

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ КОЛЕИ ПОД СДВОЕННЫМИ ЗАДНИМИ КОЛЕСАМИ ТРАКТОРА «БЕЛАРУС-2022.5» НА СУГЛИНКЕ

А.И. Бобровник,

профессор, докт. техн. наук

Т.А. Варфоломеева,

ст. преподаватель каф. тракторов и автомобилей БГАТУ

М.М. Дечко,

инженер планово-диспетчерского отдела ЛМЗ «Универсал», канд. техн. наук, доцент

Н.Н. Зезетко,

гл. конструктор ОАО «Минский тракторный завод», канд. техн. наук, доцент

В статье исследована схема нагружения заднего моста трактора «БЕЛАРУС-2022.5» со сдвоенными колесами с различным давлением. Рассмотрены формулы для расчета деформации шин и почвы. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных деформации шины от нормальной нагрузки на колесо и жесткости шины. Для упругодеформируемого колеса на уплотняемой почве рассмотрены различные формулы для расчета глубины колеи в зависимости от вертикальной нагрузки на задние колеса и давления в них. Предложена система уравнений для вычисления деформации шин и почвы по методу перемещений для статически неопределенных конструкций и выполнено сравнение результатов теоретических расчетов с полученными экспериментальными данными по изменению глубины колеи, образуемой четырьмя задними колесами при различном давлении в основной и дополнительной шинах. Наименьшее отклонение теоретических и экспериментальных данных, не превышающее 10 %, дает формула Хайлиса. Глубина колеи при движении трактора на суглинке составляет 60-82 мм.

Ключевые слова: сдвоенные колеса трактора, задний ведущий мост, глубина колеи, давление в шине, нагружения задней оси трактора, коэффициент жесткости шины.

The scheme of loading the rear axle of the tractor «BELARUS» with double wheels with different pressure is analyzed in the article. Formulas for calculating the deformation of tires and soil are considered. The calculated and experimental data on the deformation of the tire under normal load on the wheel and the stiffness of the tire are compared. For an elastically deformable wheel on compacted soil, various formulas for calculating the track depth depending on the vertical load on the rear wheels and the pressure in them are considered. A system of equations for calculating the deformation of tires and soil by the displacement method for statically indeterminate structures is proposed, and the results of theoretical calculations are compared with the experimental data obtained on the change in the depth of the track formed by the 4 rear wheels at different pressures in the main and additional tires. The smallest deviation of the theoretical and experimental data, not exceeding 10 %, is given by the Hailis formula. The track depth when driving a tractor on loam is 60-82 mm.

Key words: double tractor wheels, rear drive axle, track depth, tire pressure, tractor rear axle loads, tire stiffness coefficient.

Введение

Сельскохозяйственные тракторы в основном движутся по почве, на плодородие которых влияет давление, оказываемое их движителями.

К показателям, по которым оценивается трактор, непосредственно влияющим на урожайность сельскохозяйственных культур, относится агротехнический, которым предусматривается малое давление колесной ходовой системы на почву – 0,08...0,11 МПа [1]. Снижение давления колес на почву можно обеспе-

чить увеличением площади колес с опорной поверхностью, поэтому широко используется сдваивание, как задних, так и передних колес тракторов.

Ходовые системы современных тракторов совершенствуются в направлении улучшения тягово-сцепных свойств, несущей способности, снижения воздействия на почву. Эта проблема решается путем изменения размеров (диаметра и ширины) ведущих колес и применением сдвоенных колес, что расширяет возможности агрегатирования благодаря применению высокопроизводительных комбинированных

агрегатов. Это позволяет удлинить агросроки использования техники, уменьшить сопротивление движению трактора, глубину колеи, буксование колес трактора, уменьшить расход топлива, повысить тяговое усилие на различных почвах.

Величина давления воздуха в шине оказывает значительное влияние на сопротивление качению трактора в зависимости от полевых условий. Чтобы суммарные потери на деформацию почвы и деформацию шины были минимальными, следует пользоваться переменными давлениями воздуха в шинах.

Однако теоретических и экспериментальных работ по исследованию глубины колеи энергонасыщенных колесных тракторов под задними сдвоенными шинами при различном давлении в основном и дополнительном колесах не проводилось.

В данной работе приведены теоретические и экспериментальные исследования влияния давления в шинах колес на глубину колеи задних сдвоенных колес тракторов «БЕЛАРУС-2022.5».

Основная часть

В ходе исследования проведен анализ и уточнение методики определения глубины колеи под задними сдвоенными колесами сельскохозяйственного трактора.

