

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.483-494>

УДК 631.171



Оценка производительности беспилотных машинно-тракторных агрегатов

© 2024. И. А. Старостин , С. А. Давыдова, А. В. Ещин, Т. З. Годжаев
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва,
Российская Федерация

Достижению поставленной перед агропромышленным комплексом цели по переходу к высокопродуктивному, экологически чистому агрохозяйству способствует внедрение передовых цифровых, интеллектуальных производственных технологий и роботизированных систем. Учитывая это, а также мировые тенденции развития беспилотных мобильных средств, предложены три концептуальные модели развития беспилотных мобильных энергетических средств: создание универсальных беспилотных мобильных средств различных тяговых классов и мощности на базе серийно выпускающихся тракторов (концептуальная модель А), создание работающих группами универсальных беспилотных мобильных средств малой мощности (концептуальная модель В) и создание энергомодулей (концептуальная модель С). С целью определения дальнейших перспектив их использования осуществлены теоретические изыскания по вопросу оценки производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами предложенных концептуальных моделей. Исследования проводили на основе существующих общеизвестных методик и формул определения производительности. Проведенный анализ влияющих на производительность сельскохозяйственного агрегата при выполнении полевых операций факторов показывает, что при применении беспилотных мобильных средств может быть обеспечен рост производительности агрегата за счет увеличения коэффициента использования ширины захвата и времени основной работы за счет исключения затрат времени на отдых и личные нужды оператора, сокращения затрат времени при разворотах агрегата в конце гона. Разработанные методологические подходы к вопросу расчета производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами сельскохозяйственного назначения позволили оценить рост производительности агрегатов при использовании беспилотных мобильных средств предлагаемых концептуальных моделей. Применение беспилотных мобильных средств рассматриваемых концептуальных моделей может позволить повысить сменную производительность агрегатов для сплошной культивации по сравнению с традиционными пилотируемыми тракторами на уровень от 3 до 24 %.

Ключевые слова: цифровое сельское хозяйство, цифровые технологии, концепция, трактор, сельскохозяйственный агрегат, мобильное энергетическое средство, производительность сельскохозяйственного агрегата

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0002).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Старостин И. А., Давыдова С. А., Ещин А. В., Годжаев Т. З. Оценка производительности беспилотных машинно-тракторных агрегатов. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):483–494.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.483-494>

Поступила: 26.02.2024 Принята к публикации: 31.05.2024 Опубликовано онлайн: 26.06.2024

Performance evaluation of unmanned machine-tractor units

© 2024. Ivan A. Starostin , Svetlana A. Davydova, Aleksandr V. Eshchin,
Teimur Z. Godzhaev
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The implementation of advanced digital, intelligent production technologies and robotic systems contributes to the achievement of the goal set for the agro-industrial complex for transition to a highly productive, environmentally friendly agricultural economy. Taking this into account, as well as the global trends in the development of unmanned mobile vehicles, three conceptual models for the development of unmanned mobile power tools are proposed: the creation of universal unmanned mobile vehicles of various traction classes and power based on commercially available tractors (conceptual model A), the creation of universal unmanned low-power mobile devices working in groups (conceptual model B) and the creation of energy modules (conceptual model C). In order to determine further prospects for their use, theoretical studies have been carried out

on the issue of evaluating the productivity of agricultural aggregates in combination with unmanned mobile vehicles of the proposed conceptual models. The research was carried out on the basis of existing well-known methods and formulas for determining productivity. The analysis of factors affecting the productivity of an agricultural unit during field operations shows that when using unmanned mobile vehicles, an increase in the productivity of the unit can be ensured by increasing the utilization factor of the width of the grip and the time of main work by eliminating the time spent on rest and personal needs of the operator, reducing the time spent when turning the unit at the end of the rut. The developed methodological approaches to the issue of calculating the productivity of agricultural aggregates in combination with unmanned mobile agricultural vehicles made it possible to assess the increase in the productivity of aggregates using unmanned mobile means of the proposed conceptual models. The use of unmanned mobile vehicles of the considered conceptual models can increase the replaceable productivity of units for continuous cultivation compared with traditional manned tractors by a level from 3 to 24 %.

Keywords: digital agriculture, digital technologies, concept, tractor, agricultural unit, mobile energy facility, agricultural unit productivity

Acknowledgments: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0002).

The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Starostin I. A., Davydova S. A., Eshchin A. V., Godzhaev T. Z. Performance evaluation of unmanned machine-tractor units. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(3):483-494. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.483-494>

Received: 26.02.2024

Accepted for publication: 31.05.2024 Published online: 26.05.2024

Одним из приоритетных направлений научно-технологического развития сельского хозяйства является переход к высокопродуктивному, экологически чистому агрохозяйству. Достижению поставленной цели способствует внедрение передовых цифровых, интеллектуальных производственных технологий и роботизированных систем в АПК [1].

Учитывая мировые тенденции развития беспилотных мобильных средств [2], а также активное внедрение в сельскохозяйственное производство цифровых, информационных, интеллектуальных технологий [1, 3, 4] и роботизированных комплексов [5, 6, 7, 8] предлагается рассмотреть три концептуальные модели развития средств механизации сельского хозяйства:

- создание универсальных беспилотных мобильных средств различных тяговых классов и мощности на базе серийно выпускающихся тракторов (концептуальная модель А);

- создание универсальных беспилотных мобильных средств малой мощности, которые за счет их групповой работы (рой) [9] будут способны заменить всю номенклатуру применяющихся тракторов различных тяговых классов и мощности (концептуальная модель В);

- создание энергомодулей [10] (концептуальная модель С).

