

12. Вергейчик, Л.А. Критерий оптимизации чувствительного элемента автоматической системы регулирования глубины хода лемехов/ Л.А. Вергейчик, П.В. Клавсуть, Б.М. Астрахан // Автоматизация и средства технического контроля в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. трудов. – Горки, 1987. – С. 12-15.

13. Нагорский, И.С. Вычисление спектральной плотности по корреляционной функции стационарного случайного процесса / И.С. Нагорский // Труды ЦНИИМЭСХ. – Минск: Урожай, 1972. – Т. 10. – С.78-86.

14. Клавсуть, П.В. Нагрузочные характеристики исполнительного механизма системы стабилизации глубины хода лемехов картофелеуборочного комбайна КСК-4 / П.В.Клавсуть // Механизация возделывания и уборки картофеля в Белорусской ССР: сб. науч. трудов. – Горки, 1987. – С. 66-70.

15. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

УДК 629.11.012

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 28.09.2009

## РАСЧЕТ НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРКАСНОЙ И ОБОЛОЧКОВОЙ ШИН

Г.С. Горин, докт. техн. наук, профессор (БГАТУ); В.В. Радкевич, гл. конструктор, А.А. Янчук, зам. директора по испытаниям и эксплуатации машин (ООО «Агромашресурс»)

### Аннотация

*Получены зависимости для расчета нагрузочных характеристик оболочковой и каркасной шин. Установлены входящие в них константы аппроксимации. Проанализированы возможности повышения нагрузочной способности оболочковой шины.*

*The dependences for calculation of load characteristics of shell and frame tyres are received. The constants of approximation entering into them are established. Possibilities of increasing of loading ability shell tyres are analyzed.*

### Введение

Предприятие «Агромашресурс» (г. Минск) разработало полноприводное, 4х4 универсальное энергосредство механизации (УЭСМ) «Роса» на эластичных колесных движителях сверхнизкого давления КСхШО (колесо сельскохозяйственное с шиной-оболочкой БелОШ1). Энергосредство агрегируется с одноосными технологическими модулями: штанговым опрыскивателем или разбрасывателем твердых минеральных удобрений, образуя единую жесткую конструкцию самоходного опрыскивателя (разбрасывателя) 6х4. Грузоподъемность такого агрегата – до 1000 кг при максимальной общей массе до 2500 кг. Машины комплекса «Роса» в 2005-2008 гг. прошли полный цикл испытаний на Белорусской машиноиспытательной станции (МИС), и с 2009 г. выпускаются серийно.

Подобные, но еще более легкие, транспортные средства создавались под руководством главного конструктора комплекса агротехнических средств «Роса» В.В. Радкевича еще в конце 80-х годов. Они прошли многочисленные испытания во время экспедиций в северных широтах и при покорении южного полюса планеты. Создание таких машин велось в тесном сотрудничестве с ОАО «Белшина» (г. Бобруйск), где конструкторскими работами руководил конструктор В.В. Гуца. После возвращения из экспедиций данные машины нашли свое применение в Самарской и Воронежской областях, а также в Краснодарском крае. С соответствующими доработками на их базе были созданы первые образцы машин сельскохозяйственного назначения.

В данной работе анализируются особенности формирования нагрузочных характеристик тракторной и сверхтонкой оболочковой шин.

Цель работы – проанализировать возможности повышения нагрузочной способности и ресурса оболочковой шины при сохранении её основных достоинств – малых давлений в контакте и жесткости шины в статике.

### Основная часть

#### Механика деформирования пневматической шины

Зависимость нормальной нагрузки  $N$  от величины радиального прогиба шины  $f$  называется нагрузочной характеристикой. Для расчетного определения характеристики оболочковой бескаркасной шины часто применяют формулу Хейдекеля, которая основана на двух гипотезах:

- вне площади контакта шина не деформируется;
- среднее давление  $p_{\Sigma}$  на опорную поверхность (площадку контакта) равно внутреннему давлению воздуха  $p_w$  в ней. Это означает, что жесткость каркаса шины принимается равной нулю.

Тогда передаваемая колесом нормальная нагрузка  $N = p_w F$ . (1)

Площадь эллипса –  $F = \frac{\pi ab}{4}$ , а  $a$  и  $b$  – соответственно, длина и ширина пятна контакта:  
 $a^2 = (D - f_{ct})f_{ct} \approx D f_{ct}$ ,

$$b^2 = (d - f_{ст})f_{ст} \approx d f_{ст},$$

где  $D$  и  $d$  – диаметры колеса, соответственно, наружный и в торцовом сечениях;

$f_{ст}$  – статический прогиб (радиальная деформация) шины.