Исследования проводились на тракторе «БЕЛАРУС-2022.5» (заводской номер 205В00014; двигатель Д-260.4539; № 128937; производство ОАО «УКХ «ММЗ»).

Комплектация трактора: шины ПВМ 420/70R24 – ОАО «Белшина» (Бел 90); шина заднего моста 580/70R42 – ОАО «Белшина» (Бел 126) на ободе W18L; ТСУ-3В (вилка); передний балласт – 10 шт. по 45 кг. Почва – суглинок, при влажности 4,5...6,5 %.

Испытания проводились на экспериментальной базе ОАО «МТЗ».

Температура окружающего воздуха +4 °С, скорость ветра 11 км/ч (западный), атмосферное давление 764.3127 мм рт. ст., относительная влажность воздуха 87 %. Передний мост трактора находился в автоматическом режиме.

При выборе методики определения воздействия движителя трактора на почву, в качестве базовых приняты следующие основные положения: ГОСТ 26953-86 «Методы определения воздействия движителя на почву»; ГОСТ 26955-86 «Нормы воздействия движителя на почву»; «Методика определения условий испытаний»; ГОСТ 7463-2003 «Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия» [2].

В процессе анализа оценивали следующие параметры: глубину и ширину следа основных и дополнительных задних колес (мм); влажность почвы (%); твердость почвы (кг/см²) под основным и дополнительными колесами, а также вне колеи; давление в шинах (кПа); частоту вращения коленчатого вала двигателя (мин⁻¹); загрузку двигателя (%); расход топлива (кг/ч).

В первой серии экспериментов трактор «БЕЛАРУС-2022.5» не агрегатировался с сельскохозяйственной машиной, поэтому основная нагрузка на колеса при равномерном движении создавалась силой тяжести трактора. Массу трактора догружали до 10 т. При этом с учетом распределения силы тяжести по осям в статике на задний мост будет действовать сила $G_T = 55132$ Н.

Схему нагружения заднего моста трактора упрощенно можно представить, как абсолютно жесткую балку, опирающуюся на 4 деформируемые опоры – основные и дополнительные колеса, погружающиеся в почву. Конструкция будет уравниваться четырьмя реакциями опор со стороны основных N_o и дополнительных колес N_d . В каждой опоре присутствует по два деформируемых элемента – основное и дополнительное колесо, с жесткостью, соответственно, λ_o и λ_d , зависящей от давления в шине, а также уплотняющаяся почва с коэффициентом объемного смятия k_n (рис. 1а). Деформация шин вызовет смещение опор рассматриваемой балки на величину $h_{ш}$.

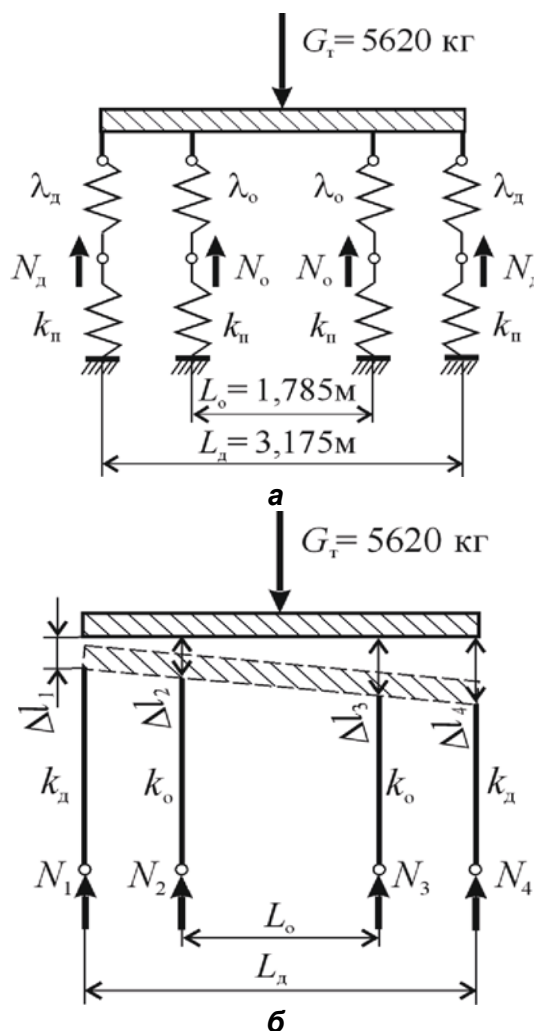


Рисунок 1. Схема нагружения (а), эпюра деформации (б) задней оси трактора

Смещение будет различным для основных и дополнительных колес вследствие разных расстояний до точки приложения нагрузки, а также при разном давлении в шинах. Деформация почвы приведет к смещению опор на глубину колеи h . При этом вследствие симметричной схемы нагружения и симметричной жесткости колес (давления в правых и левых основных и дополнительных колесах одинаковы), суммарные деформации шин и почвы $h_{ш} + h$ должны быть одинаковы под каждой парой основных и дополнительных колес.

