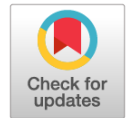


Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-681801>

EDN: XOCGGM



Статистическая модель расчёта массовых, мощностных и тяговых характеристик сельскохозяйственных тракторов

С.С. Жуков¹, В.С. Макаров^{2,3}, В.В. Беляков², А.А. Ключкин²¹ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия;² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия;³ Государственный университет управления, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Одной из задач современной агропромышленной отрасли является интегрирование цифровых и роботизированных технологий, преследующей снижение человеческого фактора в цепочке производства продукции. Особый интерес представляет переход с пилотируемых сельскохозяйственных транспортно-технологических машин на автономные наземные мобильные комплексы (АНМК). Сельскохозяйственный трактор является универсальной тягово-толкательной мобильной системой агропромышленного комплекса (АПК), поэтому его можно использовать в качестве оптимальной платформы для проектирования шасси АНМК. На этапе проектирования беспилотных наземных мобильных систем необходимо разработать такое конструктивно-техническое решение, которое позволяет эффективно функционировать АНМК без потери подвижности [4]. Развиваемое тяговое усилие на крюке трактора оказывает значительное влияние на подвижность сельскохозяйственного трактора на местности. Следовательно, для получения оптимального конструктивно-технического решения необходимо установить взаимосвязь между ключевыми характеристиками тракторов, которые позволят подобрать первичные параметры шасси АНМК.

Целью работы является установление взаимосвязи между техническими и конструкционными параметрами сельскохозяйственных тракторов на колёсном и гусеничном движителях, выраженными в форме математических зависимостей, для выбора первичных параметров АНМК.

Методы. Построение статистической модели базировалось на составлении выборки существующих моделей сельскохозяйственных тракторов и определении вида математических закономерностей между техническими параметрами в форме регрессионных уравнений.

Результаты. Получены регрессионные уравнения, устанавливающие взаимосвязь между мощностью двигателя трактора, полной массой, удельной мощностью двигателя и удельным давлением на грунт, и подобраны первичные технические параметры АНМК.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования полученных закономерностей при подборе первичных параметров при проектировании, обеспечивающих конкурентоспособность машины в определенном тягово-мощностном сегменте и соблюдение агротехнологических требований.

Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат; автономный мобильный комплекс; сельскохозяйственный трактор; полная масса; мощность энергоносителя; тяговое усилие.

Как цитировать:

Жуков С.С., Макаров В.С., Беляков В.В., Ключкин А.А. Статистическая модель расчёта массовых, мощностных и тяговых характеристик сельскохозяйственных тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 4. С. 384–392. DOI: 10.17816/0321-4443-681801 EDN: XOCGGM

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-681801>

EDN: XOCGGM

Statistical Model for Analysis of Mass, Power and Traction Characteristics of Agricultural Tractors

Sergey S. Zhukov¹, Vladimir S. Makarov^{2,3}, Vladimir V. Belyakov², Anton A. Klushkin²¹ Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino, Russia;² Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva, Nizhniy Novgorod, Russia;³ State University of Management, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: One of the challenges of modern agricultural industry is the integration of digital and robotic technologies, pursuing the reduction of the human factor in the production chain. Transition from manned agricultural transport and technological machines to autonomous ground mobile facilities (AGMF) is of particular interest. An agricultural tractor is a universal pull-push mobile system of the agricultural industry (ACI), so it can be used as an optimal platform for the design of the AGMF chassis. At the design stage of unmanned ground mobile systems, it is necessary to develop such a technical solution that allows the AGMF to function effectively without loss of mobility. The developed drawbar load has a significant impact on the mobility of the agricultural tractor on the ground. Therefore, in order to obtain an optimal technical solution, it is necessary to define the interrelation between the key characteristics of tractors, helping to select the primary parameters of the AGMF chassis.

AIM: Definition of interrelation between technical and design parameters of wheeled and tracked agricultural tractors as mathematical dependencies in order to select primary parameters of the AGMF.

METHODS: Building of the statistical model was based on compiling a sample of the existing models of agricultural tractors and determining the type of mathematical regularities between technical parameters as regression equations.

RESULTS: Regression equations defining the interrelation between tractor engine power, gross weight, specific engine power and specific ground pressure were obtained, and primary technical parameters of AGMF were selected.

CONCLUSION: The practical value of the study lies in the possibility of using the obtained parameters in the selection of primary parameters in the design, ensuring the competitiveness of the machine in a certain traction-power segment and compliance with agro-technological requirements.

Keywords: machine-tractor unit; autonomous mobile facility; agricultural tractor; gross weight; energy carrier capacity; tractive force.

