

УДК 621.43.068.4

UDC 621.43.068.4

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

Technologies and means of agricultural mechanization

**К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛАСТИЧНОГО КОЛЕСА С ПОЧВЕННЫМ ОСНОВАНИЕМ****TO THE QUESTION OF MODELING THE PROCESS OF INTERACTION OF THE ELASTIC WHEEL WITH THE SOIL BASE**

Аванесян Андрей Михайлович  
ассистент  
РИНЦ SPIN-код = 7559-7264  
E-mail: Avanesyan.andrej@yandex.ru

Avanesyan Andrey Mikhaylovich  
assistant  
RSCI SPIN-code = 7559-7264  
E-mail: Avanesyan.andrej@yandex.ru

Оберемок Виктор Алексеевич  
к.т.н., доцент  
РИНЦ SPIN-код = 6469-6072  
E-mail: Oberemok56@yandex.ru

Oberemok Victor Alekseevich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor  
RSCI SPIN-code = 6469-6072  
E-mail: Oberemok56@yandex.ru

Сергеев Николай Викторович  
К.т.н., доцент  
РИНЦ SPIN-код= 2368-1380  
E-mail: sergeev-n.v@mail.ru  
*Азово-Черноморский инженерный институт фил.  
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный  
университет» г. Зерноград Ростовской области,  
Россия*

Sergeyev Nikolai Viktorovich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor  
RSCI SPIN-code = 2368-1380  
E-mail: sergeev-n.v@mail.ru  
*Azov-Black Sea engineering institute of the Don  
state agrarian university, Zernograd, Rostov region,  
Russian Federation*

Одной из важнейших проблем, стоящих перед сельскохозяйственным производством, является повышение тягово-энергетических свойств и снижение уплотняющего воздействия колёсных движителей энергонасыщенных тракторов на почву. Решение этой проблемы требует широкого внедрения систем автоматизированного проектирования, позволяющих уже на стадии проектирования прогнозировать тягово-сцепные, топливно-экономические и агротехнологические свойства МТА. Тягово-энергетические показатели колёсных сельскохозяйственных тракторов, уровень воздействия движителей на почву в значительной мере определяются совершенством пневматических шин. Поиск оптимальных параметров пневматических шин, согласование характеристик шин с параметрами и условиями эксплуатации МТА, требуют решения двух основных задач. Во-первых, разработки аналитических зависимостей, описывающих процесс взаимодействия эластичных колёс с почвенным основанием в зависимости от режима качения колеса. Во-вторых, доведения до инженерного уровня методики расчёта и анализа системы колёсный движитель – почва. В работе рассматриваются вопросы физического и математического моделирования системы пневматическое колесо – почва. Отмечается, что из существующих подходов к описанию процесса взаимодействия эластичного колеса с почвой наиболее предпочтительным является использование реологических моделей, учитывающих одновременное деформирование и последующее восстановление почвы и шины. Однако, в

One of the most important problems facing agricultural production is to increase traction and energy properties and to decrease the deforming effect of wheel propellers of power tractors on the soil. The solution to this problem requires the widespread introduction of computer-aided design systems, which make it possible to predict the towing, fuel, economic, and agro-technological properties of the tractor unit at the design stage. Traction and energy indicators of wheeled agricultural tractors, the level of impact of wheel propellers on the soil are largely determined by the quality of pneumatic tires. The search for the optimal parameters of pneumatic tires, the compliance of tire characteristics with the parameters and operating conditions of the tractor unit, require solving two main problems. Firstly, the development of analytical dependencies describing the process of interaction of elastic wheels with the soil base, depending on the rolling mode of the wheel. Secondly, bringing to the engineering level the methods of calculation and analysis of the wheel propellers and soil system. The work discusses the issues of physical and mathematical modeling of a pneumatic wheel and soil system. It is noted that among the existing approaches to describing the process of interaction of an elastic wheel with soil, it is most preferable to use rheological models that take into account the simultaneous deformation and subsequent restoration of the soil and tire. However, when it comes to the existing models, the formation of the area of the contact patch is associated with a

