

## ОПОРНЫЕ СВОЙСТВА ШИН ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

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

### Аннотация

*Обобщены экспериментальные данные по определению размеров и площади пятна контакта с жестким основанием широкопрофильных и арочных шин, оценен уровень их воздействия на почву. Приведены формулы и эмпирические коэффициенты для расчета этих показателей для прогнозируемых шин.*

### Введение

Агротехнические и тягово-сцепные свойства колесных машин в значительной степени определяются способностью шины деформироваться в радиальном направлении и изменять при этом площадь пятна контакта с опорным основанием. Опорные свойства шин характеризуются площадью пятна контакта, средним и максимальным давлением в контакте [1]. Согласно [2, 3] в качестве допустимых показателей процесса воздействия ходовых систем на почву приняты максимальные давления на почву и максимальные нормальные напряжения в почве на глубине 0,5 м под движителями. Определение перечисленных выше показателей базируется на исходных данных по параметрам пятна контакта шин на жестком основании. Закономерности деформирования шины на жестком основании используют также при аналитических исследованиях процесса взаимодействия ходовых систем с почвой.

Экспериментальное определение параметров пятна контакта шин на жестком основании дает наиболее точные результаты. Но эти результаты могут быть отнесены только к конкретным шинам и условиям испытаний. При решении задач оптимизации ходовых систем, определении размеров шин, удовлетворяющих допустимым нормам воздействия на почву, экспериментально определить параметры пятна контакта часто невозможно. Поэтому важным является получение и обобщение экспериментальных данных по определенным группам шин. Ниже приведены сведения о параметрах пятна контакта и закономерностях деформирования шин, применяемых преимущественно на машинах для внесения удобрений, прицепах и др. сельскохозяйственной технике.

### Основная часть

Предпринят ряд попыток получить аналитические модели для определения деформации шин, контурной площади и размеров пятна контакта [1]. Как правило, развивается и уточняется известная формула Хедекеля

$$\lambda = \frac{G}{\pi P_w \sqrt{DB}}, \quad (1)$$

где  $\lambda$ ,  $G$ ,  $P_w$ ,  $D$ ,  $B$  – соответственно нормальная деформация шины, нормальная нагрузка на коле-

со, давление воздуха в шине, диаметр и ширина протектора шины.

Формула (1) основана на допущениях о том, что среднее давление в контакте равняется давлению воздуха в шине и, что шина вне зоны контакта не деформируется. Считается также, что форма пятна контакта эллиптическая. Соответственно площадь и размеры пятна контакта определяются по формулам для эллипса. Названные допущения справедливы для идеализированной шины, т.е. тороидальной оболочки с гибкими, нерастяжимыми стенками.

Реальные шины из-за жесткости каркаса деформируются не только в контакте, а ее форма в поперечном сечении не является тором. Изгибаются боковины, деформируется беговая дорожка вне зоны контакта [4]. В результате уменьшаются длина и ширина пятна контакта, его форма отличается от эллиптической. С учетом этого формулы для определения размеров и площади контакта можно записать в виде:

$$a = 2K_L \sqrt{2R\lambda - \lambda^2} \approx 2K_L \sqrt{2R\lambda}; \quad (2)$$

$$b = 2K_B \sqrt{2r\lambda - \lambda^2} \approx 2K_B \sqrt{2r\lambda}; \quad (3)$$

$$F = \frac{\pi}{4} \varepsilon ab \approx 2\pi K_L K_B \lambda \varepsilon \sqrt{Rr}, \quad (4)$$

где  $F, a, b$  – соответственно контурная площадь, длина и ширина пятна контакта;

$R, r$  – соответственно радиусы шины и беговой дорожки протектора;

$K_L, K_B$  – коэффициенты длины и ширины пятна контакта. Показывают во сколько раз реальные длина и ширина пятна контакта меньше, чем расчетные по формулам Хедекеля (хорд окружностей с радиусами  $R$  и  $r$ );

$\varepsilon$  – коэффициент формы пятна контакта. Показывает во сколько раз контурная площадь пятна контакта отличается от расчетной по формуле для эллипса.

В формулах (2)...(4) переход от точных выражений к приближенным сделан в связи с тем, что в подкоренных выражениях второй член значительно меньше первого.

Таким образом, при вычислении размеров и площади контакта наряду с размерами и деформацией шин необходимо знать эмпирические коэффициенты

$K_L, K_B, \varepsilon$ . Для отдельных групп шин, например, ведущих тракторных, накоплен значительный статистический материал по значениям указанных коэффициентов [5,6]. Однако механическое использование этих результатов для шин других групп может привести к существенным погрешностям [1].

