be several times higher than the same pressure under the tractor. At the same time, the possibilities for increasing the size of wheels are limited. Therefore, it is important to evaluate the most affordable ways to improve the performance of pneumatic tires of agricultural machines with the soil.

The studies were carried out on the basis of an analytical model that takes into account soil properties (bearing capacity, volumetric collapse coefficient), normal wheel load, width, diameter, height of the tire profile, tire curvature in the transverse plane, and its deformation. The model can be used to calculate the parameters of interaction with the soil of a single wheel making the first pass, as well as any wheel moving along the trail of the previous ones. The change in the depth of the track, the force of rolling resistance is analyzed. In the latter case, the components of rolling resistance force from soil and tire deformation are taken into account.

It has been established that it is more rational to increase the diameter of tires by increasing the height of the profile, and not by changing the landing diameter. It is advisable to increase the tire width while maintaining the value of the tread arc arrow. For a given tread width, it is necessary to strive to make the tire tread flatter. Without changing the size of the tires, significant results are obtained by increasing the relative deformation of the tires. The design of known tires allows deformation of the profile within 0.15...0.30 of its height.

Key words: tire, soil deformation, rolling resistance, tire parameters.

Введение

Исследованию процесса взаимодействия ходовых систем машин с опорным основанием посвящены труды В. В. Кацыгина, В. В. Гуськова, В. А. Скотникова, А. М. Кононова, Я. С. Агейкина, В. А. Русанова, М. И. Ляско, В. П. Бойкова, Н. А. Орды и др. [1, 2].

При моделировании процесса взаимодействия колеса с опорной поверхностью 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. 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. При обосновании параметров ходовых систем необходимо учитывать энергозатраты на передвижение в полевых и дорожных условиях, уровень воздействия ходовых систем на почву.

Исследования в области взаимодействия колёс с почвой посвящены преимущественно работе единичного колеса. Большинство работ посвящено исследованию взаимодействия колесного движителя с деформируемой опорной поверхностью. Их основной целью является определение показателей деформации шины и почвы, сопротивления качению, силы тяги, показателей уровня воздействия на почву и др. Работы отличаются описанием зоны контакта колеса с опорным основанием, принятыми закономерностями изменения нормальных и касательных напряжений в контакте, допущениями.

Большой объём исследований процесса взаимодействия с почвой многоосных ходовых систем выполнен школой В. В. Кацыгина. В частности, глубоко разработаны теоретические основы деформирования и уплотнения почв многоосными ходовыми системами [3]. Систематизированы варианты деформирования почв под ходовыми системами, предложены аналитические зависимости для расчёта показателей взаимодействия при повторных нагрузках на почву, исследовано влияние изменения количества колёс ходовой системы на свойства почвы. Учитываются диаметр, ширина, жёсткость шин. Зависимости получены для однотипных движителей.

Использование тракторов и сельскохозяйственных машин на полевых работах по современным технологиям связано с проблемой отрицательного воздействия их ходовых систем на почву. Для количественной оценки результата названного воздействия наиболее распространены в различных сочетаниях такие показатели как плотность, твердость, пористость, структурный состав почвы, сопротивление почвы обработке, глубина следа, качество выполнения последующих операций, урожайность сельскохозяйственных культур.

Цель настоящей работы – оценить и проанализировать влияние основных размеров шин (диаметр, посадочный диаметр, ширина и высота профиля, радиус кривизны в поперечной плоскости, радиальная деформация) на силу сопротивления качению и глубину следа.

