

DOI 10.12737/24932  
УДК 631.171

**РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ КОЛЕС ТРАКТОРА НА ПОЧВУ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТРАКТОРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ. АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ**  
**Хафизов К.А., Хафизов Р.Н.**

**Реферат.** В ходе статистической обработки материалов нескольких вариантов экспериментов были получены уравнения максимального давления колеса трактора на почву в зависимости от параметров трактора и физико-механических свойств почвы. В данной работе проведен анализ влияния основных факторов на величину максимального давления колеса на почву. Выявлена работоспособность уравнений за пределами экспериментальных значений факторов. С увеличением ширины профиля колеса, его диаметра, скорости трактора максимальное давление колеса на почву снижается, а с ростом массы трактора, приходящейся на одно колесо, твердости почвы, давления в шинах колеса максимальное давление колеса на почву возрастает. Сравнение с данными, имеющимися в отечественных и зарубежных изданиях, показало, что наиболее стабильные результаты предсказания величины максимального давления колеса трактора на почву получаются при использовании первого из приведенных в статье уравнений. Ошибка предсказания значений максимального давления колеса на почву находится в пределах от 3 до 15 % в зависимости от марки трактора и условий их работы.

**Ключевые слова:** давление колеса на почву, параметры трактора, твердость почвы, плотность почвы, диаметр колеса, ширина профиля шины, нагрузка на колесо, давление в шинах, уравнение регрессии.

**Введение.** В ходе статистической обработки материалов нескольких вариантов экспериментов [1, 2, 3] были получены следующие уравнения максимального давления колеса трактора на почву в зависимости от параметров трактора и физико-механических свойств почвы:

$$1) q_{max} = 3.46p_w - 7.4493Bp_w/D + 0.075552H - 0.23353(p_n p_w D^3)/M;$$

$$2) q_{max} = 0.2430 p_w + 1.0593p_w B/D + 0.0289H;$$

$$3) q_{max} = 0.3623 \rho_w B/D + 1.3008 \rho_w + 0.055 H - 1.3562 \rho_w V \sqrt{M} / (\sqrt{D^3} \sqrt{\rho_w}).$$

где  $q_{max}$  – максимальное давление колеса на почву,  $\text{kH/m}^2$ ;  $p_w$  – давление воздуха в шинах,  $\text{H/m}^2$ ;  $D$  – диаметр колеса, м;  $M$  – масса трактора, приходящаяся на одно колесо, кг;  $B$  – ширина профиля колеса, м;  $H$  – твердость почвы,  $\text{Па}(\text{H/m}^2)$ ;  $\rho_n$  – плотность почвы,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  – скорость трактора, м/с.

**Анализ полученных уравнений.** Для выявления работоспособности полученного уравнения (1) проведем расчеты при изменении основных факторов в пределах их возможного варьирования. Результаты расчетов с использованием СКМ МАТЛАБ приведены на рисунках 1 - 5.

**Исходные данные для расчета:**

$D=1.6$  м;  $p_w=1.0 \cdot 10^5$   $\text{H/m}^2$ ;  $H=15 \cdot 10^5$   $\text{H/m}^2$ ;  $\rho_n=1300$   $\text{кг/м}^3$ .

Как видно из рисунка 1, максимальное давление колеса на почву находится в линейной зависимости от ширины профиля колеса и нелинейной зависимости от массы трактора, приходящейся на одно колесо. Причем, с ро-

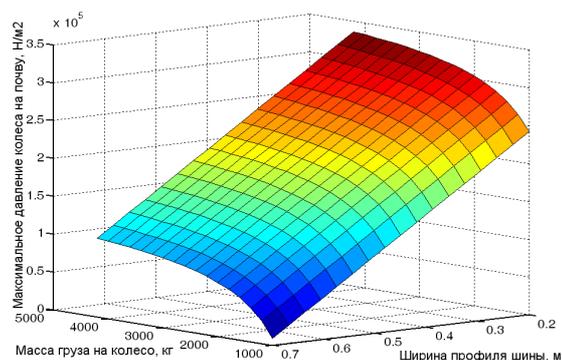


Рисунок 1 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении ширины профиля колеса  $B$  и массы груза, приходящейся на одно колесо  $M$

стом ширины профиля колеса – максимальное давление колеса на почву уменьшается, а с ростом массы, приходящейся на одно колесо, увеличивается.