Автором выполнены экспериментальные исследования по определению характеристик шин на жестком основании. Модели и основные размеры шин приведены в табл.1.

**Таблица 1. Геометрические размеры шин, мм**

Шина	Наружный диаметр	Ширина профиля	Высота профиля	Статический радиус	Ширина беговой дорожки протектора	Высота беговой дорожки протектора
16,5/70-18 мод. КФ-97	1075	425	306	486	350	54
16,5L18	1070	460	306	463	460	94
22/70-20 мод. Ф-118	1320	560	406	571	460	70
600/50-22,5	1170	600	300	483	540	88
1300x750 мод. Я-186	1280	750	300	564	684	118
1140x600 мод. Я-404	1150	605	261	496	530	62
1140x700 мод. Я-170А	1160	710	266	515	640	110
1140x700 мод. Я-369	1160	710	266	515	630	62

По форме профиля шины относятся к следующим типам: 22/70-20 мод. Ф-118, 16,5/70-18 мод. КФ-97 – широкопрофильные; 16,5L18 – низкопрофильная; 1140x700 мод. Я-170А, 1140x700 мод. Я-369, 1300x750 мод. Я-186, 1140x600 мод. Я-404 – арочные. Шины 16,5/70-18 мод. КФ-97, 1140x700 мод. Я-170А, 1300x750 мод. Я-186 – серийные, шины 22/70-20 мод. Ф-118, 16,5L18, 1140x700 мод. Я-369, 1140x600 мод. Я-404 взяты из опытных партий шин, созданных для снижения давления на почву. Шина 600/50-22,5 – импортная и является аналогом шины 1140x600 мод. Я-404. Новые шины позволяют снизить давление на почву ходовых систем машин для внесения удобрений, прицепов без значительного изменения их компоновки (количества колес, нормальной нагрузки на колесо, положения центра тяжести, ширины колеи, подвески).

Исследования проводились в лабораторных условиях с использованием стенда для определения статических характеристик шин на жестком основании. Снимали отпечатки шин, определяли их нормальную деформацию и размеры.

Значения коэффициентов  $K_L, K_B, \varepsilon$  и среднего давления исследованных шин на жестком основании, а также расчетные значения максимальных давлений шин на почву и максимальных нормальных напряжений в почве под шинами на глубине 0,5 м приведены в табл.2. Расчет показателей воздействия на почву проведен по ГОСТ 26953-86 и ГОСТ 26954-86 [7,8]. Изменение параметров контакта шин на почве по

сравнению с жестким основанием учитывалось с помощью коэффициентов, приведенных в вышеуказанных источниках.

Указанные в табл. 2 нормальные нагрузки на шины и соответствующие им давления воздуха рекомендованы в нормативной документации и являются максимальными для исследованных шин. Нормальная деформация шины при этом является допустимой. Отношение допустимой нормальной деформации шины к высоте профиля шины называется допустимой относительной нормальной деформацией шины  $[\lambda']$ . При использовании шин для меньших нагрузок уменьшается и рекомендованное давление воздуха, исходя из условия обеспечения допустимой относительной нормальной деформации шины [6]. В последнем случае давление в контакте и напряжение в почве несложно пересчитать на основе данных табл. 2.

Анализ результатов подтверждает закономерности деформирования шин с уменьшением длины и ширины пятна контакта, отклонением формы пятна контакта от эллиптической.

Значения коэффициентов  $K_L, K_B, \varepsilon$  для разных шин изменяются соответственно в пределах 0,71...0,83, 0,73...0,67 и 1,04...1,14. Средние значения указанных коэффициентов составляют 0,78, 0,81, 1,07. Следовательно реальная длина пятна контакта шин меньше, чем хорда окружности при одинаковой деформации в 1,28 раза, ширина – в 1,23 раза, а контурная площадь больше, чем расчетная по формуле для эллипса в 1,07 раза. Отметим, что во всех случаях ширина пятна контакта была меньше ширины протектора.

Арочные шины развивают пятно контакта лучше. Так, если для широкопрофильных шин значения коэффициентов  $K_L, K_B, \varepsilon$  составляют соответственно 0,76, 0,80 и 1,06, то для арочных – 0,81, 0,81, 1,09. Наиболее высокие значения коэффициента  $\varepsilon$  для шин 600/50-22,5 и 1140x700 мод.Я-369. Это связано с более плоской формой профиля шины в поперечной плоскости. Так, шина 1140x700 мод.Я-369 имеет радиус беговой дорожки протектора 830 мм, что в 1,6 раза больше, чем у шины 1140x700 мод.Я-170А такого же типоразмера. Соответственно значения коэффициента  $\varepsilon$  составляют 1,14 и 1,07.