Так как  $f_{ст}$  – мало, принимается  $(D - f_{ст})f_{ст} \approx D f_{ст}$ .

Подставляя выражения для  $F$ ,  $a$  и  $b$  в формулу (1), получим примерное выражение для расчета нормальной нагрузки, передаваемой бескаркасной оболочковой шиной:

$$N = p_w \pi f_{ст} \sqrt{dD}. \quad (2)$$

Приращения нормальных нагрузок  $\Delta N$  воспринимаются за счет увеличения площади контакта  $\Delta F$  и давления воздуха  $\Delta p_w$

$$\Delta N = \Delta p_w F + p_w \Delta F. \quad (3)$$

Приращение потенциальной энергии сжатого воздуха при деформировании шины:

$$\Delta \Pi = \Delta p_w V + p_w \Delta V. \quad (4)$$

У шин тракторов и прицепов объем внутренней полости  $V=100-200$  л.

Расчеты показывают, что относительное изменение объема  $\Delta V$  даже при больших прогибах не превышает 7%. Поэтому давление воздуха в шине  $\Delta p_w$  изменяется незначительно.

При линейной нагрузочной характеристике шины

$$\Delta \Pi = \frac{\Delta N \cdot \Delta f}{2} = c_\epsilon \frac{\Delta f^2}{2}, \quad (5)$$

где  $c_\epsilon = \frac{\Delta N}{\Delta f}$  – составляющая жесткости шины,

кН/см, вызванная деформацией воздуха.

Приравняв выражения (4) и (5), для  $\Delta \Pi$  получим:

$$c_\epsilon = \frac{2(\Delta p_w V + p_w \Delta V)}{\Delta f^2}, \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

Формула Хейдекеля пригодна лишь для ориентировочных расчетов. В действительности работа сжатия воздуха составляет лишь часть полной работы обжатия шины. Остальная работа затрачивается на деформацию материала шины – каркаса и протектора. Если давление воздуха в камере шины равно нулю, названную жесткость каркаса будем характеризовать условной величиной – давлением  $p_w$ , пропорциональным жесткости каркаса и толщине стенок шины.

Кроме того, существенное влияние на формирование нагрузочной характеристики шины оказывает жесткость протектора.

Выражение для нагрузочной характеристики каркасной шины в работе [1] предложено представлять в следующем виде:

$$\Delta N = \frac{\Delta f^2}{c_1 + c_2 \frac{\Delta f}{p_w + p_w}}, \text{кН}, \quad (6)$$

где  $p_w$  – коэффициент, характеризующий жесткость каркаса, кН/см<sup>2</sup>;

$c_1$  – постоянный для данной шины коэффициент, учитывающий свойства протектора

$$c_1 = \frac{\psi_1 \cdot h}{\psi \psi_2 \cdot E \pi \sqrt{2RD}}, \text{см}^2/\text{кН},$$

где  $\psi$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  – безразмерные эмпирические коэффициенты, соответственно, насыщенности рисунка протектора, учитывающий неравномерность распределения его по площади контакта, ужесточения шины в связи с затруднением поперечной деформации резины;

$E$  – модуль упругости резины, кН/см<sup>2</sup>;

$h$  – толщина протектора, см;

$c_2$  – постоянный для данной шины коэффициент, обратно пропорциональный её линейным размерам, см<sup>-1</sup>

$$c_2 = \frac{1}{k_1 \pi \sqrt{2RD}}.$$

Величина коэффициента  $k_1$  характеризует отношение отсекаемого объема реальной шины к объему теоретического эллиптического сегмента, получаемого при сечении шины плоскостью. Чем больше  $k_1$ , тем больше изменяется объем шины при данном прогибе.

У реальной шины изменение объема  $\Delta V$  при деформировании шины меньше, чем у идеальной в соответствии с расчетной схемой Хейдекеля. Чем больше толщина шины, число слоев корда и меньше ширина профиля шины, тем меньше изменяется объем шины при деформировании и больше работа деформации каркаса. Поэтому считается, что относительное изменение объема камеры сжатия у тракторных шин больше, чем у автомобильных.

По литературным данным:

– для шин легковых и грузовых автомобилей можно принять:  $p_w = 0,1 \dots 0,3 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $k_1 = 0,93 \dots 1,0$ ,  $c_1 = 1,57 \dots 2,24 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/кН;

– для тракторной шины:  $p_w = 1,25 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $k_1 = 0,7 \dots 1,0$ ,  $c_1 = (1,23 \dots 1,74) \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/кН.

