

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 631.372:631.531

DOI: 10.18324/2077-5415-2026-2-92-98

Методика и результаты лабораторных испытаний массово-геометрических параметров мини-электротрактора

Д.А. Милько^{1a}, В.В. Панина^{1b}, В.С. Попрыдухин^{1c}, А.В. Голаган^{1d}, И.С. Должиков^{2e}, О.А. Куницкая^{3f}

¹ Мелитопольский государственный университет, пр. Б. Хмельницкого, 18, Мелитополь, Россия

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия

³ Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, 3, Якутск, Россия

^a milkodmitry@gmail.com, ^b valeri_arsen@mail.ru, ^c vadim05051988popryaduhin@yandex.ru, ^d alexgolagan@yandex.ru,

^e idolzhikov222@mail.ru, ^f ola.ola07@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0991-1930>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-9623-516X>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5061-9739>, ^d <https://orcid.org/0009-0008-2487-2811>,

^e <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Статья поступила 24.02.2026, принята 28.04.2026

Статья представляет собой детальное описание методологии и результатов комплексных лабораторных испытаний, направленных на установление полного набора массовых, геометрических и эксплуатационно-динамических параметров перспективного образца мини-электротрактора. Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения достоверного экспериментального фундамента для валидации расчётных инженерных моделей, объективной оценки агротехнических свойств, безопасности, тягово-сцепных и энергетических характеристик новой сельскохозяйственной техники, проектируемой для работы в условиях малых и фермерских хозяйств. В работе реализован системный подход, при котором полностью снаряжённый машинный агрегат подвергался серии стандартизированных и авторских испытаний с применением специализированного метрологического оборудования: динамометров ДПУ-02/2, пружинных скоб с индикаторами, гидравлических домкратов и весовых систем. Разработанная методика включала последовательное определение габаритных размеров (2200 × 1150 × 900 мм), дорожного просвета (250 мм), статических нагрузок на переднюю и заднюю оси при конструктивной и эксплуатационной массе, координат центра тяжести (в том числе высоты 259 мм), условного среднего давления колёс на жёсткое основание, радиуса поворота и угла статической устойчивости. Ключевые результаты: расчётный угол статического опрокидывания (62,6 °) существенно превышает нормативный минимум в 40 °, что свидетельствует о запасе устойчивости конструкции. Количественно определены нагрузки на оси и давление на грунт для передних (104 кПа) и задних (118 кПа) ведущих колёс при эксплуатационной массе. Установлен радиус поворота, равный 1,0 м, характеризующий высокую маневренность агрегата. Полученный массив экспериментальных данных обладает значительной практической ценностью для конструкторов, инженеров-испытателей и агроинженеров, формируя объективную основу для последующей оптимизации компоновки, точного прогнозирования удельного давления на почву, оценки проходимости и интеграции в систему точного земледелия.

Ключевые слова: мини-электротрактор; лабораторные испытания; устойчивость; центр масс; давление на грунт; массово-геометрические параметры.

Methodology and results of laboratory tests of mass-geometric parameters of a mini-electric tractor

D.A. Milko^{1a}, V.V. Panina^{1b}, V.S. Popryadukhin^{1c}, A.V. Golagan^{1d}, I.S. Dolzhikov^{2e}, O.A. Kunitskaya^{3f}

¹ Melitopol State University; 18, B. Khmel'nitsky Ave., Melitopol, Russia

² St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

³ Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoye Shosse, Yakutsk, Russia

^a milkodmitry@gmail.com, ^b valeri_arsen@mail.ru, ^c vadim05051988popryaduhin@yandex.ru, ^d alexgolagan@yandex.ru,

^e idolzhikov222@mail.ru, ^f ola.ola07@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0991-1930>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-9623-516X>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5061-9739>, ^d <https://orcid.org/0009-0008-2487-2811>,

^e <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Received 24.02.2026, accepted 28.04.2026