Рисунок 2 показывает, что максимальное давление колеса на почву находится в нелинейной зависимости и от диаметра колеса и от массы трактора, приходящейся на одно колесо. Причем с ростом массы трактора, приходящейся на одно колесо, максимальное давление колеса на почву растет и растет тем интенсивнее, чем больше диаметр колеса.

Влияние давления в шинах на максимальное давление колеса на почву проявляется как линейный рост давления колеса на почву с ростом давления в шинах в диапазоне диаметра колеса больше 0,8 м – рисунок 3.

Рассмотрим одновременное влияние на максимальное давление колеса на почву диаметра колеса и ширины его профиля.

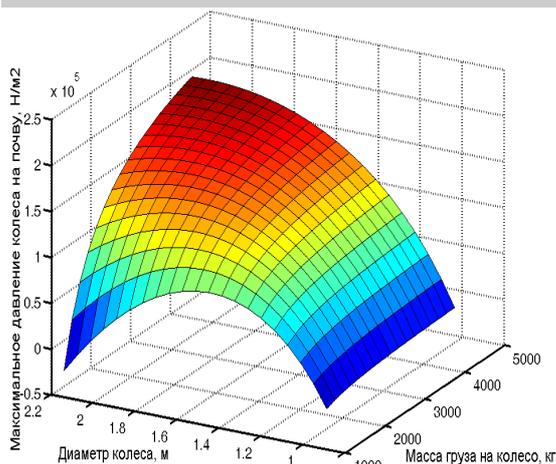


Рисунок 2 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении диаметра колеса и массы груза, приходящейся на одно колесо

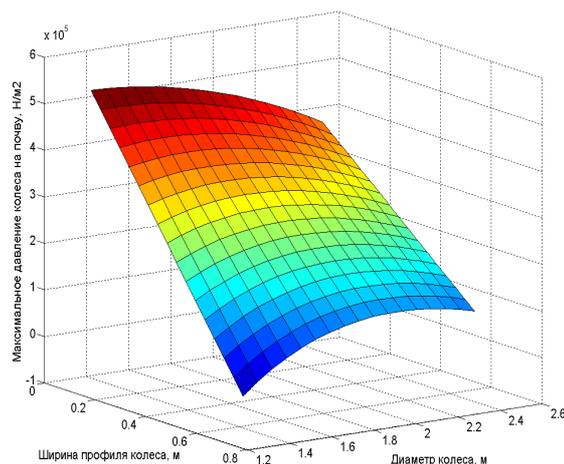


Рисунок 4 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении ширины профиля колеса и его диаметра

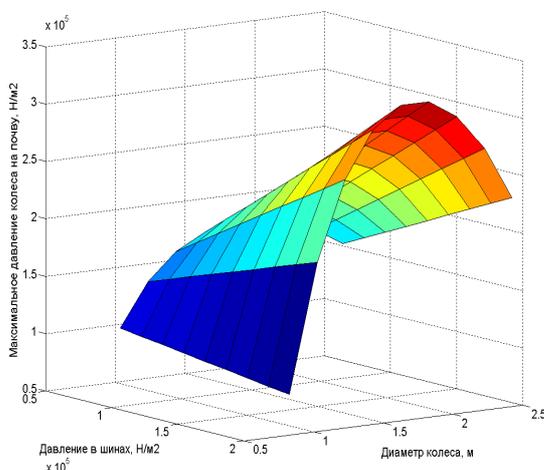


Рисунок 3 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении давления в шинах и диаметра колеса

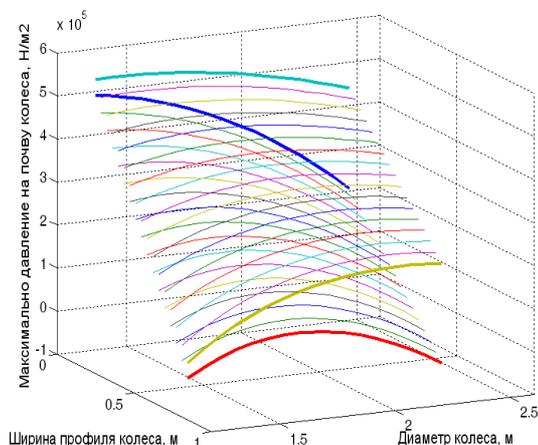


Рисунок 5 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении ширины профиля колеса и его диаметра для  $M=2000$  кг (нижний график) и  $M=5000$  кг (верхний график)

**Исходные данные для расчета:**

$p_w=1.6 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $H=15 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;

$\rho_n=1300 \text{ кг/м}^3$ ;  $M=3000 \text{ кг}$ .

