

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-838

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-15-24>

## Лабораторные исследования МЭС сельскохозяйственного назначения с автономным электроприводом тягового класса 0,6

*З.А. Годжаев<sup>1</sup>, С.Е. Сенькевич<sup>2✉</sup>, Н.А. Майстренко<sup>3</sup>, А.Г. Левшин<sup>4</sup>, И.С. Алексеев<sup>5</sup>,  
Е.Н. Ильченко<sup>6</sup>, С.Ю. Уютов<sup>7</sup>*

<sup>1, 2, 5, 6, 7</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

<sup>3, 4</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

<sup>1</sup> fic51@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>

<sup>2</sup> umo.viesh@list.ru<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0001-6354-7220>

<sup>3</sup> nmaystrenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1268-713X>

<sup>4</sup> alevshin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>

<sup>5</sup> dreeddog@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-5169-895X>

<sup>6</sup> kat-sama@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-3901-5706>

<sup>7</sup> s\_uyutov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9394-5916>

**Аннотация.** Создание мобильных энергетических средств с применением автоматизированного управления электропривода дает возможность увеличить производительность транспортных и механизированных работ в сельскохозяйственном производстве, повысить функциональные и эксплуатационные характеристики этих машин и уменьшить их негативное влияние на окружающую среду. Цель работы – провести экспериментальные лабораторные исследования мобильного энергетического средства (МЭС) с электродвигателем на базе колесного трактора тягового класса 0,6. Испытания трактора в почвенном канале и на бетонном основании проводили в соответствии с ГОСТ 25836-83. Рассмотрели равновесие трактора в поперечной в продольной плоскостях и относительно задней ведущей оси. Определили тяговые показатели машины и оценили тягово-сцепные и энергетические свойства трактора при прямолинейном поступательном движении. Эксплуатационная масса МЭС составила 1469,5 кг. Анализ полученных значений вертикальной и горизонтальной координат центра тяжести трактора показал повышение статической и динамической устойчивости трактора в результате изменений компоновочных решений агрегатных составляющих трактора. Характер изменения вертикальной и горизонтальной координаты направлен на повышение продольной и поперечной устойчивости МЭС. Опытный образец МЭС с электроприводом подтвердил свой тяговый класс 0,6: на твердой поверхности (бетонный трек) тяговое усилие на крюке фиксировали 8,0...9,0 кН, на слабонесущем грунте (почвенный канал) тяговое усилие составило 4,0...6,0 кН. Результаты исследований в дальнейшем позволят применять электроприводы на МЭС тягового класса 0,6.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования; испытания трактора; электродвигатель; трактор; исследования мобильного энергетического средства; равновесие трактора; тяговое усилие

**Для цитирования:** Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Майстренко Н.А., Левшин А.Г., Алексеев И.С., Ильченко Е.Н., Уютов С.Ю. Лабораторные исследования МЭС сельскохозяйственного назначения с автономным электроприводом тягового класса 0,6 // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 4. С. 15-24. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-15-24>

## ORIGINAL ARTICLE

**Laboratory studies of agricultural mobile power vehicles with an autonomous electric drive of traction class 0.6****Z.A. Godzhaev<sup>1</sup>, S.E. Senkevich<sup>2</sup>✉, N.A. Maistrenko<sup>3</sup>, A.G. Levshin<sup>4</sup>, I.S. Alekseev<sup>5</sup>, E.N. Ilchenko<sup>6</sup>, S.Yu. Uytov<sup>7</sup>**<sup>1,2,5,6,7</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia<sup>3,4</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Moscow, Russia<sup>1</sup> fic51@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730><sup>2</sup> umo.viesh@list.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-6354-7220><sup>3</sup> nmaystrenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1268-713X><sup>4</sup> alevshin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448><sup>5</sup> dreeddog@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-5169-895X><sup>6</sup> kat-sama@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-3901-5706><sup>7</sup> s\_uytov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9394-5916>

**Abstract.** Designing mobile power vehicles using the automated control of an electric drive makes it possible to increase the productivity of transport and mechanized operations in agricultural production, improve the functional and operational characteristics of these machines and reduce their negative impact on the environment. The study purpose is to conduct experimental laboratory studies of a mobile power vehicle (MPV) with an electric motor based on a wheeled tractor of traction class 0.6. The authors carried out tractor tests in a soil channel and on a concrete foundation in accordance with GOST 25836-83. They analyzed the tractor balance in the transverse and longitudinal planes and relative to the rear drive axle. As a result, they determined the traction indicators, as well as the traction and energy properties of the tractor during its rectilinear translational motion. The operating weight of the MPV was 1469.5 kg. The analysis of the obtained values of the vertical and horizontal coordinates of the center of gravity of the tractor showed an increase in its static and dynamic stability due to the modified layout solutions of its components. The changes in vertical and horizontal coordinates tend to increase the longitudinal and transverse stability of MPVs. The prototype MPV with an electric drive confirmed its traction class of 0.6: on a hard surface (concrete track), the hitch bar traction force was recorded at 8.0 to 9.0 kN; for weak soil (soil channel), the traction force amounted to 4.0 to 6.0 kN. The results of the studies will further introduce the use of electric drives on MPVs of traction class 0.6.

**Keywords:** experimental research; autonomous electric drive; electric motor; mobile power equipment; traction tests; agricultural tractor

**For citation:** Godzhaev Z.A., Senkevich S.E., Maistrenko N.A., Levshin A.G., Alekseev I.S., Ilchenko E.N., Uytov S.Yu. Laboratory studies of agricultural mobile power vehicles with an autonomous electric drive of traction class 0.6. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(4):15-24 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-15-24>

**Введение**

Совершенствование методов и средств определения основных показателей, характеризующих потребительские свойства машинно-тракторных агрегатов (МТА), является одним из важнейших направлений повышения эффективности сельскохозяйственного производства. Режим работы МТА создается сочетанием энергетических характеристик ее частей (двигателя, трактора и сельскохозяйственной машины). Вопросы эффективной эксплуатации МТА можно решить только при рассмотрении совокупности взаимодействия ее основных частей [1].