Рассмотрим предлагаемые различными исследователями формулы для расчета деформации шин и почвы.

В первом приближении нормальная деформация шины, находящейся в пределах реальных нагрузок и интервалов варьирования давлений в шине, с достаточной степенью точности, как указывается в источнике [3], описывается формулой Р. Хейдекеля:

$$h_{ш} = \frac{G_k}{2\pi p_{ш} \sqrt{r_0 r_c}}, \quad (1)$$

где G_k – нормальная нагрузка на колесо, Н;

$p_{ш}$ – давление воздуха в шине, Па;

$r_0 = D_0 / 2$ – свободный радиус ненагруженного колеса, м;

D_0 – диаметр колеса, м (для шины 580/70R42 $D_0 = 1,9$ м);

r_c – радиус кривизны протектора, м (для шины 580/70R42 $r_c = 0,985$ м).

Откуда коэффициент жесткости шины λ в нормальном направлении подчиняется линейному закону Гука для упругих деформаций.

$$\lambda = \frac{G_k}{h_{ш}} = \pi p_{ш} \sqrt{2D_0 r_c}. \quad (2)$$

В качестве более достоверной приводится формула, полученная В.В. Смильским [4]:

$$G_k = (p_{ш} + p_3) \sqrt{z} \frac{D_0 b_d}{b} h_{ш}^3 \sqrt{\frac{h_{ш}}{H_{п}}}, \quad (3)$$

где p_3 – давление, эквивалентное жесткости каркаса при различной деформации шины, кПа (для тракторных шин при расчетах рекомендовано принимать $p_3 \approx 110$ кПа);

z – число слоев корда в шине PR – Ply Rating (для шины 580/70R42 принимаем условно $z = 8$);

b – ширина профиля беговой дорожки колеса, м ($b = 0,546$ м для шины 580/70R42);

b_d – ширина диска, м (для диска W18L $b_d = 0,457$ м);

$H_{п}$ – высота профиля шины, м ($H_{п} = 0,406$ м).

Зависимость деформации от нагрузки и давления в шине нелинейная:

$$h_{ш} = \sqrt[4]{\frac{H_{п}}{z^2} \left(\frac{G_k b}{D_0 b_d (p_{ш} + p_3)} \right)^3}. \quad (4)$$

В источнике [5] сравниваются зависимости прогиба шины от нормальной нагрузки, полученные экспериментально, расчетом по методу конечных элементов и по эмпирической формуле:

$$h_{ш} = \frac{G_k}{\pi K (p_{ш} + p_3) \sqrt{D_0 b}}, \quad (5)$$

где K – коэффициент, учитывающий конструкционные особенности шины (диагональное или радиальное расположение корда, количество слоев корда, конструктивные особенности протектора, материал армирующих элементов и т.д.).

Указанное сравнение в работе [5] выполнено для автомобильной шины с существенно меньшими по сравнению с тракторными шинами размерами: $D_0 = 686$ мм; $b = 175$ мм; $p_3 = 8$ кПа; $K = 0,79$ (для исследованной бескамерной шины 175/80R16 размер определен на основе проведенных испытаний). Приведенный график (рис. 2) показывает, что экспериментальные данные прогиба шины в зависимости от нормальной нагрузки близки к линейной зависимости. При этом экспериментальные значения несколько превышают рассчитанные по формуле (5) (рис. 2, линии 1 и 2).

В ряде работ [6-8;10] приводятся данные экспериментальных исследований деформации шин на жестком основании под нагрузкой с использованием формулы В. Л. Бидермана:

$$h_{ш} = \frac{c_2 G_k}{2(p_{ш} + p_3)} + \sqrt{\left(\frac{c_2 G_k}{2(p_{ш} + p_3)} \right)^2 + c_1 G_k}, \quad (6)$$

где c_1 , ($\text{м}^2/\text{кН}$) и c_2 , ($1/\text{м}$) – постоянные для данной шины коэффициенты.

