

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.3.06

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-32-36

МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА БУКСОВАНИЯ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ТРАКТОРА**ЛЕВШИН АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ** , *д-р техн. наук, профессор*alevshin@rgau-msha.ru ; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>**ГАСПАРЯН ИРИНА НИКОЛАЕВНА**, *д-р с.-х. наук, профессор*gas_shag@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7161-3654>**АЛСАНКАРИ АХМАД**, *аспирант*

alsankariahmad@gmail.com

БУТУЗОВ АНТОН ЕВГЕНЬЕВИЧ, *старший преподаватель*

abutuzov@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Экспериментальная оценка тягово-сцепных свойств трактора при выполнении работ затруднительна, поэтому разработка методики экспресс-анализа буксования является важной прикладной задачей. Оценка тягово-сцепных свойств по ГОСТ производится на нормированных почвенных фонах и горизонтальном направлении вектора тягового усилия, что существенно отличается от производственных испытаний. С целью обоснования методики оценки буксования при выполнении машинно-тракторным агрегатом полевых работ по выборкам небольшого объема предлагается использовать дифференциальную модель. Апробация методики проведена по результатам тяговых испытаний трактора МТЗ-80 на стерне озимой пшеницы и экспериментальных исследований чизельного агрегата на базе трактора New Holland S8000. Опыты проводились для трех уровней влажности почвы: 11...13; 14...16; 17...19%. Глубина обработки почвы составляла 12...15; 17...20; 22...25 см. Установлено, что дисперсии адекватности полученных зависимостей буксования от коэффициента использования тягового усилия для сравниваемых вариантов являются практически однородными. Для почв с влажностью 11...13% дисперсия адекватности равна 0,117, для влажности 14...16% – 0,637, для влажности 17...19% – 0,827. При пониженной влажности почвы процесс взаимодействия колеса с почвой является более стабильным. Сделан вывод о том, что методика экспресс-анализа буксования колес трактора при выполнении конкретных видов работ при ограниченном объеме экспериментальных данных позволяет получить зависимости, сопоставимые по точности с данными тяговых испытаний.

Ключевые слова: буксование, колесный трактор, чизельный плуг, расход топлива, методика испытаний.

Формат цитирования: Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Алсанкари А., Бутузов А.Е. Методика экспресс-анализа буксования на эксплуатационных режимах работы трактора // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 4. С. 32-36. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-32-36>.

© Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Алсанкари А., Бутузов А.Е., 2022



ORIGINAL PAPER

METHOD OF THE EXPRESS ANALYSIS OF SLIPPING
ON VARIOUS OPERATING MODES OF A TRACTOR**ALEKSANDR G. LEVSHIN** , *DSc (Eng), Professor*alevshin@rgau-msha.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>**IRINA N. GASPARYAN**, *DSc (Ag), Professor*irina150170@yandex.ru **AKHMAD ALSANKARY**, *PhD student*

alsankariahmad@gmail.com

ANTON E. BUTUZOV, *Senior Lecturer*

abutuzov@rgau-msha.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. It is difficult to experimentally evaluate the traction and coupling properties of a tractor during its operation, so developing a method for an express analysis of slipping is an urgent practical task. According to GOST, traction properties are estimated

against normalized soil backgrounds and the horizontal direction of the traction force vector, which differs significantly from production tests. To justify the methodology for estimating slipping when a machine-tractor unit operating on small-size sample plots, it is proposed to use a differential model. The methodology was tried based on the traction test results of the MTZ-80 tractor on winter wheat stubble and experimental studies of a chisel unit based on the New Holland S8000 tractor. The experiments were carried out for three levels of soil moisture: 11...13; 14...16; 17...19%. The tillage depth was 12...15; 17...20; and 22...25 cm. It has been established that the adequacy dispersions of the obtained dependences of slipping on the tractive effort coefficient for the compared options are practically homogeneous. For soils with a moisture content of 11...13%, the dispersion of adequacy is 0.117, for a moisture content of 14...16% – 0.637, for a moisture content of 17...19% – 0.827. With low soil moisture, the interaction of a wheel with the soil is more stable. The authors conclude that the method of express analysis of tractor wheel slipping when performing specific types of work, with a limited amount of experimental data, makes it possible to obtain dependences comparable in accuracy with the data of traction tests.