существующих моделях формирование площади пятна контакта связывают с общим нормальным прогибом, что не подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями. В предлагаемой работе введено понятие агротехнологического прогиба пневматической шины. Разработанная модель позволяет при известной нормальной нагрузке на колесо, радиусе качения колеса и скорости движения рассчитать глубину колеи, тангенциальную и радиальную деформации шины, продольную и нормальную деформации основания, давление в зоне контакта. Приведены аналитические и экспериментальные зависимости давления в контакте и глубины колеи от величины агротехнического прогиба

Ключевые слова: ЭЛАСТИЧНОЕ КОЛЕСО, НОРМАЛЬНЫЙ ПРОГИБ, АГРОТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГИБ, ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА, НАПРЯЖЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОЧВЫ, УПЛОТНЕНИЕ ПОЧВЫ, ГЛУБИНА КОЛЕИ, ДАВЛЕНИЕ В КОНТАКТЕ

common normal deflection, which is not confirmed by numerous experimental studies. In the present work, the concept of agrotechnological deflection of a pneumatic tire is introduced. The developed model makes it possible to calculate the rut depth, the tangential and radial deformations of the tire, the longitudinal and normal deformations of the base, and the contact pressure under a known normal load on the wheel, wheel rolling radius and speed. We have also presented analytical and experimental dependences of the contact pressure and the rut depth on the size of the agrotechnical deflection

Keywords: ELASTIC WHEEL, NORMAL DEFLECTION, AGROTECHNICAL DEFLECTION, AREA OF CONTACT PATCH, PRESSURE OF SOIL DEFORMATION, SOIL PANNING, RUT DEPTH, CONTACT PRESSURE

DOI: <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-155-002>

Одной из важнейших проблем, стоящих перед сельскохозяйственным производством, является повышение тягово-энергетических свойств и снижение уплотняющего воздействия колёсных движителей энергонасыщенных тракторов на почву [1,2]. Оптимизация параметров пневматической шины, как основного элемента колёсного движителя, является одним из направлений повышения эксплуатационных показателей сельскохозяйственных тракторов [3,4].

Поиск оптимальных параметров пневматических шин, согласование характеристик шин с параметрами и условиями эксплуатации МТА, требуют разработки математических моделей системы движитель-почва. широкого внедрения систем автоматизированного проектирования, позволяющих уже на стадии проектирования с достаточной для практики точностью рассчитывать показатели исследуемых процессов [5].

Основой для таких исследований являются математические модели эластичное колесо – почва, учитывающие вязко-упругие свойств пневматической шины и почвы [6,7].

Точность выполняемых расчётов зависит главным образом от выбора

исходных уравнений, описывающих характер и закономерности деформирования контактируемых тел [8].

Целью настоящей работы являлся расчёт и исследование показателей уплотняющего воздействия эластичных колёс на почву.

Для расчета показателей уплотняющего воздействия колёсного движителя на почву использовалась реологическая модель системы пневматическая шина – почва В.П. Бойкова – М.А. Левина [9]. Рассматриваемая модель позволяет по известной нагрузке на ось колеса  $G_k$  (рисунок 1) и свободному радиусу колеса  $R$  определять тангенциальную и радиальную деформации шины, продольную и нормальную деформации порного основания, давление в зоне контакта  $q$ , глубину колеи .