Создание мобильных сельскохозяйственных машин различного функционального назначения [2] с применением автоматизированного электропривода (ЭП) дает возможность увеличить

производительность МТА в сельскохозяйственном производстве [3], а также повысить функциональные и эксплуатационные характеристики этих агрегатов [4-10].

Высокие цены на энергоресурсы побуждают совершенствовать трактора с ДВС [11] и использовать стационарные и мобильные энергетические средства, работающие на электроприводе [12]. Несмотря на их высокую стоимость, применение ЭП в сельхозмашинах открывает новый уровень автоматизации процессов управления тракторной техникой и самоходными сельскохозяйственными машинами, улучшает экологию и условия труда в агропромышленном комплексе [6, 7]. Применение ЭП в трансмиссии может снизить себестоимость сельскохозяйственной продукции и вредное воздействие на окружающую среду [8].

Незначительное изменение конструкции машин приводит к модификации их эксплуатационных показателей. Основным эксплуатационным параметром трактора считается тяговая характеристика, которая определяется тяговыми испытаниями [1]. Но есть и альтернативные варианты: например, мгновенно увеличивая подачу топлива до максимальной, при свободном разгоне трактора можно измерить значение угловых скоростей коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса на заданной передаче и соответствующем почвенном фоне с нагрузкой и без нее [3]. Однако этот метод приемлем только для тракторов с двигателями внутреннего сгорания.

Можем предположить, что улучшение будет наблюдаться после применения электропривода, так как это снизит энергопотребление и повысит КПД [12].

**Цель исследований:** провести экспериментальные лабораторные исследования мобильного энергетического средства (МЭС) с электроприводом на базе трактора тягового класса 0,6.

### Материалы и методы

Объектом исследований стал трактор тягового класса 0,6 (самоходное шасси с электродвигателем на базе трактора Т-16). В рамках исследований на трактор Т-16 вместо классического дизельного двигателя внутреннего сгорания установили асинхронный электродвигатель мощностью 11 кВт (частота вращения ротора асинхронного электродвигателя – от 0 до 1450 мин<sup>-1</sup>). Первичным источником энергии служит блок из 40 аккумуляторных батарей емкостью по 20 Ач, общей массой 160 кг. Максимальное напряжение – до 540 В. Вал электромотора напрямую соединен с первичным валом коробки переключения передач. Электродвигатель через векторный преобразователь частоты подключен к блоку аккумуляторных батарей.

Испытания трактора в почвенном канале и на бетонном основании проводили в соответствии с ГОСТ 25836-83 «Тракторы. Виды и программы испытаний». Определяли тяговые показатели машины и оценивали тягово-сцепные и энергетические свойства трактора при прямолинейном поступательном движении с целью оценки эксплуатационной надежности трактора и его элементов и разработки рекомендаций по его совершенствованию.

Экспериментальные данные для верификации коэффициентов математической модели, подтверждения ее адекватности, определения эффективности внедрения электрического привода в силовую передачу мобильного энергетического средства тягового класса 0,6 получили с помощью

разработанной программы-методики лабораторно-экспериментальных исследований макетного образца трактора.

Программа испытаний энергетического средства с электроприводом на базе самоходного шасси Т-16 тягового класса 0,6 включает в себя техническую экспертизу (ГОСТ Р 54784-2011) и энергетическую оценку (ГОСТ 30745-2001) с определением тягового усилия, скорости, мощности, буксования движителей (колес), удельного расхода энергии, снятия характеристик с узлов объекта испытаний.

Исследования проводили в разрезе некоторых характеристик МЭС.

Перед проведением испытаний экспериментально определили координаты центра тяжести макетного образца. Для этого установили специальные датчики давления, показывающие силу реакций опоры на каждом колесе трактора.

Суммарные реакции на колесах трактора определили по зависимостям:

$$\text{а) на передних колесах } Y_{\text{п}} = Y_{\text{пл}} + Y_{\text{шпр}};$$

$$\text{б) на задних колесах } Y_{\text{з}} = Y_{\text{зл}} + Y_{\text{зпр}};$$

$$\text{в) общий вес трактора } G_{\text{а}} = Y_{\text{п}} + Y_{\text{з}},$$

где  $Y_{\text{пл}}$ ,  $Y_{\text{шпр}}$  – соответственно реакции на переднем левом и переднем правом колесах;  $Y_{\text{зл}}$ ,  $Y_{\text{зпр}}$  – соответственно реакции на заднем левом и заднем правом колесах, Н.

Значения, полученные при измерении параметров реакции соответствующего датчика давления, представлены в таблице 1.

Суммарные силы на заднюю и переднюю оси трактора равны, соответственно,  $Y_{\text{з}} = 7508,317$  Н,  $Y_{\text{п}} = 6908,081$  Н, а общий вес при этом составил  $G_{\text{а}} = 14416,398$  Н.

Схемы сил для расчета продольной координаты центра тяжести и поперечной координаты приведены на рисунке 1.

Таблица 1

Значения реакций колес, полученные при измерении

Table 1

Wheel reaction values obtained during measurement

№ датчика <i>Sensor No.</i>	Реакции колес <i>Wheel reactions</i>	Значения, Н <i>Values, N</i>
1	$Y_{\text{пл}}$	3929,024
2	$Y_{\text{шпр}}$	2979,057
3	$Y_{\text{зпр}}$	4176,760
4	$Y_{\text{зл}}$	3331,557

Условие равновесия трактора в продольной плоскости относительно задней оси:

$$\sum M_B = 0$$

$$Y_{II} \cdot L - G_m \cdot a = 0.$$

Откуда

$$a = \frac{Y_{II} L}{G_m}. \tag{1}$$

Рассматривая условие равновесия трактора относительно передней оси, получаем:

$$b = \frac{Y_3 L}{G_m}, \tag{2}$$

где  $L_0 = 2,485$  м.