При любом диаметре колеса влияние ширины профиля колеса на максимальное его давление на почву линейно, рисунок 4 и давление колеса на почву тем больше, чем меньше ширина профиля колеса.

Увеличение нагрузки на колесо, как видно из рисунка 5, ведет к возрастанию максимального давления колеса на почву. При этом интенсивность снижения максимального давления колеса на почву с ростом значения диаметра колеса уменьшается.

Рассмотрим одновременное влияние на максимальное давление колеса на почву ширины его профиля и давления в шинах.

**Исходные данные для расчета:**

$p_w=1.6 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $H=15 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $\rho_n=1300 \text{ кг/м}^3$ ;  $M=3000 \text{ кг}$ .

Как видно из рисунка 6, в пределах обыч-

ных размеров ширины профиля шины сельскохозяйственных тракторов рост давления в шинах ведет к росту максимального давления колеса на почву.

Рассмотрим, как влияют на значение максимального давления колеса на почву физико-механические свойства почвы, выраженные через твердость почвы – рисунок 7. С ростом твердости почвы максимальное давление колеса на почву увеличивается.

Интересно посмотреть, как одновременно влияют на максимальное давление колеса на почву три основных конструктивных фактора – это диаметр колеса, ширина профиля и нагрузка, приходящаяся на одно колесо.

**Исходные данные для расчета:**

$p_w=1.6 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $H=15 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;

$\rho_n=1500 \text{ кг/м}^3$ .

На рисунке 8 изменение максимального давления колеса на почву отображается интенсивностью изменения цвета поверхности куба. Чем больше давление колеса на почву, тем в

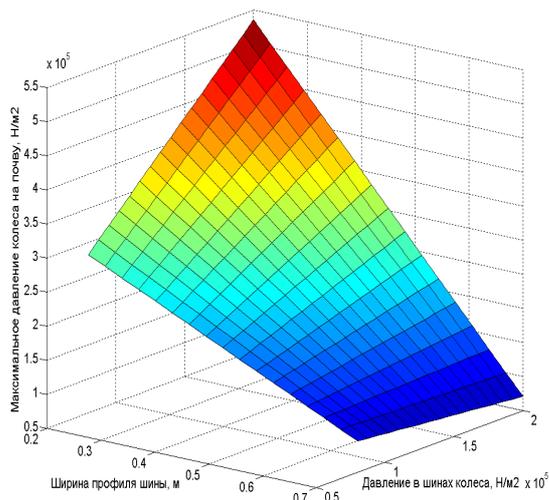


Рисунок 6 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении ширины профиля колеса и давления в шинах

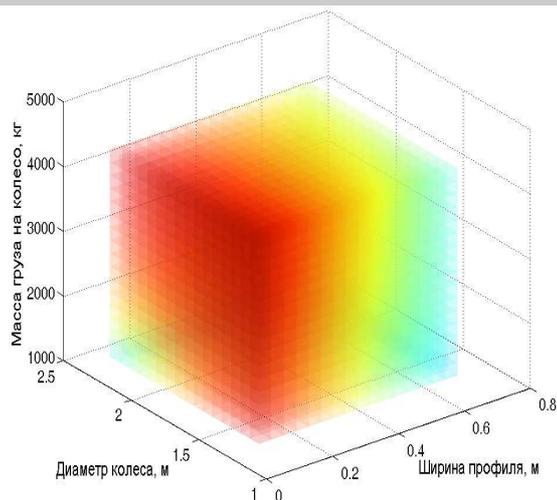


Рисунок 8 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении ширины профиля, диаметра колеса и массы груза, приходящейся на колесо

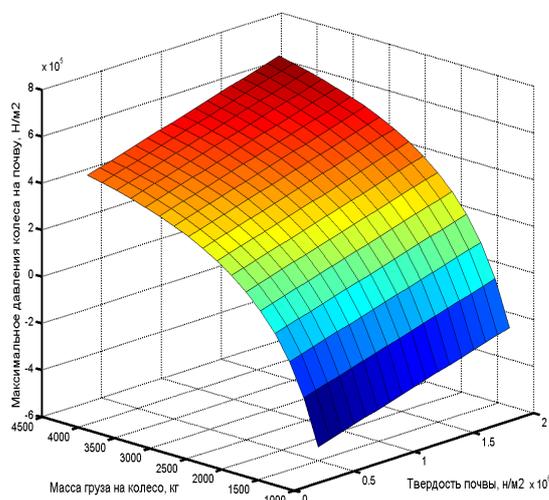


Рисунок 7 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении твердости почвы и массы груза на колесо