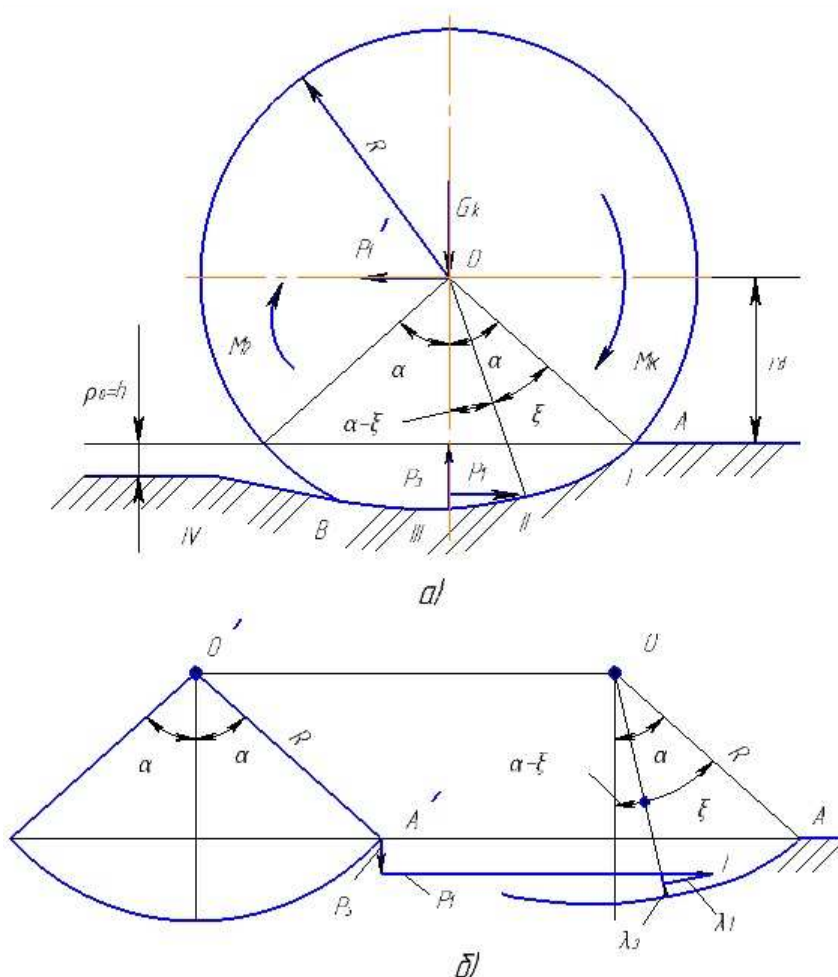


Рисунок 1 – Схема сил и деформаций пневматической шины и почвы.

Предложенная модель предполагает использование на образование

площади контакта всего нормального прогиба шины. Однако исследования характера деформации крупногабаритных тракторных шин показали, что на образование площади контакта используется не весь прогиб, а только часть его.

В связи с этим, при разработке математических моделей для расчета уплотняющего воздействия пневматических колёс на почву необходимо учитывать не полный нормальный прогиб шины, а лишь часть его, связанную с развитием длины контакта (агротехнический прогиб).

В предлагаемой работе неинвариантность площади контакта нормальной деформации шины была учтена введением коэффициента использования нормального прогиба на развитие площади контакта  $K_h$ .

$$K_h = \frac{h_n}{h_0}, \quad (1)$$

где  $h_n$  – часть прогиба, идущего на развитие площади контакта, мм;

$h_0$  – полная радиальная деформация шины, мм.

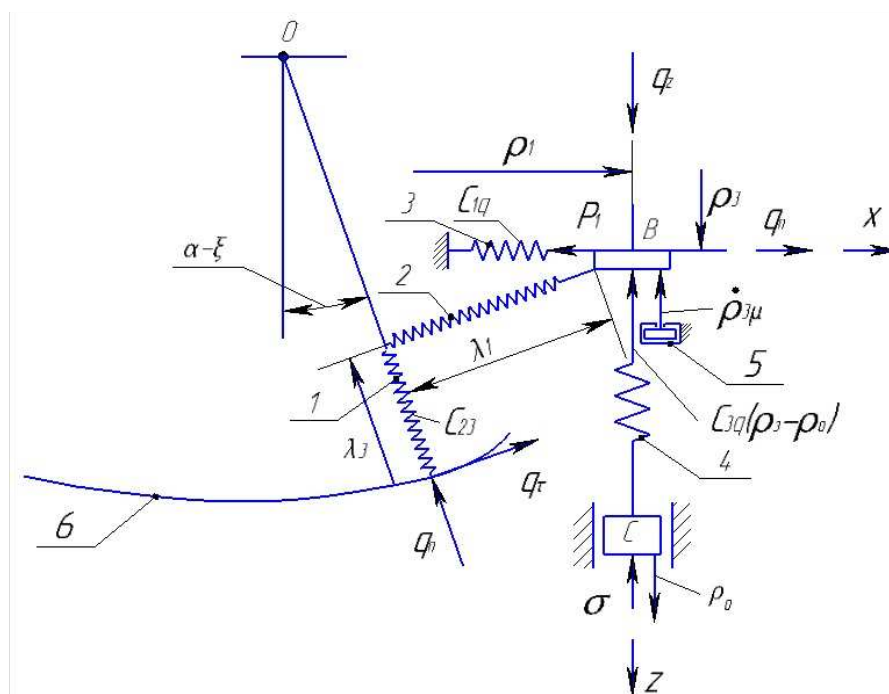


Рисунок 2 – Механическая модель системы «эластичное колесо – почва»:

1,2 – пружины, имитирующие радиальную и тангенциальную жёст-

кость шин; 3,4 – пружины, имитирующие продольную и тангенциальную жесткость почвы; 5 – элемент, учитывающий вязкие свойства почвы; 6 – экваториальная линия шины.

