

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-120130>

Оригинальное исследование



Выбор расчетной зависимости для оценки буксования колесного сельскохозяйственного трактора «Кировец» К-7

Н.Л. Анисимов¹, Э.И. Ефимов¹, Р.Ю. Добрецов², М.И. Дмитриев¹¹ Петербургский тракторный завод, Санкт-Петербург, Российская Федерация;² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Точность прогнозирования тяговых характеристик связана с выбором аналитической зависимости для расчетной оценки буксования при проектировании или модернизации сельскохозяйственного трактора для выбора правильной конфигурации машинно-тракторного агрегата. Многие существующие аналитические модели расчета буксования основаны на экспериментальных данных и справедливы для конкретных условий испытания и техники. Актуальность работы заключается в обосновании зависимости, описывающей буксование движителей современных энергонасыщенных тракторов компоновочной схемы 4К46, для исследования их тяговых характеристик.

Цель работы — обоснование расчетной формулы буксования для наиболее точного прогнозирования тяговых свойств на этапах проектирования, модернизации тракторов 4К46 и сопрягаемых с ними агрегатов.

Материалы и методы. В работе проанализированы известные расчетные зависимости буксования с целью сопоставления результатов теоретических оценок с результатами полевых испытаний на стерне, проведенных на машиноиспытательных станциях по единой методике, для сельскохозяйственных колесных тракторов «Кировец» серии К-7. Произведена аппроксимация экспериментальных данных тракторов «Кировец» серии К-7 с целью выявления новых зависимостей для расчетного определения буксования на стерне. В качестве критерия оценки точности описания опытных данных зависимостями использован коэффициент аппроксимации.

Результаты. Среди рассматриваемых аналитических зависимостей для прогнозирования значения коэффициента буксования выделены уравнения, наиболее удовлетворительно описывающие данные тяговых испытаний тракторов «Кировец» серии К-7. На основе экспериментальных данных, путем аппроксимации получены уравнения буксования в зависимости от удельного тягового усилия: общее для всех испытываемых тракторов и отдельно для тракторов с посадочными размерами шин 32 и 38 дюймов, которые наиболее приближенно их описывают. Получены значения удельного тягового усилия, соответствующие максимальному тяговому КПД и допустимому коэффициенту буксования 16% тракторов «Кировец» серии К-7.

Заключение. Для прогнозирования значений коэффициента буксования при построении потенциальной тяговой характеристики энергонасыщенных тракторов 4К46 могут быть использованы некоторые существующие и предложенные в данной работе новые уравнения.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор; колесный движитель; аналитический способ; кривая буксования; удельное тяговое усилие; тяговые испытания.

Как цитировать:

Анисимов Н.Л., Ефимов Э.И., Добрецов Р.Ю., Дмитриев М.И. Выбор расчетной зависимости для оценки буксования колесного сельскохозяйственного трактора «Кировец» К-7 // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 1. С. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-120130>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-120130>

Original study article

Selection of the analytical dependency for assessment of slipping of the Kirovets K-7 wheeled agricultural tractor

Nikolay L. Anisimov¹, Eduard. I. Efimov¹, Roman Yu. Dobretsov², Mikhail I. Dmitriev¹¹ Petersburg Tractor Plant JSC, Saint Petersburg, Russian Federation;² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The accuracy of prediction of towing properties is related to selection of the analytical dependency for assessment of slipping in the process of development or modernization of agricultural tractor in order to define the correct configuration of a machine-tractor unit. The relevance of the study lies in justification of the dependency describing slipping of wheels of modern high-powered 4K4b tractors and needed for study of tractors' towing properties.

AIMS: Justification of the analytical formula of slipping for better accuracy of towing properties prediction at development stages and modernization of 4K4b tractors and units conjugated to them.

METHODS: Known analytical dependencies of slipping were analyzed in the study in order to compare the theoretical assessment results with the results of field-testing at harvest field carried out at machine testing stations according to common method. The theoretical and experimental results were obtained for the Kirovets K-7 series agricultural wheeled tractors. The experimental data of the Kirovets K-7 series tractors was approximated in order to find new dependencies for analytical determination of slipping at harvest field. The approximation coefficient was taken as the criterion for assessment of accuracy of experimental data description by the dependencies.

RESULTS: Among the considered analytical dependencies for prediction of slipping coefficient value, the equations which describe the experimental data of towing testing of the Kirovets K-7 series tractors the most satisfactorily were outlined. Based on approximated experimental data, the equations of slipping depending on specific towing force were obtained. There is the equation common for all tested tractors and there are separate equations for tractors with 32-inch and 38-inch tires. These equations provide with the best approximation of description of tractors. Values of specific towing force correlating to maximal towing efficiency and acceptable slipping coefficient of 16% for the Kirovets K-7 series tractors were obtained.

CONCLUSIONS: Some existing and new proposed in the article equations can be used for prediction of values of slipping coefficient at creating of potential towing characteristic for high-powered 4K4b tractors.

Keywords: agricultural tractor; wheel; analytical method; curve of slipping; specific towing force; towing testing.

