

Перспективы внедрения мини-электротрактора в растениеводстве на примере разбрасывания удобрений

Д.А. Милько^{1a}, А.В. Ковалев^{1b}, В.В. Панина^{1c}, А.В. Гвоздев^{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., 4, Санкт-Петербург, Россия

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

^a milkodmitry@gmail.com, ^b aleksmg@yandex.ru, ^c valeri_arsen@mail.ru, ^d 4gav1lgvozdev@yandex.ru,

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

^a <https://orcid.org/0000-0002-0991-1930>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5822-5494>,

^c <https://orcid.org/0000-0001-9623-516X>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>,

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

Статья поступила 14.01.2026, принята 04.02.2026

Тенденции развития современного растениеводства, особенно в сегменте малых форм хозяйствования, сталкиваются с комплексом нерешённых проблем в области механизации. К ним относятся: снижение производственных затрат, повышение урожайности культур, существенный физический и моральный износ машинно-тракторного парка, зависимость от импортной техники и ГСМ, значительная экологическая нагрузка при использовании двигателей внутреннего сгорания. В данной статье исследуется потенциал внедрения мини-электротрактора как инновационного средства для преодоления указанных вызовов на примере технологической операции разбрасывания минеральных удобрений. Автор приводит анализ технико-экономических и эксплуатационных характеристик электротракторов, проводя параллель с аналогичными по классу представителями, но с двигателями внутреннего сгорания, выделяя их преимущества, такие как низкая себестоимость эксплуатации, экологичность, высокая энергоэффективность и совместимость с цифровыми агротехнологиями. Представленный в статье прототип мини-электротрактора является автономным транспортным средством с дистанционным управлением, что в свою очередь позволяет значительно упростить выполнение операций в растениеводстве, животноводстве, садоводстве, а также в других смежных отраслях. Исследования, представленные в статье, показывают, что автоматизация процесса внесения минеральных удобрений на базе мини-электротрактора с применением электропривода центробежного тукорассеивающего рабочего органа являются оптимальным вариантом. При этом учитывались такие факторы, как окружная скорость вращения тукорассеивающего рабочего органа, высота установки над поверхностью земли, ширина колеи мини-электротрактора и коэффициент парусности. Установлено, что для мини-электротрактора с шириной колеи до 1,5 м достаточно иметь окружную скорость вращения однодискового центробежного рабочего органа $15,5 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ($2,47 \text{ с}^{-1}$). Затраты мощности на его привод при этом составляют менее $0,35 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Выявлено, что удельные затраты энергии на привод центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений в агрегате относительно затрат мощности на его привод составляют около 10 %.

Ключевые слова: мини-электротрактор; разбрасывание удобрений; точное земледелие; энергоэффективность; дистанционное управление; электропривод сельскохозяйственных машин.

Prospects for the implementation of a mini electric tractor in crop production using fertilizer spreading as an example

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

¹ Melitopol State University; 18, B. Khmelnytsky 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 Highway, Yakutsk, Russia

^a milkodmitry@gmail.com, ^b aleksmg@yandex.ru, ^c valeri_arsen@mail.ru, ^d 4gav1lgvozdev@yandex.ru,

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

^a <https://orcid.org/0000-0002-0991-1930>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5822-5494>,

^c <https://orcid.org/0000-0001-9623-516X>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>,

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

Received 14.01.20256 accepted 04.02.2026

The development trends of modern crop production, especially in the segment of small-scale farming, face a complex of unresolved problems in the field of mechanization. These include reducing production costs, increasing crop yields, significant physical and moral wear and tear of the machinery and tractor fleet, dependence on imported equipment and fuels and lubricants, and significant environmental impact from the use of internal combustion engines. This article investigates the potential of implementing a mini electric tractor

as an innovative tool to overcome these challenges, using the technological operation of spreading mineral fertilizers as an example. The analysis of the technical, economic, and operational characteristics of electric tractors is provided, drawing parallels with similar class counterparts with internal combustion engines, highlighting their advantages such as low operating costs, environmental friendliness, high energy efficiency, and compatibility with digital agricultural technologies. The mini electric tractor prototype presented in the article is an autonomous vehicle with remote control, which, in turn, significantly simplifies the performance of operations in crop production, livestock farming, horticulture, and other related industries. The research presented in the article shows that automating the process of applying mineral fertilizers using a mini electric tractor with an electric drive of a centrifugal fertilizer spreading working body is an optimal solution. Factors such as the peripheral speed of the spreading working body, its installation height above the ground surface, the track width of the mini electric tractor, and the drag coefficient are taken into account. It is found that for a mini electric tractor with a track width of up to 1,5 m, it is sufficient to have a peripheral rotation speed of a single-disc centrifugal working body of $15,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ($2,47 \text{ s}^{-1}$). The power consumption for its drive is less than $0,35 \text{ kW} \cdot \text{h}$. It is revealed that the specific energy consumption for driving the centrifugal working body for spreading fertilizers in the unit, relative to its drive power consumption, is about 10 %.