Key words: slipping, wheeled tractor, chisel plow, fuel consumption, test method.

For citation: Levshin A.G., Gasparyan I.N., Alsankary A., Butuzov A.E. Method of the express analysis of slipping on various operating modes of a tractor. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(4): 32-36. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-32-36>.

Введение. При оценке тягово-сцепных свойств трактора особое значение имеет буксование ходовых систем. С одной стороны, с позиций увеличения эрозионно опасных частиц вследствие разрушения ее структуры оно оценивает уровень экологического воздействия на почву, а с другой стороны, является ограничивающим фактором для реализации тягового усилия при выполнении технологической операции. Принятые ограничения величины буксования для колесных тракторов 4×2 (15%) и 4×4 (18%) [1] обосновываются максимумом тягового коэффициента полезного действия по результатам тяговых испытаний, однако уже при буксовании 6-7% существенно увеличивается количество эрозионно опасных частиц размером менее 0,5 мм [2].

Тяговые испытания проводят на нормированных фонах и горизонтально направленном векторе тяговой нагрузки для получения сравнительных результатов¹. В процессе реальной эксплуатации машинно-тракторных агрегатов работы выполняются на фонах, существенно отличающихся от типовых по влажности, агрегатной структуре (вспаханное поле), характеру растительного покрова и т.д. На трактор воздействует сила сопротивления в виде случайной функции, и в зоне контакта шины с поверхностью происходит вибрационное взаимодействие. При этом вектор усредненной силы сопротивления имеет сложное пространственное расположение [3, 4], что приводит к перераспределению нагрузок по колесам и осям трактора и непосредственно сказывается на увеличении уплотнения почвы и буксования².

Экспериментальная оценка тягово-сцепных свойств трактора при выполнении заданных работ – достаточно сложная процедура, поэтому разработка методики экспресс-анализа буксования является важной прикладной задачей.

Цель исследований: обосновать методику оценки буксования при выполнении машинно-тракторным агрегатом полевых работ по выборкам небольшого объема.

Материалы и методы. При экспресс-оценке буксования для малых объемов измерений предлагается использовать дифференциальную модель [5]. Проверка методики проводилась применительно к результатам энергетической оценки машинно-тракторного агрегата с чизельным плугом в условиях Ирака [6] и исходных экспериментальных данных тяговых испытаний аналогичных моделей тракторов, проведенных

в КубНИИТИМ. Тяговые испытания трактора МТЗ-80 эксплуатационной массой 3860 кг проводились на стерне озимой пшеницы; влажность почвы – 19% при температуре окружающего воздуха 23 °С, барометрическом давлении 740 мм ртутного столба и относительной влажности 63%.

Исследование чизельного агрегата проводилось в Ираке на участке земли, который не обрабатывался в предыдущем сезоне; тип почвы – суглинок. Агрегат – в составе трактора New Holland S8000 (мощностью 82 л.с., массой 3080 кг) с чизельным плугом шириной захвата 2160 мм, производство Государственного машиностроительного завода (Ирак). Передние шины – 18.4-30, задние – 12.4-24. Опыты проводились для трех уровней влажности почвы: 11...13; 14...16; 17...19%. Вторым фактором в исследованиях была глубина обработки почвы на трех уровнях, см: 12...15; 17...20; 22...25 [6, 7].

В опыте определялись следующие показатели:

– Буксование колес трактора Sl , %, рассчитывалось по формуле:

$$Sl = \frac{V_t - V_p}{V_t} \cdot 100, \quad (1)$$

где V_t – теоретическая скорость, км/ч; V_p – рабочая скорость, км/ч.