Давление p_3 , кПа может быть рассчитано по формуле [6]:

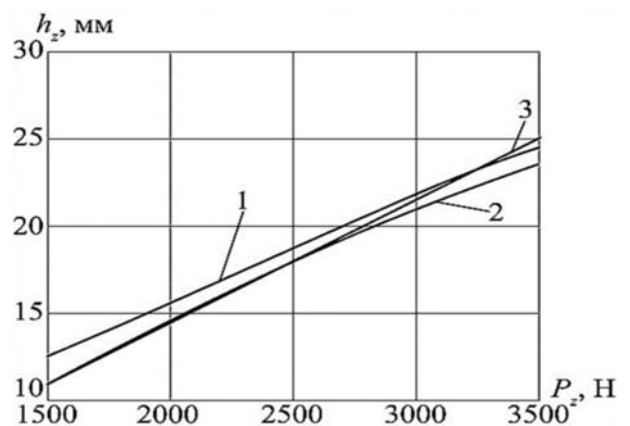


Рисунок 2. Зависимость прогиба шины от нормальной нагрузки на колесо при давлении воздуха в шине 150 кПа: 1 – эксперимент; 2 – расчет по формуле (5); 3 – расчет методом конечных элементов [2]

$$p_3 = 16,7z \left(\sqrt{\frac{D_0}{b}} - 1,4 \right) - 28 \quad (7)$$

Коэффициенты p_3 , c_1 и c_2 зависят от ряда параметров шины. Это наружный диаметр колеса (D_0), максимальная ширина профиля шины (b), статический радиус (r_c), посадочный диаметр шины (D_n) и норма слойности (z) и др. Учитывая, что показатель нормы слойности в технических данных для радиальных шин не указывается, в источнике [7] предлагается адаптировать модель тракторных шин В.Л. Бидермана, используя показатель контурной площади пятна контакта. Выполненные в работе [8] эксперименты позволили получить эмпирические константы формулы (6) для шин 15,5R38 и 16,9R38 (табл. 1).

Таблица 1 Эмпирические константы для расчета деформации шины по формуле (6) [8]

Коэффициент	Шина 15,5R38	Шина 16,9R38
$c_1, \text{м}^2/\text{кН} \times 10^4$	1,45	3,06
$c_1, \text{м}^2/\text{кН} \times 10^4$	0,478	0,765
$c_2, \text{м}^{-1} \times 10^4$		
$c_2, \text{м}^{-1} \times 10^4$		

На рисунке 3 сопоставлены зависимости деформации шины 15,5R38 от нагрузки, рассчитанные по различным формулам и при различном давлении воздуха. Заметим, что деформации, рассчитанные по формуле (1), показывают заниженные значения деформации по сравнению с остальными формулами. Недостаток формулы (6) связан с необходимостью проведения натурных экспериментов для определения эмпирических констант c_1 и c_2 . В формуле (5) также присутствует эмпирическая константа K . Поэтому формулу (6) исключим из дальнейшего анализа, так как она требует проведения натурных экспе-

риментов по измерению деформации шины при различных нагрузках на колесо.

Подставив в формулу (4) константы, соответствующие шине 580/70R42 и диску W18L, получим формулу для расчета деформации шины в виде:

$$h_{\text{ш}} = K \left[\frac{G_{\text{к}}}{(p_{\text{ш}} + p_3)} \right]^{\frac{3}{4}}, \quad (8)$$

где K – коэффициент, включающий параметры конкретной шины, равный в нашем случае 0,258.

Из формулы (8) следует, что жесткость шины зависит не только от давления в ней, но и от приложенной нагрузки. Формула содержит две константы, связанные с параметрами конкретной шины: коэффициент $K = 0,258$ и p_3 – давление, эквивалентное жесткости каркаса. Эти величины целесообразно уточнять опытным путем для конкретного типа шины. Коэффициент жесткости шины в нормальном направлении для рассматриваемого авторами типа шин может быть вычислен по формуле [4]:

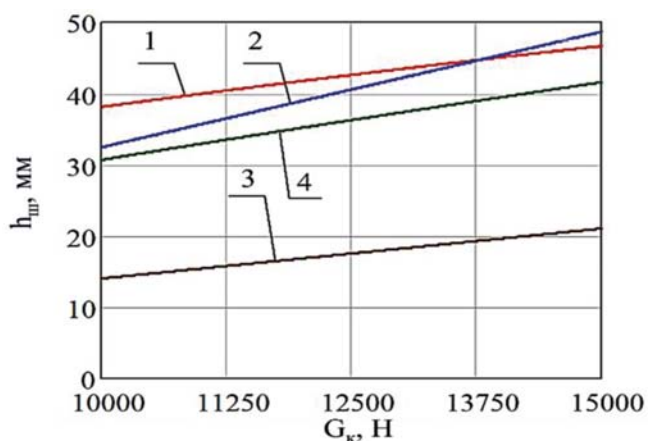
$$\lambda = \frac{G_{\text{к}}}{h_{\text{ш}}} = 3,87 \cdot \sqrt[4]{G_{\text{к}} (p_{\text{ш}} + p_3)^3} \quad (9)$$