Таким образом,  $a = 1,191$  м,  $b = 1,294$  м.

Значения параметров трактора представлены в таблице 2.

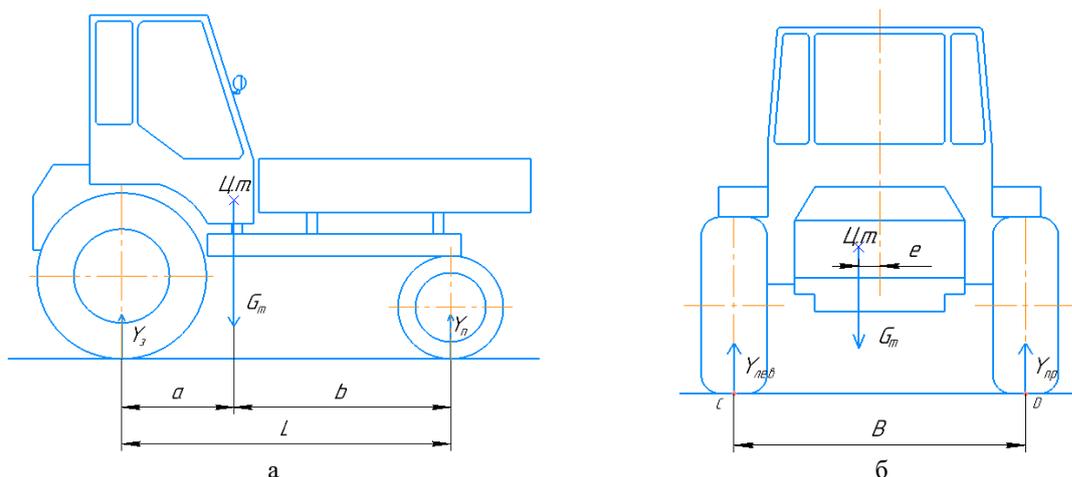


Рис. 1. Схемы сил для расчета продольной координаты центра тяжести (а) и поперечной координаты (б):

- $L$  – колесная база;  $a$  – расстояние от оси заднего колеса до центра тяжести трактора;
- $b$  – расстояние от оси переднего колеса до центра тяжести трактора;
- $Y_3$  – суммарная реакция на заднем мосту от колес трактора;
- $Y_{II}$  – суммарная реакция на переднем мосту от колес трактора;  $G_m$  – общий вес трактора;
- $B$  – колея трактора;  $e$  – смещение центра тяжести от центральной оси трактора;
- $Y_{лев}$  – реакции по левому борту;  $Y_{прав}$  – реакции на по правому борту

Fig. 1. Force diagram for calculating the longitudinal coordinate of the center of gravity and force diagram to calculate the transverse coordinate

- $L$  – wheelbase;  $a$  – distance from the rear wheel axis to the tractor’s center of gravity;
- $b$  – distance from the front wheel axis to the tractor’s center of gravity;
- $Y_3$  – total reaction on the rear axle from the tractor’s wheels;  $Y_{II}$  – total reaction on the front axle from the tractor’s wheels;
- $G_m$  – total weight of the tractor;  $B$  – tractor’s track;  $e$  – displacement of the center of gravity from the central axis of the tractor;
- $Y_{лев}$  – reactions on the left side;  $Y_{прав}$  – reactions on the right side

Таблица 2

Измеряемые величины по протоколу испытаний

Table 2

Measured values according to test records

Измеряемые величины / Measured values	Значение / Value
Колесная база, $L$ , мм / Wheelbase, $L$ , mm	2485
Колея трактора, $B$ , мм / Tractor’s track, $B$ , mm	1275
Радиус заднего колеса, $r_3$ , мм / Rear wheel radius, $r_3$ , mm	585
Угол поднятия трактора относительно горизонта $\alpha$ , град. / Tractor lifting angle relative to the horizon $\alpha$ , deg	7,274
Реакция на переднем левом колесе, $Y_{IIл}$ , Н / Reaction on the front left wheel, $Y_{IIл}$ , N	3929,02
Реакция на переднем правом колесе, $Y_{IIп}$ , Н / Reaction on the front right wheel, $Y_{IIп}$ , N	2979,06
Реакция на заднем левом колесе, $Y_{3л}$ , Н / Reaction on the rear left wheel, $Y_{3л}$ , N	3331,56
Реакция на заднем правом колесе, $Y_{3п}$ , Н / Reaction on the rear right wheel, $Y_{3п}$ , N	4176,76
Усилие на переднюю ось при поднятии трактора на угол $\alpha$ к горизонту, $Y'_{II}$ , Н Force on the front axle when lifting the tractor at an angle $\alpha$ to the horizon, $Y'_{II}$ , N	5200

Для определения поперечной координаты центра тяжести рассмотрим равновесие трактора в поперечной плоскости (рис. 1).

Условие равновесия трактора:

$$\sum M_0 = 0$$

$$Y_{np} \cdot B - G_m (0,5B - e) = 0.$$

Откуда

$$e = \frac{B}{G_m} (0,5G_m - Y_{np}), \quad (3)$$

где  $B = 1,275$  м;  $Y_{np}$  – суммарная сила, действующая на правый борт трактора, Н.

Получаем  $e = 0,004$  м.

Для определения вертикальной координаты центра тяжести одну из осей (обычно переднюю) поднимают на высоту  $H_1$  с помощью подъемного устройства ( $H_1 = 0,925$  м) в соответствии с данными рисунка 2.