Keywords: mini electric tractor; fertilizer spreading; precision farming; energy efficiency; remote control; electric drive of agricultural machinery.

Введение. Как доказательную базу актуальности применения малой механизации в растениеводстве следует отнести повышение качества жизни работников, повышение рентабельности труда наряду с повышением безопасности выполнения технологических операций за счёт возможности удалённого воздействия [1–7]. Агротехнические операции по внесению минеральных удобрений в почву являются важной частью большинства агротехнологий. Намеченный ныне в мире концептуальный вектор перехода на точные способы земледелия [8–17] оставляет в них недостаточно изученными актуальные вопросы эффективности технологического процесса внесения минеральных удобрений в почву. Эта актуальность вызвана тем, что часть общей площади поля отводится под инженерную зону [18]. Она включает транспортную систему для движения всех средств механизации, коммуникации для подвода энергии и воды, телекоммуникационные каналы и систему ориентации. Основным отличием от традиционных способов сплошного разбрасывания удобрений по полю в колеем земледелия является ограничение на их попадание на поверхность инженерной зоны. Последнее существенно влияет на себестоимость всей агротехнологии и как следствие – себестоимости конечной продукции. Теоретическими и экспериментальными исследованиями центробежных дисковых рабочих органов занималось большое количество ученых [19–210]. Исследователями было изучено влияние конструктивных форм выполнения дисков, лопаток и других элементов конструкции рабочих органов, па-

раметров и режимов их работы, физико-механических свойств минеральных удобрений и других сыпучих материалов, условий работы машин на их рабочую ширину захвата, в частности, дальность разбрасывания, неравномерность внесения удобрений и т. д. Проведёнными исследованиями установлено, что наибольшее влияние на максимальную дальность полёта частиц удобрений оказывает окружная скорость вращения дискового рабочего органа, высота его установки над поверхностью поля и коэффициент парусности частиц минеральных удобрений. Учитывая наличие электрической энергетической установки мини-электротрактора для внесения сыпучих материалов, целесообразно использование электропривода, который лучше поддается автоматизации и управлению этого процесса.

Цель: оценить целесообразность внедрения мини-электротракторов в растениеводстве на примере разбрасывателя минеральных удобрений.

Методы. Теоретические исследования, синтез конструктивных схем и параметров агрегатов для внесения минеральных удобрений осуществлялся путём моделирования на ПК условий его функционирования. Методика исследования предполагает использование основ теоретической механики и теории сельскохозяйственных машин с использованием прикладных пакетов решения математических задач. Физическим объектом экспериментальных исследований выступил мини-электротрактор (рис. 1, а) и вариант использования мини-электротрактора с разбрасывателем минеральных удобрений (рис. 1, б).



а)



б)

Рис. 1. Мини-электротрактор (а) с разбрасывателем минеральных удобрений (б)

Для проведения экспериментальных исследований навесной однодисковый тракторный разбрасыватель типа JarMet специально был переоборудован в электрифицированный (рис. 1, б). Для этого под дисковым тукорассеивающим рабочим органом был установлен электрический двигатель с редуктором. Частота вращения вала электродвигателя изменялась путем изменения частоты электрического тока с помощью электронного устройства (частотного преобразователя). Параметры электрического тока фиксировали с помощью мультиметра. Который представляет собой переносной прибор, предназначенный для измерений силы тока, напряжения и мощности в однофазных и трёхфазных трёхпроводных и четырёхпроводных цепях переменного тока при равномерной и неравномерной нагрузках фаз.

С целью исключения возможности попадания минеральных удобрений в зону транспортных дорожек постоянной технологической колеи мини-электротрактора был оборудован специальным защитным экраном с ле-

вой и правой его сторон (см. рис. 1, б). Навесная технологическая система мини-электротрактора представляет собой серийный навесной механизм традиционного трактора с основным гидравлическим цилиндром, нижними и верхними тягами. С помощью навесной системы разбрасыватель минеральных удобрений был присоединен к тягам навесного механизма мини-электротрактора (см. рис. 1, б).

При проведении испытаний электрифицированного разбрасывателя минеральных удобрений, агрегируемого с мини-электротрактором, в качестве сыпучего технологического материала использовалось фуражное зерно пшеницы.