При качении эластичного колеса по грунту, наряду с деформацией шины, происходит деформация грунта с образованием колеи. Для упругодеформируемого колеса на уплотняемой почве Гуськовым В.В. [3] предложена формула:

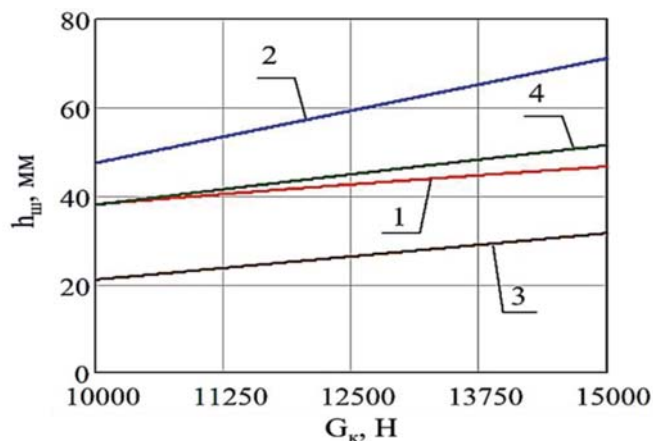
$$h = \sqrt[3]{\frac{G_{\text{к}}^2}{k^2 b^2 D_{\text{пр}}}}, \quad (10)$$

где k – коэффициент объемного смятия грунта, $\text{Н}/\text{м}^3$ ($k = (0,06-0,11) \cdot 10^7 \text{ Н}/\text{м}^3$ для среднего суглинка при слежавшейся пахоте влажностью 16-17 %) [3];

$D_{\text{пр}}$ – приведенный диаметр колеса, м;



а



б

Рисунок 3. Зависимость деформации шины от нормальной нагрузки на колесо при давлении воздуха в шине 100 кПа (а) и 150 кПа (б): 1 – расчет по формуле (6); 2 – расчет по формуле (5); 3 – расчет по формуле (1); 4 – расчет по формуле (4)

$$D_{пр} = D_0 - 2h_{ш} + \frac{h_{ш}}{h}(D_0 - h_{ш}). \quad (11)$$

Подставив выражение (10), формулу (11) в формулу (1), получим:

$$G_k = \lambda \sqrt{D_0 \lambda^2 h + G_k (D_0 - 2h) \lambda - G_k^2}. \quad (12)$$

Величина нагрузки G_k задана в неявном виде. Вертикальная нагрузка на колесо G_k может быть выражена при решении квадратного уравнения:

$$G_k = \lambda \frac{\sqrt{\frac{D_0^2}{4} + h^2 + \frac{D_0 \lambda^2}{b^2 k^2 h} + \frac{D_0}{2} - h}}{\left(\frac{\lambda}{bkh}\right)^2 + 1}, \quad (13)$$

где λ – коэффициент жесткости шины.

По уравнению (13) нельзя аналитически получить обратную формулу для вычисления глубины колеи h по заданной вертикальной нагрузке на колесо G_k , поэтому решение такой задачи может быть выполнено только численными методами.

Если принять, что коэффициент жесткости шины λ может быть задана произвольной формулой, то из формул (10) и (11) получим:

$$G_k = \frac{b^2 k^2 \sqrt{D_0^2 + 4h^2 + \frac{4D_0 \lambda^2}{b^2 k^2 h} + D_0 - 2h}}{2 \frac{\lambda}{h^2} + \frac{b^2 k^2}{\lambda}} \quad (14)$$

В работе Хайлиса Г.А. [9] для расчета глубины колеи в зависимости от нагрузки на деформируемое колесо предложена формула:

$$h = \sqrt{\frac{G_k^2}{r_0^3 (kb)^2 \left[\sqrt{\frac{8k}{9\lambda} + 1} + \sqrt{\frac{k}{2\lambda}} \right]^2}}. \quad (15)$$

Поскольку коэффициент жесткости шины λ для заданного типа является функцией давления в шине, то и глубина колеи при фиксированных параметрах шины и почвы будет зависеть только от давления в шине и нормальной нагрузки, которая распределяется на основные и дополнительные колеса в зависимости от жесткости системы. Коэффициент жесткости шины может быть рассчитан либо по формуле Хейдекеля (2), либо по формуле Смильского (9), а деформация почвы (глубина колеи) – численно из формулы Гуськова (10) или по формуле Хайлиса (15). При этом рассчитанные значения могут заметно отличаться (рис. 4).