To cite this article:

Zhukov SS, Makarov VS, Belyakov VV, Klushkin AA. Statistical Model for Analysis of Mass, Power and Traction Characteristics of Agricultural Tractors. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(4):384–392. DOI: 10.17816/0321-4443-681801 EDN: XOCGGM

Submitted: 31.05.2025

Accepted: 17.09.2025

Published online: 24.09.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Авторский анализ показал, что в настоящее время доля тракторов на колёсном (КД) и гусеничном движителе (ГД) составляет 50% от общего количества сельскохозяйственных машин (рис. 1), потому что трактор является основной машиной для существенного количества технологических операций. Так оказалось, что рынок гусеничных движителей в 9 раз меньше, чем колесных. Малая применимость сельскохозяйственных тракторов с ГД вызвана тем, что они эффективны только для пахотных работ, в остальных случаях они не выдерживают конкуренции с колесными тракторами (рис. 2, *a*) по следующим критериям: стоимость эксплуатации, ремонтпригодность, скорость, маневренность и т.п. Однако, гусеничные трактора (рис. 2, *b*) обладают высокой проходимостью, то есть высоким качеством взаимодействия с опорной поверхностью и при этом низким удельным давлением на грунт, что позволяет применять тракторы на ГД на слабонесущих грунтах и на снежном основании.

Кроме того, выделяется смежная конструкция — колёсно-гусеничный движитель (рис. 2, *c*). Как правило колёсная схема движителей — 4×4 и иногда включает в себя спаренные колеса. Схема гусеничных движителей может быть, как состоящей из двух продольных

гусеничных модулей, так и из четырёх модулей (4×4). Наиболее подробно виды движителей описаны в работе [2]. Проведя анализ тракторной техники всех крупных мировых производителей, оказалось, что колёсно-гусеничный движитель присутствует только на комбайновой или прочей уборной технике. Все приведённые ведущие модели тракторов имеют стандартные виды движителей.

Внедрение цифровых и интеллектуальных систем в агропромышленное производство требует новых подходов к ведению сельскохозяйственной деятельности. Сельскохозяйственные тракторы должны быть оснащены технологией автономной работы, которая позволит совершать работу без человека, оператора машинно-тракторного агрегата (МТА), т.е. эксплуатироваться круглосуточно. При этом конструкция автономного мобильного комплекса (АМК) должна позволять функционировать в условиях всепогодности.

Соответственно, к проектированию таких АМК необходимо подходить на фундаментальном уровне, учитывать природно-климатические особенности местности эксплуатации. При этом шасси АМК необходимо разработать наиболее универсальным и адаптивным. Под универсальностью шасси подразумевается использование КД и ГД на одинаковом шасси с возможностью замены движителей. Под понятием адаптивности заложен следующий смысл: шасси способно подстраиваться под изменяемые

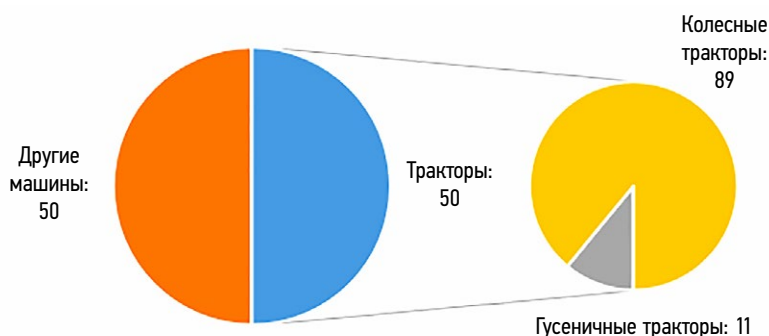


Рис. 1. Доля тракторного парка среди всех видов машин, %.

Fig. 1. Share of tractor fleet among all types of machines, %.

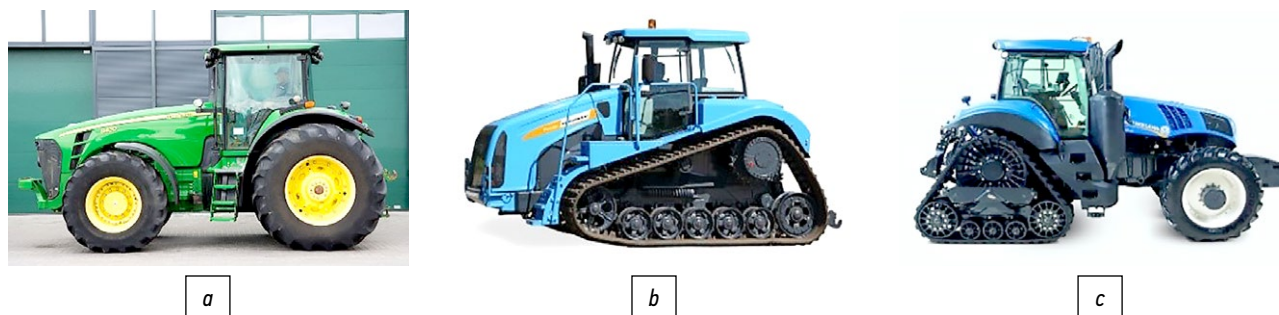


Рис. 2. Виды движителей: *a* — колёсный движитель (источник: <https://dostavkatk.ru>); *b* — гусеничный движитель (источник: <https://blagoveschensk.km124.ru>); *c* — колёсно-гусеничный движитель (источник: <https://atgarant.ru/>).