The article provides a detailed description of the methodology and results of comprehensive laboratory tests aimed at establishing the complete set of mass, geometric, and operational-dynamic parameters of a promising mini-electric tractor prototype. The relevance

of the study is driven by the need to obtain a reliable experimental foundation for validating computational engineering models and objectively assessing the agrotechnical properties, safety, traction-adhesion, and energy characteristics of new agricultural machinery designed for small-scale and farm operations. The work implements a systematic approach where the fully equipped machine unit undergoes a series of standardized and proprietary tests using specialized metrological equipment: DPU-02/2 dynamometers, spring braces with indicators, hydraulic jacks, and weighing systems. The developed methodology includes the sequential determination of overall dimensions ($2200 \times 1150 \times 900$ mm), ground clearance (250 mm), static loads on the front and rear axles at both the design and operating weights, coordinates of the center of gravity (including a height of 259 mm), the conditional average ground pressure of the wheels on a rigid surface, the turning radius, and the static stability angle. Key results: the calculated static tipping angle ($62,6^\circ$) significantly exceeds the regulatory minimum of 40° , indicating a structural stability margin. Axle loads and ground pressure for the front (104 kPa) and rear (118 kPa) drive wheels under operational weight are quantitatively determined. The turning radius is established at 1,0 m, indicating high machine maneuverability. The obtained array of experimental data holds significant practical value for designers, test engineers, and agricultural engineers, forming an objective basis for subsequent layout optimization, accurate prediction of specific ground pressure, assessment of traction and flotation, and integration into precision farming systems.

Keywords: mini-electric tractor, laboratory testing, stability, center of gravity, ground pressure, mass-geometric parameters.

Введение. Лабораторные испытания позволяют определить массовые и геометрические параметры мини-электротрактора [1, 2, 3, 4].

Принимая во внимание очевидные преимущества электрических тракторов, их проектирование сталкивается с проблемой отсутствия специализированных методик расчёта массово-геометрических параметров. Существующие подходы [1, 2] базируются на многолетнем опыте эксплуатации машин с ДВС, однако компоновка электротракторов принципиально иная: аккумуляторные батареи, обладающие значительной массой, размещаются, как правило, в нижней части рамы, что снижает центр тяжести, но одновременно изменяет распределение нагрузок по осям в зависимости от степени заряда. Кроме того, в научной литературе недостаточно освещены вопросы влияния типа и расположения тяговых электродвигателей (мотор-колеса либо центральный привод) на устойчивость и опорную проходимость. В связи с этим экспериментальное определение массово-геометрических параметров становится не просто этапом паспортизации, а необходимым условием верификации расчётных моделей на ранних стадиях проектирования.

В последние десятилетия в мировом сельскохозяйственном машиностроении наблюдается устойчивая тенденция к электрификации мобильных энергетических средств [5, 6, 7, 8], предназначенных для условий мелкотоварного и фермерского производства. Применение электротракторов позволяет снизить углеродный след, уменьшить шумовое воздействие и повысить энергоэффективность агротехнологических операций [9, 10, 11]. Однако массовое внедрение такой техники сдерживается отсутствием системных экспериментальных данных по их реальным массово-геометрическим и тягово-динамическим характеристикам. Существующие нормативные документы [1, 2], регламентируют методы испытаний преимущественно для традиционных тракторов с ДВС и не в полной мере учитывают компоновочные особенности электрических аналогов, такие как иное распределение масс (за счёт размещения аккумуляторных батарей), изменённую базу, специфику балластирования и требования к давлению на почву [12, 13, 14, 15]. Кроме того, в научно-технической литературе недостаточно представлены результаты

натурных экспериментов по определению координат центра тяжести, статической устойчивости и опорной проходимости для мини-электротракторов [16, 17, 18]. В связи с этим разработка и апробация специализированной методики лабораторных испытаний, адаптированной под конструктивные особенности электрических машин, является актуальной научно-практической задачей, решение которой создаёт основу для паспортизации новых образцов и их сертификации.

К параметрам мини-электротрактора, определяемым при испытаниях, относятся габаритные размеры, колея, база, дорожный просвет, ёмкость аккумуляторной батареи, конструктивная (сухая) и эксплуатационная (снаряжённая) массы, статическая нагрузка на движители, массы балластного груза и дополнительного оборудования, давление на грунт, координаты центра тяжести и статическая устойчивость машинного агрегата [19, 20].

Линейные размеры (за исключением дорожного просвета), ёмкости аккумуляторной батареи и массы должны определяться по методике, предложенной в ГОСТ [1, 2].

Для измерения дорожного просвета мини-электротрактора, машинный агрегат полностью снаряжается, укомплектовывается балластными грузами и возимым инструментом.

Статическая нагрузка, создаваемая массой машинного агрегата на движитель, измеряется при эксплуатационной массе [2, 21], на основании взвешивания на весах или расчётом на основании взвешивания. При взвешивании транспортного средства, находящегося в агрегате с мини-электротрактором, оно должно быть заправлено технологическими материалами и находиться в транспортном положении.