– Расход топлива V_{co} , л/га, процент расхода топлива был рассчитан по следующему уравнению:

$$V_{co} = \frac{V \cdot 10000}{St \cdot Bp \cdot 1000}, \quad (2)$$

где V – количество топлива, расходуемого на обработку почвы за время опыта, мл; St – пройденное расстояние за время опыта, м; Bp – ширина захвата, м.

– Сопротивление плуга Ft , кН, сила тяги определялась с использованием динамометра тип (Диллон) в соответствии со следующим уравнением [7]:

$$Ft = P - R, \quad (3)$$

где P – сила тяги агрегата при вспашке, кН; R – сила тяги агрегата (без груза, на холостом ходу), кН.

– Мощность на технологический процесс P_{ft} , кВт, мощность в лошадиных силах была рассчитана в соответствии со следующим уравнением [7]:

$$P_{ft} = \frac{Ft \cdot V_p}{3,6}, \quad (4)$$

где Ft – тяговое усилие, кН; V_p – рабочая скорость, км/ч.

¹ ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90). Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей.

² Кутыков Г.М. Тяговая динамика тракторов. М.: Машиностроение, 1980. 215 с.

– Коэффициент использования тягового усилия трактора, φ :

$$\varphi = \frac{F_t}{G \cdot \lambda}, \quad (5)$$

где G – сцепной вес трактора, кг; λ – константа ($\lambda = 1$ для тракторов с колесной формулой 4×4 ; $\lambda = 0,75$ – для тракторов 4×2) [1].

Методика аппроксимации экспериментальных данных по зависимости буксования от тягового сопротивления применялась в соответствии с рекомендациями [8].

Результаты и их обсуждение. Определение зависимости между буксованием и тяговым усилием для ограниченного количества точек при выполнении механизированных работ проводили по аналогии с методикой аппроксимации экспериментальных данных дифференциальным уравнением для тяговых испытаний трактора МТЗ-80, проведенных по ГОСТ 30745 на стерне озимой пшеницы. На каждой передаче при ступенчатом увеличении тягового сопротивления (10...15 точек) определялись показатели тягово-сцепных свойств. Нагрузку увеличивали до достижения буксования 25...30%. Значения тягового усилия и буксования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные результаты тяговых испытаний трактора МТЗ-80

Table 1

Initial results of traction tests of the MTZ-80 tractor

Крюковое усилие, $P_{кр}$, кН <i>Drawbar pull, P_{kr}, kN</i>	Буксование, δ , % <i>Slipping, δ, %</i>	$\ln(\delta)$	φ
18,14	25,84	3,25	0,68
17,65	24,92	3,22	0,66
17,06	20,76	3,03	0,64
16,47	18,00	2,89	0,62
15,40	15,69	2,75	0,58
13,97	11,07	2,40	0,53
13,43	11,53	2,44	0,51
12,16	6,92	1,93	0,46
12,01	8,31	2,12	0,45
9,90	4,15	1,42	0,37
8,63	4,61	1,53	0,32
8,43	3,23	1,17	0,31
6,57	2,03	0,71	0,25

Для описания зависимости буксования от тягового усилия в процессе работы аппроксимировали дифференциальным уравнением [5]:

$$\frac{d\delta}{d\varphi} = b\delta, \quad (6)$$

$$\delta = ae^{b(\varphi - \varphi_0)}, \quad (7)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты; $\varphi_0 = 0$.

Вариацию точек относительно полученного экспоненциального уравнения оценивали дисперсией адекватности:

$$S_{ag}^2 = \frac{1}{f_{ag}} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \delta_{расч})^2; \text{ число степеней свободы } f_{ag} = N - 2. \quad (8)$$

Эмпирические коэффициенты уравнения (7) определим по методу наименьших квадратов [9]. Для этого линеаризуем зависимость (6) путем логарифмирования $\ln \delta = \ln a + b(\varphi - \varphi_0)$ и представим ее в линейном виде $Y = a' + bx$.