To cite this article:

Anisimov NL, Efimov EI, Dobretsov RYu, Dmitriev MI. Selection of the analytical dependency for assessment of slipping of the Kirovets K-7 wheel agricultural tractor. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(1): 25–33. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-120130>

Received: 31.12.2022

Accepted: 01.04.2023

Published: 14.04.2023

ВВЕДЕНИЕ

Для непрерывного совершенствования технического уровня сельскохозяйственного трактора необходима актуализация аналитических методов прогнозирования эксплуатационных показателей. Неотъемлемой частью при проектировании или модернизации сельскохозяйственного трактора выступает построение и анализ потенциальной тяговой характеристики, в частности, кривой буксования движителя. Буксование движителя сельскохозяйственного трактора является важным показателем при оценке эффективности работы трактора, характеризующим правильность подбора состава машинно-тракторного агрегата (МТА) и выбора режима выполнения сельскохозяйственных работ. Буксование колес характеризуется коэффициентом буксования δ :

$$\delta = \frac{V_T - V}{V_T},$$

где V_T, V — теоретическая и действительная скорость движения трактора, м/с.

Процесс буксования оказывает влияние на экономические и экологические свойства трактора. При повышенном буксовании происходит увеличение расхода топлива, ускоряется износ шин, снижается производительность МТА и происходит повреждение структуры почвы, что снижает ее плодородие.

При работе трактора с большим тяговым усилием буксование обычно превышает допустимый предел. Обеспечение буксования движителя в оптимальном диапазоне необходимо для повышения эффективности функционирования МТА и снижения вредного воздействия на почву. Для колесных тракторов 4К4 допустимое буксование составляет 16% [1]. В работе [2] установлен рациональный режим буксования 8–12% в результате исследования воздействия ведущих колес трактора тягового класса 0,6 на физические свойства почвы. Авторы в работе [3] приводят допустимый предел буксования 5–15%, в зависимости от состояния почвы. Как отмечается, буксование 5–6% указывает на чрезмерную вертикальную нагрузку на ведущие колеса, которая приводит к возрастанию сопротивления качению и уплотнению почвы. А при буксовании более 15% происходит снижение производительности и повышение расхода топлива.

Буксование зависит от тяговой нагрузки, веса трактора, конструкции движителя, типа и состояния почвы [4, 5]. Авторами работы [6] установлено повышение буксования с ростом скорости при неустановившейся тяговой нагрузке и снижение буксования с ростом скорости при установившейся тяговой нагрузке. Как отмечается в работе [7], механические свойства грунта оказывают большее влияние, чем остальные факторы. На рис. 1 [5] представлен вид зависимости буксования от тягового усилия на стерне для тракторов

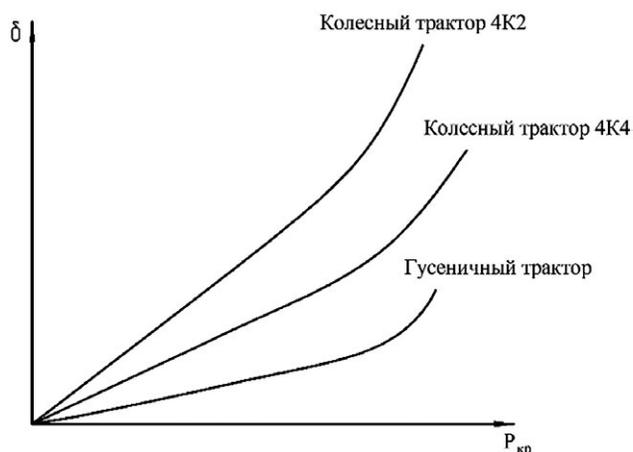


Рис. 1. Зависимость буксования от тягового усилия тракторов на стерне.

Fig. 1. Dependence of slipping on towing force at harvest field.

различной компоновочной схемы. Кривая буксования гусеничного трактора выглядит более пологой, характеризуя меньшие значения буксования. Полноприводный трактор 4К4 несколько уступает гусеничному большими значениями буксования. Наибольшее значение буксования имеет трактор с приводом на одну ось 4К2, который не в полной степени использует сцепной вес.

Многие существующие аналитические модели расчета буксования основаны на экспериментальных данных. Такие модели просты в использовании, однако справедливы для конкретных условий испытания и техники. Актуальность работы заключается в выборе зависимости, описывающей буксование современных энергонасыщенных тракторов компоновочной схемы 4К4б, для исследования их тяговых характеристик.

Цель работы заключается в прогнозировании тяговых свойств тракторов компоновочной схемы 4К4б.

Объектом исследования является колесный трактор компоновочной схемы 4К4б.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Важной характеристикой для определения и сравнения тяговых возможностей тракторов является зависимость значения коэффициента буксования от тягового усилия на крюке или удельного тягового усилия. Обычно вид этой зависимости определяется экспериментально. Для сельскохозяйственных тракторов испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 30745–2001 [8] и ГОСТ Р 52777–2007 [9]. Эталонным фоном для испытания тракторов и для определения тягового класса по ГОСТ 27021–86 [1] является сухая стерня (испытания проводятся на горизонтальном участке поля). Но для вновь проектируемого трактора данная характеристика неизвестна. Поэтому на практике используют расчетные зависимости, либо пользуются характеристиками буксования трактора-прототипа.