Статическая нагрузка, создаваемая массой машинного агрегата, определяется двумя способами: при конструктивной и эксплуатационной массах.

Материалы и методы исследования. Испытание при конструктивной массе проводится с применением динамометра ДПУ-02/2 путём подъёма передней (задней) оси мини-электротрактора на 10–15 мм (рис. 1, 2) над уровнем горизонтальной поверхности с помощью стяжного устройства.

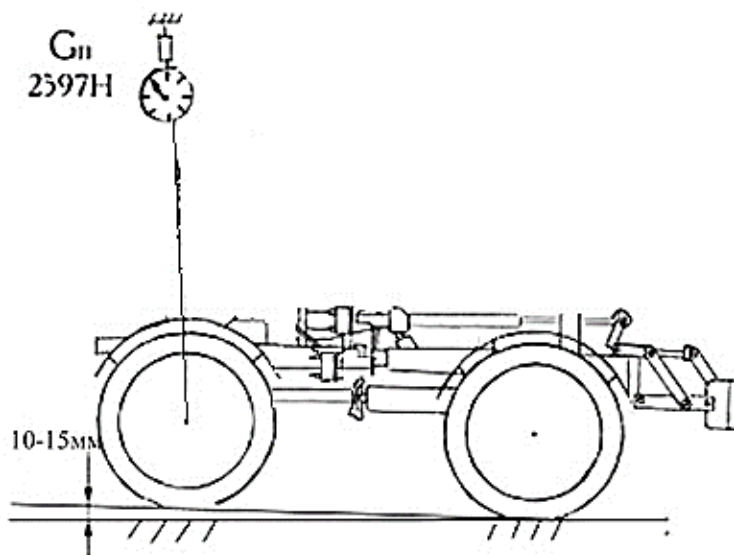


Рис. 1. Определение нагрузки на переднюю ось

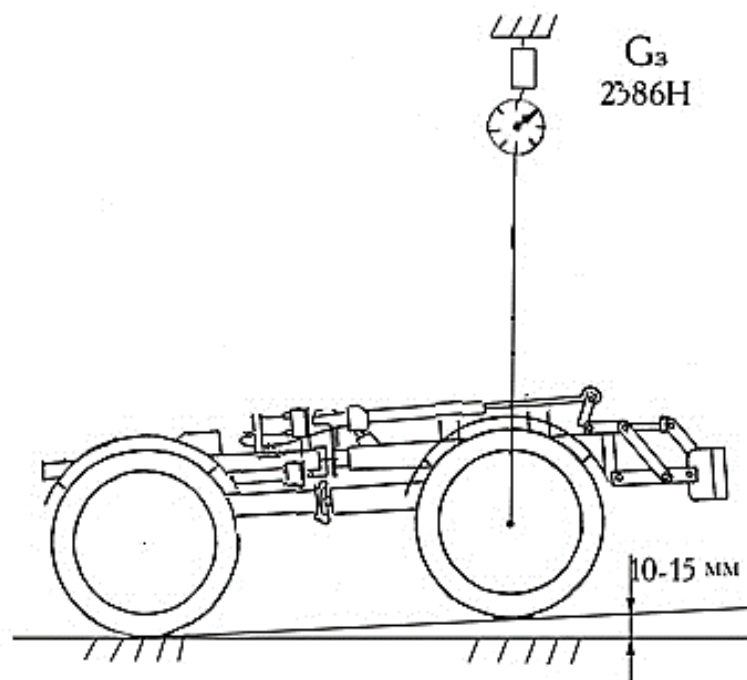


Рис. 2. Определение нагрузки на заднюю ось

Второе испытание проводится с применением пружинной скобы с индикатором типа ДОСМ-3-1 и гидравлического домкрата (рис. 3). Машинный агрегат устанавливается на горизонтальной площадке и с помощью домкрата, оборудованного индикатором, взвешивается одна из его осей, т. е. ось поднимается до тех пор, пока колеса чуть-чуть не оторвутся от поверхности. Чтобы получить более точные значения, подъём оси должен быть незначительным. Аналогично взвешивается и другая ось.