Тесноту нелинейной связи случайных величин оценим индексом корреляции r_{xy} , а оценку статистической значимости уравнения проверим по критерию Фишера. Фактическое значение статистики Фишера равно отношению удельных (рассчитанных на одну степень свободы) факторной и остаточной дисперсий [8]:

$$r_{xy} = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_x - \bar{y}_x)^2}{\sum (y_x - \bar{y})^2}}, \quad 0 \leq r_{xy} \leq 1; \quad (8)$$

$$F_{факт} = \frac{\rho_{xy}^2}{1 - \rho_{xy}^2} (n - 2). \quad (9)$$

Для оценки фактического значения статистики $F_{факт}$ сравниваем с критическим (табличным) значением $F_{табл}$ критерия Фишера при уровне значимости 0,05 и числу степеней свободы $k_1 = 1$ и $k_2 = (n - 2)$.

Графики исходных данных тяговых испытаний трактора МТЗ-80 (б) и линеаризованной зависимости (а) приведены на рисунке 1. Дисперсия адекватности равна 0,844; индекс корреляции – 0,977; расчетное значение критерия Фишера – 467,3; критическое значение – 4,844. Поскольку расчетное значение критерия больше критического, принимаем гипотезу о значимости уравнения.

Результаты исследования чизельного агрегата приведены в таблице 2 [6], результаты аппроксимации представлены на рисунке 2.

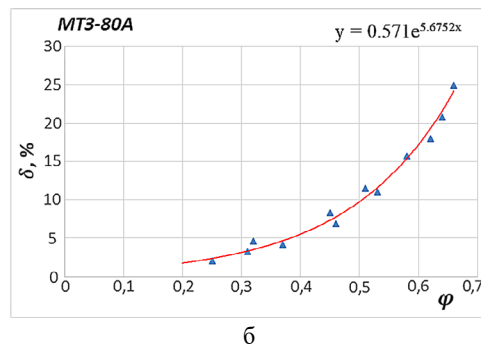
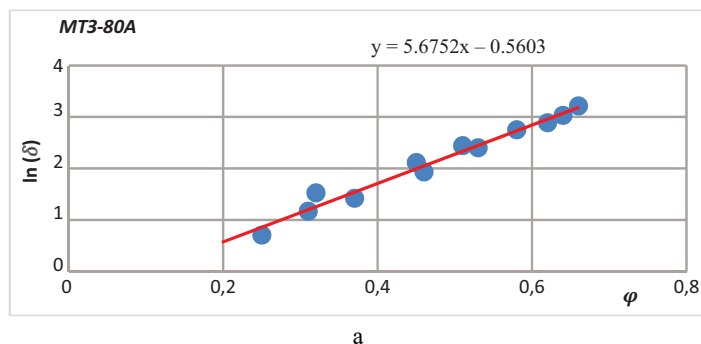


Рис. 1. Зависимость между буксованием и коэффициентом использования тягового усилия:

а – преобразованная ордината; б – аппроксимирующая функция

Fig. 1. Relationship between slipping and the tractive force coefficient:

а – transformed ordinate; б – approximating function

Таблица 2

Показатели работы чизельного агрегата на базе трактора New Holland S8000 (Ирак)

Table 2

Performance indicators of a chisel unit based on a New Holland S8000 tractor (Iraq)

Содержание влаги, % Moisture content, %	Глубина обработки, см Depth of tillage, cm	Буксование, % Slipping, %	Сила сопротивления, кН Resistance force, kN	Мощность тяговая, кВт Traction power, kW
11...13	12...15	4,6	4,901	6,18
	17...20	9,1	13,602	7,50
	22...25	12,1	17,501	9,04
14...16	12...15	6,8	9,704	6,98
	17...20	11,2	14,900	8,53
	22...25	18,2	17,803	9,71
17...19	12...15	9,3	10,301	7,50
	17...20	13,1	16,000	8,75
	22...25	20,9	18,105	10,51