Результаты и обсуждение. Для проведения теоретических исследований полёта частицы удобрений массой M , брошенной с дискового рабочего органа разбрасывателя минеральных удобрений, представим в виде эквивалентной схемы (рис. 2), на которой отразим действующие на неё силы.

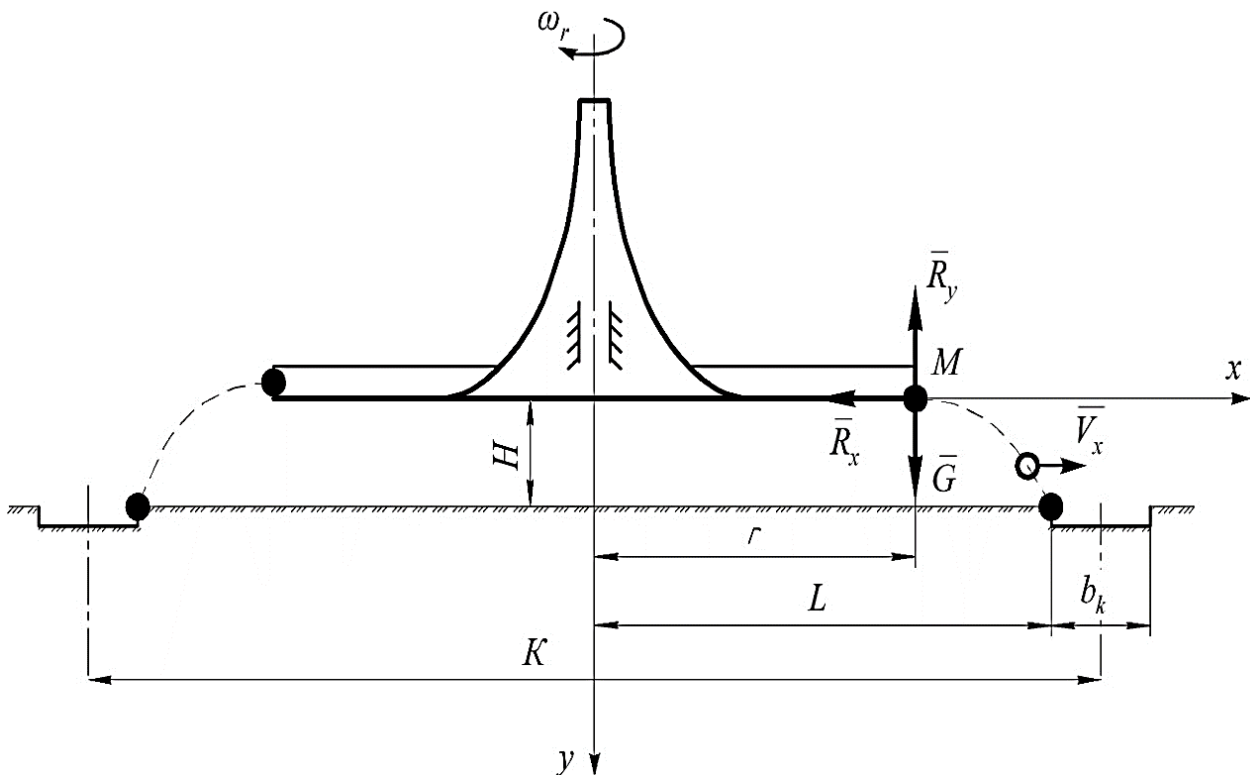


Рис. 2. Эквивалентная схема полёта частицы массой M , брошенной с дискового рабочего органа разбрасывателя минеральных удобрений

Согласно схеме на рис. 2 частица удобрений после отрыва от края диска (или с конца лопасти), получив необходимую скорость, совершает движение в плоскости, совпадающей с направлением абсолютной скорости рассева. Совершая свободный полёт в воздушной среде, она должна упасть на поверхность почвы и не достигнуть транспортно-технологических дорожек для движения по ним колес мини-электротрактора. При этом на частицу массой M действуют силы тяжести G и сопротивления воздуха R_x .

Дифференциальное уравнение движения частицы удобрений при полёте в направлении оси X имеет вид:

$$M \cdot \dot{x} = -R_x. \quad (1)$$

Силу сопротивления воздуха R_x можно определить следующим образом:

$$R_a = k \cdot \gamma \cdot F \cdot \dot{x}^2, \quad (2)$$

где k – коэффициент сопротивления воздуха; γ – удельный вес воздуха, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; F – миделево сечение, м^2 .