Серийная шина 16,5/70-18 мод. КФ-97 оказывает в 1,5...2,3 раза большее давление на почву, чем дру-

**Таблица 2. Эмпирические коэффициенты и расчетные показатели  
уровня воздействия шин на почву**

Шина	Нагрузка, кН	Давление воздуха, кПа	$K_L$	$K_B$	$\varepsilon$	Среднее давление на жесткое основание, кПа	Макс. давл. на почву, кПа	Макс. напряж. в почве, кПа	$[\lambda']$
16,5/70-18 мод. КФ-97	32,0	370	0,71	0,87	1,04	375	469	52,2	0,17
16,5L18	17,0	110	0,75	0,73	1,04	157	197	26,6	0,24
22/70-20 мод. Ф-118	40,0	200	0,80	0,81	1,05	203	263	55,2	0,22
600/50-22,5	34,7	140	0,79	0,79	1,09	157	197	45,7	0,34
1300x750 мод. Я-186	50,0	250	0,80	0,85	1,06	242	315	68,3	0,25
1140x600 мод. Я-404	33,0	180	0,79	0,77	1,07	172	216	45,5	0,30
1140x700 мод. Я-170А	30,0	200	0,83	0,82	1,07	181	226	43,0	0,24
1140x700 мод. Я-369	36,6	200	0,81	0,81	1,14	176	220	49,2	0,24

гие шины. Однако напряжения в почве на глубине 0,5 м под всеми шинами отличаются незначительно. Исключение, ввиду меньшей нагрузки, составляет шина 16,5L18. Сравнение данных по шинам 600/50-22,5, 1140x600 мод. Я-404, 1140x700 мод. Я-170А, 1140x700 мод. Я-369 с шиной 16,5/70-18 мод. КФ-97 показывает, что при снижении максимального давления на почву более чем в два раза максимальные напряжения в почве на глубине 0,5 м снижаются в среднем в 1,14 раза. Это связано с тем, что при сопоставимой нагрузке последняя шина имеет меньшую площадь контакта.

Следовательно, при использовании разработанных шин (или с аналогичными параметрами) можно ожидать улучшения свойств почвы, в основном, в пахотном слое.

Для вычислений по формулам (2)...(4) необходимо знать деформацию шин. В табл.3 приведены уравнения регрессии для определения нормальной деформации исследованных шин. Уравнения регрессии получены в результате реализации ортогонального центрального композиционного плана  $2^2$ . Пользуясь полученными уравнениями, можно получить значения нормальной деформации шин в широком диапазоне нагрузок и давлений воздуха в шинах. Нормальная нагрузка на колесо может изменяться в ходе технологического процесса и при использовании шин для разных машин. В последнем случае изменяется и давление воздуха в шинах. Давление воздуха может устанавливаться разным также в зависимости от твердости опорного основания, скоростного режима. В общем случае зависимость деформации шин от нагрузки и

**Таблица 3. Уравнение регрессии для определения деформации шин**

Шина	Уравнение регрессии	Область эксперимента		Критерий Фишера	
		G, кН	$P_w$ , МПа	$F_{\varepsilon}$	$F_T$
16,5/70-18 мод. КФ-97	$\lambda = 23,3 + 3,33G - 175,4P_w + 372,9P_w^2 - 5,38P_w G$	15...35	0,13...0,37	1,91	2,93
16,5L18	$\lambda = 17,85 + 8,29G - 504,4P_w - 0,063G^2 + 2530P_w^2 - 22,35P_w G$	4...20	0,06...0,13	2,13	3,16
22/70-20 мод. Ф-118	$\lambda = 52,74 + 3,41G - 376,3P_w - 0,0113G^2 + 792P_w^2 - 4,95P_w G$	10...45	0,15...0,25	2,73	3,16
600/50-22,5	$\lambda = 89,25 + 5,88G - 1571P_w - 0,0174G^2 + 6756P_w^2 - 16,9P_w G$	15...35	0,06...0,15	2,74	3,16
1300x750 мод. Я-186	$\lambda = 30,1 + 2,79G - 235,3P_w - 0,0109G^2 + 583,3P_w^2 - 3,54P_w G$	10...50	0,13...0,25	1,83	3,16
1140x600 мод. Я-404	$\lambda = 17,6 + 4,6G - 207,1P_w - 0,0257G^2 + 584P_w^2 - 7,62P_w G$	10...30	0,11...0,21	2,23	2,96
1140x700 мод. Я-170А	$\lambda = 32,34 + 3,98G - 346P_w - 0,0168G^2 + 979,7P_w^2 - 6,92P_w G$	12...36	0,07...0,23	2,24	3,16
1140x700 мод. Я-369	$\lambda = 25,95 + 2,74G - 211,35P_w + 621,9P_w^2 - 6,06P_w G$	12...36	0,07...0,23	0,89	2,93

давления воздуха нелинейная. В уравнениях размерность  $\lambda$  – в мм,  $G$  – в кН,  $P_w$  – в кПа.