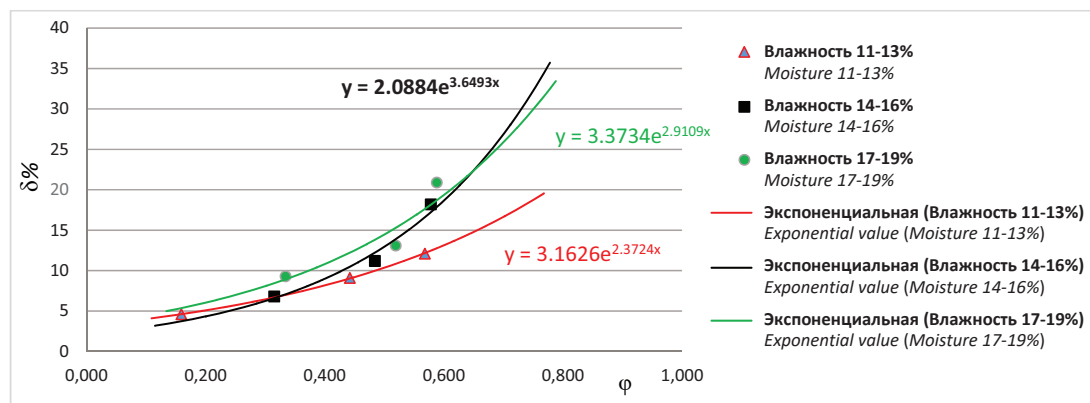


Рис. 2. Схема взаимосвязи между буксованием и тяговым усилием при разных уровнях влажности

Fig. 2. Relationship pattern between slipping and traction at different levels of soil moisture content

В результате аппроксимации зависимости буксования от коэффициента использования сцепного веса получим эмпирические коэффициенты зависимости (7) для почвы разной влажности. Результаты аппроксимации данных

исследований чизельного агрегата представлены на рисунке 2. Сравнение дисперсий адекватности для испытаний чизельного агрегата в сравнении с данными для тяговых испытаний по критерию Фишера приведено в таблице 3.

Таблица 3

Результаты статистического анализа экспериментальных данных

Table 3

Results of the statistical analysis of experimental data

Влажность почвы, % <i>Soil moisture, %</i>	Эмпирические коэффициенты <i>Empirical coefficients</i>		Дисперсия адекватности <i>Adequacy dispersion</i>	Индекс корреляции, ρ_{xy}^2 <i>Correlation index, ρ_{xy}^2</i>	Расчетное значение критерия Фишера <i>Estimated value of the Fisher criterion</i>
	<i>a</i>	<i>b</i>			
Для чизельного агрегата / <i>For chisel unit</i>					
11...13	3,162	2,372	0,117	0,999	999
14...16	2,088	3,649	0,637	0,976	40,4
17...19	3,373	2,911	0,827	0,885	7,673
Для тяговых испытаний / <i>For drawbar pull test</i>					
19,0	0,571	5,675	0,844	0,977	467,261

Критическое значение критерия Фишера: $F_{kp} = 4,844$ при доверительной вероятности 0,95; при числе степеней свободы $k_1 = 11$ и $k_2 = 1$ [8].

Значения дисперсий адекватности при влажности почвы 14...16%, 17...19% и для тяговых испытаний однородны (имеют сопоставимую вариацию), а для влажности

11...13% дисперсия существенно отличается, что можно объяснить более устойчивым взаимодействием колеса с почвой (выше твердость и меньше буксование).

Следует отметить, что при увеличении влажности дисперсия адекватности увеличивается, что говорит об увеличении вариации значений буксования. При средней влажности 14...16% динамика приращения буксования при увеличении коэффициента использования тягового усилия выше по сравнению с данными для менее влажной и более влажной почвы (рис. 2).