Расчет распределения нагрузки от силы тяжести на колеса выполним по методу перемещений для статически неопределимых конструкций. Для упрощения расчета рассмотрим в качестве опор под недеформируемой балкой упругие стержни с жесткостью k_0 и k_n для основных и дополнительных колес соответственно (рис. 16). Каждый такой стержень состоит из двух упругих элементов – шины и почвы, соединен-

ных последовательно и деформируемых под действием соответствующей реакции опоры на $\Delta l = h_{ш} + h$. Зададим виртуальные перемещения опор, которые вызывают деформации $\Delta l_{1...4}$.

Соотношения между виртуальными перемещениями дают два дополнительных уравнения, недостающих для статической определенности конструкции. Дополнив уравнения виртуальных перемещений уравнениями равновесия сил и моментов, получим систему уравнений для определения реакций в опорах, и подставив деформации шины и почвы под основными и дополнительными колесами, получаем:

$$\begin{cases} N_1 + N_2 + N_3 + N_4 - G_T = 0 \\ -N_1(L_A/2 - L_0/2) + N_3 L_0 - G_T L_0/2 + N_4(L_A/2 + L_0/2) = 0; \\ \frac{h_{ш}(N_3, p_{ш0}) + h(N_3, p_{ш0}) - h_{ш}(N_1, p_{шA}) - h(N_1, p_{шA})}{L_A + L_0} = \\ \frac{h_{ш}(N_2, p_{ш0}) + h(N_2, p_{ш0}) - h_{ш}(N_1, p_{шA}) - h(N_1, p_{шA})}{L_A - L_0} \\ \frac{h_{ш}(N_4, p_{шA}) + h(N_4, p_{шA}) - h_{ш}(N_1, p_{шA}) - h(N_1, p_{шA})}{L_A} = \\ \frac{h_{ш}(N_2, p_{ш0}) + h(N_2, p_{ш0}) - h_{ш}(N_1, p_{шA}) - h(N_1, p_{шA})}{L_A/2 - L_0/2}. \end{cases} \quad (16)$$

Система состоит из четырех уравнений с неизвестными $N_1...N_4$, которые также являются аргументами функций для вычислений деформаций шин и почвы для основных и дополнительных колес в зависимости от давления в шине. Решение системы уравнений (16) выполнено численно методом Левенберга-Марквардта в программе Mathcad.

Для сравнения теоретически рассчитанных результатов выполнено экспериментальное исследование по изменению глубины колеи h , мм, образуемой четырьмя задними колесами (основное и дополнительное

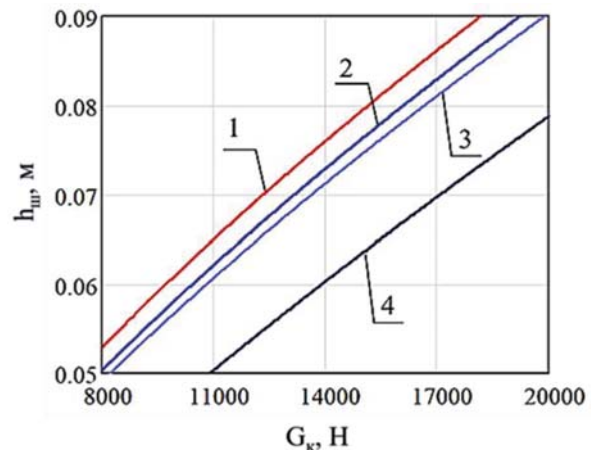


Рисунок 4. Зависимости глубины колеи от нагрузки на колесо при давлении в шине 120 кПа, рассчитанные по формулам: 1 – Хейдекеля (1), Гуськова (10); 2 – Смильского (8), Гуськова (10); 3 – Хейдекеля (1), Хайлиса (15); 4 – Смильского (8), Хайлиса (15)

на правой и левой стороне) на участке длиной 300 м. Давление в колесах варьировалось на трех уровнях (табл. 2). Измерения выполнялись по каждому колесу в десяти равностоящих от начала колеи точках. При этом было установлено, что в первых трех точках глубина колеи постоянно больше, чем в последующих точках. Эти точки находятся на участке разгона, где начиная движение, трактор двигался с ускорением, вызывающим дополнительную нагрузку на колеса и большее их погружение в почву, поэтому рассматривался только участок равномерного движения трактора.