Для определения центра масс мини-электротрактор устанавливается на горизонтальной поверхности, затем передняя ось поднимается на определённый угол и

устанавливается на подставку. При помощи стяжного устройства и динамометра ДПУ-02/2 определяется нагрузка на заднюю ось при её поднятии на 10–15 мм (рис. 4). Исходя из высоты центра масс, определяется предельная устойчивость при боковом опрокидывании графическим способом (рис. 5).

Для установления среднего условного давления одиночного движителя машинного агрегата на жёсткое основание надо определить контурную площадь контакта протектора шины мини-электротрактора. Для этого мини-электротрактор устанавливается на площадке, при этом значение неровностей в пределах контурной площади не более 1 мм.

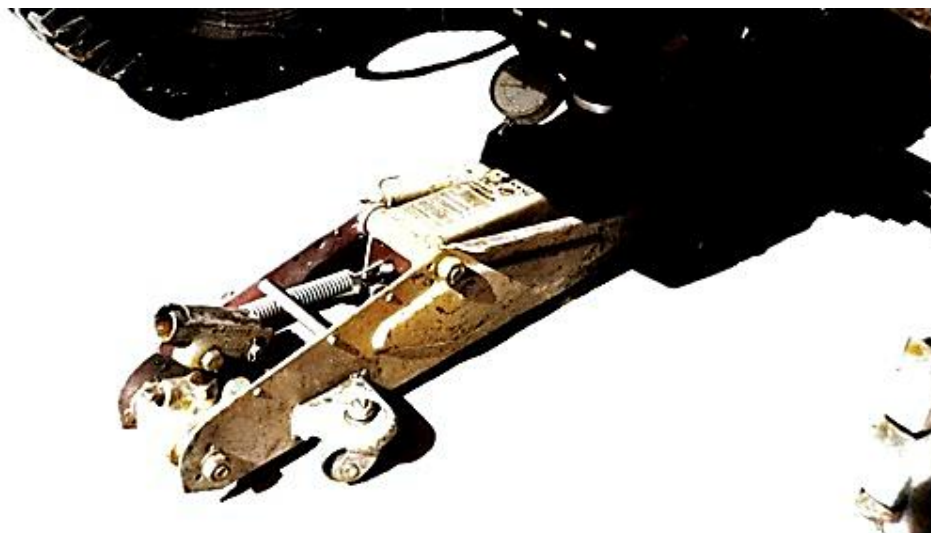


Рис. 3. Испытание с применением пружинной скобы, индикатора типа ДОСМ-3-1 и гидравлического домкрата

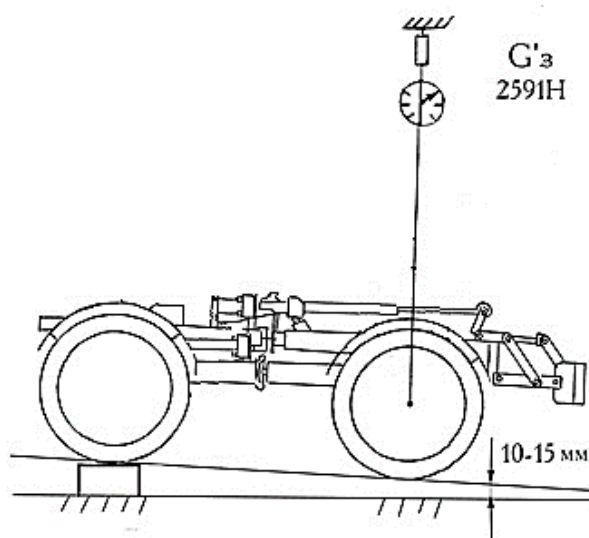


Рис. 4. Нагрузка на заднюю ось при поднятой передней оси на определённый угол и установленной на подставку

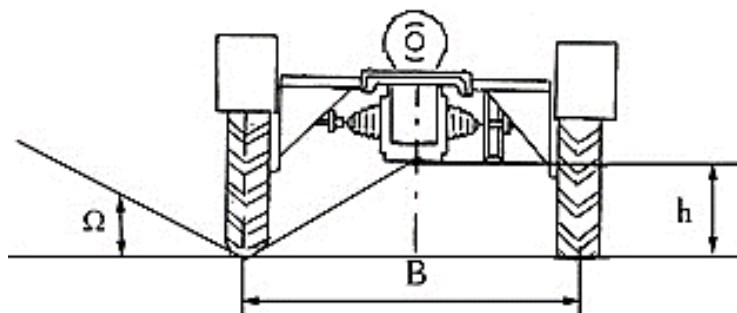


Рис. 5. Определение предельной устойчивости машинного агрегата

Положение колёс соответствует прямолинейному движению машинного агрегата, давление в шинах доводится до 150 кПа. Для определения отпечатка контурной площади ведущего колеса производится многократное его опускание (до полного заполнения отпечатка) домкратом при отсутствии смещения машинного агрегата в горизонтальной плоскости в опущенном положении. При этом после каждого опускания колесо

поворачивают на угол, соответствующий ширине выступа протектора.