Основная часть

Определить глубину следа и силу сопротивления качению любого колеса многоколесной ходовой системы можно при решении уравнений [4]:

для глубины следа

$$h = \frac{\sigma_0}{K} \operatorname{arth} \frac{G_{\text{пл}}}{2b_0\sigma_0\sqrt{(2R-\lambda)\Delta} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}-1} + \frac{\lambda}{\Delta} \arcsin \sqrt{\frac{\Delta}{\lambda}} \right)} - h_{s1}; \quad (1)$$

$$G = \frac{\alpha b_0 \sigma_0^2}{K} \sqrt{\frac{2R-h-\lambda}{\Delta}} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{\operatorname{ch} \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} + G_{\text{пл}}; \quad (2)$$

для силы сопротивления качению

$$P_f = P_{f_{\text{п}}} + P_{f_{\text{ш}}}; \quad (3)$$

$$P_{f_{\text{п}}} = \frac{2b_0\sigma_0^2}{K} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{\operatorname{ch} \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}}; \quad (4)$$

$$P_{f_{\text{ш}}} = K_{\text{ш}} B_{\text{к}} \lambda, \quad (5)$$

где h – глубина следа; σ_0 – несущая способность почвы; K – коэффициент объёмного смятия почвы k , приведённый к размерам колеса; $2b_0$ – ширина беговой дорожки шины; Δ – стрела дуги протектора (высота беговой дорожки шины); λ – радиальная деформация шины; R – свободный радиус колеса; h_{s1} – средняя остаточная глубина следа от предшествующих колёс; α – расчётный коэффициент; G – нормальная нагрузка на колесо; $G_{\text{пл}}$ – часть нагрузки, воспринимаемая в плоской части контакта шины с почвой; P_f – сила сопротивления качению колеса; $P_{f_{\text{п}}}$ – составляющая силы сопротивления качению из-за деформации почвы; $P_{f_{\text{ш}}}$ – составляющая силы сопротивления качению из-за деформации шины; $B_{\text{к}}$ – ширина плоской зоны контакта шины с почвой; $K_{\text{ш}}$ – давление шины на дорогу при нулевом значении давления воздуха в шине.

Модель построена, исходя из предпосылки, что поверхность контакта шины с почвой представляет собой усечённый эллиптический параболоид, а распределение нормальных давлений в контакте подчиняется закону гиперболического тангенса [5]. Более подробно методика, а также частные случаи, изложены в литературных источниках [4, 6].

Как следует из приведенной выше модели, значения силы сопротивления качению и параметров следа зависят от ряда факторов. Оценим степень влияния конструктивных параметров шин на показатели взаимодействия колёсных ходовых систем с почвой, так как через эти факторы можно наиболее активно влиять на результат взаимодействия.

На рис. 1...5 приведены расчётные зависимости влияния конструктивных параметров шин на глубину следа и силу сопротивления качению. В качестве исходного варианта приняты размеры, соответствующие шине 22/70-20 [4, 7]: диаметр $D = 1,3$ м, стрела дуги протектора $\Delta = 0,07$ м, высота профиля шины $H = 0,396$ м, ширина профиля шины $B = 0,560$ м, допустимая деформация шины $[\lambda] = 0,089$ м, ширина беговой дорожки шины $2b_0 = 0,46$ м, посадочный диаметр шины $d = 0,508$ м. Расчёт проведён для случая качения колёс по слежавшейся пахоте ($k = 10 \cdot 10^7$ Н/м³, $\sigma_0 = 8,6 \cdot 10^5$ Н/м²) при нагрузке на колесо 30 кН.

Увеличение диаметра шин на почвах даёт положительный эффект (рис. 1). Важен способ увеличения диаметра. При увеличении диаметра путём повышения высоты профиля шины ($H/B = 0,3 \dots 0,9$) происходит существенное снижение P_f и h . Это связано с тем, что при принятой 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, то глубина следа практически остаётся постоянной, т. к. удлинение пятна контакта при равной деформации шины компенсируется уменьшением приведённого коэффициента объёмного смятия почвы, зависящего от размеров колеса. Увеличение ширины профиля шины при постоянном значении стрелы дуги протектора Δ , равном 0,07 м, позволяет уменьшить и глубину следа, и силу сопротивления качению (рис. 2).