С небольшими допущениями положим, что $\dot{x} = V_x$. Тогда после подстановки (2) в (1) и математических преобразований имеем:

$$\frac{dV}{V_x} = -k_s \cdot dx, \quad (3)$$

где k_s – коэффициент парусности частицы удобрения, численно равный

$$k_s = \frac{k \cdot F \cdot \gamma}{M}. \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (3), получим:

$$\ln V_x = -k_s \cdot x + \ln C_1, \quad (5)$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Из уравнения (5) выразим V_x :

$$V_x = C_1 \cdot e^{-k_s \cdot x}. \quad (6)$$

Постоянную интегрирования C_1 определим из начальных условий, согласно которым при $x = 0$ скорость частицы будет равна $V_x = V_r$, где V_r – линейная скорость частицы удобрения, движущейся по окружности.

Определив постоянную C_1 и проинтегрировав уравнение (6) по времени t , получим:

$$\frac{e^{k_s \cdot x}}{k_s} = V_r \cdot t + C_2, \quad (7)$$

где C_2 – постоянная интегрирования.

Постоянную интегрирования C_2 определим из начальных условий, согласно которым при $t = 0$, $x = 0$. Тогда $C_2 = k_s^{-1}$. С учётом этого имеем:

$$k_s \cdot x = \ln(k_s \cdot V_r \cdot t + 1). \quad (8)$$

Откуда выражение для дальности полёта в функции времени будет иметь вид:

$$x = \frac{\ln(k_s \cdot V_r \cdot t + 1)}{k_s}. \quad (9)$$

Для определения времени t полёта частицы удобрения рассмотрим её движение по вертикали, таким образом в направлении оси y под действием силы тяжести и составляющей силы R_y сопротивления воздуха. Так как скорость движения частицы в этом направлении от её начальной скорости не зависит, а высота H падения относительно дальности полёта частицы небольшая, то влиянием силы R_y сопротивление воздуха можно пренебречь. С учётом этого можно принять, что при свободном падении частицы высота H будет равна:

$$H = \frac{g \cdot t^2}{2}, \quad (10)$$

где g – ускорение свободного падения, $m \cdot s^{-2}$.

Из выражения (10) выразим время t :

$$t = \left(\frac{2 \cdot H}{g} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Подставив полученное выражение (11) для времени t в выражение (9), получим уравнение дальности полёта частицы удобрения в виде:

$$x = \frac{\ln \left(k_s \cdot V_r \cdot \left(\frac{2 \cdot H}{g} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right)}{k_s}. \quad (12)$$

Согласно представленной схеме на рис. 1 дальность полёта частицы удобрений не должна достигать зоны транспортно-технологических дорожек постоянной технологической колеи, т. е.:

$$x \leq L, \quad (13)$$

где L – половина ширины агротехнической (продуктивной) зоны поля для обслуживания ее мини-электротрактором, m :

$$L = 0.5 \cdot (K - b_k), \quad (14)$$

где K – шаг колес, m ; b_k – ширина транспортно-технологической дорожки постоянной технологической колеи, m .

Ширина агротехнической зоны поля для обслуживания её мини-электротрактором определена шагом колес K за вычетом ширины b_k транспортно-технологической дорожки. Последняя зависит в основном от параметров его транспортной системы мини-электротрактора [19]. Откуда следует, что максимальная дальность X полёта частицы удобрений должна быть равна:

$$X = 0.5 \cdot (K - b_k). \quad (15)$$

Подставив выражение (15) в формулу (12), выразим скорость V_r , которую должна иметь частица удобрений, чтобы не достигнуть транспортно-технологических дорожек инженерной зоны поля:

$$V_r = \frac{e^{\frac{0.5 \cdot (K - b_k)}{k_s}} - 1}{k_s \cdot \left(\frac{2H}{g} \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (16)$$

Анализируя уравнение (16) можно отметить, что на скорость V_r , которую должна иметь частица удобрений, чтобы не достигнуть транспортно-технологических дорожек инженерной зоны поля, влияют:

- шаг и ширина постоянной технологической колеи K и b_k ;
- высота установки центробежного аппарата H ;
- коэффициент парусности удобрений k_s .

Если центробежный рабочий орган будет иметь постоянный радиус r по всей его окружности, то для практических расчётов положим, что частица удобрения сходит с лопасти или с края диска с абсолютной скоростью, приблизительно равна скорости V_r , т. е.

$$V_r = \omega_r \cdot r, \quad (17)$$

где ω_r – окружная скорость вращения центробежного дискового рабочего органа разбрасывателя удобрений, s^{-1} .