Наличие чёткого отпечатка без подтеков обеспечивается нанесением красящего вещества на выступы протекторов. Контурная площадь протектора движителя определяется очерчиванием отпечатка плавной кривой, охватывающей выступы.

Для определения радиуса поворота мини-электротрактора подбирался широкий участок асфальтированного шоссе. На протекторы наносится меловая черта, рама переламывается до крайнего положения, на малой скорости мини-электротрактором описывается круг.

Для определения максимальной скорости мини-электротрактора выбирался ровный, прямой, горизонтальный участок дороги требуемого качества. Замеры производятся при установившемся движении мини-электротрактора в сухую безветренную погоду, на участке дороги определённой длины, снимается время прохождения участка. Заезды совершаются не менее двух раз, это делается, чтобы избежать влияния уклонов на дороге и также влияния встречного ветра.

При проведении испытаний особое внимание уделялось соблюдению условий нагружения, максимально приближённых к реальным. Для этого перед каждым циклом измерений мини-электротрактор выдерживался в статическом положении не менее 30 минут для стабилизации давления в шинах и релаксации напряжений в элементах подвески. Давление в шинах контролировалось цифровым манометром с ценой деления 1 кПа и поддерживалось на уровне 150 ± 2 кПа во всех опытах. При определении контурной площади контакта применялся метод многократного нагружения с промежуточным поворотом колеса, что позволило получить усреднённый отпечаток протектора с учётом его конструктивной неравномерности. Обработка результатов проводилась с применением методов математической ста-

тистики и оценкой доверительных интервалов при вероятности 0,95.

Результаты исследований. После проведения испытаний было установлено, что мини-электротрактор имеет следующие параметры:

Габаритные размеры, мм (с навеской)	
Длина, мм	2200
Ширина, мм	1150
Высота, мм	900
Ёмкость АКБ, А-ч	72
Дорожный просвет, мм	250

Результаты измерений статической нагрузки при конструктивной массе приводятся в табл. 1.

Лабораторные испытания позволяют найти расстояние плоскости, проходящей через центр масс, с помощью формулы:

$$\begin{aligned} l'_n &= \frac{G_n L}{G_m}, \\ l'_3 &= \frac{G_3 L}{G_m}, \end{aligned} \quad (1)$$

где l'_n, l'_3 – соответственно расстояние до вертикальной плоскости от передней и задней осей; G_n, G_3 – сила веса, действующая соответственно на переднюю, заднюю оси; L – расстояние между осями машинного агрегата, $L = 1100$ мм; G_m – сила веса мини-электротрактора, $G_m = 5179$ Н.

Расстояние до вертикальной плоскости от передней оси 552 мм, а от задней – 548 мм.

Таблица 1. Результаты проведения испытаний мини-электротрактора (масса конструктивная)

Измеряемый параметр	Опыт 1	Опыт 2	Среднее
Нагрузка на переднюю ось, Н	2601	2597	2593
Нагрузка на заднюю ось, Н	2570	2586	2601
Масса машинного агрегата, кг	527	528	529
Сила веса машинного агрегата, Н	5170	5179	5189

Высоту центра масс определяют из уравнения:

$$h = \left(\frac{G'_3}{G_m} \cdot L - l'_n \right) \cdot \operatorname{ctg} \tau, \quad (2)$$

где τ – угол наклона машинного агрегата, град; G'_3 – сила веса, действующая на заднюю ось при поднятой передней оси на 15° и установленной на подставку (рис. 4). По расчётам высота центра масс составляет 259 мм.

Определяется предельная устойчивость при боковом опрокидывании графическим способом. Угол опрокидывания вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg} \Omega = \frac{B}{2 \cdot h}, \quad (3)$$

где B – расстояние между колесами (рис. 5). По требованиям угол опрокидывания должен быть не менее 40° , а по расчётам угол опрокидывания мини-электротрактора $62,6^\circ$, значит, он соответствует предъявляемым требованиям.