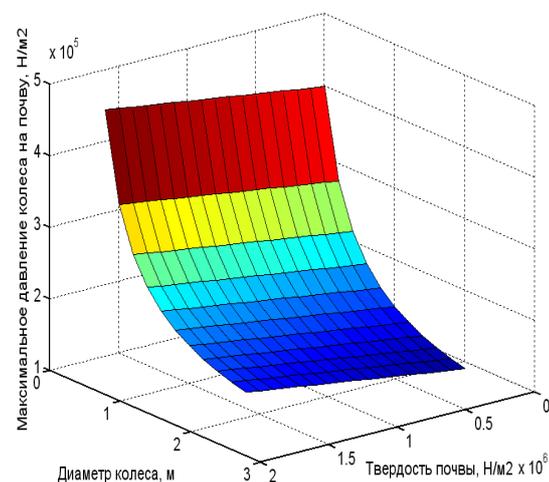


Рисунок 9 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении диаметра колеса и твердости почвы

более интенсивный ярко-красный цвет окрашена поверхность куба. С уменьшением диаметра, ширины профиля и увеличением нагрузки на колесо максимальное давление колеса на почву увеличивается.

Проанализируем формулу (2), рассмотрев совместное влияние на величину максимального давления колеса на почву диаметра колеса и твердости почвы, смотрите рисунок 9.

**Исходные данные для расчета:**

$$p_w = 2 \times 10^5 \text{ Н/м}^2; V = 0.7 \text{ м.}$$

Как видно из рисунка 9, чем больше твердость почвы и меньше диаметр колеса, тем больше значение максимального давления колеса на почву. Результаты расчета по формуле (2) согласуются с результатами, полученными из формулы (1).

Анализ формулы (3) позволит установить влияние на максимальное давление колеса на

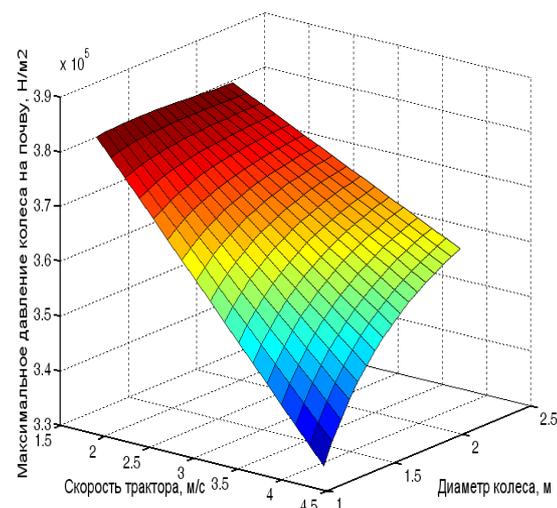


Рисунок 10 – Изменение максимального давления колеса на почву при изменении диаметра колеса и ее линейной скорости

Таблица 1 – Сравнение значений давления колеса на почву полученных расчетным путем и экспериментально, согласно протоколам DLG Test Center (Германия)

Марка трактора	Масса трактора, кг	Диаметр колеса*, м	Ширина профиля шины*, м	Давление в шинах, н/м <sup>2</sup> ×10 <sup>5</sup>	Давление колеса на почву по протоколу DLG, Н/м <sup>2</sup> ×10 <sup>5</sup>	Давление колеса на почву по формулам, н/м <sup>2</sup> ×10 <sup>5</sup>		
						1-я формула	2-я формула	3-я формула
Deutz-Fahr 6.81	7620	1.90 (600/70R42)	0.6	2	2.55	2.6380	1.9064	2.8210
New Holland Fiat G-210	9000	1.88 (580/70R42)	0.58	2	2,95	3.0236	1.8910	2.6658
Кировец 701М	14960	1.83 (30.5R-32)	0.775	2	2,25	1.8733	2.1346	2.2048
JohnDeere 6820	6405	1.81 (650/65R38)	0.65	2	2,2	1.9485	1.9982	2.8725
MTЗ-82	3730	1.54 (15.5R-38)	0.394	2	1,62**	1.8474	1.4808	2.5113
T-150K	8135	1.70 (21.5R-24)	0.546	1.8	2,03**	2.0564	1.5122	2.1329

почву скорости перемещения трактора.