Fig. 2. Types of propulsion systems: *a*, wheeled propulsion system (source: <https://dostavkatk.ru>); *b*, tracked propulsion system (source: <https://blagoveschensk.km124.ru>); *c*, wheeled-tracked propulsion system (source: <https://atgarant.ru/>).

физико-механические параметры поверхности движения и под тяговый режим.

Цель данной работы — получение математических зависимостей между массовыми, мощностными и тяговыми характеристиками существующих сельскохозяйственных тракторов для разработки статистической модели выбора первичных технических и конструктивных параметров АМК.

МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ МОДЕЛИ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Суть статистического анализа заключается в нахождении адекватной математической закономерности между независимыми друг от друга параметрами: техническими и конструктивными. В исследовании [3] уже приводилось составление статистической модели выбора первичных параметров гусеничных машин, но она является достаточно обобщенной, поскольку не учитывает специфику работы сельскохозяйственных гусеничных тракторов. Например, в отличие от исследования [3], мы не определяем зависимости, связанные со скоростью и грузоподъемностью, поскольку они не представляют существенного значения для с/х тракторов. Подобное исследование проводилось зарубежными учеными в работе [5], где устанавливались взаимосвязи между тягово-мощностными параметрами тракторов при работе 85% от номинальной максимальной мощности. В нашей работе мы устанавливаем математические зависимости между аналогичными параметрами для конкретных тракторов на развиваемом номинальном тяговом усилии, исходя из их назначения и колёсной формулы. Наиболее важной является величина тягового сопротивления на крюке, поскольку от неё зависит степень взаимодействия двигателя с поверхностью движения.

Главным условием движения трактора, особенно в составе МТА, является развитие тягового усилия, превышающее сумму всех сил сопротивления движению. Основная сила сопротивления возникает в области взаимодействия трактора с поверхностью движения. Взаимодействие сельскохозяйственного трактора происходит в двух системах «двигатель — поверхность движения» и «сельскохозяйственная машина — грунт». Соответственно, общее тяговое усилие должно превышать тяговые затраты в этих системах. Прогнозирование тяговых характеристик является важнейшей задачей сельскохозяйственной инженерии и данной проблеме посвящено множество исследований. Так, на формирование тягового сопротивления на крюке влияет ряд факторов, среди которых можно выделить массу агрегата, скорость движения, физико-механическое состояние грунта, давление в шинах и так далее. Отдельно стоит заметить, что моделирование тягового сопротивления на различных видах грунта является одной из главных задач земледельческой механики во всем мире, например, в исследовании [6] составляется статистическая модель тягового усилия при вспашке почвы Alfisol.

Взаимодействие между двигателем трактора и поверхностью движения во многом зависит от физико-механического состояния поверхности движения, и в целом от прочностных показателей грунта. Некоторые исследования отдельно посвящены изучению проходимости трактора по естественным грунтам, которые пригодны к ведению сельскохозяйственной деятельности, таким как суглинок и чернозём. Например, в работе [7] проводится оценка между тяговым усилием трактора пятого тягового класса и показателем индекса конуса на рисовых полях в Корее. Моделью статистического анализа является получение уравнения линейной регрессии и определение её адекватности при помощи коэффициента достоверности R . При установлении взаимосвязи между параметрами трактора используется модель линейной регрессии, поскольку коэффициент достоверности R^2 больше, чем у полиномов 1-й и 2-й степеней. Для составления самой модели необходимо сформировать выборку технических и конструктивных параметров, между которыми определяется математическая зависимость.