Лабораторные испытания позволяют определить условное давление одиночного движителя мини-электротрактора на жёсткое основание по формуле:

$$g_{\text{усл.}} = \frac{G_{n(3)}}{1000 \cdot F_{n(3)}}, \quad (4)$$

где $F_{n(3)}$ – суммарная контурная площадь контакта протектора шин передних (задних) колес, м^2 .

Результаты расчёта приведены в табл. 2.

Переломом рамы в крайние положения устанавливаются углы поворота в правую и левую стороны, которые составили 45° в каждую сторону. По следу, оставленному от помеченных протекторов, определяется радиус поворота мини-электротрактора, составляющий 1,0 м.

Полученные экспериментальные данные позволяют не только констатировать численные значения параметров, но и выявить определённые закономерности. Сравнение нагрузок на переднюю и заднюю оси при конструктивной массе (2593 Н и 2601 Н соответственно) показывает, что разница составляет менее 0,5 %, что свидетельствует о тщательно подобранной компоновке базового шасси. При переходе к эксплуатационной массе нагрузка на заднюю ось возрастает до 3305 Н, тогда как передняя нагружается до 2709 Н. Таким образом, коэффициент распределения массы по осям изменяется с 0,50/0,50 до 0,45/0,55, что типично для тракторов классической компоновки и обеспечивает необходимые тягово-сцепные свойства при агрегатировании

с почвообрабатывающими машинами. Высота центра масс (259 мм) составляет всего 28,8 % от колеи (900 мм), что объясняет высокий угол статической устойчивости (62,6°). Для сравнения: у серийных тракторов аналогичного класса этот показатель обычно находится в пределах 45–55°. Полученное значение давления на грунт (104–118 кПа) не превышает агро-технических норм в допустимые 120 кПа для минеральных почв средней плотности, что в свою очередь позволяет рекомендовать данный мини-электротрактор для работы на полях с несущей способностью не ниже 150 кПа.

Обсуждение. Сопоставление полученных результатов с данными других исследователей [7, 11, 15] показывает хорошую схожимость по основным параметрам. Так, в работе Y. Мао и др. [7] для экспериментального электротрактора мощностью 15 кВт высота центра масс

составила 275 мм при колее 950 мм, что сравнимо с нашими данными (259 мм при 900 мм). Давление на грунт, зафиксированное в испытаниях Иванова [15] для лёгких колесных машин, находилось в диапазоне 95–125 кПа, что также коррелирует с полученными нами значениями. Вместе с тем необходимо отметить, что все сравниваемые исследования проводились на жёстком основании, тогда как в реальных полевых условиях давление на почву будет несколько ниже за счёт деформации грунта и увеличения фактической площади контакта. Для уточнения этого эффекта требуются дополнительные натурные испытания на различных типах почв. Перспективным направлением дальнейших исследований является также изучение влияния вибраций, возникающих при работе электротрактора, на точность поддержания заданного курса и устойчивость движения.

Таблица 2. Результаты экспериментов

Измеряемый параметр	Конструктивная масса	Эксплуатационная масса
Среднее давление на почву передних колес, кПа	99	104
Среднее давление на почву задних колес, кПа	99	118
Нагрузка на переднюю ось, Н		2709
Нагрузка на заднюю ось, Н		3305

Выводы. Разработана и апробирована комплексная методика лабораторных испытаний мини-электротрактора, позволяющая с высокой точностью определить его основные массово-геометрические и эксплуатационные параметры: габариты, массу, координаты центра тяжести, нагрузку на оси, давление на грунт и устойчивость.

Экспериментально установлено, что испытуемый образец мини-электротрактора имеет угол статической устойчивости 62,6°, что существенно превышает нормативное требование в 40° и свидетельствует о его высокой безопасности против опрокидывания.

Определены параметры, влияющие на воздействие машины на почву: условное давление на грунт при эксплуатационной массе составляет 104 кПа для передних и 118 кПа для задних колес. Радиус поворота агрегата равен 1,0 м, что подтверждает его высокую маневренность.

Полученные количественные данные (высота центра масс 259 мм, неравномерность распределения нагрузки

по осям) формируют объективную основу для последующих расчётов прочности, тягово-сцепных качеств и для оптимизации конструкции мини-электротрактора.