Ввиду того, что экспериментальное определение деформации шин значительно проще, чем определение площади пятна контакта, представляет интерес зависимость площади пятна контакта от деформации шины. Эксперимент показал, что для всех исследованных шин эта связь выражается линейным уравнением регрессии

$$F = C_1 + C_2 \lambda, \quad (5)$$

где размерность  $F$  – м<sup>2</sup>,  $\lambda$  – мм.

Значения параметров  $C_1$ ,  $C_2$  приведены в табл.4. Здесь же даны значения коэффициента корреляции  $r_k$ , экспериментальное  $t_\varepsilon$  и табличное  $t_T$  значения критерия Стьюдента при 5%-ном уровне значимости. Корреляция во всех случаях значима.

Однако в эксперименте минимальная деформация шин составляла 20...40% от допустимой. В области меньших деформаций возможна нелинейность и отклонение от уравнения (5).

Приведенной информации достаточно, чтобы определить параметры пятна контакта, оценить показатели воздействия исследованных шин на почву. Для определения контурной площади и размеров пятна контакта шин при прогнозировании оптимальных параметров ходовых систем необходимые геометрические размеры шин (диаметр, ширину, высоту профиля, радиус или размеры беговой дорожки протектора) можно задать. Допустимая нормальная деформация шин  $[\lambda]$  в этом случае может быть определена из выражения

$$[\lambda] = [\lambda'] H, \quad (6)$$

где  $[\lambda']$  – допустимая относительная нормальная деформация шины;

$H$  – высота профиля шины.

**Таблица 4. Параметры уравнения регрессии для определения площади пятна контакта**

Шина	$C_1 * 10^2, м^2$	$C_2 * 10^3, м^2 / мм$	$r_k$	$t_\varepsilon$	$t_T$
16,5/70-18 мод. КФ-97	-0,325	1,802	0,939	18,58	2,31
16,5L18	-1,388	1,703	0,998	41,85	2,31
22/70-20 мод. Ф-118	-3,854	2,638	0,994	26,44	2,31
600/50-22,5	-3,652	2,634	0,994	26,72	2,31
1300x750 мод. Я-186	-2,749	3,150	0,993	22,81	2,37
1140x600 мод. Я-404	-0,633	2,500	0,985	16,32	2,31
1140x700 мод. Я-170А	-2,630	3,012	0,996	27,92	2,37
1140x700 мод. Я-369	-1,188	3,417	0,994	24,86	2,37

Значения  $[\lambda']$  приведены в специальной литературе и изменяются в пределах 0,14...0,30. Для исследованных шин значения допустимой относительной деформации шин приведены в табл.2.

Отметим, что при известных значениях ширины и высоты беговой дорожки протектора радиус кривизны беговой дорожки протектора вычисляется по формулам для сектора круга.

Более сложно рассчитать нормальную деформацию шины, отличающуюся от допустимой. Анализ показывает, что наиболее рационально использовать в этом случае формулу, полученную в результате обработки большого количества экспериментальных данных [9]. В системе единиц СИ формула имеет вид:

$$\lambda = K \frac{G^{3/4}}{100 + P_w}, \quad (7)$$

где размерности  $\lambda$  – м,  $G$  – кН,  $P_w$  – кПа,  $K = \frac{кН^{1/4}}{м}$ ;

100 – постоянная величина равная 100 кПа.

Сравнение значений деформации шины, рассчитанных по формуле (6), с экспериментальными данными по исследованным шинам показывает, что погрешность не превышает 8 %.

Для расчетов по формуле (7) необходимо знать значения коэффициента  $K$  и давление воздуха в шинах. Если предварительно определить  $[\lambda]$  по формуле (6), то коэффициент  $K$  можно найти из выражения

$$K = \frac{[\lambda] (100 + P_w)}{G^{3/4}}. \quad (8)$$

Значения нормальной нагрузки и давления воздуха при расчете по формуле (8) должны соответствовать допустимой нормальной деформации шины. Среднее значение коэффициента  $K$  для исследования широкопрофильных шин составляет 1,76, для арочных – 1,46.