Рассматривая равновесие трактора относительно задней ведущей оси, колеса которой остаются внизу при подъеме передней оси, получим:

$$Y'_n \cdot L' - G_m \cdot \cos \alpha \cdot a + G_m \cdot \sin \alpha \cdot h = 0. \quad (4)$$

Из этого выражения определим значение  $h$ :

$$h = a \cdot \operatorname{ctg} \alpha - \frac{Y'_n \cdot L'}{G_m \sin \alpha}, \quad (5)$$

где  $Y'_n$  – усилие, прикладываемое к оси передних колес при поднятии трактора с поворотом на угол  $\alpha$  к горизонту;  $L'$  – проекция продольной базы на опорную поверхность, измеряемая по отвесам.

Вертикальная координата определяется выражением:

$$H = h + r_3. \quad (6)$$

Для определения вертикальной координаты центра тяжести или центра тяжести в таблице 3 приведены значения необходимых величин.

После подстановки числовых значений в уравнения (5) и (6) получили вертикальную координату центра тяжести трактора  $H = 0,302$  м (табл. 4).

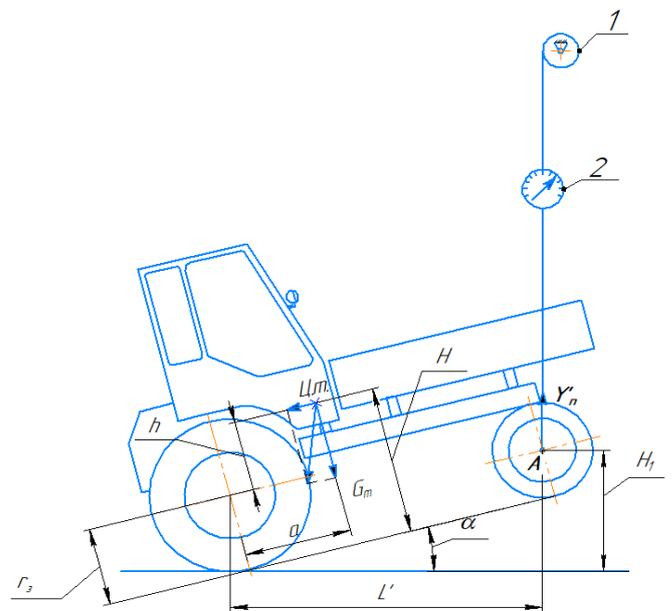


Рис. 2. Расчетная схема

для определения вертикальной координаты:

- 1 – подъемник; 2 – динамометр;
- $H$  – высота от центра тяжести трактора до оси, проходящей через пятно контакта переднего и заднего колес;
- $H_1$  – высота, на которую поднята передняя ось трактора;
- $Y'_n$  – усилие, прикладываемое к оси передних колес при поднятии трактора с поворотом на угол  $\alpha$ ;
- $h$  – расстояние от центра тяжести до центра ведущей оси;
- $G_m$  – общий вес трактора;
- $L'$  – проекция продольной базы на опорную поверхность;
- $\alpha$  – угол к горизонту, на который поднят трактор;
- $r_3$  – радиус заднего колеса

Fig. 2. Calculation diagram for determining the vertical coordinate:

- 1 – hoist, 2 – dynamometer;
- $H$  – height from the tractor’s center of gravity to the axle passing through the contact patch of the front and rear wheels;
- $H_1$  – height to which the front axle of the tractor is raised;
- $Y'_n$  – force applied to the axle of the front wheels when lifting the tractor with a turn at an angle  $\alpha$ ;
- $h$  – distance from the center of gravity to the center of the drive axle;  $G_m$  – total weight of the tractor;
- $L'$  – projection of the longitudinal base onto the supporting surface;
- $\alpha$  – angle to the horizon to which the tractor is raised;
- $r_3$  – radius of the rear wheel

Таблица 3

Измеряемые величины по протоколу испытаний для определения вертикальной координаты центра тяжести

Table 3

Measured values according to the test records for determining the vertical coordinate of the center of gravity

Измеряемые величины / Measured values	Значение / Value
Усилие на переднюю ось при поднятии трактора на угол $\alpha$ ; $Y'_n$ , Н <i>Force on the front axle when lifting the tractor by an angle <math>\alpha</math>; <math>Y'_n</math>, N</i>	5200
Проекция продольной базы на опорную поверхность, $L'$ , м <i>Projection of the longitudinal base on the supporting surface, <math>L'</math>, m</i>	2,465
Высота поднятия передней оси трактора, $H_1$ , м / Height of lifting the front axle of the tractor, $H_1$ , m	0,925
Угол поднятия трактора относительно горизонта, $\alpha$ , град. / Angle of lifting the tractor relative to the horizon, $\alpha$ , deg.	7,274

Таблица 4

Вычисляемые величины

Table 4

Calculated values

Величина / Measured values	Значение / Value
Расстояние от оси заднего колеса до центра тяжести трактора, $a$ , мм <i>Distance from the rear wheel axis to the tractor's center of gravity, <math>a</math>, mm</i>	1191,0
Расстояние от оси переднего колеса до центра тяжести трактора, $b$ , мм <i>Distance from the front wheel axis to the tractor's center of gravity, <math>b</math>, mm</i>	1294,0
Смещение центра тяжести от центральной оси трактора, $e$ , мм <i>Displacement of the center of gravity from the central axis of the tractor, <math>e</math>, mm</i>	4,0
Расстояние от ЦМ до центра ведущей оси, $h$ , мм / <i>Distance from the center of mass to the center of the drive axle, <math>h</math>, mm</i>	-283,0
Вертикальная координата центра тяжести трактора, $H$ , мм <i>Vertical coordinate of the tractor's center of gravity, <math>H</math>, mm</i>	302,0

Вертикальная и горизонтальная координаты центра тяжести трактора показали, что в результате установки электропривода произошло его смещение и, как следствие, повысилась устойчивость МЭС.