Для сравнения тяговых показателей трактора используется удельное усилие на крюке, определяемое отношением усилия на крюке ($P_{кр}$) к весу трактора (G). Наилучшие тяговые показатели трактор имеет на бетонированной дороге, где удельное тяговое усилие составляет 0,65–0,75 при буксовании 10–15%. Наихудшие значения удельного усилия на крюке 0,15–0,35 достигаются на поле, подготовленном под посев. Удельное тяговое усилие $\varphi_{кр}$ на стерне лежит в пределах 0,30–0,44 [7].

Правильный выбор массы трактора обеспечивает наилучшие возможности для реализации тягового усилия. Номинальная эксплуатационная масса полноприводного трактора определяется по формуле:

$$m_{тр} = \frac{P_{крн}}{g \cdot \varphi_{кр}},$$

где $P_{крн}$ — номинальное тяговое усилие, Н; g — ускорение свободного падения, м/с²; $\varphi_{кр}$ — удельная сила тяги.

Принимая в расчете $P_{крн} = 65$ кН, $\varphi_{кр} = 0,41$, получим значение эксплуатационной массы трактора 16161 кг.

Существуют различные зависимости определения значения буксования от тягового усилия [10–17].

1. Логарифмическая зависимость, полученная в результате аппроксимации опытных данных [10]:

$$\delta = -0,05 \cdot \frac{P_{кр}}{\mu \cdot G} \cdot \left[\ln \left(1 - \frac{P_{кр}}{\mu \cdot G} \right) \right], \quad (1)$$

где $P_{кр}$ — сила тяги на ведущих колесах, Н; G — вес трактора, Н. Для трактора со всеми ведущими колесами $G = m_{тр} \cdot g$; $\mu = \varphi_{кр\max}$ — коэффициент сцепления шин с грунтом.

2. Зависимость, выражающая осредненные опытные данные [11]:

$$\delta = \frac{1}{B} \cdot \ln \frac{A}{\varphi_{кр\max} - \varphi_{кр}}, \quad (2)$$

где A , B — коэффициенты, зависящие от типа трактора, типа и состояния опорной поверхности [11]; $\varphi_{кр\max}$, $\varphi_{кр}$ — максимальное и текущее значения удельного тягового усилия на крюке.

Для трактора компоновочной схемы 4К46 при движении по стерне: $A = 0,708$, $B = 7,15$, $\varphi_{кр\max} = 0,67$.

3. Зависимость буксования для колесных тракторов, полученная в результате обобщения экспериментальных данных в широком диапазоне грунтовых условий Ю.В. Гинзбургом [12]:

$$\delta = 1 - \left(1 - \frac{\varphi_{кр}}{\varphi_{кр\max}} \right)^{0,1 \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{кр}}{\varphi_{кр\max}} \right)}, \quad (3)$$

где $\varphi_{кр\max}$, $\varphi_{кр}$ — максимальное и текущее значения удельного касательного тягового усилия.

4. Степенная зависимость [13]:

$$\delta = \left(\frac{P_{кр}}{P_{кр\max}} \right)^n, \quad (4)$$

где $P_{кр\max}$ — максимальное касательное тяговое усилие; n — экспериментальный коэффициент, зависящий от особенностей конструкции трактора, типа ходовой системы, состояния почвы и агрофона. В результате экспериментального исследования, проведенного в Российском государственном аграрном заочном университете, получены значения n для различных почвенных условий [13]. Для стерни примем $n = 4,1$.

5. В работе [14] представлена зависимость буксования от удельного крюкового усилия для тракторов серии К-744 с одинарными колесами на стерне колесовых:

$$\delta = \frac{0,110 \cdot \varphi_{кр}}{0,773 - \varphi_{кр}}. \quad (5)$$

Для дальнейшего расчета представим модели определения буксования (1–5) в функции от удельного тягового усилия для их сравнения. Для этого модели (1), (3), (4) преобразованы с помощью следующих зависимостей:

$$\varphi_{кр} = \frac{P_{кр}}{G}, \quad P_{кр} = P_{кр} + P_f, \quad \varphi_{кр\max} = \frac{P_{кр\max}}{G}, \quad P_{кр\max} = \mu \cdot G,$$

где $P_{кр}$ — сила тяги на крюке. $P_f = f \cdot m_{тр} \cdot g$ — сила сопротивления качению трактора.

Для изучения связи коэффициента буксования и удельного тягового усилия воспользуемся регрессионным анализом. Степень соответствия аппроксимирующей функции исходным данным оценивается коэффициентом аппроксимации R^2 :

- при $R^2 \geq 0,95$ считается, что выбранная модель имеет высокую точность аппроксимации;
- при $0,75 \leq R^2 < 0,95$ считается, что выбранная модель удовлетворительно описывает экспериментальные данные;
- при $0,5 \leq R^2 < 0,75$ говорят о слабой аппроксимации;
- при $R^2 < 0,5$ наблюдается недостаточная точность аппроксимации, модель требует изменения.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2},$$

где y_i — фактическое значение; \hat{y}_i — значение аппроксимирующей функции; \bar{y} — среднее арифметическое.