Подставив выражение (17) в выражение (16), имеем математическую модель, связывающую параметры центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений с режимом его работы и параметрами постоянной технологической колеи:

$$\omega_r = \frac{e^{\frac{0.5 \cdot (K - b_k)}{k_s}} - 1}{r \cdot k_s \cdot \left(\frac{2H}{g} \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (18)$$

Из анализа зависимости (18) следует, что наибольшее влияние на окружную скорость вращения центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений оказывают высота его установки H , ширина колеи мини-электротрактора K и коэффициент парусности удобрений k_s .

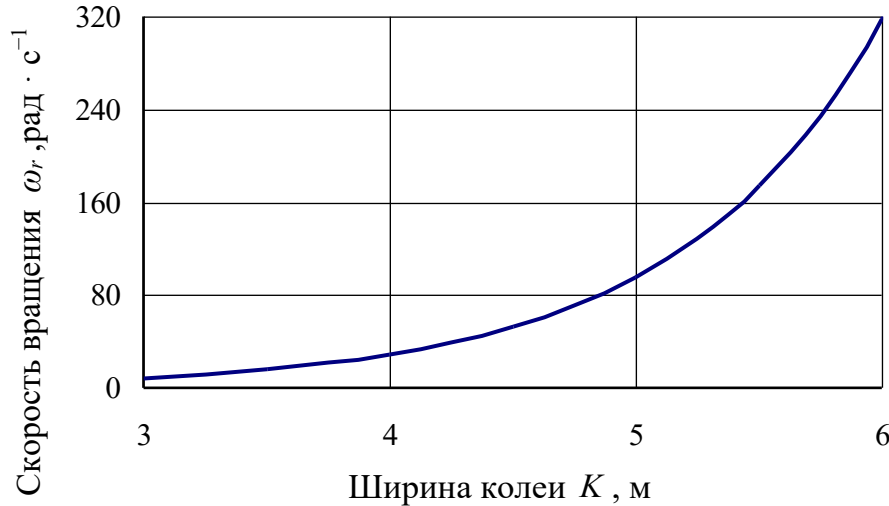


Рис. 3. Зависимость окружной скорости ω_r вращения центробежного дискового рабочего органа разбрасывателя удобрений от ширины колеи K мини-электротрактора

Из анализа зависимости на рис. 3 следует, что для мини-электротрактора, ширина колеи которого равна $K = 1,0$ м, достаточно иметь окружную скорость вращения центробежного рабочего органа $15,5$ рад·с⁻¹, что соответствует частоте его вращения $1,13$ с⁻¹. С увеличением ширины колеи мини-электротрактора до 6 м, необходимая окружная скорость центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений экспоненциально увеличивается до $318 - 1$ ($50,67$ с⁻¹). Естественно, такое увеличение скорости вращения центробежного органа требует соответственного увеличения и затрат мощности на его привод [18]. Поэтому далее исследуем зависимость необходимых затрат мощности на привод центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений от скорости его вращения.

Общую мощность N , необходимую для привода центробежного рабочего органа, представим в виде суммы мощностей на сообщение кинетической энергии частицам удобрений N_1 , на преодоление сил сопротивления при движении частиц по лопатке и диску N_2 , на удар частиц о лопатку в месте подачи удобрений N_3 , на преодоление трения в опорах вала N_4 :

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4. \quad (19)$$

Мощность N_1 определяется как кинетическая энергия массы удобрений, проходящих через аппарат за одну секунду:

$$N_1 = \frac{Q \cdot \omega_r^2 \cdot r^2}{2}, \quad (20)$$

где Q – массовый расход удобрений, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Затраты мощности N_2 на преодоление сил сопротивления при движении частиц по диску центробежно-

Построенный по (17) график зависимости окружной скорости вращения ω_r рабочего органа от ширины колеи K мостового агросредства носит экспоненциальный характер (рис. 3).

го рабочего органа достаточно точно можно определить:

$$N_2 = Q \cdot l \cdot f \cdot (0,7 \cdot \omega_r^3 \cdot r + 0,5 \cdot \omega_r^2 \cdot r + g), \quad (21)$$

где l – длина рабочей части лопатки, м; f – коэффициент трения удобрений по диску.

Затраты мощности N_3 определим, полагая, что удар лопатки о струю удобрений является неупругим:

$$N_3 = 2 \cdot \pi \cdot Q \cdot \frac{\omega_r^2 \cdot r^3}{L \cdot z}, \quad (22)$$

где z – число лопаток на диске.