Тяговые испытания проводили в лабораторных условиях на двух фонах: почва в почвенном канале и бетонное основание.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования макетного образца МЭС на базе трактора Т-16 тягового

класса 0,6 провели при вероятностном характере внешних воздействий.

Смещение центра тяжести к позиции позволило повысить устойчивость всего трактора. Эксплуатационная масса МЭС после внесения изменений в конструкцию составила 1469,5 кг.

В результате лабораторных испытаний в почвенном канале и на бетонном основании получили экспериментальные осциллограммы тяговой нагрузки и фазных токов (рис. 3, 4).

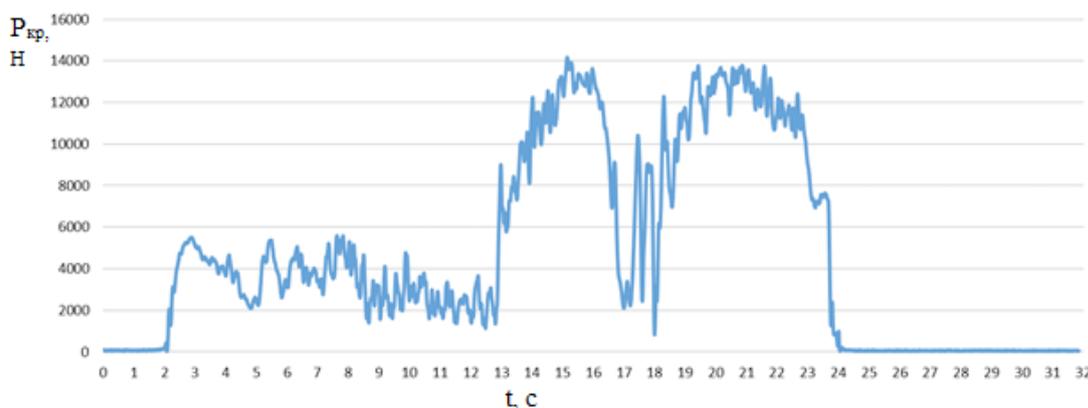


Рис. 3. Осциллограмма тяговой нагрузки при испытаниях на бетонном основании

Fig. 3. Oscillogram of traction load during tests on a concrete base

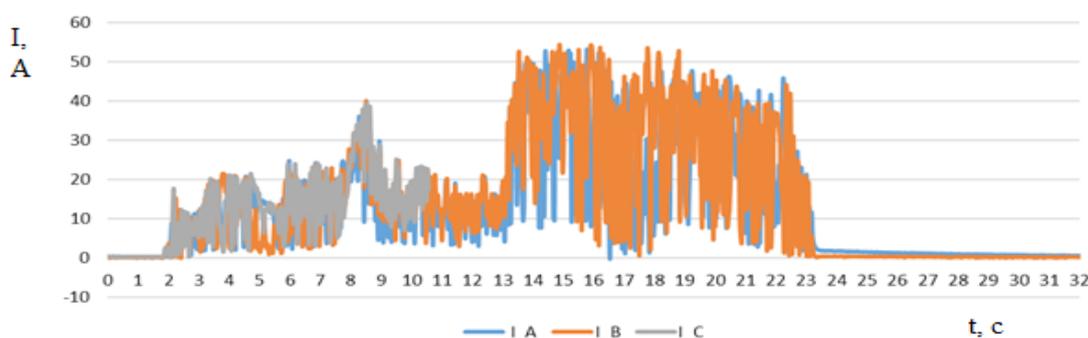


Рис. 4. Осциллограмма фазных токов при испытаниях на бетонном основании

Fig. 4. Oscillogram of phase currents during tests on a concrete base

Пиковые значения усилия на крюке МЭС, фиксированные датчиками, достигали величин свыше 10 кН, средние показатели не превышали 9 кН.

На бетонном покрытии, ввиду лучшего сцепления с опорной поверхностью, МЭС с электроприводом может преодолеть большее тяговое сопротивление (на 37%), чем на почве.

По осциллограммам провели анализ вероятностных характеристик измеренных параметров. Осциллограмму разбили на участки с установившимся режимом движения под нагрузкой. Ввиду добавления нагрузки в процессе опыта на бетонном основании таких участков два: первый – 19,56–30,56 с; второй – 30,56–41,56 с. В почвенном канале такой участок один: 7,5–9,0 с.

Параметры вероятностных характеристик фазных токов ( $I_A, I_B, I_C$ ) и фазных напряжений ( $V_A, V_B, V_C$ ) при испытаниях на бетонном основании и в почвенном канале приведены в таблице 5.

Гистограммы вероятностных характеристик фазных токов и фазных напряжений при испытаниях

в почвенном канале, построенные по данным таблицы 5, представлены на рисунке 5.

Параметры вероятностных характеристик тягового сопротивления при испытаниях на бетонном основании и в почвенном канале приведены в таблице 6.

Параметры вероятностных характеристик тягового сопротивления при испытаниях на бетонном основании и в почвенном канале, построенные по данным таблицы 6, представлены на рисунке 6.

Нормированная взаимная корреляционная функция (ВКФ) силы тягового сопротивления на крюке ( $R_{кр}$ ) и силы тока фазы А при испытаниях на бетонном основании показана на рисунке 7.

Получили высокую переменную взаимную корреляцию между силой тока фазы А и силой тягового сопротивления на крюке ( $R_{кр}$ ). При испытаниях во время разгона и торможения она положительна и отрицательна в процессе установившегося движения.