Почва в модели представлена элементами “В” и “С” (рис.2). Элемент “С” – безмассовый, характеризует сухое трение при пластической деформации почвы. Элемент “В” имеет приведенную эффективную массу  $m$ .

В системе все механические характеристики принимаются в расчёте на единицу длины контакта шины с почвой. Реакция почвы на колесо описывается четырьмя составляющими [9].

1. Силой упругой деформации почвы

$$= \quad , \quad (2)$$

где  $C_{3D}$  – нормальная жёсткость почвы, Н/мм;

нормальная деформация почвы, мм;

нормальная пластическая деформация почвы, мм.

2. Силой пластической деформации почвы

$$= = + + \quad , \quad (3)$$

где коэффициенты регрессии.

3. Силой инерции массы почвы  $m$ , вовлечённой в перемещение при образовании колеи

$$= \quad , \quad (4)$$

4. Силой вязкого сопротивления почвы

$$= \quad , \quad (5)$$

где коэффициент вязкого сопротивления почвы, Нс/м.

Распределённые усилия, действующие на почву со стороны шины в вертикальном  $q_z$  и горизонтальном  $q_x$  направлениях, равны:

$$= + + \quad , \quad (6)$$

$$= \quad , \quad (7)$$

Распределённые усилия, действующие на шину в радиальном  $q_n$  и тангенциальном направлениях

$$= \quad , \quad (8)$$

$$= \quad , \quad (9)$$

где  $C_{10}$  — продольная жесткость почвы, Н/мм;

— продольная деформация почвы, мм;

$C_{23}$  — радиальная жёсткость беговой дорожки шины, Н/мм;

$C_1$  — продольная жёсткость шины, Н/мм;

— радиальное и тангенциальное перемещение беговой дорожки шины, мм.

Исходя из равенства по модулю распределённых усилий, действующих на колесо и почву, а также учитывая зависимости (6-9) получим:

$$+ \quad = \quad = \quad , \quad (10)$$

$$= \quad + \quad + \quad + \quad = \quad (11)$$

где — передний угол контакта колеса с почвой;

— угол поворота колеса;

$R$  — расстояние от оси колеса до передней точки контакта, мм;

$r_k$  — радиус качения колеса, мм.

Элементарные приращения усилий, действующих со стороны почвы на шину в направлении вертикали и горизонтали в точке “Г” с координатой , с учётом зависимостей (8) и (9) соответственно равны:

$$= \quad + \quad = \quad , \quad (12)$$

$$= \quad + \quad , \quad (13)$$

Элементарное приращение момента реакции грунта  $dM_2$  определится как

$$= \quad + \quad , \quad (14)$$

С учётом уравнений (1-14) математическая модель взаимодействия пневматического колеса с почвой будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & \dots = \dots + \dots \\
 & \dots = \dots \\
 & \dots = \dots + \dots \\
 & \dots = \dots + \dots \\
 & \dots = \dots \\
 & \dots = \dots + \dots = \dots \\
 & \dots = \dots = \dots \\
 & \dots = \dots
 \end{aligned}$$

Система уравнений (15) оказывается полной с учётом равенств (6-11).

Решение системы уравнений (15) позволяет определить показатели воздействия на почву от условий движения и агротехнических качеств движителя.

Расчёты показателей уплотнения почвы, подготовленной под посев, выполнялись для радиальной шины модели Ф-81 со свободным радиусом колесом  $R=900$  мм и шириной беговой дорожки  $B=730$  мм. Уплотнение почвы оценивалось глубиной колеи  $h=$  и давлением в зоне контакта  $q_n$ .

Результаты расчетов позволили сделать следующие выводы:

При  $K_h=1,0$  значения глубины колеи  $h$  и давления в контакте  $q_n$ , рассчитанные по существующей и уточнённой модели совпадают. При

глубина колеи (рис.3) и давление в контакте (рис.4) по уточнённой методике получаются больше.