Составление выборки сельскохозяйственных тракторов является трудоёмкой задачей, поскольку рынок сельскохозяйственных машин представлен большим количеством брендов, а ведущие производители тракторов имеют широкий модельный ряд. При этом, тракторы оснащаются энергоносителями с различными тягово-мощностными характеристиками. Составление выборки можно провести согласно Государственному стандарту 27021-86 [1], разделив все тракторы по тяговым классам. Однако, такой подход не эффективен, поскольку большинство востребованных колёсных и гусеничных тракторов находятся в более высоких классах, либо не входят в них. Во-вторых, составление подборки тракторов для каждого класса не даст нам объективной статистической модели с точки зрения его вовлеченности в производство. Это можно объяснить тем, что тяговые и мощностные возможности трактора могут использоваться по-разному, например, трактор с тяговым усилием 40–50 кН предназначен для выполнения обработки почвы, но в то же время может использоваться как в посевных, как в уборочных, так и во вспомогательных работах с меньшими тяговыми затратами. При этом конструкция шасси трактора может быть, как 4×2, так и 4×4. Исходя из вышесказанного, мы решили составлять статистическую модель тракторов на основе технологической эксплуатации тракторов с учётом колёсной формулы: универсальные (4×2), универсально-пропашные (4×4) и пропашные тракторы (4×4). Отдельно будет составлена статистическая модель тракторов на ГД, сразу стоит заметить, что они используются только для энергозатратных работ. Таким образом, каждая группа составлена из двадцати тракторов с разными тягово-мощностными характеристиками (табл. 1).

Процедура обработки данных сводилась к установлению математических зависимостей между конструктивными и техническими параметрами шасси. Основным параметром является тяговое

Таблица 1. Тягово-мощностной диапазон тракторов**Table 1.** Traction and power range of tractors

Вид трактора	Мощность ДВС, кВт	Тяговое усилие, кН
Универсально-пропашной 4×2	11–73,5	7,8–28,4
Универсально-пропашной 4×4	81–161,8	37,3–47
Пропашной 4×4	66–514	24,5–68,6
Гусеничный	250–487	49–68,6

сопротивление на крюке, образуемое при перемещении прицепного агрегата в процессе взаимодействия с грунтом. В том числе, тяговое сопротивление оказывает влияние на сцепление движителя с полотном пути. Исследуя процесс формирования тягового сопротивления на крюке, можно выделить три вида взаимодействия агрегата и грунта: 1) взаимодействие режущих элементов почвообрабатывающих агрегатов и грунта; 2) взаимодействие сошников сеялок и грунта; 3) взаимодействие колеса и грунта. Данные виды взаимодействия перечислены в направлении уменьшения тягового сопротивления, поскольку взаимодействие с грунтом происходит на различной глубине с разной твёрдостью. Поэтому самое высокое значение сопротивления образуется при механической обработке грунта режущими элементами плуга, а самое минимальное при качении колеса по несущей поверхности. К тому же на процесс взаимодействия оказывают влияние следующие факторы, которые можно объединить в группы: 1) физико-механические характеристики грунта (влажность, плотность, модуль деформации и т.п.); 2) рельеф местности (равнина, холмистая местность, горная местность т.п.); 3) агротехнологические требования (скорость движения, способ движения по участку, конструкция агрегата и т.п.). Ввиду всего этого, было решено отталкиваться от развиваемого тягового усилия трактора, поскольку агрегатирование с тем или иным устройством подразумевает тяговые возможности трактора. Исходя из всего выше сказанного, мы должны определить

взаимосвязь между тяговым сопротивлением на крюке, полной массой, мощностью ДВС и прочими удельными характеристиками шасси, необходимыми для подбора первоначальных параметров АМК.

ПОЛУЧЕНИЕ МОДЕЛИ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

На основании анализа и обработки параметров основных характеристик тракторов на КД были получены графики (рис. 3–6) и следующие регрессионные уравнения (табл. 2, 3).