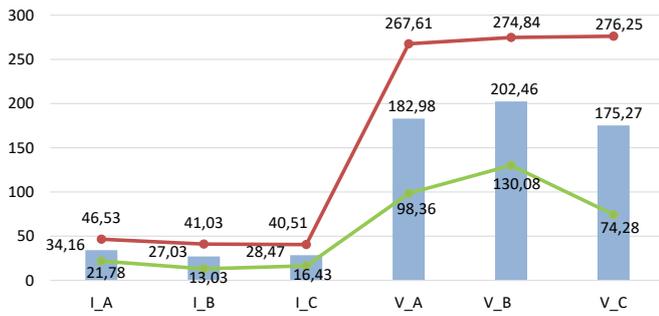
Таблица 5

Параметры вероятностных характеристик фазных токов и фазных напряжений при испытаниях на бетонном основании и в почвенном канале

Table 5

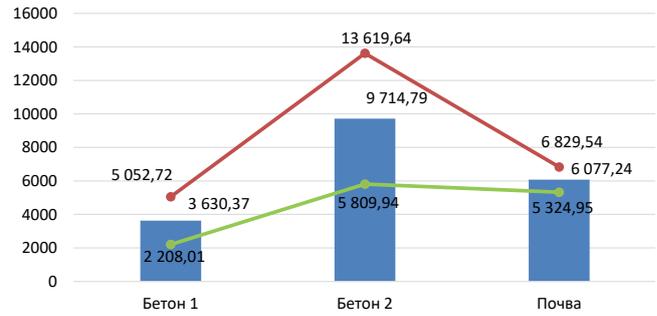
Parameters of probabilistic characteristics of phase currents and phase voltages during tests on a concrete base and in a soil channel

Параметр <i>Parameter</i>	Математическое ожидание <i>Mathematical expectation</i>	Дисперсия <i>Variance</i>	Среднее квадратическое отклонение <i>Standard square deviation</i>	Коэффициент вариации <i>Variation coefficient</i>
<b>На бетонном основании / On a concrete base</b>				
<b>Участок 1 / Site 1</b>				
$I_A$	12,98	51,05	7,15	0,550
$I_B$	12,94	57,37	7,58	0,585
$I_C$	14,41	53,62	7,32	0,508
$V_A$	226,74	6104,30	78,13	0,345
$V_B$	238,08	8562,72	92,54	0,389
$V_C$	183,99	6314,72	79,47	0,432
<b>Участок 2 / Site 2</b>				
$I_A$	26,04	238,82	15,45	0,593
$I_B$	27,90	266,01	16,31	0,5846
$I_C$	24,24	225,99	15,03	0,620
$V_A$	192,32	7327,32	85,56	0,445
$V_B$	210,21	9840,51	99,20	0,472
$V_C$	165,18	6244,41	79,02	0,478
<b>В почвенном канале / In a soil channel</b>				
$I_A$	34,16	153,12	12,37	0,362
$I_B$	27,03	195,99	13,99	0,518
$I_C$	28,47	144,98	12,04	0,423
$V_A$	182,99	7161,45	84,63	0,462
$V_B$	202,46	5238,52	72,38	0,357
$V_C$	175,27	10197,37	100,98	0,576



**Рис. 5. Гистограмма математических ожиданий фазных токов (I, А) и фазных напряжений (V, В) при испытаниях в почвенном канале и границы среднего квадратического отклонения математического ожидания (— нижняя; — верхняя)**

**Fig. 5. Histogram of phase currents (I, A) and phase voltages (V, V) during tests in a soil channel and the boundaries of the average square deviation of the mathematical expectation (— lower; — upper)**



**Рис. 6. Параметры вероятностных характеристик тягового сопротивления (Н) и границы среднего квадратического отклонения математического ожидания (— нижняя; — верхняя)**

**Fig. 6. Parameters of probabilistic characteristics of traction resistance in laboratory tests on a concrete base and in a soil channel and the boundaries of the average square deviation of the mathematical expectation (— lower; — upper)**

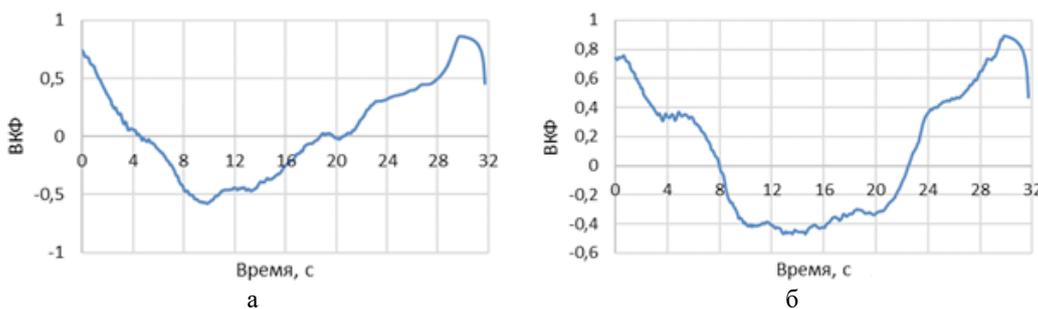
**Параметры вероятностных характеристик тягового сопротивления при испытаниях на бетонном основании и в почвенном канале**

Таблица 6

**Parameters of probabilistic characteristics of traction resistance during tests on a concrete base and in a soil channel**

Table 6

Условия испытаний <i>Test conditions</i>	Математическое ожидание <i>Mathematical expectation</i>	Дисперсия <i>Variance</i>	Среднее квадратическое отклонение <i>Standard square deviation</i>	Коэффициент вариации <i>Variation coefficient</i>
<b>Бетон, участок 1</b> <i>Concrete, site 1</i>	3630,37	2023100,02	1422,36	0,391
<b>Бетон, участок 2</b> <i>Concrete, site 2</i>	9714,79	15247855,19	3904,85	0,402
<b>Почва / Soil</b>	6077,24	565947,71	752,29	0,124