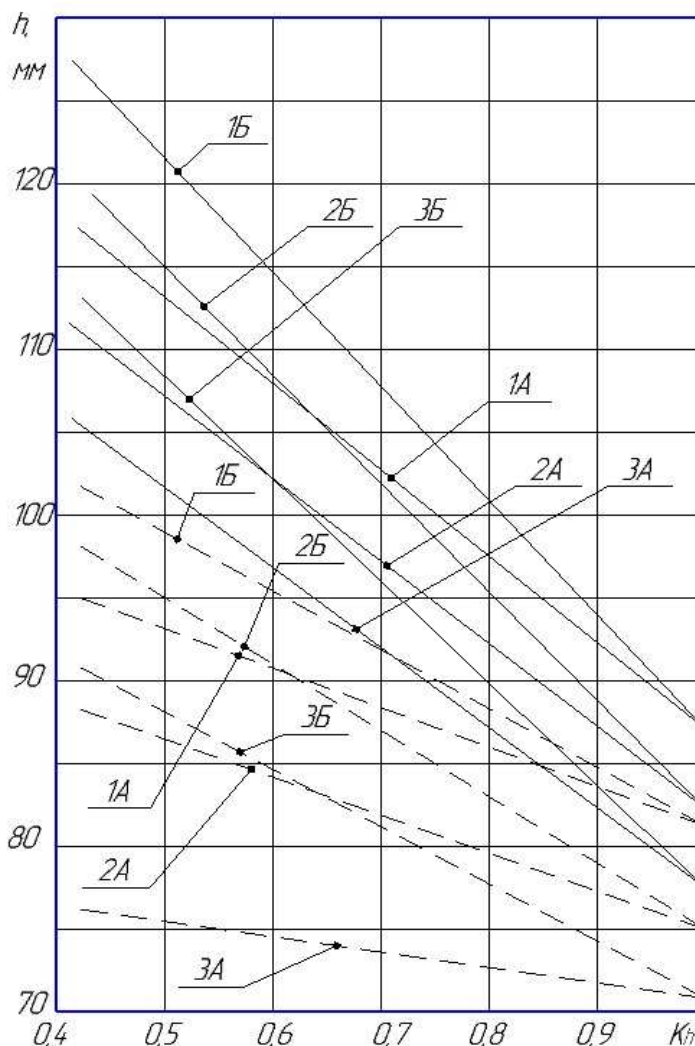


Рисунок 3 – Зависимость глубины колеи от коэффициента агротехнического прогиба  $K_h$ :

---- за один проход; за два прохода;

**А** – расчёт по существующей модели; **Б** – расчёт по уточнённой модели;

1 –  $G=50$  кН; 2 –  $G=45$  кН; 3 –  $G=40$  кН.

С уменьшением  $K_h$  эта разница возрастает. При  $K_h=0,40$  она достигает 9,3% по глубине (рис.3) и 16,6% по давлению на почву (рис.4).