Для получения уравнений буксования, которые описывают все имеющиеся результаты тяговых испытаний, испытаний тракторов с посадочным диаметром шин 38 дюймов (710/70R38) и посадочным диаметром 32 дюйма (30,5R32, 30,5LR32, 800/65R32) выполнена аппроксимация данных. Результаты представлены на рис. 2, 3, 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построены кривые буксования в функции от удельного тягового усилия $\varphi_{кр}$ и совмещены с экспериментальными данными тяговых испытаний сельскохозяйственных тракторов К-7 «Кировец» с одинарными колесами. Результаты представлены на рис. 2. Сведения об испытаниях тракторов К-7 «Кировец» приведены в табл. 1.

Как показано на рис. 2, кривая (2) $R^2 = 0,704$ и кривая (5) $R^2 = 0,685$ наиболее удовлетворительно описывают опытные данные среди рассмотренных. Кривая (1) $R^2 = 0$ несколько занижает, а (3) завышает значения буксования. Кривая (1) имеет схожий характер изменения буксования гусеничного трактора, работающего с меньшим буксованием, по сравнению с колесным трактором. Кривая (4) до $0,25 \varphi_{кр}$ занижает прогнозные значения буксования, а после $0,25 \varphi_{кр}$ значительно завышает значения. Результаты расчета значения коэффициента аппроксимации R^2 приведены в табл. 2.

С целью практического использования результаты тяговых испытаний тракторов «Кировец» К-7 аппроксимированы экспоненциальной зависимостью, которая показала более точное описание данных с наибольшими значениями коэффициента аппроксимации R^2 .

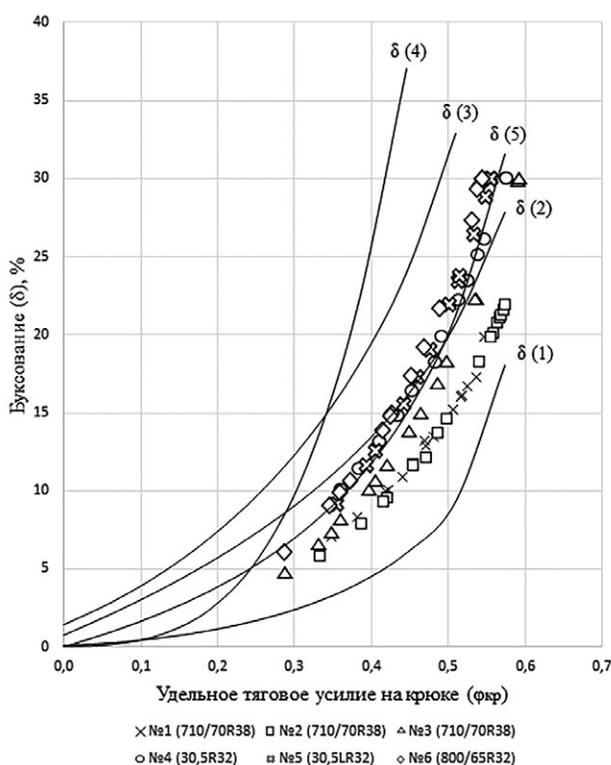


Рис. 2. Кривые буксования, полученные расчетным путем, и экспериментальные данные.

Fig. 2. The characteristic curves of slipping obtained analytically and the experimental data.

Результаты приведены на рис. 3, 4, 5. На рис. 3 представлено графическое представление построенной кривой. Вид полученного уравнения:

$$\delta = 1,1977 \cdot e^{5,4585 \cdot \varphi_{кр}} \quad (6)$$

Таблица 1. Сведения об испытаниях тракторов

Table 1. Information about testing of tractors

№	Модель трактора; типоразмер шин (давление воздуха в шине); масса; мощность двигателя	Место испытаний	Тип фона	Характеристики фона	
				Влажность, %	Твердость, МПа
1	К-744Р4; 710/70R38; 0,14 МПа; 15960 кг; 298,1 кВт	Северо-Кавказская МИС	Стерня озимой пшеницы	20,8...24,5	0,72...1,54
2	К-742Пр; 710/70R38 (0,14 МПа); 15850 кг; 298,1 кВт			средняя — 22,65	средняя — 1,13
3	К-742Пр; 710/70R38 (0,14 МПа); 15960 кг; 292,3 кВт			10,15...16,73	0,42...1,4
4	К-744Р4; 30,5R32 (0,14 МПа); 15751 кг; 301 кВт			средняя — 13,44	средняя — 0,91
5	К-744Р4; 30,5LR32 (0,14 МПа); 16330 кг; 301 кВт			15,3...23,0	1,14...2,28
6	К-742Пр; 800/65R32 (0,14 МПа); 16360 кг; 292,3 кВт			средняя — 20,1	средняя — 1,69

Таблица 2. Расчетные значения коэффициента аппроксимации R^2 **Table 2.** Calculated values of approximation coefficient R^2

№ кривой	R^2	Точность аппроксимации
1	0	Недостаточная ($R^2 < 0,5$)
2	0,704	Слабая ($0,5 \leq R^2 < 0,75$)
3	0,291	Недостаточная $R^2 < 0,5$
4	0,149	Недостаточная ($R^2 < 0,5$)
5	0,685	Слабая ($0,5 \leq R^2 < 0,75$)

Построенная кривая описывает экспериментальные данные с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0,852$.