**Исходные данные для расчета:**

$$p_w = 2 \times 10^5 \text{ Н/м}^2; H = 20 \times 10^5 \text{ Н/м}^2;$$

$$\rho_n = 1300 \text{ кг/м}^3; M = 1800 \text{ кг}; V = 0.7 \text{ м}.$$

Как видно из рисунка 10, влияние линейной скорости центра вращения колеса на максимальное ее давление на почву наблюдается, что подтверждается и результатами, полученными другими исследователями [4].

Результаты расчета максимального давления колес тракторов на почву совпадают со значениями, полученными для отечественных и зарубежных тракторов при их испытаниях в независимом центре DLG Test Center (Германия) – таблица 1 [6, 7, 8, 9]. Наибольшая стабильность результатов выявлена при

использовании формулы (1).

Ошибка предсказания значений давления колеса на почву находится в пределах от 3 до 15 % в зависимости от марки трактора и условий их работы.

**Выводы.** В результате проведенных экспериментов и обработки экспериментальных данных выявлены 3 уравнения для расчета максимального давления колес тракторов на почву. Сравнение с данными, имеющимися в различных изданиях, показало, что наиболее стабильные результаты получаются при использовании формулы:

$$q_{max} = 3.46p_w - 7.4493Bp_w/D + 0.075552H - 0.23353(p_n p_w D^3)/M.$$

Литература

1. Хафизов Р.Н. Метод расчета энергии урожая, потерянного из-за негативного воздействия движителей // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (37). – С. 81-85.
2. Хафизов Р.Н. Методика многофакторного эксперимента по определению зависимости давления движителей трактора на почву от параметров трактора, движителя и физико-механических свойств почвы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (37). – С. 86-92.
3. Хафизов К.А., Хафизов Р.Н. Результаты многофакторного эксперимента по определению зависимости максимального давления колес трактора на почву от параметров трактора и физико-механических свойств почвы. Статистический анализ // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 4. – С. 84-96.
4. Золотаревская Д.И., Джафари Наими К., Лядин В.П. Изменение реологических свойств и уплотнение почвы при воздействии колесных движителей // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 5. – С. 33-37.
5. Дьяков В.П. Механизм деформации почвы и модель критической скорости приложения нагрузки / В.П. Дьяков // Достижения науки и техники АПК. – 2007. – №10. – с. 51-53.
6. DLG Протокол испытаний тракторов 2003 New Holland Fiat G 210 <http://www.dlg-test.de/tests/NewHollandFiatG210.pdf> (дата обращения 12.10.16).
7. DLG Протокол испытаний тракторов. Deutz-Fahr 6.81 AgroStar. DLG-profi тест, протокол №. 4/92. [http://www.povmis.ru/images/stories/pdf/dlg/deutz-ahr6\\_81agrostar.pdf](http://www.povmis.ru/images/stories/pdf/dlg/deutz-ahr6_81agrostar.pdf) (дата обращения 12.10.16).
8. DLG Протокол испытаний тракторов. Кировец 701М / <http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/ru/tests/k701m.pdf> (дата обращения 12.10.16).
9. Ходовые системы тракторов: (Устройство, эксплуатация, ремонт): Справочник/В. М. Забродский, А. М. Файнлейб, Л. Н. Кутин, О. Л. Уткин-Любовцов.- М.: Агропромиздат, 1986,-271 с.

**Сведения об авторах:**

Хафизов Камиль Абдулхакович – доктор технических наук, профессор кафедры тракторы, автомобили и энергетические установки, e-mail: fts-kgau@mail.ru

Хафизов Рамиль Наилевич – старший преподаватель кафедры тракторы, автомобили и энергетические уста-

**RESULTS OF MULTIVARIATE EXPERIMENT TO DETERMINE DEPENDENCE OF THE MAXIMUM PRESSURE OF TRACTOR WHEELS ON THE SOIL FROM TRACTOR'S PARAMETERS AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL. ANALYSIS OF THE EQUATIONS**

**Khafizov K.A., Khafizov R.N.**

**Abstract.** During statistical processing of proceeding of several variants of experiments the equation of maximum pressure of tractor wheels on the soil were obtained, depending on the tractor parameters and physical and mechanical properties of the soil. This paper analyzes the influence of the main factors on the maximum amount of wheels pressure on the ground. We revealed performance of equations beyond the experimental values of the factors. With an increase in the width of the wheel profile, its diameter, the speed of the tractor, the maximum pressure of wheel on the ground is reduced, and with increasing tractor's weight on one wheel, the soil hardness, the pressure in wheel tire the maximum pressure of wheel on ground increases. Comparison with the data, available in the domestic and foreign journals, showed that the most stable prediction results of maximum pressure value of tractor wheels on the ground are obtained by using the first equation in the article. The prediction error of wheels maximum pressure values is in the range of 3 to 15%, depending on the brand of tractor and its working conditions.