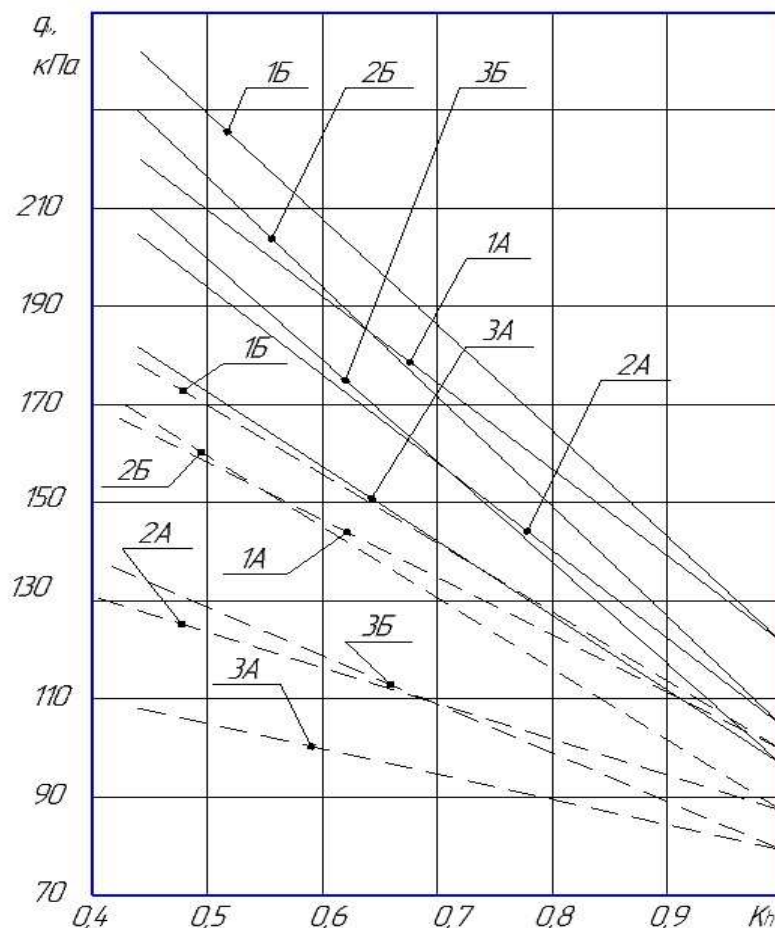


Рисунок 4 – Зависимость давления на почву от коэффициента агротехнического прогиба  $K_h$ :

---- за один проход; за два прохода;

**А** – расчёт по существующей модели; **Б** – расчёт по уточнённой модели;

1 –  $G=50$  кН; 2 –  $G=45$  кН; 3 –  $G=40$  кН.

Кроме этого, с уменьшением коэффициента агротехнического прогиба  $K_h$  возрастает разность между значениями глубины и давления при первом и втором проходах. Так, если при  $K_h=1,0$  при втором проходе коля становится глубже на 9,2%, то при  $K_h=0,40$  она увеличивается на 22,8%.

Проведённые исследования подтвердили существенность влияния коэффициента агротехнического прогиба  $K_h$  на показатели уплотняющего

воздействия пневматических колёс на почву. В общем случае увеличение его значения на каждые 10% приводит к уменьшению глубины колеи на 7,8%, снижению контактных давлений на почву до 20%.

Для проверки полученных результатов были проведены полевые исследования уплотняющего воздействия колес указанного типоразмера на поле, подготовленном под посев. Вязко-упругие характеристики шины и почвы были идентичными характеристикам, принятым для проведения теоретических расчётов. Коэффициент агротехнического прогиба шины  $K_h$  составил 0,59. Нормальная нагрузка на ось испытуемого колеса составила 40 кН. Испытания проводились с использованием шинного тестера конструкции АЧИМСХ2 [10]. Полевые испытания подтвердили корректность математической модели. Среднее значение глубины колеи составило 8,2 см, что ниже на 3,7% расчётного значения по уточненной методике и выше на 9,4% по существующей. Максимальное значение контактных давлений составило 114 кПа, что на 5,0 % меньше расчётного по уточнённой и выше на 14% по существующей методике.

#### Выводы

Оптимизация параметров тракторных шин требует разработки современных методов расчета показателей, характеризующих закономерности деформации шин и опорного основания. В качестве основы для таких расчётов могут быть использованы реологические модели системы эластичное колесо-почва.

При решении задач воздействия эластичных колёс на почву, необходим учёт параметров, характеризующих способность шин использовать нормальный прогиб на развитие площади контакта. Не учёт указанных параметров приводит к завышению площади контакта и снижению нормальных давлений соответственно на 9,2 % и 22,8 %.