В предварительных расчетах проектируемых ходовых систем, при известных (заданных) размерах шин, соответствующее известной нагрузке давление воздуха в шинах можно определить, преобразовав формулу (1) с учетом изложенных выше результатов. Формула может быть записана в виде:

$$\lambda = \frac{G}{2\pi P_w \varepsilon K_L K_B \sqrt{Rr}}.$$

Следовательно, давление воздуха в шине при ее допустимой нормальной деформации можно рассчитать из выражения

$$P_w = \frac{G}{2\pi \varepsilon K_L K_B [\lambda] \sqrt{Rr}}. \quad (9)$$

Полученное значение  $P_w$  используется для вычислений по формулам (7, 8).

Таким образом, при известной нормальной нагрузке на колесо и заданных основных размерах шины, используя последовательно выражения (6), (2), (3), (4) и полученные значения коэффициентов  $K_L$ ,  $K_B$ ,  $\varepsilon$ , можно рассчитать параметры контакта прогнозируемой шины с жестким основанием и оценить по методике [7,8] уровень воздействия ее на почву при допустимой нормальной деформации шины. Если нормальная деформация шины отличается от допустимой, то аналогичные расчеты можно выполнить, определив указанную деформацию шины по формуле (7).

#### Заключение

Выполненные исследования и проведенный анализ подтверждают существенное изменение параметров контакта с жестким основанием шин, используемых на сельскохозяйственной технике, в сравнении с идеализированными. В среднем реальная длина пятна контакта при равной деформации меньше в 1,28 раза, ширина – в 1,23 раза, а контурная площадь больше, чем расчетная по формуле для эллипса в 1,07 раза.

Полученные данные, а также приведенные в статью закономерности позволяют определять показатели опорных свойств, оценить уровень воздействия на почву ряда широкопрофильных и арочных шин в широком диапазоне нагрузок на колеса и значений давления воздуха в шинах, оценивать указанные параметры для шин и ходовых систем с прогнозируемыми параметрами.

Решение проблемы снижения уровня воздействия ходовых систем на почву путем применения шин с пониженным давлением без изменения компоновки машин может позволить снизить более чем в два раза максимальные давления на почву. При этом из-за увеличения площади контакта существенного

уменьшения напряжений в подпахотном слое почвы не происходит.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Проходимость машин/ В.А. Скотников [и др.]. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 328с.
2. Русанов, В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения/ В.А. Русанов. – М.: ВИМ, 1998. – 368 с.
3. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву: ГОСТ 26955-86. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 7 с.
4. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей/ Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 242с.
5. Экспериментальные исследования деформации тракторных шин от нормальной нагрузки/ Э.Б. Станкевич [и др.] //Тракторы и сельхозмашины. – 1985, №6. -С.22-24.
6. Бойков, В.П. Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин/ В.П. Бойков, В.П. Белковский. – М.: Агропромиздат, 1988. – 240 с.
7. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву: ГОСТ 26953-86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 11 с.
8. Техника сельскохозяйственная мобильная. Метод определения максимального нормального напряжения в почве: ГОСТ 26953-86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 4 с.
9. Расчет нормальной жесткости шин для оценки их эксплуатационных показателей/ А.И. Евграфов [и др.] //Автомобильная промышленность. – 1977, №3. – С. 20-22.

УДК 621.31

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.05.2009

## СОСТОЯНИЕ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Г.И. Янукович, канд. техн. наук, профессор, Н.Г. Королевич, канд. экон. наук, доцент (УО БГАТУ)

#### Аннотация

*Показаны источники электрической энергии в Республике Беларусь, их общая установленная мощность и распределение ее по республиканским унитарным предприятиям (РУП). Приведены показатели по РУП производства и потребления электроэнергии. Дан анализ обеспеченности установленными энергетическими мощностями областей республики из расчета на единицу площадей общего земельного фонда, сельхозугодий, пашни, а также на один миллион человек всего населения, сельского населения, трудовых ресурсов.*

#### Введение

Энергосистема Беларуси представляет собой вертикально интегрированную компанию, основная деятельность которой связана с производством, передачей и распределением электрической энергии. Энергетическая система – это сложный комплекс, включающий

электростанции, котельные, электрические и тепловые сети, которые объединены общностью режима их работы на всей территории республики.

Управляет Белорусской энергосистемой государственное производственное объединение (ГПО) «Белэнерго», которое подчинено Министерству энергетики.