Теоретические расчеты глубины колеи выполнены для всех возможных комбинаций формул: Хейдекель – Гуськов; Смильский – Гуськов; Хейдекель – Хайлис; Смильский – Хайлис. При этом учитывался и

тот факт, что некоторые константы, входящие в расчетные формулы, выбирались приближенно по литературным источникам: k – коэффициент объемного смятия почвы; p_3 – давление, эквивалентное жесткости каркаса; K – коэффициент, связанный с параметрами конкретной шины. В процессе поиска решений значения этих констант подбирались таким образом, чтобы обеспечить наилучшее приближение расчетных и экспериментальных данных. Степень совпадения расчетных и экспериментальных данных оценивалась по средней остаточной дисперсии.

Выполненные расчеты (табл. 3) показали, что теоретические значения глубины колеи по всем формулам дают результаты в пределах допустимого отклонения, которые совпадают с экспериментальными. Формула

Таблица 2. Экспериментальные данные по измерениям глубины колеи под основными и дополнительными колесами трактора на участке установившегося движения

Давление, $p_{ш}$, кПа		Колесо	Глубина колеи, h_3 , мм.													Среднее	Дисперсия	
основное колесо	дополнительное колесо																	
120	100	основное	70	74	73	70	70	75	69	80	74	72	70	72	76	71	73	9
160	140		98	92	89	85	70	72	74	96	94	86	82	74	74	77	83	93
130	110		80	79	81	78	64	75	75	79	79	78	79	65	78	75	76	27
160	100		99	98	98	97	97	95	95	98	97	97	96	97	96	95	97	2
120	140		69	72	74	76	68	71	69	69	73	72	75	69	70	69	71	7
160	110		88	89	90	90	94	87	87	89	89	90	89	94	87	87	89	5
120	110		75	73	69	70	64	70	72	77	76	60	77	60	77	70	71	35
130	140		80	80	77	78	70	76	79	84	81	79	76	79	78	78	78	10
130	100		89	86	77	80	79	79	81	86	86	80	80	81	79	80	82	13
120	100		72	70	69	72	68	70	68	76	76	70	74	70	72	67	71	8
160	140	дополнительное	94	83	84	89	74	80	79	94	86	87	88	72	86	74	84	49
130	110		79	79	77	77	60	74	73	76	77	77	76	63	76	74	74	32
160	100		64	62	64	59	61	64	64	68	62	64	62	66	65	65	64	5
120	140		76	70	75	76	79	70	68	68	70	73	74	70	69	70	72	12
160	110		86	70	76	79	74	70	74	80	69	74	78	79	79	76	76	22
120	110		72	70	68	69	60	74	69	77	75	61	74	60	74	69	69	31
130	140		83	84	80	82	79	79	83	85	86	83	86	79	70	84	82	17
130	100		80	79	75	80	76	77	79	79	81	78	78	76	80	79	78	3

Таблица 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных глубины колеи h , мм под основными и дополнительными колесами трактора на участке установившегося движения

Давление, кПа		Эксперимент		Гуськов								Хайлис							
				Хейдекель				Смильский				Хейдекель				Смильский			
				Расчетное		Отклонение		Расчетное		Отклонение		Расчетное		Отклонение		Расчетное		Отклонение	
осн.	доп.	осн.	доп.	осн.	доп.	осн.	доп.	осн.	доп.	осн.	доп.	осн.	доп.	осн.	доп.	осн.	доп.		
120	100	73	71	79	76	-6	-5	78	74	-5	-3	76	72	-3	-1	77	74	-4	-3
160	140	83	84	80	78	3	6	79	77	4	7	83	81	0	3	80	78	3	6
130	110	76	74	79	77	-3	-3	78	75	-2	-1	78	74	-2	0	78	75	-2	-1
160	100	97	64	82	75	15	-11	82	72	15	-8	82	73	15	-9	81	74	16	-10
120	140	71	72	77	80	-6	-8	75	79	-4	-7	77	80	-6	-8	76	79	-5	-7
160	110	89	76	81	76	8	0	81	73	8	3	83	75	6	1	81	75	8	1
120	110	71	69	79	77	-8	-8	77	75	-6	-6	76	74	-5	-5	77	75	-6	-6
130	140	78	82	78	79	0	3	76	78	2	4	79	80	-1	2	78	79	0	3
130	100	82	78	80	76	2	2	79	73	3	5	78	72	4	6	78	74	4	4
Средняя дисперсия				43				45				32				38			
k				$0,076 \times 10^7$				$0,071 \times 10^7$				$0,074 \times 10^7$				$0,060 \times 10^7$			
p_3								10								70			
K								0,245								0,25			

Хайлиса дает наименьшее отклонение при сравнении с экспериментальными данными. Отклонения расчетных значений глубины колеи от средних экспериментальных по всем формулам не превышают 10 %, в то время как отклонения экспериментальных значений от их средних – 18 %. Исключением является единственный эксперимент, в котором давление в шинах максимально отличалось (в основных колесах – 160 кПа, в дополнительных – 100 кПа).