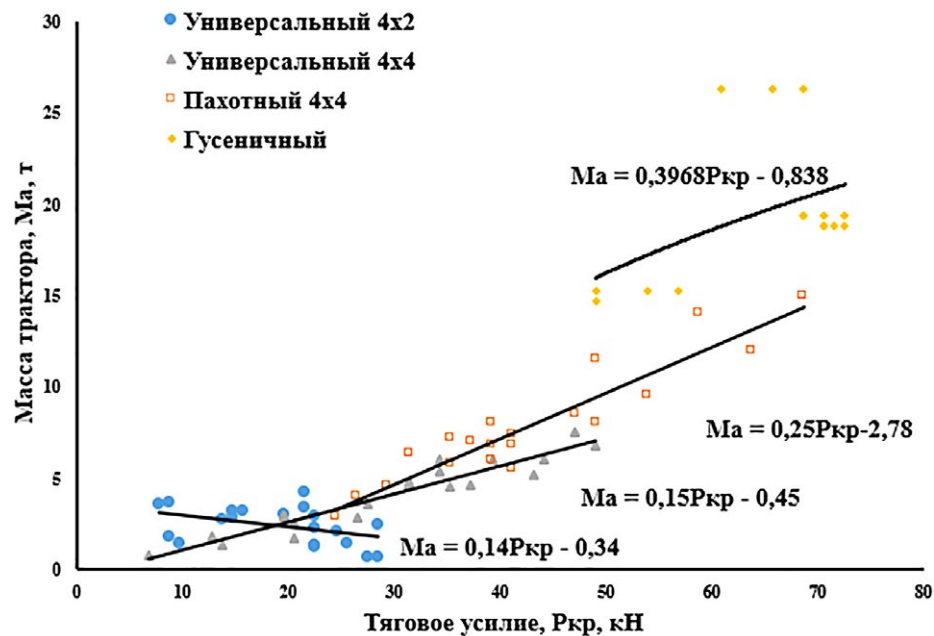
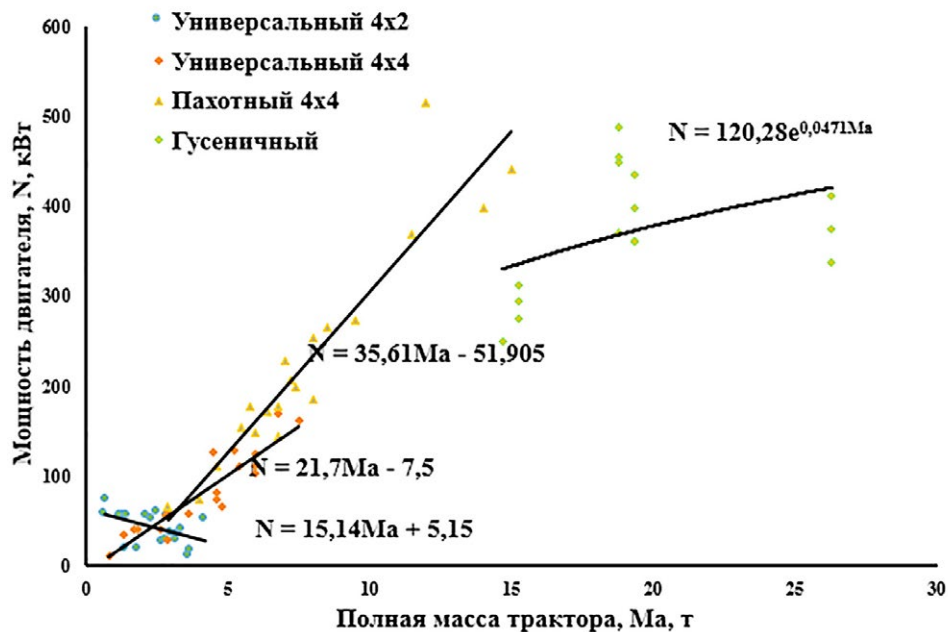
Поскольку сельскохозяйственный трактор во многих операциях выступает в роли тягово-толкательной системы, то главным параметром выступает тяговое усилие на крюке. Прицепные сельскохозяйственные машины и агрегаты в процессе работы формируют большие силы сопротивления и энергоноситель трактора должен развивать мощность, необходимую для их преодоления. Известно, что поток мощности от энергоносителя распределяется по элементам шасси, но для с/х тракторов существует понятие «полезной мощности», которая распределяется на вал отбора мощности (ВОМ) и тягово-сцепное устройство. Поскольку на развитие требуемого тягового усилия затрачивается часть развиваемой мощности, то между ними существует уже известная математическая закономерность, поэтому необходимо определить взаимосвязь между неочевидными характеристиками МТА. Важным звеном исследования

Таблица 2. Регрессионные уравнения соотношения параметров КТ**Table 2.** Regression equations of wheeled tractor parameters interrelation

Зависимости	Назначение КМ	Колёсная формула	
		4×2	4×4
Мощность двигателя от полной массы КТ, [кВт – т]	Универсальные	$N = 15,14 M_a + 5,15$	$N = 21,7 M_a + 7,5$
	Пахотные	–	$N = 35,6 M_a + 51,9$
Полная масса КТ от тягового усилия, [т – кН]	Универсальные	$M_a = 0,14 P_{kp} - 0,34$	$M_a = 0,15 P_{kp} - 0,45$
	Пахотные	–	$M_a = 0,25 P_{kp} - 2,78$
Удельная мощность двигателя от полной массы КТ, [кВт/т-т]	Универсальные	$N_{уд} = -1,1958 M_a + 20,6$	$N_{уд} = 0,2488 M_a + 18,63$
	Пахотные	–	$N_{уд} = 0,9154 M_a + 20,7$
Удельное давление на грунт от полной массы КТ, [кПа-т]	Универсальные	$P_{уд} = -7,086 \ln M_a + 96,4$	$P_{уд} = -9,25 \ln M_a + 99,6$
	Пахотные	–	$P_{уд} = 91,4 e^{-0,033 M_a}$