**Key words:** wheel pressure on the ground, tractor's parameters, soil hardness, soil density, the diameter of the wheel, the width of a tire, a load on wheel, pressure in tire, the regression equation.

**References**

1. Khafizov R.N. Method of crop energy calculating, lost due to the negative impact of propulsion. [Metod rascheta energii urozhaya, poteryannogo iz-za negativnogo vozdeystviya dvizhiteley]. // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – The Herald of Kazan State Agrarian University*. 2015. № 3 (37). P. 81-85.
2. Khafizov R.N. Methods of complex experiment to determine the dependence of the tractor propellers pressure on the soil according to the tractor parameters, propeller and mechanical properties of the soil. [Metodika mnogofaktornogo eksperimenta po opredeleniyu zavisimosti davleniya dvizhiteley traktora na pochvu ot parametrov traktora, dvizhitelya i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pochvy]. // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – The Herald of Kazan State Agrarian University*. 2015. № 3 (37). P. 86-92.
3. Khafizov K.A., Khafizov R.N. Results of multivariate experiment to determine dependence of the maximum pressure of tractor wheels on the soil from tractor's parameters and physical and mechanical properties of soil. Statistical analysis. [Rezultaty mnogofaktornogo eksperimenta po opredeleniyu zavisimosti maksimalnogo davleniya koles traktora na pochvu ot parametrov traktora i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pochvy. Statisticheskiy analiz]. // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – The Herald of Kazan State Agrarian University*. 2016. № 4 (). P. 84-96.
4. Zolotarevskaya D.I., Dzhafari Naimi K., Lyadin V.P. Change of rheological properties and soil compaction under the influence of wheel propulsion. [Izmenenie reologicheskikh svoystv i uplotnenie pochvy pri vozdeystvii kolesnykh dvizhiteley]. // *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny. - Tractors and agricultural machinery*. 2007. № 5. P. 33-37.
5. Dyakov V.P. Mechanism of deformation of the soil and model of critical speed of the application of loading [Mehanizm deformatsii pochvy i model kriticheskoy skorosti prilozheniya nagruzki] / V.P. Dyakov // *Dostizheniya nauki i tekhniki apk. – Advances in agriculture science and technology. – 2007. – №10. – p. 51-53*
6. *DLG Protokol ispytaniy traktorov 2003 New Holland Fiat G 210*. (DLG Tractor test report 2003 tractors New Holland Fiat G 210). Available at: <http://www.dlg-test.de/tests/NewHollandFiatG210.pdf> (Accessed 12.10.16).
7. *DLG Protokol ispytaniy traktorov. Deutz-Fahr 6.81 AgroStar*. (DLG-profi test, protokol №4/92). (DLG Tractor test report. Deutz-Fahr 6.81 AgroStar. DLG-profi test №4/92). Available at: [http://www.povmis.ru/images/stories/pdf/dlg/deutz-ahr6\\_81agrostar.pdf](http://www.povmis.ru/images/stories/pdf/dlg/deutz-ahr6_81agrostar.pdf) (Accessed 12.10.16).
8. *DLG Protokol ispytaniy traktorov. Kirovets 701M*. (DLG Tractor test report. Kirovets 701M). Available at: <http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/ru/tests/k701m.pdf> (Accessed 12.10.16).
9. *Khodovye sistemy traktorov: (Ustroystvo, ekspluatatsiya, remont): Spravochnik*. [The carrier of tractor system: (device, exploitation, repair): reference book] / V. M. Zabrodskiy, A. M. Faynleyb, L. N. Kutin, O. L. Utkin-Lyubovtsov. - M.: Agropromizdat, 1986, - P. 271; illustrated.

**Authors:**

Khafizov Kamil Abdulkhakovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Tractors, automobiles and power plants Department e-mail: fts-kgau@mail.ru

Khafizov Ramil Nailevich - Senior lecturer of Tractors, automobiles and power plants Department, e-mail: rami-lajz@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.