Затраты мощности N_4 на преодоление трения в опорах вала можно определить следующим образом:

$$N_4 = 0,5 \cdot \left(m_d + \frac{Q \cdot l}{\omega_r \cdot r} \right) \cdot g \cdot f_n \cdot d, \quad (23)$$

где m_d – масса диска с лопатками, валом и шкивом; f_n – коэффициент трения качения в подшипниках; d – диаметр дорожки на внутреннем кольце подшипника, м.

Подставив зависимости (20–23) затрат мощности на привод в (19) и разрешив полученную зависимость относительно скорости ω_r центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений получим:

$$N = A_1 \cdot \omega_r^3 + A_2 \cdot \omega_r^2 + A_3 \cdot \omega_r^{-1} + A_0, \quad (24)$$

где $A_1 = 0,7 \cdot Q \cdot l \cdot f \cdot r$;

$$A_2 = 0,5 \cdot Q \cdot l \cdot f \cdot r + \frac{Q \cdot r^2}{2} + \frac{2 \cdot \pi \cdot Q \cdot r^3}{L \cdot z};$$

$$A_3 = 0,5 \cdot g \cdot f_n \cdot d \cdot \frac{Q \cdot l}{r}$$

$$A_0 = Q \cdot l \cdot f \cdot g + 0,5 \cdot g \cdot f_n \cdot d \cdot m_d.$$

Из анализа зависимости (24) следует, что необходимые затраты мощности на привод центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений зависят

от окружной скорости его вращения в третьей степени. График указанной зависимости представлен на рис. 4.

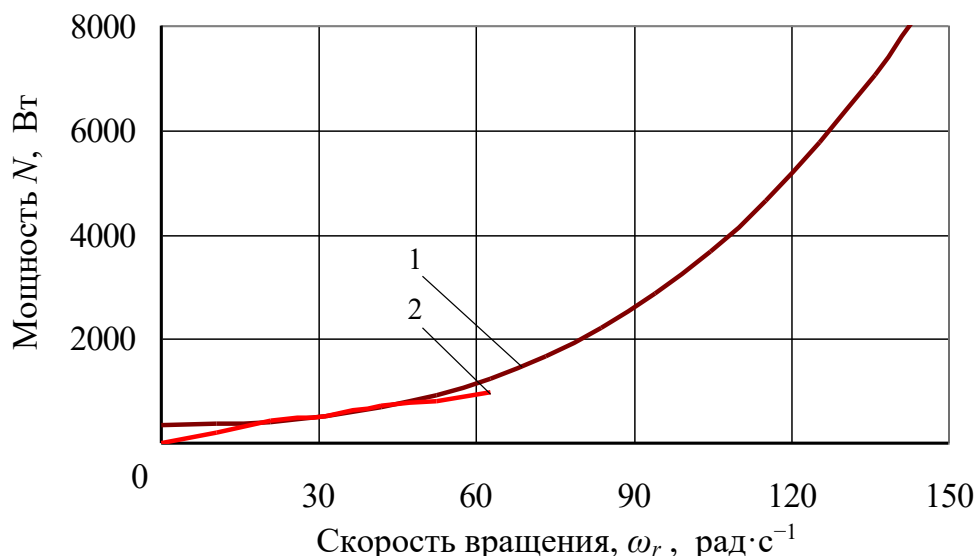


Рис. 4. Зависимость затраты мощности N на привод центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений от окружной скорости ω_r его вращения: 1 – теоретическая зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

Из проведённого анализа следует, что для физического объекта исследований (разбрасывателя сыпучих материалов агрегируемым с мини-электротрактором), затраты мощности на привод составляют $0,35 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Полученный результат довольно точно согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 4). С увеличением окружной скорости вращения центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений до $140 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ($22,2 \text{ с}^{-1}$) затраты мощности на его привод возрастают экспоненциально и достигают $8,0 \text{ кВт}$.

Заключение. Результаты исследований показали, что удельные затраты энергии на привод центробеж-

ного рабочего органа для разбрасывания удобрений в мини-электротракторе относительно затрат мощности на его привод составляют около 10 %. В свою очередь полученные значения чётко соотносятся с экспериментальными данными. С увеличением окружной скорости вращения центробежного рабочего органа для разбрасывания удобрений до $140 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ($22,2 \text{ с}^{-1}$) затраты мощности на его привод возрастают экспоненциально и достигают $8,0 \text{ кВт}$.