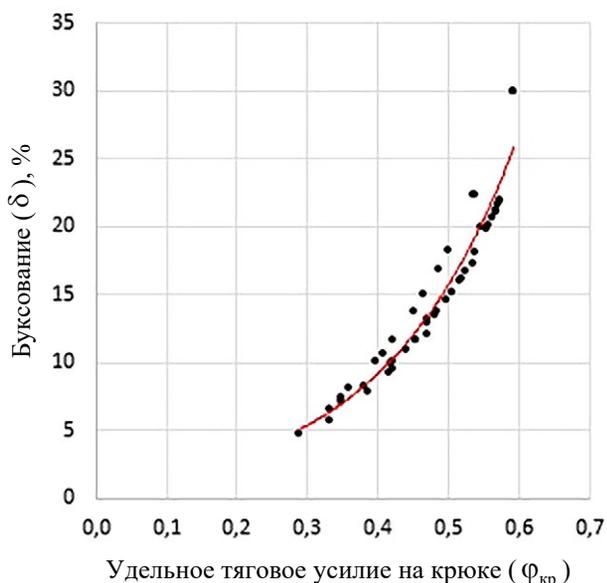
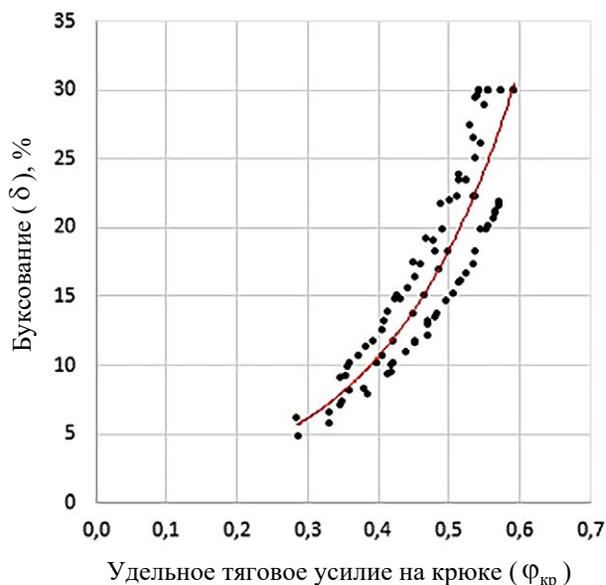
На рис. 4 представлено графическое изображение построенной кривой для шин с посадочным диаметром 38 дюймов. Вид полученного уравнения:

$$\delta = 1,0809 \cdot e^{5,3557 \cdot \varphi_{кр}} \quad (7)$$

Построенная кривая описывает экспериментальные данные с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0,959$.

На рис. 5 представлено графическое представление построенной кривой буксования для шин с посадочным диаметром 32 дюйма. Вид полученного уравнения:

$$\delta = 1,3018 \cdot e^{5,6309 \cdot \varphi_{кр}} \quad (8)$$

**Рис. 4.** Аппроксимация экспериментальных данных с шинами 38 дюймов: №1, №2, №3 (710/70R38).**Fig. 4.** Approximation of the experimental data for 38-inch tires: #1, #2, #3 (710/70R38).**Рис. 3.** Аппроксимация экспериментальных данных экспоненциальной зависимостью.**Fig. 3.** Experimental data approximation with an exponential function.

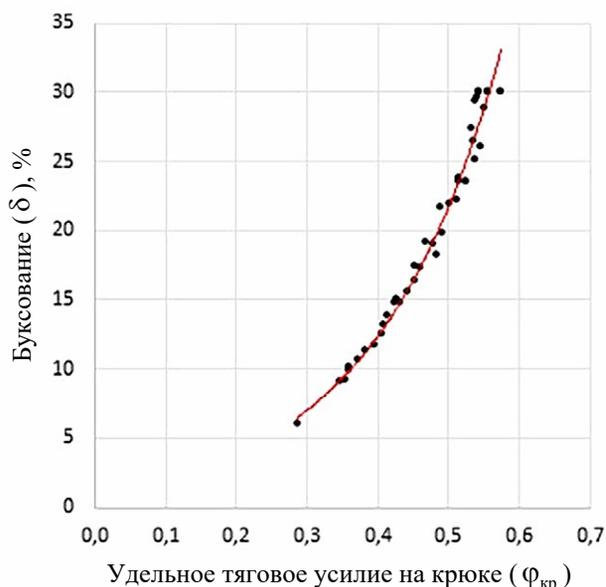
Построенная кривая описывает экспериментальные данные с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0,9861$.