## Литература

1. Кравченко В.А. Повышение эффективности МТА на базе колёсных тракторов / В.А. Кравченко, В.А. Оберемок, Л.В. Кравченко // Технология колёсных и гусеничных машин. 2014. № 6 (16). С. 45-50.
2. Кравченко В.А. Повышение эксплуатационных показателей движителей сельскохозяйственных колёсных тракторов / В.А. Кравченко, В.А. Оберемок, В.Г. Яровой // Монография. Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт. 2015. 212 с.
3. Меликов И.М. Оптимизация конструктивных параметров радиальных шин движителей зерноуборочных комбайнов / И.М. Меликов // Тракторы и сельхозмашины. № 2. 2018. С.41-46.
4. Повышение эксплуатационных качеств колёсных движителей / В.В. Коптев, В.А. Кравченко, В.Г. Яровой и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2000. № 5. С. 33-34.
5. Кравченко В.А. Оптимизация параметров движителей колёсных тракторов / В.А. Кравченко // Эколого-мелиоративные аспекты рационального природопользования: материалы Международной научно-практической конференции. Волгоград, 31 января - 3 февраля 2017 г. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2017. Том 3. С.17-24.
6. Золотаревская Д.И. Математические модели деформирования эластичных колёс / Д.И. Золотаревская // Техника в сельском хозяйстве. 1989. № 1. С. 45-49.
7. Водяник И.И. Применение реологических моделей для описания взаимодействия тракторного колеса с почвой / И.И. Водяник // Совершенствование конструкций и улучшение эксплуатационных качеств машин в сельском хозяйстве. Кишинёв: Кишинёвский СХИ, 1982. С.32-37.
8. Золотаревская Д.И. Анализ влияния основных факторов на характеристики упругих свойств эластичных колёс тракторов / Д.И. Золотаревская // Тракторы и сельхозмашины. № 4. 2018. С. 71-78.
9. Бойков В.П. Определение некоторых показателей взаимодействия колёсного движителя трактора с почвогрунтом / В.П. Бойков, М.А. Левин // Тракторы и сельхозмашины, 1986, № 6. – С.610.
10. А.с. 1259132 СССР, МКИ G 01M17/02. Шинный тестер / В.Я. Яровой, А.Ф. Шкарлет, В.Н. Гоголев, В.А. Оберемок (СССР). №3768376. Оpubл. 23.09.86. Бюл. № 35.

## References

1. Kravchenko V.A. Povyshenie effektivnosti MTA na baze kolyosnyh traktorov / V.A. Kravchenko, V.A. Oberemok, L.V. Kravchenko // Tekhnologiya kolyosnyh i gusenichnyh mashin. 2014. № 6 (16). p. 45-50.
2. Kravchenko V.A. Povyshenie ekspluatatsionnyh pokazatelej dvizhitelej sel'skohozyajstvennyh kolyosnyh traktorov / V.A. Kravchenko, V.A. Oberemok, V.G. Yarovoj // Monografiya. Zernograd: Azovo-CHernomorskij inzhenernyj institut. 2015. p. 212.
3. Melikov I.M. Optimizatsiya konstruktivnyh parametrov radial'nyh shin dvizhitelej zernouborochnyh kombajnov / I.M. Melikov // Traktory i sel'hozmashiny. № 2. 2018. p.41-46.
4. Povyshenie ekspluatatsionnyh kachestv kolyosnyh dvizhitelej / V.V. Koptev, V.A. Kravchenko, V.G. Yarovoj i dr. // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyajstva. 2000. № 5. p. 33-34.
5. Kravchenko V.A. Optimizatsiya parametrov dvizhitelej kolyosnyh traktorov / V.A. Kravchenko // Ekologo-meliorativnye aspekty racional'nogo prirodopol'zovaniya: materialy

Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Volgograd, 31 yanvarya -3 fevralya 2017 g. Volgograd: Volgogradskij GAU, 2017. Tom 3. p.17-24.

6. Zolotarevskaya D.I. Matematicheskie modeli deformirovaniya elastichnyh ko-lyos / D.I. Zolotarevskaya // Tekhnika v sel'skom hozyajstve. 1989. № 1. p. 45-49.

7. Vodyanik I.I. Primenenie reologicheskikh modelej dlya opisaniya vzaimodej-stviya traktornogo koleasa s pochvoj / I.I. Vodyanik // Sovershenstvovanie konstrukcij i uluchshenie ekspluatacionnyh kachestv mashin v sel'skom hozyajstve. Kishinyov: Kishinyovskij SKHI, 1982. p.32-37.

8. Zolotarevskaya D.I. Analiz vliyaniya osnovnyh faktorov na harakteristiki uprugih svojstv elastichnyh kolyos traktorov / D.I. Zolotarevskaya // Traktory i sel'-hozmashiny. № 4. 2018. p. 71-78.

9. Bojkov V.P. Opredelenie nekotoryh pokazatelej vzaimodejstviya kolyosnogo dvizhitelya traktora s pochvogruntom / V.P. Bojkov, M.A. Levin // Traktory i sel'hoz-mashiny, 1986, № 6. – p.6–10.

10. A.s. 1259132 SSSR, MKI G 01M17/02. SHinnyj tester / V.YA. YArovoj, A.F. SHkarlet, V.N. Gogolev, V.A. Oberemok (SSSR). №3768376. Opubl. 23.09.86. Byul. № 35.