Таблица 3. Регрессионные уравнения соотношения параметров ГТ**Table 3.** Regression equations of tracked tractor parameter interrelation

Зависимости	Уравнение
Мощность двигателя от полной массы ГТ, [кВт – т]	$N = 120,28e^{0,0471M_a}$
Полная масса ГТ от тягового усилия, [т – кН]	$M_a = 0,3968P_{кр} - 0,838$
Удельное давление $P_{уд}$ от полной массы ГТ, [МПа – т]	$P_{уд} = 0,0181 \ln(M_a) - 0,0137$
Удельная мощность двигателя — полная масса ГТ, [кВт/т – т]	$N = -0,4794 M_a + 28,74$

**Рис. 3.** Зависимость полной массы трактора от тягового усилия на крюке.**Fig. 3.** Dependence of total tractor weight on the traction force on the drawbar load.**Рис. 4.** Зависимость мощности двигателя от полной массы трактора.**Fig. 4.** Dependence of engine power on the total weight of the tractor.

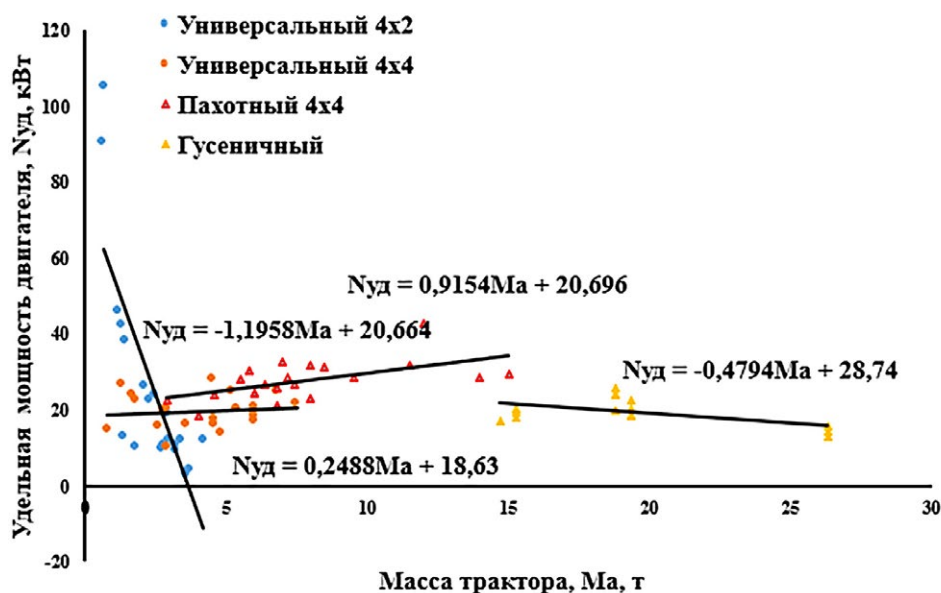


Рис. 5. Зависимость удельной мощности двигателя от полной массы трактора.

Fig. 5. Dependence of specific engine power on total tractor weight.

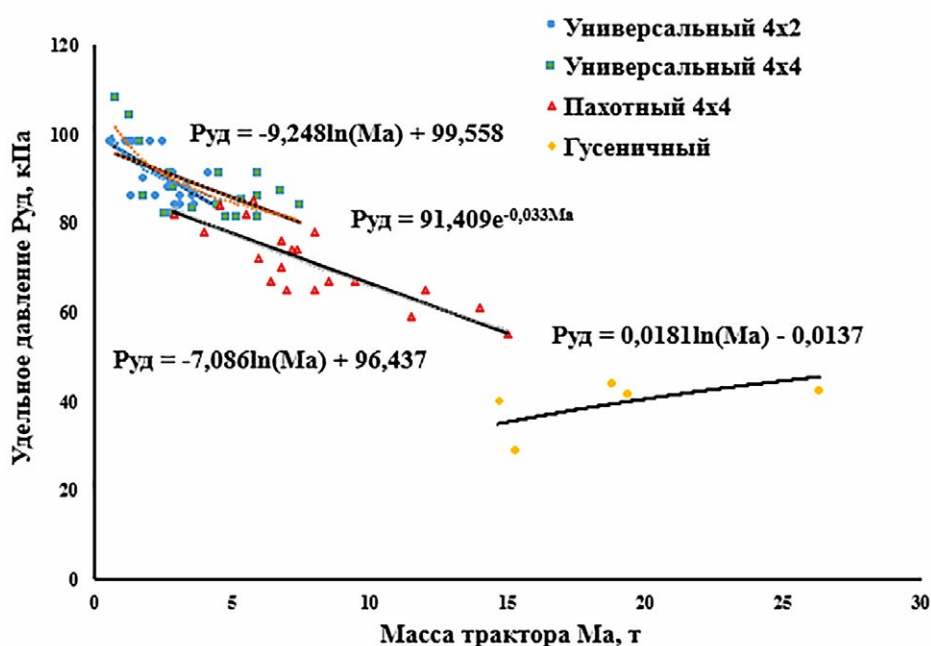


Рис. 6. Зависимость удельного давления на грунт от полной массы трактора.