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

Литература

- Bakker T., van Asselt K., Bontsema J., Müller J., van Straten G. Systematic Design of an Autonomous Platform for Robotic Weeding // Journal of Terramechanics. 2010. Vol. 47. № 2. P. 63–73.
- Bergeman M., Billingsley J., Reid J., van Henten E. Robotics in Agriculture and Forestry // Springer Handbook of Robotics. 2016. P. 1463–1492.
- Van Bergeijk J., Goense D. Soil tillage resistance as tool to map soil type differences // Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E. (Eds.) Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture. Madison, Wisconsin : ASA-CSSA-SSSA, 1996. P. 605–616.
- Vaughan B. How to determine an accurate soil testing laboratory // Clay D.E. et al. (Eds.) Site Specific Management Guidelines SSMG 4. Norcross, Georgia: Potash and Phosphate Institute, 1999.
- Verschoore R., Pieters J.G., Seps T., Spriet Y., Vangeyte J. Development of a sensor for continuous soil resistance measurement // Stafford J., Werner A. (Eds.) Precision Agriculture. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2003. P. 689–695.
- Pérez-Ruiz M., Slaughter D.C., Gliever C., Upadhyaya S. Tractor-Based Real-Time Kinematic-GPS Positioning System for Geo-Referencing of Field Operations // Computers and Electronics in Agriculture. 2012. Vol. 86. P. 64–71.
- Moreda G.P., Muñoz-García M.A., Barreiro P. High Voltage Electrification of Tractors and Agricultural Machinery A Review // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 115. P. 117–131.
- Semenov V., Karpovich A., Bolobova A. Prospects for the Use of Electric Drives in Agricultural Tractors // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 659. P. 012045.
- Grisso R.D., Alley M.M., McClellan P. Precision Farming Tools: Variable-Rate Application // Virginia Cooperative Extension Publication. 2009. № 442–505.
- Rinaldi M., Brambilla M., Bisaglia C. Electrification of a Compact Agricultural Tractor: A Case Study // Biosystems Engineering. 2020. Vol. 193. P. 1–11.
- Nadykto V., Cherepukhin V., Gridnev E. Crop cultivation with the use of constant technological line // Biblioteka Fragmenta Agronomica (Poland). 1997. № 2B. P. 483–486.
- Pedersen H., Sørensen C., Oudshoorn F., McPhee J. User requirements for a wide span tractor for controlled traffic farming // International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. CIOSTA XXXV Conference