Следует также учесть, что разработанный образец мини-электротрактора по совокупности массово-геометрических параметров соответствует требованиям, предъявляемым к сельскохозяйственной технике классов 0,9–1,4. Установленные значения угла статической устойчивости и давления на грунт позволяют рекомендовать машину для эксплуатации в условиях миниатюрных полей, фермерских хозяйств и защищённого грунта. Полученный массив экспериментальных данных может быть использован при создании цифровых двойников аналогичных машин, а также при разработке нормативной документации, учитывающей специфику электрических тракторов.

Исследования выполнены в рамках проекта РНФ № 25-26-00080 «Мини-электротрактор».

Литература

- ГОСТ 7057–81. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1981. 18 с. (Заменен на ГОСТ 7057–2001).
- ГОСТ 12.2.002–91. Система стандартов безопасности труда. Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности. – М.: Издательство стандартов, 1991. 61 с.
- Chinnaraj K., Sathya Prasad Mangalaramanan and Lakshmana Rao C. Experimental and Numerical Stress Analysis of Multi Axle Heavy Truck Frame Assembly Proceedings of 4th ICTACEM (2007) p. 281–283.
- Pine T., Lee M.M.K. and Jones T.B. Weight reduction in automobile structures – an experimental study on torsional stiffness of box sections. Proc. Instn Mech. Engrs, Part D: J. Automotive Engineering, 1999, 213(D1), 59–71.
- Lowry J., and Larminie J. Electric Vehicle Technology Explained (Wiley, 2012).
- Husain S.I. Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals (CRC Press, 2011).
- Mao Y., Wu Y., Yan X., Liu M, Xu L. (2022) Simulation and experimental research of electric tractor drive system based on Modelica. PLoS ONE 17(11): e0276231. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276231>.
- Zhang T., Yan G., Wen L., Liao Y. Current situation and development of electric agricultural machinery in China. Journal of Agricultural Mechanization Research. 2012; (4): 236–240.
- A. Lajunen, P. Sainio, L. Laurila, J. Pippuri-Mkelinen, and K. Tammi "Overview of Powertrain Electrification and Future