Для выбора оптимального удельного тягового усилия, получено уравнение (9) и выполнены построения, представленные на рис. 6, 7.

На рис. 6 представлено изменение тягового КПД тракторов серии К-7 «Кировец».

Вид полученного уравнения:

$$\eta_T = -4,1624 \cdot \varphi_{кр}^2 + 2,6861 \cdot \varphi_{кр} + 0,3 \quad (9)$$

**Рис. 5.** Аппроксимация экспериментальных данных с шинами 32 дюйма: №4 (30,5R32), №5 (30,5LR32), №6 (800/65R32).**Fig. 5.** Approximation of the experimental data for 32-inch tires: #4 (30.5R32), #5 (30.5LR32), #6 (800/65R32).

Построенная кривая описывает экспериментальные данные с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0,8041$.

Учитывая, что экспериментальные данные получены при определенном диапазоне изменения тягового усилия, уравнения (6)–(9) справедливы для $\varphi_{кр} \in [0,29; 0,6]$.

С использованием уравнения (6), (9) построены кривые тягового КПД трактора $\eta_{Т max}$ и буксования δ в зависимости от удельного тягового усилия $\varphi_{кр}$. Как показано на рис. 7, максимальное значение $\eta_{Т max}$ достигается при $\varphi_{кр} = 0,32$, при этом $\delta = 7\%$. При допустимом коэффициенте буксования $\delta_{д} = 16\%$ удельное тяговое усилие равно $\varphi_{кр} = 0,48$.

Принципиально важно, что все рассмотренные и предложенные в данной статье расчетные зависимости имеют сугубо прикладное значение и не вскрывают физической связи между значением коэффициента буксования и параметрами, характеризующими процесс взаимодействия деформируемого колеса с грунтом. Однако данное замечание не снижает практической полезности и применимости таких зависимостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования выявлены существующие аналитические зависимости (2) и (5), наиболее приближенно описывающие экспериментальные данные тракторов «Кировец» серии К-7. Также в результате аппроксимации экспериментальных данных получены новые зависимости: общее для всех тракторов (6), для тракторов только с шинами R38 (7) и R32 (8). Установлено, что максимальному значению тягового КПД $\eta_{Т max}$ соответствует $\varphi_{кр} = 0,32$ и допустимому коэффициенту буксования 16% $\varphi_{кр} = 0,48$.

Для прогнозирования значений коэффициента буксования при построении потенциальной тяговой характеристики энергонасыщенных тракторов 4К46 могут быть использованы некоторые существующие и предложенные в данной работе новые уравнения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Н.Л. Анисимов — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Э.И. Ефимов — редактирование текста рукописи; Р.Ю. Добрецов — научное руководство; М.И. Дмитриев — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

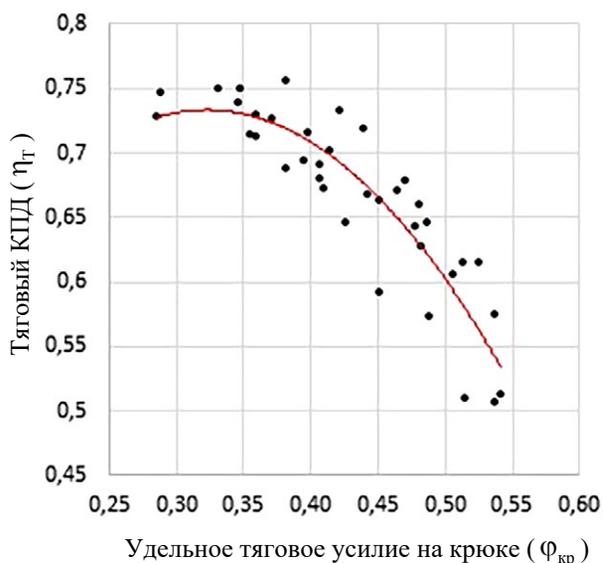


Рис. 6. Аппроксимация экспериментальных данных.
Fig. 6. Experimental data approximation.

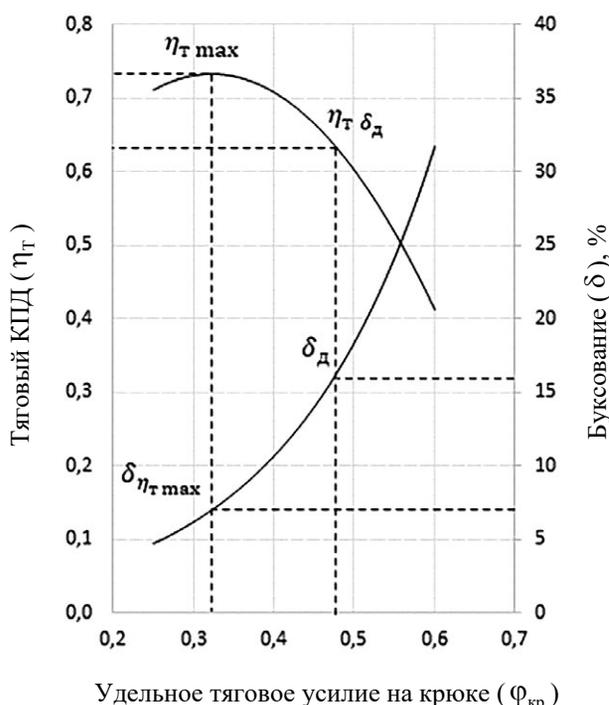


Рис. 7. Удельное тяговое усилие на стерне, соответствующее максимальному тяговому КПД и допустимому буксованию трактора.