Фактическое погружение основных колес в грунт при этом было на 15 мм, а дополнительных – на 10 мм больше расчетного. Это связано с тем, что очень низкое давление в шинах дополнительных колес приводит к большой деформации, которая значительно отличается от теоретически рассчитываемой по формулам Хейдекеля и Смильского.

При этом основные колеса будут глубже погружаться в почву, что вызывает возрастание сопротивления качению и дополнительное тяговое усилие на основных колесах, что в свою очередь способствует значительному погружению основных колес в почву.

Глубина колеи трактора «Беларус-2022.5» на суглинке при давлении, в основном, 120-160 кПа и дополнительном колесе 100-140 кПа составляет 64-97 мм.

Заключение

1. Выполнен сравнительный анализ методик расчета нормальной деформации шин и почвы (глубины колеи) применительно к тракторным шинам марки Бел-126 с профилем 580/70R42 на ободе W18L. Проведено экспериментальное исследование по определению глубины колеи под основными и дополнительными колесами на задней оси трактора «БЕЛАРУС-2022.5» со двоянными колесами с различным давлением в шинах при движении без прицепных агрегатов по суглинку.

2. Предложена математическая модель для теоретического расчета распределения нормальной нагрузки от силы тяжести трактора по методу перемещений для статически неопределенных конструкций на основные и дополнительные колеса в зависимости от давления в шинах. Определены теоретические значения глубины колеи в зависимости от соотношения давлений в основных и дополнительных шинах при движении трактора без прицепного агрегата по суглинку.

3. Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментальных значений глубины колеи показывает, что отклонения не превышают 10 %, в то время как отклонения самих экспериментальных значений от их средних 18 %. Формула Хайлиса дает результат с наименьшим допустимым отклонением к экспериментальным данным.

4. Максимальное отклонение теоретических и экспериментальных данных наблюдается при максимальной разнице давлений в основных и дополнительных шинах, что объясняется тем, что низкое давление в шинах дополнительных колес приводит к большой

деформации почвы, которая значительно отличается от теоретически рассчитываемой. Основные колеса будут глубже погружаться в почву, что вызывает значительное возрастание сопротивления качению и дополнительное тяговое усилие на основных колесах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шарипов, В.М. Конструирование и расчет тракторов / В.М. Шарипов. – М.: Машиностроение, 2004. – 591 с.

2. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. МКС 65.060.10. ОКП 47 2200: ГОСТ 24057-2001. – Введен 01.01.2003.

3. Тракторы. Теория: учебник для студентов вузов по специальности «Автомобили и тракторы» / В.В. Гуськов [и др.]; под общ. ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 14.

4. Скотников, В.А. Основы расчета трактора и автомобиля / В.А. Скотников, А.А. Машенский, А.С. Солонский; под общ. ред. В.А. Скотникова. – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с.

5. Вольская Н.С. Моделирование автомобильной пневматической шины, взаимодействующей с твердой неровной опорной поверхностью / Н.С. Вольская, Я.Ю. Левенков, О.А. Русанов // Наука и образование: электронный науч.-технич. журнал. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 05.2013. – С. 107-125.

6. Ксеневиц, И.П. Ходовая система – почва – урожай / И.П. Ксеневиц, В.А. Скотников, М.И. Ляско. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.

7. Ребров, А.Ю. Использование информационных технологий при идентификации показателей инновационных тракторных сельскохозяйственных шин категорий IF и VF / А.Ю. Ребров, Р.П. Мигущенко // Механіка та машинобудування. – 2015. – № 1. – С. 98-105.

8. Влияние внутреннего давления воздуха в шине на максимальное контактное давление на опорное основание / В.Г. Шевцов [и др.]; Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства [Электронный ресурс]. – 2015. Режим доступа: <https://docplayer.ru/67283996-Mehanizacii-selskogo-hozyaystva-vliyanie-vnutrennego-davleniya-vozduha-v-shine-na-maksimalnoe-kontaktnoe-davlenie-na-opornoe-osnovanie.html>. – Дата доступа: 13.05.2021.

9. Хайлис, Г.А. Определение глубины колеи и силы сопротивления перекатыванию по почве свободного пневматического колеса / Г.А. Хайлис // Достижения науки и техники в АПК. – 2006. – № 4. – С. 10-14.

10. Бидерман, В.Л. Автомобильные шины / В.Л. Бидерман, Р.Л. Гуслицер М.: Госхимиздат, 1963. – 384 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.09.2021