- Scenarios for Non-Road Mobile Machinery" *Energies*, vol. 11, p. 1184, May 2018.
10. Y. Gao and M. Ehsani "Parametric design of the traction motor and energy storage for series hybrid off-road and military vehicle" *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, pp. 749–755, May 2006.
 11. E.A. Buning "Electric drives in agricultural machinery—approach from the tractor side" *Journal of Agricultural Engineering (New Delhi)*, vol. 47, no. 3, pp. 30–35, 2010.
 12. Tajanowskij G., Tana W. (2012). Analysis of movement kinematics at turn of wheel tractor with semi-trailer with articulated operated draught bar. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57, 190–196.
 13. Kondratiev A. (2019). Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (102)), 6–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184551>.
 14. Wang X., Wang S., Zhang Z. Construction of energy saving and emission reduction technology system for agricultural mechanization. *Chinese Agricultural Mechanization*. 2010; (4): 6–10.
 15. Иванов Н.А. Эффективность легких колесных вездеходов при эксплуатации в лесах // *Технология колёсных и гусеничных машин*. 2015. № 3 (19). С. 13–19.
 16. Григорьева О.И., Давтян А.Б., Гринько О.И., Войнаш С.А. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров // *Машиностроение: новые концепции и технологии : мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (23 окт. 2020 г.)*. Красноярск, 2020. С. 45–49.
 17. Егорин А.А., Петросян С.С., Андронов А.В., Хитров Е.Г., Степанищева М.В. Анализ эксплуатационных характеристик современных харвестеров // *Системы. Методы. Технологии*. 2021. № 4 (52). С. 127–131.
 18. Gerts E.F., Kunitskaya O.A., Runova E.M., Tikhonov E.A., Timokhov R.S., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfiliev P.N. Forest preservation techniques in the Urals // *International Journal of Environmental Studies*. 2023. V. 80, № 4. P. 1055–1064.
 19. Форвардеры на лесозаготовках. Ч. 1: Классификация и особенности конструкции / Л.Д. Бухтояров, В.В. Абрамов, А.А. Просужих, С.Е. Рудов, И.В. Григорьев, О.А. Куницкая // *Леспромформ*. 2020. № 4 (150). С. 64–69.
 20. Morphological Analysis of Forest Tractor Assemblies / M. Šušnjar, D. Horvat, K. Andrija, Z. Pandur // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2008. No 29.
 21. Куницкая О.А., Помигуев А.В. Функциональные возможности и эксплуатационные характеристики средств энергоснабжения лесных терминалов // *Повышение эффективности лесного комплекса: мат-лы Седьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием (25 мая 2021 г.)*. Петрозаводск, 2021. С. 102–103.
 5. Lowry J., and Larminie J. *Electric Vehicle Technology Explained* (Wiley, 2012)
 6. Husain S.I. *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals* (CRC Press, 2011).
 7. Mao Y., Wu Y., Yan X., Liu M., Xu L. (2022) Simulation and experimental research of electric tractor drive system based on Modelica. *PLoS ONE* 17(11): e0276231. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276231>.
 8. Zhang T., Yan G., Wen L., Liao Y. Current situation and development of electric agricultural machinery in China. *Journal of Agricultural Mechanization Research*. 2012; (4): 236–240.
 9. A. Lajunen, P. Sainio, L. Laurila, J. Pippuri-Mkelinen, and K. Tammi "Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery" *Energies*, vol. 11, p. 1184, May 2018.
 10. Y. Gao and M. Ehsani "Parametric design of the traction motor and energy storage for series hybrid off-road and military vehicles" *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, pp. 749–755, May 2006.
 11. E.A. Buning "Electric drives in agricultural machinery—approach from the tractor side" *Journal of Agricultural Engineering (New Delhi)*, vol. 47, no. 3, pp. 30–35, 2010.
 12. Tajanowskij G., Tana W. (2012). Analysis of movement kinematics at turn of wheel tractor with semi-trailer with articulated operated draught bar. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57, 190–196.
 13. Kondratiev A. (2019). Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (102)), 6–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184551>.
 14. Wang X., Wang S., Zhang Z. Construction of energy saving and emission reduction technology system for agricultural mechanization. *Chinese Agricultural Mechanization*. 2010; (4): 6–10.
 15. Ivanov N.A. Efficiency of light wheeled all-terrain vehicles during operation in forests // *Technology of wheeled and tracked machines*. 2015. № 3 (19). P. 13–19.
 16. Grigorieva O.I., Davtyan A.B., Grinko O.I., Voynash S.A. Concept of a universal machine for forestry work and extinguishing forest fires // *Mechanical engineering: new concepts and technologies: materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists (October 23, 2020)*. Krasnoyarsk, 2020. pp. 45–49.
 17. Egorin A.A., Petrosyan S.S., Andronov A.V., Hitrov E.G., Stepanishcheva M.V. Analysis of operational characteristics of modern harvesters // *Systems. Methods. Technologies*. 2021. № 4 (52). P. 127–131.
 18. Gerts E.F., Kunitskaya O.A., Runova E.M., Tikhonov E.A., Timokhov R.S., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfiliev P.N. Forest preservation techniques in the Urals // *International Journal of Environmental Studies*. 2023. V. 80, № 4. P. 1055–1064.
 19. Forwarders in logging. Part 1: Classification and design features / Bukhtoyarov L.D., Abramov V.V., Prosuzhikh A.A., Rudov S.E., Grigoriev I.V. Kunitskaya O.A. // *Lesprominform*. 2020, no 4 (150), pp. 64–69. (In Russ.).
 20. Morphological Analysis of Forest Tractor Assemblies / M. Šušnjar, D. Horvat, K. Andrija, Z. Pandur // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2008. No 29.
 21. Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V. Functional capabilities and operational characteristics of power supply facilities for timber terminals // *Improving the efficiency of the forestry complex: Proc. of the Seventh All-Russian National Scientific and Practical Conf. with international participation (May 25, 2021)*. Petrozavodsk, 2021. Pp. 102–103.

References

1. GOST 7057–81. Agricultural tractors. Test methods. Moscow: Publishing House of Standards, 1981. 18 p. (In Russ.)
2. GOST 12.2.002–91. System of occupational safety standards. Agricultural machinery. Safety evaluation methods. Moscow: Publishing House of Standards, 1991. 61 p. (In Russ.)
3. Chinnaraj K., Sathya Prasad Mangalaramanan and Lakshmana Rao C. Experimental and Numerical Stress Analysis of Multi Axle Heavy Truck Frame Assembly Proceedings of 4th ICTACEM (2007) p. 281–283
4. Pine T., Lee M.M. K. and Jones T.B. Weight reduction in automobile structures – an experimental study on torsional stiffness of box sections. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part D: J. Automotive Engineering*, 1999, 213(D1), 59–71.