Fig. 7. Specific towing force at harvest field corresponding to maximal towing efficiency and acceptable tractor slipping.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. N.L. Anisimov — search for publications, writing the text of the manuscript; E.I. Efimov — editing the text of the manuscript; R.Yu. Dobretsov — scientific supervision; M.I. Dmitriev — expert opinion, approval of the final version. All authors made a substantial contribution to the conception of the work,

acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 27021-86. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. М.: Издательство стандартов, 1986. Дата обращения: 07.09.2022. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200009845>
- Черников О.Н., Быченин А.П. Влияние режимов буксования колесного движителя энергетического средства МТА на физические свойства почвы // Известия самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. Т. 3, № 4. С. 44–49. Дата обращения: 11.11.2022. Режим доступа: <https://bulletin.ssaa.ru/1997-3225/article/view/22678>
- Čiplienė A., Gurevičius P., Janulevičius A., et al. Experimental validation of tyre inflation pressure model to reduce fuel consumption during soil tillage // *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 186. P. 45–59. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.06.023
- Колобов Г.Г., Парфенов А.П. Тяговые характеристики тракторов. М.: Машиностроение, 1972.
- Кузьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. М.: КолосС, 2004.
- Тургиев А.К., Попов В.В., Мочунова Н.А. Влияние повышения скорости движения агрегата на величину буксования ведущих колес трактора // *Природообустройство*. 2012. № 3. С. 99–101. Дата обращения: 11.11.2022. Режим доступа: <http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-22-2012-03.pdf/download/gmgup-22-2012-03.pdf>
- Шувалов Е.А., Бойков А.В., Добряков Б.А. Теория и расчёт трактора «Кировец». Л.: Машиностроение, 1980.
- ГОСТ 30745-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей. М.: Издательство стандартов, 2002. Дата обращения: 07.09.2022. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200030187>
- ГОСТ Р 52777-2007. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. М.: Стандартинформ, 2009. Дата

обращения: 07.09.2022. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200057686>

- Носов Н.А., Павлов В.Ю., Самойлов А.Д. Тягово-экономический расчёт трактора: Методические указания. Санкт-Петербург: СПбГТУ, 1995.
- Городецкий К.И., Парфенов А.П., Лавлинский А.М. Обобщенные тяговые показатели сельскохозяйственных тракторов // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. Т. 84, №2. С. 3–8. doi: 10.17816/0321-4443-66246
- Гинзбург Ю.В., Швед А.И., Парфенов А.П. Промышленные тракторы. М.: Машиностроение, 1986.
- Махмутов М.М., Кондаурова Н.В. Тягово-цепные свойства колесных машинно-тракторных агрегатов // *Научное обозрение. Технические науки*. 2016. №3. С. 70–71. Дата обращения: 15.08.2022. Режим доступа: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1089>
- Селиванов Н.И., Запрудский В.Н. Показатели динамических и тягово-цепных свойств тракторов «Кировец» серии К-744 // *Вестник КрасГАУ*. 2012. №5. С. 297–305. Дата обращения: 10.10.2022. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/pokazateli-dinamicheskikh-i-tyagovo-stsepyh-svoystv-traktorov-kirovets-serii-k-744/pdf>
- Ширяева Е.В. Разработка способа оценки взаимодействия колесных движителей сельскохозяйственных тракторов в составе МТА с почвой. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2013.
- Maclaurin B. Using a modified version of the Magic Formula to describe the traction/slip relationships of tyres in soft cohesive soils // *Journal of Terramechanics*. 2014. Vol. 52. P. 1–7. doi: 10.1016/j.jterra.2013.11.005
- Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др. Тракторы: Теория: учебник для студентов ВУЗов по спец. «Автомобили и тракторы». М.: Машиностроение, 1988.