Fig. 6. Dependence of specific ground pressure on the total tractor weight.

является графическая информация (рис. 3–6), поскольку она дает понятие о характере взаимосвязи.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МОДЕЛИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ

Анализ технических и конструкционных параметров сельскохозяйственных тракторов показывает, то между ними существует некоторая математическая

закономерность, обнаруженная при помощи графических зависимостей. Результаты по каждому графику сообщают следующее:

Между тяговым усилием трактора и его полной массой получены следующие результаты: с увеличением тяги увеличивается масса трактора, кроме класса универсальных тракторов 4x2. Большое количество колёсных тракторов представлено в диапазоне тягового усилия от 20 до 50 кН, а полная масса 7–8 т. У тракторов на ГД наибольшая плотность полной массы от 15 до 20 т, при тяговом диапазоне от 50 до 75 кН.

Взаимосвязь между полной массой и мощностью двигателя отображает схожую тенденцию роста одного параметра вслед за вторым; более детальный анализ показывает, что большая часть тракторов на КД при массе в 7–8 т находятся в мощностном диапазоне до 300 кВт. Для тракторов на ГД при тех же массах мощности составляют от 300 до 400 кВт.

При тех же массах тракторов на КД удельная мощность двигателя в преимуществе находится в пределах до 40 кВт/т, для тракторов на ГД – 20 кВт/т.

Графическая зависимость полной массы трактора от удельного давления на грунт показывает ниспадающую тенденцию: с увеличением массы колёсных тракторов удельное давление на грунт снижается до 60 кПа/т при массе 10 т, а для гусеничных тракторов наоборот наблюдается незначительное увеличение от 38 кПа/т до 42 кПа/т при увеличении массы от 15 т до 27 т.

ОБСУЖДЕНИЕ

В предложенном исследовании построение статистической модели сельскохозяйственных тракторов происходит по номинальным техническим и конструкционным параметрам, которые носят вариативный характер в процессе работы машинно-тракторного агрегата. Так, мы учитывали максимально возможные значения параметров, которых трактор часто не достигает в процессе технологической операции. Так, достижение максимального значения мощности энергоносителя и силы тяги возможно только при обработке залежалых грунтов. Сила тяги на крюке трактора носит переменный характер, поскольку она принимает разные значения ввиду изменчивости массово-габаритных и технических параметров разных типов агрегатов и также может меняться в течение совершения технологической операции, например при посевных работах. В дальнейшем исследовании авторский коллектив данной работы поставил цель построить статистическую модель прицепных сельскохозяйственных агрегатов и машин для определения влияния технико-конструкционных и технологических параметров на формирование силы сопротивления на крюке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистическая модель показывает, что между техническими и конструктивными параметрами сельскохозяйственных транспортно-технологических машин можно выявить аналитические зависимости. Полученные зависимости позволяют подбирать первоначальные параметры АМК таким образом, чтобы ТМ как минимум могла конкурировать с традиционными видами шасси, и, как максимум, могла функционировать круглосуточно во всепогодных условиях. Конечно, данное исследование устанавливает взаимосвязи между параметрами традиционных схем шасси, но при этом представляет концепт для построения такой же модели между специализированными ТМ, коих

встречается в сельскохозяйственном производстве достаточное количество, например, порталные и низкоклиренсные тракторы. Кроме того, использование полученных зависимостей может быть определено как составная часть совокупности научных, методологических и практических основ реверсивного инжиниринга для решения комплексных задач импортозамещения в агропромышленном комплексе Российской Федерации.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.С. Жуков — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, составление статистической модели, написание текста и редактирование статьи; В.С. Макаров — сбор и анализ литературных источников, графическая обработка результатов исследования; В.В. Беляков — курирование исследования, обзор литературы, обзор и анализ литературных источников; А.А. Ключкин — обзор литературы, сбор и анализ научно-технической литературы. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования — Минобрнауки России) по теме: «Разработка научных, методологических и практических основ реверсивного инжиниринга для решения комплексных задач импортозамещения в агропромышленном комплексе Российской Федерации» (шифр научной темы FZNW-2024-0026).