**Рис. 7. Нормированная взаимная корреляционная функция при испытаниях на бетонном основании: а – анализ сигнала от  $P_{кр}$  к силе тока фазы А; б – анализ сигнала от силы тока фаза А к  $P_{кр}$**

**Fig. 7. Normalized mutual correlation function for tests on concrete base: а – analysis of the signal from the drawbar pull to the current intensity of Phase A; б – analysis of the signal from the current intensity of Phase A to the drawbar pull**

Нормированная взаимная корреляционная функция силы тягового сопротивления на крюке  $P_{кр}$  и силы тока фазы А (анализ сигнала от  $P_{кр}$  к  $I_a$ ) при испытаниях на бетонном основании показывает быстрое убывание функции (до 4,0 с), в диапазоне

4,0-20,0 с наблюдается отрицательная корреляция исследуемых процессов, после 20,0 с – нарастающая положительная корреляция (рис. 7а).

Нормированная взаимная корреляционная функция силы тягового сопротивления на крюке  $P_{кр}$

и силы тока фазы А (анализ сигнала от  $I_a$  к  $R_{кр}$ ) при испытаниях на бетонном основании также показывает быстрое убывание функции (до 8,0 с), в диапазоне 8,0-20,0 с наблюдается отрицательная корреляция исследуемых процессов, после 22,0 с – нарастающая положительная корреляция (рис. 7б).

### Выводы

1. Результаты испытаний показали повышение устойчивости трактора в результате смещения центра тяжести.

### Список источников

- Арженовский А.Г., Козлов Д.С., Петрищев Н.А. Метод получения тяговой характеристики трактора в эксплуатационных условиях // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 5. С. 25-30. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-5-25-30>
- Юферов Л.Ю., Споров А.П. Конструкция и компоновка электрического мобильного транспортного средства для фермерского хозяйства // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 3 (48). С. 89-94. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-3-89-94>
- Трухачев В.И., Дидманидзе О.Н., Девянин С.Н. Перспективы тракторостроения в России // Чтения академика В.Н. Болтинского: Сборник статей. Москва, 17-18 января 2024 г. М.: Российский государственный аграрный университет; ООО «Сам Полиграфист», 2024. С. 43-53. EDN: ВТКХКН
- Воротников И.Л., Муравьева К.А., Петров К.А. Импортзамещение в сельскохозяйственном машиностроении России: состояние и проблемы // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 8. С. 52-57. EDN: ВАИТС
- Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Алексеев И.С. и др. Математическое моделирование динамических процессов сельскохозяйственного мобильного энергетического средства на электроприводе // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25, № 1. С. 112-122. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122>
- Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Алексеев И.С. и др. Обоснование выбора параметров электромеханической трансмиссии для трактора тягового класса 0,6-0,9 и согласование тяговых характеристик // Агринженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 63-70. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-63-70>
- Юферов Л.Ю., Споров А.П., Гусаров В.А., Писарев Д.Ю. Тенденции развития сельскохозяйственной электрифицированной мобильной техники // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 1 (46). С. 3-8. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-3-8>
- Дидманидзе О.Н., Федоткин Р.С., Крючков В.А. и др. Предпосылки создания сельскохозяйственного трактора с гибридным и электрическим приводом // Транспортное дело России. 2024. № 1. С. 307-311. EDN: ZINYKV
- Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Алексеев И.С. Результаты проведения экспериментальных исследований трактора, оснащенного упруго-демпфирующим механизмом при агрегатировании с сеялкой // Тракторы и сельхозмашины. 2021. Т. 88, № 4. С. 33-44. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-4-33-44>
- Чаплыгин М.Е., Попов Р.А., Сенькевич С.Е. Расчет мощностного баланса мобильного энергетического средства с навесным адаптером для уборки лубяных культур // Аграрный научный журнал. 2023. № 9. С. 144-151. <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i9pp144-151>

2. Параметры вероятностных характеристик тягового сопротивления при испытаниях на бетонном основании и в почвенном канале показали в среднем превышение до 30% среднеквадратичного отклонения на фоне «бетон» в сравнении с «почвой».

3. Макетный (опытный) образец МЭС с электроприводом подтвердил свой тяговый класс 0,6: на твердой поверхности (бетонный трек) тяговое усилие на крюке фиксировалось как 8,0...9,0 кН, на слабонесущем грунте (почвенный канал) тяговое усилие составило 4,0...6,0 кН.

### References

- Arzhenovskiy A.G., Kozlov D.S., Petrishchev N.A. Determining the traction characteristic of a tractor in operating conditions. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018;12(5):25-30. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-5-25-30>
- Yuferev L.Yu., Sporov A.P. Design and layout of an electric mobile vehicle for farming. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2022;69(3):89-94. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-3-89-94>
- Trukhachev V.I., Didmanidze O.N., Devyanin S.N. Prospects for tractor manufacturing in Russia. *Readings of Academician V.N. Boltinsky*: Collection of papers. Moscow, January 17-18, 2024. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; ООО “Sam Polygraphist”, 2024. Pp. 43-53. (In Russ.)
- Vorotnikov I.L., Muraveva M.V., Petrov K.A. Import substitution in agricultural machinery in Russia: state and problems. *Science and Business: Ways of Development*. 2018;8:52-57. (In Russ.)
- Godzhaev Z.A., Senkevich S.E., Alekseev I.S., Ilchenko E.N. Mathematical modeling of dynamic processes of agricultural mobile energy vehicles on an electric drive. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(1):112-122. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122>
- Godzhaev Z.A., Senkevich S.E., Alekseev I.S. et al. Justification of the choice of parameters of an electromechanical transmission for a tractor of traction class of 0.6-0.9 traction class and coordination of traction characteristics. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(1):63-70. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-63-70>
- Yuferev L.Yu., Sporov A.P., Gusarov V.A. et al. Trends in the development of agricultural electrified mobile equipment. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2022;69(1):3-8. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-3-8>
- Didmanidze O., Fedotkin R., Kryuchkov V. et al. Prerequisites for creation of agricultural tractors with hybrid and electric drive. *Transport Business of Russia*. 2024;1:307-311. (In Russ.)
- Sen'kevich S.E., Il'chenko Y.N., Alekseyev I.S. Results of experimental studies of a tractor equipped with an elastic-damping mechanism when aggregated with a seeder. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2021;88(4):33-44. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-4-33-44>
- Chaplygin M.E., Popov R.A., Senkevich S.E. Power balance calculation of a mobile energy vehicle with a mounted adapter for harvesting bast crops. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal*. 2023;(9):144-151. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i9pp144-151>
- Sorokin M.S., Lisychenko N.L., Yasak V.V. Conception of development of agricultural technique with the use