С учетом приведенных значений  $k_1$  относительное изменение объема камеры сжатия при деформировании шины, а, следовательно, и изменение давления воздуха в шине мало.

Из приведенной формулы (6) с учетом выражения для  $c_\epsilon$  следует, что при  $c_f=0$  и  $h=0$ , а также  $p_w \neq 0$  составляющая жесткости, вызванная сжатием воздуха и шины, равна

$$c_\Sigma = k_1 (p_w + p_w) \pi \sqrt{2RD},$$

где  $D$  – наружный диаметр шины;

$R$  – радиус кривизны протектора.

Далее приводим экспериментальные данные о нагрузочных характеристиках шины, полученных при разных давлениях воздуха [2], а также рассчитанные авторами константы аппроксимации зависимости жесткости  $c_\Sigma = c_w + c_v$  тракторной шины 12-38 с радиальным кордом от давления воздуха в шине, значения  $c_v$  и удельной работы воздуха [3]:

$$e = \frac{c_B}{c_\Sigma}$$

По результатам аппроксимации результатов экспериментальных исследований, выражение (6) для нагрузочной характеристики тракторной шины 12-38 имеет вид:

$$\Delta N = \frac{10}{-(0,55 \dots 0,78) + \frac{15\Delta f}{k_1(p_w + 1,24)}} \Delta f^2, \text{ кН}, (7)$$

где размерности  $[c_1 = -(0,55 \dots 0,78)] = \text{см}^2/\text{кН}$ ;  $[c_2 = 15] = \text{см}^{-1}$ ;  $[p] = \text{кН}/\text{см}^2$ ; параметры шины  $k_1 = 1,0$ ;  $R = 15 \text{ см}$ ;  $D = 157 \text{ см}$ .

Ввиду малости коэффициента  $c_1$ , учитывающего влияние протектора шины, перепишем выражение (7) в следующем виде:

$$\Delta N = 10k_1 \frac{(p_w + 1,24)\Delta f}{15}. (8)$$

Тогда с учетом того, что  $\Delta N = c_\Sigma \Delta f$ , получим выражение для жесткости каркасной шины:

$$c_\Sigma = \frac{k_1 \cdot (p_w + 1,24)}{1,5}, \text{ кН}/\text{см}. (9)$$

Расчеты по формуле (9) дают значения  $c_\Sigma$ , заниженные на 20% по сравнению с данными таблицы.

Из таблицы следует, что у современного трактора жесткость каркаса шины может превысить жесткость, создаваемую давлением воздуха. Из проведенных ранее исследований [4] новых шин 9-20 следует, что работа сжатия воздуха в них  $A_\epsilon$  при воздействиях нормальной нагрузки и соответствующем давлении воздуха в шине составляет примерно 60% полной работы сжатия  $A_n$ , а остальные 40% затрачиваются на деформацию материала шины, в том числе 1/3 приходится на деформацию протектора.

### Давление и жесткость шины 12-38. Удельная работа сжатия воздуха

Давление, $\text{кН}/\text{см}^2 \cdot 10^{-2}$					
$p_w$ – воздуха	0,8	1,1	1,4	1,7	2,1
$p_w$ – каркаса	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
Жесткость шины, $\text{кН}/\text{см}$					
$c_\epsilon$ – оболочковой (расчетные данные)	0,53	0,73	0,93	0,64	1,4
$c_\Sigma$ – радиальной (экспериментальные данные)	1,4	1,6	1,9	2,2	2,7
$l = \frac{c_\epsilon}{c_\Sigma}$ – удельная работа сжатия воздуха, %	38	46	48	51	51

Аналогичные исследования нагрузочных характеристик тракторной шины 15,5 R 38 модели Ф – 2А с полной высотой почвозацепов  $h_z = 35 \text{ мм}$  и с изношенными почвозацепами  $h_z = 2,0 \text{ мм}$  тракторов «Беларус 822», выполненные НИИ КГШ, показали, что при  $N = 20,5 \text{ кН}$ :

– если  $p_w = 0,20 \text{ МПа}$  отношение  $\frac{A_M}{A_n} = 0,184$

при  $h_z = 35 \text{ мм}$  и  $\frac{A_M}{A_n} = 0,183$  при  $h_z = 2 \text{ мм}$ ;

– если  $p_w = 0,10 \text{ МПа}$   $\frac{A_M}{A_n} = 0,334$  при  $h_z = 35 \text{ мм}$  и

$\frac{A_M}{A_n} = 0,356$  при  $h_z = 2 \text{ мм}$ .