- "From Effective to Intelligent Agriculture and Forestry". 2013. P. 134–136.
13. Sönmez I, Kaplan M, Sönmez S. An investigation of seasonal changes in nitrate contents of soils and irrigation waters in greenhouses located in Antalya-Demre Region. *Asian Journal of Chemistry*, 2007; 19: 5639–5646.
 14. Chamen W.C.T. Controlled traffic farming – from worldwide research to adoption in Europe and its future prospects // *Acta Technologica Agriculturae*. 2015. №18. P. 64–73.
 15. Ojeniyi S.O., Adeniyi M.O. Effect of poultry manure and NPK fertilizer on soil fertility and maize nutrient contents and yield at Akra southwestern Nigeria. *Proceedings of 25th Annual Conference of Soil Science Society of Nigeria (SSSN)*. Benin, 1999; pp.185–191.
 16. Al-Gaadi K.A., Tola E., Alameen A.A., Madugundu R., Marey S.A., Zeyada A.M., Edris M.K. Control and monitoring systems used in variable rate application of solid fertilizers: A review *Journal of King Saud University – Science*, 2023; 35: 102574.
 17. Maleki M.R., Mouazen A.M., Ketelaere B.D., Ramon H., Merkx R., DeBaerdemaeker J. On-the-go variable-rate phosphorus fertilization based on a visible and near-infrared soil sensor. *Biosystem Engineering*, 2008; 99: 35–45.
 18. Bulgakov V., Kuvachov V., Olt J. Theoretical study on power performance of agricultural gantry systems // *Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation" 2019*. Vol. 30. № 1. P. 0167-0175.
 19. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Математическое моделирование процесса разрушения массива почвогрунта плоскими ножами при использовании грунтометов для тушения лесных пожаров // *Справочник. Инженерный журнал*. 2017. № 12 (249). С. 55–60.
 20. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Иванов В.А. Исследование закономерностей разрушения грунта при работе комбинированных грунтометов для тушения лесных пожаров // *Системы. Методы. Технологии*. 2017. № 1 (33). С. 146–151.
 21. Шапиро В.Я., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Григорьев М.Ф. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2018. № 1 (361). С. 61–69.
 6. Pérez-Ruiz M., Slaughter D.C., Gliever C., Upadhyaya S. Tractor-Based Real-Time Kinematic-GPS Positioning System for Geo-Referencing of Field Operations // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2012. Vol. 86. P. 64–71.
 7. Moreda G.P., Muñoz-García M.A., Barreiro P. High Voltage Electrification of Tractors and Agricultural Machinery A Review // *Energy Conversion and Management*. 2016. – Vol. 115. P. 117–131.
 8. Semenov V., Karpovich A., Bolobova A. Prospects for the Use of Electric Drives in Agricultural Tractors // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 659. P. 012045.
 9. Grisso R.D., Alley M.M., McClellan P. Precision Farming Tools: Variable-Rate Application // *Virginia Cooperative Extension Publication*. 2009. № 442–505.
 10. Rinaldi M., Brambilla M., Bisaglia C. Electrification of a Compact Agricultural Tractor: A Case Study // *Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 193. P. 1–11.
 11. Nadykto V., Cherepukhin V., Gridnev E. Crop cultivation with the use of constant technological line // *Biblioteka Fragmenta Agronomica (Poland)*. 1997. № 2B. P. 483–486.
 12. Pedersen H., Sørensen C., Oudshoorn F., McPhee J. User requirements for a wide span tractor for controlled traffic farming // *International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. CIOSTA XXXV Conference "From Effective to Intelligent Agriculture and Forestry"*. 2013. P. 134–136.
 13. Sönmez I, Kaplan M, Sönmez S. An investigation of seasonal changes in nitrate contents of soils and irrigation waters in greenhouses located in Antalya-Demre Region. *Asian Journal of Chemistry*, 2007; 19: 5639–5646.
 14. Chamen W.C.T. Controlled traffic farming – from worldwide research to adoption in Europe and its future prospects // *Acta Technologica Agriculturae*. 2015. №18. P. 64–73.
 15. Ojeniyi S.O, Adeniyi / O. Effect of poultry manure and NPK fertilizer on soil fertility and maize nutrient contents and yield at Akra southwestern Nigeria. *Proceedings of 25th Annual Conference of Soil Science Society of Nigeria (SSSN)*. Benin, 1999; pp.185–191.
 16. Al-Gaadi K.A., Tola E., Alameen A.A., Madugundu R., Marey S.A., Zeyada A.M., Edris M.K. Control and monitoring systems used in variable rate application of solid fertilizers: A review *Journal of King Saud University Science*, 2023; 35: 102574.
 17. Maleki M.R., Mouazen A.M., Ketelaere B.D., Ramon H., Merkx R., DeBaerdemaeker J. On-the-go variable-rate phosphorus fertilization based on a visible and near-infrared soil sensor. *Biosystem Engineering*, 2008; 99: 35–45.
 18. Bulgakov V., Kuvachov V., Olt J. Theoretical study on power performance of agricultural gantry systems // *Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation"*. 2019. Vol. 30. № 1. P. 0167-0175.
 19. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Mathematical modeling of the process of destruction of a soil mass with flat knives when using ground mortars to extinguish forest fires // *Handbook. Engineering magazine*. 2017. No. 12 (249). pp. 55–60.
 20. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Ivanov V.A. Investigation of the patterns of soil destruction during the operation of combined ground mortars for extinguishing forest fires // *Systems. Methods. Technologies*. 2017. No. 1 (33). pp. 146–151.
 21. Shapiro V.Ya., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Grigorev M.F. Theoretical study of the process of destruction of a soil mass by spherical knives when using combined structures of ground mortars for extinguishing forest fires // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine*. 2018. No. 1 (361). pp. 61–69.

References

1. Bakker T., van Asselt K., Bontsema J., Müller J., van Straten G. Systematic Design of an Autonomous Platform for Robotic Weeding // *Journal of Terramechanics*. 2010. Vol. 47. № 2. P. 63–73.
2. Bergerman M., Billingsley J., Reid J., van Henten E. Robotics in Agriculture and Forestry // *Springer Handbook of Robotics*. 2016. P. 1463–1492.
3. Van Bergeijk J., Goense D. Soil tillage resistance as tool to map soil type differences // Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E. (Eds.) *Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture*. Madison, Wisconsin: ASA-CSSA-SSSA, 1996. P. 605–616.
4. Vaughan B. How to determine an accurate soil testing laboratory // Clay D.E. et al. (Eds.) *Site Specific Management Guidelines SSMG 4*. Norcross, Georgia: Potash and Phosphate Institute, 1999.
5. Verschoore R., Pieters J.G., Seps T., Spriet Y., Vangeyte J. Development of a sensor for continuous soil resistance measurement // Stafford J., Werner A. (Eds.) *Precision Agriculture*. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2003. P. 689–695.