REFERENCES

- GOST 27021-86. Traktory selskokhozyaystvennyye i lesokhozyaystvennyye. Tyagovyye klassy. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1986. (in Russ). Accessed: 07.09.2022. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200009845>
- Chernikov ON, Bychenin AP. Influence of the slipping modes of the wheel propeller of the MTA power tool on the physical properties of the soil. *Izvestiya samarskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2018;3(4):44–49. (in Russ). Accessed: 11.11.2022. Available from: <https://bulletin.ssaa.ru/1997-3225/article/view/22678>
- Čiplienė A, Gurevičius P, Janulevičius A, et al. Experimental validation of tyre inflation pressure model to reduce fuel consumption during soil tillage. *Biosystems Engineering*. 2019;186:45–59. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.06.023
- Kolobov GG, Parfenov AP. *Traction characteristics of tractors*. Moscow: Mashinostroenie; 1972. (in Russ).
- Kutkov GM. Tractors and cars. *Theory and technological properties*. Moscow: KolosS; 2004. (in Russ).
- Turgiev AK, Popov VV, Mochunova NA. The effect of increasing the speed of the unit on the amount of slippage of the driving

wheels of the tractor. *Prirodoobustroystvo*. 2012;3:99–101. (in Russ). Accessed: 11.11.2022. Available from: <http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-22-2012-03.pdf/download/gmgup-22-2012-03.pdf>

7. Shuvalov EA, Boykov AV, Dobryakov BA. *Theory and calculation of the Kirovets tractor*. Leningrad: Mashinostroenie; 1980. (in Russ).

8. GOST 30745-2001. Traktory selskokhozyaystvennyye. Opredelenie tyagovykh pokazateley. Moscow: Izdatelstvo standartov; 2002. (in Russ). Accessed: 07.09.2022. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200030187>

9. GOST R 52777-2007. Tekhnika selskokhozyaystvennaya. Metody energeticheskoy otsenki. M.: Standartinform; 2009. (in Russ). Accessed: 07.09.2022. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200057686>

10. Nosov NA, Pavlov VYu, Samoilov AD. Traction-economic calculation of the tractor: Guidelines. Saint Petersburg: SPbGTU; 1995. (in Russ).

11. Gorodetsky K.I. Parfenov A.P., Lavlinsky A.M. Generalized traction indicators of agricultural tractors. *Tractors and agricultural machinery*. 2017;84(2):3–8. (in Russ). doi: 10.17816/0321-4443-66246

12. Ginzburg YuV, Shved AI, Parfenov AP. *Industrial tractors*. Moscow: Mashinostroenie; 1986. (in Russ).

13. Makhmutov MM, Kondaurova NV. Traction and coupling properties of wheeled machine-tractor units. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*. 2016;3:70–71. (in Russ). Accessed: 15.08.2022. Available from: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1089>

14. Selivanov NI, Zaprudsky VN. Indicators of dynamic and traction properties of tractors “Kirovets” series K-744. *Vestnik KrasGAU*. 2012;5:297–305. (in Russ). Accessed: 10.10.2022. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/pokazateli-dinamicheskikh-i-tyagovo-stsepykh-svoystv-tractorov-kirovets-serii-k-744/pdf>

15. Shiryayeva EV. Razrabotka sposoba otsenki vzaimodeystviya kolesnykh dvizhiteley selskokhozyaystvennykh traktorov v sostave MTA s pochvoy [dissertation] Volgograd; 2013. (in Russ).

16. Maclaurin B. Using a modified version of the Magic Formula to describe the traction/slip relationships of tyres in soft cohesive soils. *Journal of Terramechanics*. 2014;52:1–7. doi: 10.1016/j.jterra.2013.11.005

17. Guskov VV, Velev NN, Atamanov YuE, et al. *Tractors: Theory: a textbook for university students on special. “Automobiles and Tractors”*. Moscow: Mashinostroenie; 1988. (in Russ).

ОБ АВТОРАХ

* Анисимов Николай Леонидович,

ведущий инженер-конструктор отдела главного конструктора; аспирант Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта; адрес: Российская Федерация, 198097, Санкт-Петербург, пр-т Стачек, д. 47; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1270-1093>; eLibrary SPIN: 4958-4651; e-mail: anisimovnl05@mail.ru

Ефимов Эдуард Иванович,

ведущий инженер-конструктор отдела главного конструктора; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2918-5787>; eLibrary SPIN: 5654-9775; e-mail: efimo-@mail.ru

Добрецов Роман Юрьевич,

д-р техн. наук, профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3827-0220>; eLibrary SPIN: 6168-3091; e-mail: dr-idpo@yandex.ru

Дмитриев Михаил Игоревич,

канд. техн. наук, начальник инженерного центра, главный конструктор отдела главного конструктора; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9396-0372>; eLibrary SPIN: 2880-5520; e-mail: Mikhail.Dmitriev@sptz.kzgroup.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

* Nikolay L. Anisimov,

Leading Design Engineer of the Chief Designer Department; Postgraduate of the Higher School of Transport of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport; address: 47 Stachek avenue, 198097 Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1270-1093>; SPIN-код: 4958-4651; e-mail: anisimovnl05@mail.ru

Eduard I. Efimov,

Leading Design Engineer of the Chief Designer Department; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2918-5787>; eLibrary SPIN: 5654-9775; e-mail: efimo-@mail.ru

Roman Yu. Dobretsov,

Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Higher School of Transport of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3827-0220>; eLibrary SPIN: 6168-3091; e-mail: dr-idpo@yandex.ru

Mikhail I. Dmitriev,

Cand. Sci. (Tech), Chief Designer of the Chief Designer Department; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9396-0372>; eLibrary SPIN: 2880-5520; e-mail: Mikhail.Dmitriev@sptz.kzgroup.ru

* Corresponding author