Библиографический список

1. Скороходов А.Н., Левшин А.Г. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: БИБКМ; ТРАНСЛОГ, 2017. 478 с. EDN: WWONWA
2. Кузнецов Н.Г., Гапич Д.С., Ширяева Е.В. К вопросу об определении допустимого коэффициента буксования полноприводного колесного трактора // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2014. № 2 (34). С. 176-179. EDN: SFFKYR
3. Francois P.B. Traction and Agricultural Tractor Tire Selection Studies. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College. 1994. P. 341.
4. Арженовский А.Г., Козлов Д.С., Петрищев Н.А. Метод получения тяговой характеристики трактора в эксплуатационных условиях // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12. № 5. С. 25-30. EDN: MGJGTR
5. Левшин А.Г., Чечет В.А., Левшин А.А., Ондар А.М. Дифференциальная модель буксования колеса // Доклады ТСХА. 2019. Вып. 291. Ч. 2. С. 153-156. EDN: ZDVHTV
6. Roudhan S.A. The effect of soil moisture and depth of tillage in some technical indicators to perform unit tools when you use the chisel plow. Journal of kerbala university. Second scientific conference of the Faculty of Agriculture. 2012. С. 687-692. <https://www.iasj.net/iasj/download/c29e0a729e334379>
7. Al-Najjar F. A study of some factors affecting the drive wheel slip in Furat tractor for two kinds of Syrian soils. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies -Engineering Sciences Series, 2011; 33(2): 53-70.
8. Левшин А.Г. Планирование и организация эксперимента / А.Г. Левшин, А.А. Левшин, А.Е. Бутузов, Н.А. Майстренко. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 65 с.

Критерии авторства

Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Алсанкари А., Бутузов А.Е. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Алсанкари А., Бутузов А.Е. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.05.2022

Одобрена после рецензирования 30.05.2022

Принята к публикации 17.06.2022

Выводы

Методика экспресс-анализа буксования колес трактора на основе применения дифференциальной модели буксования при выполнении конкретных видов работ при ограниченном объеме экспериментальных данных (для трех точек) позволяет получить зависимости, сопоставимые по точности с данными тяговых испытаний для 13 точек.

References

1. Skorokhodov A.N., Levshin A.G. Proizvodstvennaya ekspluatatsiya mashinno-traktornogo parka [Production operation of the machine and tractor fleet]. Moscow, BIBCOM; TRANSLOG, 2017. 478 p. (In Rus.)
2. Kuznetsov N.G., Gapich D.S., Shiryayeva E.V. K voprosu ob opredelenii dopustimogo koeffitsiyenta buksovaniya polnoprivodnogo kolesnogo traktora [On the issue of determining the permissible coefficient of slipping of an all-wheel-drive tractor]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa, 2014; 2 (34): 176-179. (In Rus.)
3. Francois P.B. Traction and Agricultural Tractor Tire Selection Studies. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College. 1994. P. 341.
4. Arzhenovsky A.G., Kozlov D.S., Petrishchev N.A. Metod polucheniya tyagovoy kharakteristiki traktora v ekspluatatsionnykh usloviy [Method for obtaining the traction characteristics of a tractor in operating conditions]. Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii, 2018; 12(5): 25-30. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-5-25-30> (In Rus.)
5. Levshin A.G., Chechet V.A., Levshin A.A., Ondar A.M. Differentsial'naya model' buksovaniya kolesa [Differential model of wheel slipping]. Doklady TSKHA, 2019; 291(2): 153-156. (In Rus.)
6. Roudhan S.A. The effect of soil moisture and depth of tillage in some technical indicators to perform unit tools when you use the chisel plow. Journal of kerbala university. Second scientific conference of the Faculty of Agriculture. 2012. С. 687-692. <https://www.iasj.net/iasj/download/c29e0a729e334379>
7. Al-Najjar F. A study of some factors affecting the drive wheel slip in Furat tractor for two kinds of Syrian soils. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies -Engineering Sciences Series, 2011; 33(2): 53-70.
8. Levshin A.G., A.A. Levshin, A.E. Butuzov, Maistrenko N.A. Planirovanie i organizatsiya eksperimenta [Planning and organizing an experiment]. Moscow, Izd-vo RGAU-MSKHA, 2016. 65 p. (In Rus.)

Contribution

A.G. Levshin, I.N. Gasparyan, A. Alsankary, A.E. Butuzov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. A.G. Levshin, I.N. Gasparyan, A. Alsankary, A.E. Butuzov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 27.05.2022

Approved after reviewing 30.05.2022

Accepted for publication 17.06.2022