При этом полная работа обжатия шины  $A_n$  при  $p_w = 0,2 \text{ МПа}$  в 1,53 раза больше, чем при  $p_w = 0,1 \text{ МПа}$ , если высота почвозацепов полная, и в 1,48 раза – если почвозацепы изношены. Следовательно, работа деформирования материала шины  $A_M$  в 4 раза больше при  $p_w = 0,1 \text{ МПа}$ , чем при  $p_w = 0,2 \text{ МПа}$ .

Применяемые на тракторах многослойные шины с относительно низким давлением воздуха 0,1-0,2 МПа имеют по этой причине большое сопротивление качению на твердых и грунтовых дорогах. При увеличении нормальной нагрузки на колеса и выезде на твердое основание давление воздуха в шине рекомендуется увеличить так, чтобы сохранить статический прогиб шины и не расслоить её каркас.

К шине трактора предъявляется комплекс противоречивых требований:

- малое давление в контакте;
- высокие тягово-скоростные свойства и КПД;
- большая перегрузочная способность;
- высокая плавность хода, позволяющая двигаться в транспортном потоке со скоростью до 50 км/ч.

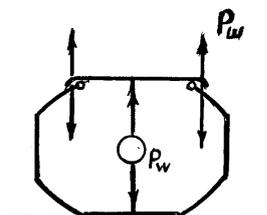
В Российской Федерации разработаны подобные шины «AVTOROS» сверхнизкого давления 43-23,5-21 IT HC2 и 49-23,5-21 IT HC-4 с нормой слоистости 2 и 4 для работы с  $p_w = 35 \dots 40 \text{ кПа}$ . Это позволило поднять их грузоподъемность до 6 кН вместо 2,5 кН у шины – оболочки [5].

Анализ результатов испытаний показал, что радиальная жесткость шины – оболочки в 4,5-6 раз меньше, чем у упомянутых шин «AVTOROS», либо у шин сверхнизкого давления 1300×600-533, используемых на внедорожных транспортных средствах «ТРЭКОЛ-39291» [6].

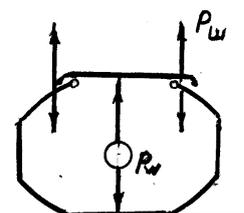
Если коэффициент, характеризующий жесткость каркаса,  $p_w = 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ кН}/\text{см}^2$ , то среднее давление в контакте шины с почвой (рис. 1) будем рассчитывать по формуле:  $p_\Sigma = p_w + p_w$ , а радиальную жесткость

кордной шины сверхнизкого давления по формуле (9) (рис. 1а):

- при  $p_w = 0,1 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $p_{\Sigma} = 1,34 \cdot 10^{-2}$



- а)  $P_{ш} = 1,24 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup> =  $1,24 \cdot 10^{-1}$  МПа;  
 $P_w = 0,1 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup> =  $0,1 \cdot 10^{-1}$  МПа;  
 $P_{\Sigma} = 1,54 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup> =  $1,54 \cdot 10^{-1}$  МПа.



- б)  $P_w = 0,1 \dots 0,2 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>;  
 $P_{ш} = 0,1 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>;  
 $P_{\Sigma} = 0,2 - 0,3 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup> =  $0,2 - 0,3 \cdot 10^{-1}$  МПа.

Рис. 1. Распределение давлений: а – шина кордная сверхнизкого давления; б – шина оболочковая;  $P_w$  – давление воздуха;  $P_{ш}$  – давление каркаса на обод;  $P_{\Sigma}$  – давление в контакте

кН/см<sup>2</sup>,  $c_{\Sigma} = 0,89$  кН/см;

- при  $p_w = 0,3 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $p_{\Sigma} = 1,54 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $c_{\Sigma} = 1,03$  кН/см;
- при  $p_w = 0,5 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $p_{\Sigma} = 1,74 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $c_{\Sigma} = 1,16$  кН/см.

Полученные данные согласуются с данными, приведенными в работах [5 и 6].

У оболочковой шины  $p_w = 0,1 \dots 0,2 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $p_{ш} = 0,1 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $p_{\Sigma} = 0,2 \dots 0,3 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>,  $c_{\Sigma} = 0,47 \dots 0,6$  кН/см (рис. 1б).

Если нормальная нагрузка на колесо  $N=5,5$  кН, статический прогиб кордной шины составляет примерно  $f_{ст} = 5$  см, а парциальная (собственная) частота колебаний машины на такой шине

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{ст}}} \approx 2,23 \text{ Гц.}$$

Если машина разгружена,  $n=3,30$  Гц.

Такая шина слишком жесткая. Повышать плавность хода, снижая давление воздуха в каркасной шине, опасно.