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: S.S. Zhukov: literature review, collection and analysis of literature sources, statistical modeling, writing and editing of the manuscript; V.S. Makarov: collection and analysis of literature sources, graphical processing of the research results; V.V. Belyakov: supervision of the study, literature review, review and analysis of literature sources. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: The paper was prepared as part of the research work, implemented at the expense of the federal budget (funding source: the Ministry of Education and Science of the Russian Federation) on topic "Development of scientific, methodological and practical fundamentals of reverse engineering for solving complex tasks of import replacement in agricultural industry of the Russian Federation" (scientific topic code FZNW-2024-0026).

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. State Standard 27021-86 Agricultural and forestry tractors. Towing classes. Moscow: Ministry of Tractor and Agricultural Engineering of the USSR; 1987. (In Russ.)
2. Zhukov SS, Belyakov VV, Makarov VS. Interaction of the propulsion unit of robotic agricultural machines with the roadbed. *Transport systems*. 2018;3(9):25–33. (In Russ.) doi: 10.46960/62045_2018_3_25 EDN: MBOYEM
3. Beresnev PO, Filatov VI, Eremin AA, et al. Statistical model of choice the geometrical parameters, mass of inertia, capacity and velocity characteristics of track transport technological machines. *Proceedings of NSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2016;1(12):109–164. (In Russ.) EDN: VZDVAJ
4. Belyakov VV, Belyaev AM, Bushueva ME, et al. The concept of mobility of ground transport and technological machines. *Proceedings of NSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2013;3(100):145–175. (In Russ.) EDN: REANDH
5. Özbayer MM, Güner M. Comparison of Performance Characteristics of Agricultural Tractors. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*. 2022;39(1):6–18. doi: 10.55507/gopzfd.1115003
6. Alhassan E, Olaoye J, Lukman A, et al. Statistical modelling of a tractor tractive performance during ploughing operation on a tropical Alfisol. *Open Agriculture*. 2024;9(1). doi: 10.1515/opag-2022-0282 EDN: KCIMJX
7. Kim WS, Kim YJ, Baek SY, et al. Traction performance evaluation of a 78-kW-class agricultural tractor using cone index map in a Korean paddy field. *J. Terramechanics*. 2020;91:285–296. doi: 10.1016/j.jterra.2020.08.005 EDN: DYQIOI
8. Bekker MG. *Theory of Land Locomotion: The Mechanics of Vehicle Mobility*. Michigan: University of Michigan Press; 1956. doi: 10.3998/mpub.9690401
9. Wong JY. *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*. Elsevier; 2010. doi: 10.1016/C2009-0-00403-6 EDN: YEWVEY

ОБ АВТОРАХ

* Жуков Сергей Сергеевич,

старший преподаватель кафедры «Математика и вычислительная техника»;
адрес: Россия, 606340, Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22А;
ORCID: 0000-0002-8090-5461;
eLibrary SPIN: 6476-8929;
e-mail: ser-9.02.94@yandex.ru

Макаров Владимир Сергеевич,

д-р техн. наук;
профессор кафедры «Строительные и дорожные машины»;
старший научный сотрудник Лаборатории реверсивного инжиниринга;
ORCID: 0000-0002-4423-5042;
eLibrary SPIN: 9834-6239;
e-mail: makvl2010@gmail.com

Беляков Владимир Викторович,

д-р техн. наук, профессор,
профессор кафедры «Строительные и дорожные машины»;
ORCID: 0000-0003-0203-9403;
eLibrary SPIN: 3944-4416;
e-mail: belyakov@nntu.ru

Клюшкин Антон Алексеевич,

ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины»;
ORCID: 0009-0009-3141-6029;
eLibrary SPIN: 2266-8679;
e-mail: aak-nntu@ya.ru

AUTHORS' INFO

* Sergey S. Zhukov,

Senior Lecturer of the Mathematics and Computer Engineering Department;
address: 22A Oktyabrskaya st, Knyaginino, Russia, 606340;
ORCID: 0000-0002-8090-5461;
eLibrary SPIN: 6476-8929;
e-mail: ser-9.02.94@yandex.ru

Vladimir S. Makarov,

Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Construction and Road Machines Department;
Senior Researcher Associate of the Reverse Engineering Lab;
ORCID: 0000-0002-4423-5042;
eLibrary SPIN: 9834-6239;
e-mail: makvl2010@gmail.com

Vladimir V. Belyakov,

Dr. Sci. (Engineering), professor,
Professor of the Construction and Road Machines Department;
ORCID: 0000-0003-0203-9403;
eLibrary SPIN: 3944-4416;
e-mail: belyakov@nntu.ru

Anton A. Klushkin,

Assistant lecturer of the Construction and Road Machines Department;
ORCID: 0009-0009-3141-6029;
eLibrary SPIN: 2266-8679;
e-mail: aak-nntu@ya.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author