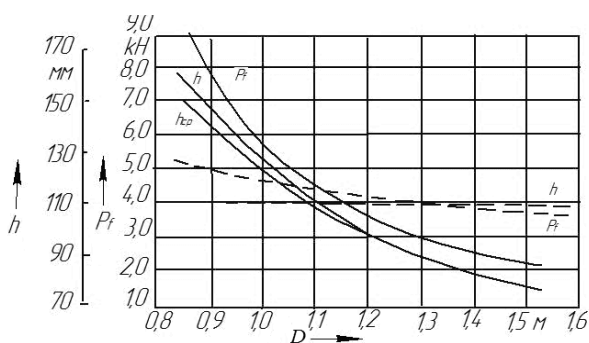


Рис. 1. Зависимость показателей взаимодействия колеса с почвой от диаметра шины: сплошные – увеличение D путём изменения H ($d = \text{const}$), штриховые – увеличение D путём изменения d ($H = \text{const}$)

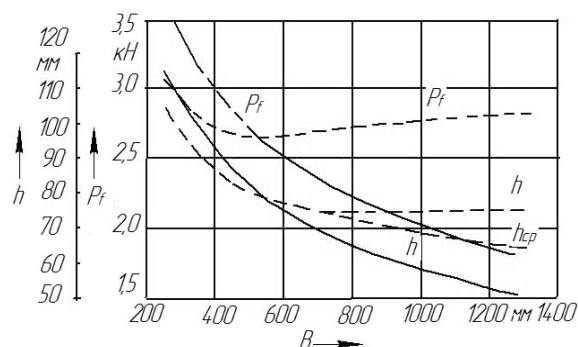


Рис. 2. Зависимость показателей взаимодействия колеса с почвой от ширины профиля шины: сплошные – $\Delta = \text{const}$, штриховые – $\Delta/B = \text{const}$

Например, увеличение ширины профиля шины B в два раза (с 600 до 1200 мм) приводит к снижению глубины следа и силы сопротивления качению примерно в 1,35...1,4 раза. В то же время увеличение ширины шины при одновременном увеличении стрелы дуги проектора по закономерности $\Delta/B = 0,13 = \text{const}$ незначительно влияет на максимальную глубину следа уже при $B > 600$ мм. Средняя глубина следа $h_{\text{ср}}$ при этом продолжает снижаться. 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 объёма деформируемой почвы сила сопротивления качению при этом растёт.

Рассмотренный пример показывает существенность влияния кривизны шин в поперечной плоскости на показатели взаимодействия с почвой. Влияние кривизны проектора, зависящей при постоянной ширине профиля от значений стрелы дуги проектора, показано на рис. 3. Другие размеры шины соответствуют исходному варианту. Наблюдается близкая к линейной зависимости показателей взаимодействия от значения стрелы дуги протектора Δ . Следовательно, уменьшая кривизну беговой дорожки шины, можно значительно снизить силу сопротивления качению колеса и глубину следа при неизменных габаритах шин. Результат от увеличения относительной деформации шины при постоянных её размерах (рис. 4) соизмерим с результатом от увеличения габаритов шины. Конструкции известных шин допускают деформацию профиля преимущественно в пределах 0,15...0,30 от его высоты. Как правило, при снижении отношения H/B относительная деформация шины увеличивается. Результаты расчёта такого варианта показаны на рис. 5.

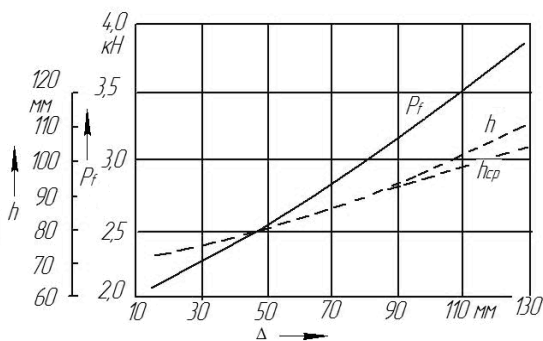


Рис. 3. Зависимость показателей взаимодействия колеса с почвой от кривизны беговой дорожки шины