Нагрузочная характеристика современной пневматической шины – линейная (рис. 2). При движении по неровностям и раскатке машины деформации шины и динамические нагрузки на колеса в два-три раза превы-

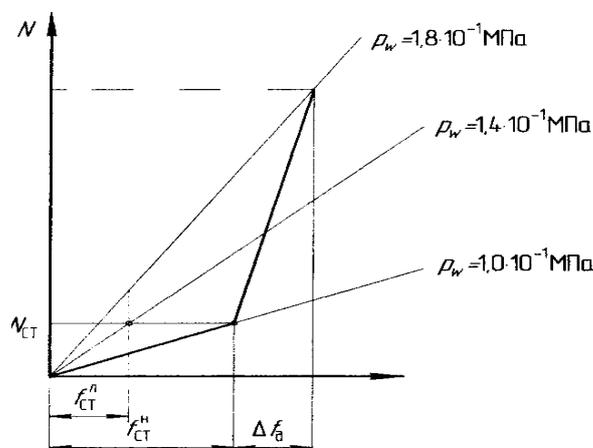


Рис. 2. Формирование нелинейной нагрузочной характеристики

шают статические. Создание пневматической шины с нелинейной нагрузочной характеристикой позволит:

- увеличить статический прогиб шины в два раза;
- ограничить максимальные деформации, предотвращая излом корда.

### Выводы

Получены константы аппроксимации выражений для расчета нагрузочной характеристики и жесткости каркасной шины, а также аналогичные зависимости для оболочковой шины.

Установлено, что из-за большой жесткости каркаса у кордной шины сверхнизкого давления суммарное среднее давление в контакте достигает  $p_{\Sigma} = 1,3 \dots 1,6 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup> при  $p_w = 0,1 \dots 0,3 \cdot 10^{-2}$  кН/см<sup>2</sup>. Следовательно, по показателям воздействия на почву она мало отличается от обычных шин низкого давления.

Из-за высокой жесткости каркасной шины возникают вибрации неподрессоренных масс шасси, что способствует образованию уплотненной корки в следе шины.

Благодаря меньшим давлениям, в контактах с почвой машины с оболочковыми шинами меньше повреждают посевы и способны преодолевать снежные заносы и болота.

На многие, вновь возникающие спорные вопросы, могут ответить лишь опыты производственной эксплуатации комплексов на кордных и оболочковых шинах сверхнизкого давления.

Для повышения грузоподъемности и перегрузочной способности оболочковой шины необходимо сформировать её нелинейную нагрузочную характеристику.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бидерман, В.Л. Автомобильные шины/ В.Л. Бидерман. – М.: Госхимиздат, 1963. –353 с.

2. Селезнев, И.Н. Оценка эксплуатационных характеристик тракторных шин/ И.Н. Селезнев // Каучук и резина, 1969. – №3.

3. Горин, Г.С. Параметры тракторной шины 12х38/ Г.С. Горин// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Мн.: ЦНИИМЭСХ, 1974. – Вып. 15. – С. 118-123.

4. Завьялов, Ю.П. Влияние высоты грунтозацепов протектора на жесткостные характеристики шин

ведущих колес тракторов класса 1,4/ Ю.П. Завьялов // Тракторы и сельхозмашины, 1984. – №3. – С. 18-19.

5. Тягово-сцепные качества высокоэластичных шин сверхнизкого давления/ С.Д. Зайцев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины, 2008, №9. – С. 29-31.

6. Создание вездеходных транспортных средств на пневмоколесных движителях сверхнизкого давления: автореф. ... дис. канд. техн. наук/ В.И. Котляренко. – М.: НАМИ, 1998. – 21с.

## **Прибор автоматического контроля концентрации моющих средств в растворах АМР-4Т**

*Предназначен* для использования в химических лабораториях или на участках очистки с целью автоматизации операции контроля концентрации моющих растворов.



### **Основные технические данные**

Диапазон измерения концентрации	г/л	3...40
Предел допустимой погрешности	%	4
Диапазон температур растворов	°С	20...70
Время одного измерения	мин	не более 2
Потребляемая мощность	ВА	не более 15
Питание (сеть)	В/Гц	220/50
Габаритные размеры длина x ширина x высота	мм	270 x 240 x 85
Масса	кг	3,4
Тип датчика		погружной

*Применение прибора позволяет сократить трудоемкость контроля концентрации моющего раствора по сравнению с химанализом, позволяет оперативно корректировать технологический процесс мойки, тем самым повышая качество очистки деталей и рациональное использование моющих средств.*