11. Сорокин М.С., Лисиченко М.Л., Ясак В.В. Концепция развития сельскохозяйственной техники с использованием гибридного привода // Инженерия природопользования. 2016 № 2 (6). С. 25-28. EDN: XWQUNN

12. Гусаров В.А. Силовая установка для мобильного транспортного средства класса 0,6-0,8 на базе тракторного самоходного шасси Т-16 // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 2. С. 26-32. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-26-32>

### Информация об авторах

- <sup>1</sup> **Годжаев Захид Адыгезалович**, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом № 2 «Мобильных энергосредств»; [fc51@mail.ru](mailto:fc51@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>; SPIN-код: 1892-8405.
- <sup>2</sup> **Сенькевич Сергей Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией № 2.2 «Автоматизированного привода СХТ»; [umo.viesh@list.ru](mailto:umo.viesh@list.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6354-7220>; SPIN-код: 7766-6626.
- <sup>3</sup> **Майстренко Николай Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка; [nmaystrenko@rgau-msha.ru](mailto:nmaystrenko@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1268-713X>; SPIN-код: 4636-5800.
- <sup>4</sup> **Левшин Александр Григорьевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка; [alevshin@rgau-msha.ru](mailto:alevshin@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>; SPIN-код: 1428-5710.
- <sup>5</sup> **Алексеев Илья Сергеевич**, инженер; [dreeddog@mail.ru](mailto:dreeddog@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0005-5169-895X>; SPIN-код: 9832-7848.
- <sup>6</sup> **Ильченко Екатерина Николаевна**, инженер; [kat-sama@mail.ru](mailto:kat-sama@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0005-3901-5706>; SPIN-код: 5672-1313.
- <sup>7</sup> **Уютов Сергей Юрьевич**, младший научный сотрудник; [s\\_uuyotov@mail.ru](mailto:s_uuyotov@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-9394-5916>; SPIN-код: 7350-1489.
- <sup>1,2,5,6,7</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5
- <sup>3,4</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

### Вклад авторов:

З.А. Годжаев – руководство исследованиями, методология, верификация данных;  
С.Е. Сенькевич – анализ предметной области, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;  
Н.А. Майстренко – проведение исследований;  
А.Г. Левшин – руководство исследованиями, методология, ресурсы. концептуализация;  
И.С. Алексеев – проведение исследований;  
Е.Н. Ильченко – проведение исследований, визуализация;  
С.Ю. Уютов – формальный анализ, администрирование данных.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 20.01.2025, после рецензирования и доработки 20.06.2025, принята к публикации 23.06.2025

of hybrid-drive. *Engineering of Nature Management*. 2016;2:25-28. (In Russ.)

12. Gusarov V.A. Power plant for a 0.6-0.8 class mobile vehicle based on the T-16 self-propelled tractor chassis. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(2):26-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-26-32>

### Author Information

- Zakhid A. Godzhaev**<sup>1</sup>, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Head of Department No. 2 of Mobile Power Vehicles; [fc51@mail.ru](mailto:fc51@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>
- Sergey E. Senkevich**<sup>2</sup>, PhD (Eng), Associate Professor, Senior Researcher, Head of Laboratory No. 2.2 of Automated Drive of the Chemical Transportation System; [umo.viesh@list.ru](mailto:umo.viesh@list.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6354-7220>
- Nikolay A. Maistrenko**<sup>3</sup>, CSc (Eng), Associate Professor, Department of Machine and Tractor Fleet Operation; [nmaystrenko@rgau-msha.ru](mailto:nmaystrenko@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1268-713X>
- Aleksandr G. Levshin**<sup>4</sup>, DSc (Eng), Professor, Department of Machine and Tractor Fleet Operation; [alevshin@rgau-msha.ru](mailto:alevshin@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>
- Ilya S. Alekseev**<sup>5</sup>, Engineer; [dreeddog@mail.ru](mailto:dreeddog@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0005-5169-895X>
- Ekaterina N. Ilchenko**<sup>6</sup>, Engineer; [kat-sama@mail.ru](mailto:kat-sama@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0005-3901-5706>
- Sergey Yu. Uuyotov**<sup>7</sup>, Junior Research Engineer; [s\\_uuyotov@mail.ru](mailto:s_uuyotov@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-9394-5916>
- <sup>1,2,5,6,7</sup> Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5
- <sup>3,4</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

### Author Contribution

Z.A. Godzhaev – research supervision, methodology, data curation;  
S.E. Senkevich – conceptualization; literature review, writing – review and editing of the manuscript conclusions;  
N.A. Maistrenko – investigation;  
A.G. Levshin – research supervision, formal analysis, writing – original draft;  
I.S. Alekseev – investigation;  
E.N. Ilchenko – investigation; visualization;  
S.Yu. Uuyotov – formal analysis, data curation.

### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest and are responsible for plagiarism.

Received 20.01.2025; Revised 20.06.2025; Accepted 23.06.2025