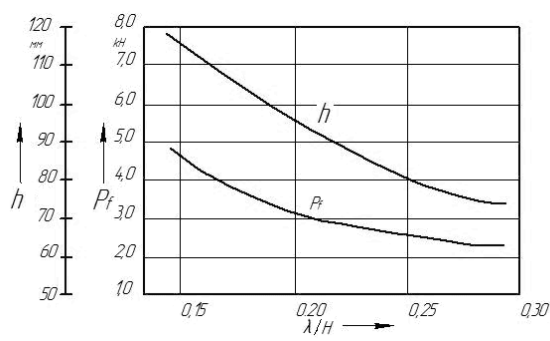


Рис. 4. Зависимость показателей взаимодействия колеса с почвой от относительной деформации шины ($D = \text{const}$, $d = \text{const}$)

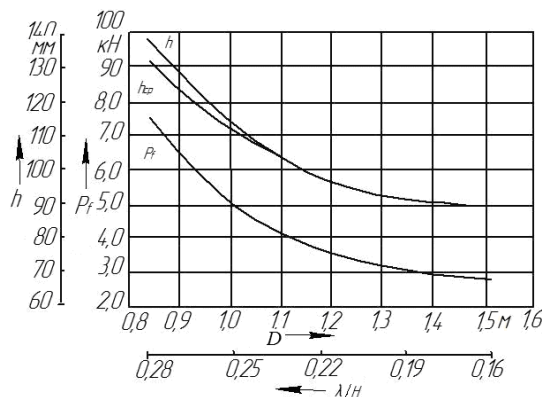


Рис. 5. Зависимость показателей взаимодействия колеса с почвой от диаметра шины и её относительной деформации ($d = \text{const}$, $H = \text{var}$, $\lambda/H = \text{var}$)

В данном случае при увеличении высоты профиля шины ($H/B = 0,3 \dots 0,9$) пропорционально уменьшалась и относительная деформация шины соответственно в пределах $0,28 \dots 0,16$. Сравнивая полученные результаты с данными рис. 1 (сплошные линии), видим, что интенсивность уменьшения P_f и h в зависимости от диаметра в рассматриваемом случае примерно в 1,4 раза ниже, что указывает на необходимость поиска путей увеличения радиальной деформации шин.

При увеличении размеров шин и улучшении их деформационных характеристик существенно снижаются глубина следа и сила сопротивления качению машин в полевых условиях. Сила сопротивления качению в полевых условиях снижается при совпадении колеи. Уменьшение силы сопротивления качению происходит и при дальнейшем уширении шин.

Заключение

Изменение диаметра и ширины шин позволяет снизить глубину следа и силу сопротивления качению ведомых колёс. При этом эффективнее увеличивать диаметр путём повышения высоты профиля шин, сохраняя постоянное значение относительной деформации, а при увеличении ширины шин не увеличивать значение размера стрелы дуги протектора.

Показатели взаимодействия колёс с почвой можно существенно улучшить без изменения габаритов шин путём увеличения радиуса кривизны шин в поперечной плоскости и улучшения их деформационных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скотников, В. А. Проходимость машин / В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов. – Минск: Наука и техника, 1982. – 328 с.
2. Романюк, Н. Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву мобильных энергосредств: [монография] / Н. Н. Романюк. – Минск: БГАТУ, 2020. – 198 с.
3. Орда, А. Н. Сопротивление почв / А. Н. Орда. – Минск: БГАТУ, 2002. – 94 с.
4. Гедроить, Г. И. Взаимодействие с почвой многоколёсных ходовых систем / Г. И. Гедроить, А. Г. Гедроить, А. Д. Чететкин // Агропанорама. – 2012. – № 5. – С. 2–7.
5. Кацыгин, В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров сельскохозяйственных машин и орудий / Вопросы сельскохозяйственной механики / В. В. Кацыгин. – Минск: Урожай, 1964. – Т. 13. – С. 5–147.
6. Гедроить, Г. И. Сопротивление качению ведомых пневматических колёс / Г. И. Гедроить // Агропанорама. – 2010. – № 1. – С. 26–30.
7. Гедроить, Г. И. Объёмы работ и условия эксплуатации транспортных средств / Г. И. Гедроить, С. В. Занемонский // Агропанорама. – 2021. – № 3. – С. 2–7.