При реализации концептуальной модели А за базу принимаются серийно выпускающиеся сельскохозяйственные тракторы тяговых классов

от 0,6 до 8 в соответствии с ГОСТ 27021-86 (СТ СЭВ 628-85)¹, которые подвергаются соответствующей модернизации. При реализации концептуальной модели В за базу принимается мобильное энергетическое средство тягового класса 0,6, а при реализации концептуальной модели С базой является энергомодуль, соответствующий по своим тяговым характеристикам тракторам тягового класса 0,2.

Предполагается, что предложенные концептуальные модели беспилотных мобильных средств оснащаются комплексом систем, обеспечивающих возможность реализации полностью беспилотного управления. К данным системам относятся – системы беспилотного вождения с точностью до 0,02 м (достигается современными системами вождения); система управления трансмиссией с поддержанием оптимальной скорости при работе в загонке и на поворотах; система управления гидравлической системой мобильного энергетического средства с автоматическим подъемом рабочих органов сельскохозяйственного агрегата на разворотной полосе и их опусканием после осуществления разворота; система управления ВОМ мобильного энергетического средства; система управления настройками сельскохозяйственной машины (при их наличии); система мониторинга технического состояния узлов и агрегатов мобильного энергетического средства и сельскохозяйственной машины.

¹ГОСТ 27021-86 (СТ СЭВ 628-85). Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. М.: изд-во стандартов, 1986. 8 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294827/4294827535.pdf>

В настоящее время учеными и ведущими производителями сельскохозяйственной техники в равной степени прорабатываются все описанные концепции. Для определения дальнейших перспектив требуется проработать вопрос оценки эффективности применения предложенных концептуальных моделей беспилотных мобильных средств сельскохозяйственного назначения.

При комплектовании машинно-тракторного парка организации выбор мобильных энергетических средств для выполнения технологических операций осуществляется по двум основным подходам. Первый подход предусматривает использование мобильных энергетических средств, позволяющих за счет своей высокой производительности осуществлять технологические операции в сжатые сроки наиболее напряженного периода. Второй подход предусматривает использование мобильных энергетических средств, позволяющих минимизировать затраты на выполнение всего комплекса работ [11].

Произведенный анализ литературных источников показывает, что применение беспилотных мобильных средств позволяет существенно повысить производительность и качество проведения работ [7, 12], исключить тяжелый ручной труд и участие человека в выполнении вредных для здоровья технологических операций [8, 11, 13]. При этом в большинстве случаев вызывает вопросы экономическая эффективность применения данной техники [5, 6, 8], в связи с чем при оценке экономических показателей необходим комплексный подход, учитывающий, в частности, влияние применения современных технологий на производительность. Существующие подходы к расчету производительности машинно-тракторных агрегатов не учитывают эффекта от использования современных систем цифрового управления, позволяющих в дальнейшем создавать беспилотные мобильные средства. В связи с этим возникают затруднения при теоретической оценке эффекта от применения разрабатываемой техники, в частности при сравнительной оценке производительности машинно-тракторных агрегатов в составе с перспективными беспилот-

ными мобильными средствами и существующими пилотируемыми тракторами.

Цель исследований – разработка методологических подходов к оценке производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами различных концептуальных моделей путем выявления влияния на производительность их компоновочных схем и применения цифровых систем управления агрегатом.

Задачи исследования:

- анализ методологических подходов к оценке производительности сельскохозяйственных агрегатов;
- выявление факторов, оказывающих влияние на производительность сельскохозяйственных агрегатов;
- разработка методологических подходов к оценке производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными энергетическими средствами;
- проведение сравнительной оценки производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с предлагаемыми концептуальными моделями беспилотных мобильных энергетических средств в сравнении с использованием традиционных пилотируемых тракторов.

Научная новизна – разработка методологических подходов к оценке производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами предложенных концептуальных моделей при выполнении полевых работ.

Материал и методы. При проведении исследований применяли существующие общеизвестные методики определения производительности сельскохозяйственного агрегата^{2, 3, 4} [14, 15, 16], а также данные об эффективности использования систем параллельного вождения [13]. Сравнительную оценку производили для однотипных сельскохозяйственных агрегатов с классическими мобильными средствами, управляемыми оператором, и беспилотными мобильными средствами предложенных концептуальных моделей при оснащении их комплексом систем, обеспечивающих возможность реализации полностью беспилотного управления.

²Зангиев А. А., Скороходов А. Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка. Издание 3-е, Стереотипное. СПб.: изд-во "Лань", 2018. 464 с.

³Ряднов А. И. Эксплуатация машинно-тракторного парка: курс лекций. Изд. второе, доп. и перераб. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2020. 180 с.

⁴Эксплуатация машинно-тракторного парка. Г. Г. Маслов, Е. М. Юдина, Н. А. Ринас [и др.]. Краснодар: Кубанский ГАУ имени И. Т. Трубилина, 2022. 205 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rpgunh> EDN: RPGUNH

Результаты и их обсуждение. В общем случае расчетная производительность агрегата за смену определяется по формуле⁵:

$$W = 0,1 \cdot B_p \cdot \beta \cdot V_p \cdot \tau \cdot T_{см}, \quad (1)$$

где B_p – рабочая ширина захвата агрегата, м; β – коэффициент использования ширины захвата; V_p – рабочая скорость движения агрегата, км/ч; τ – коэффициент использования времени смены; $T_{см}$ – время смены, ч.

Рабочая ширина захвата агрегата зависит от типа используемой сельскохозяйственной машины, которая зависит от множества факторов, включая тяговый класс трактора.

Коэффициент использования ширины захвата для базового трактора определяется по формуле⁶:

$$\beta_6^i = \frac{B_p^i - B_{пб}}{B_p^i}, \quad (2)$$

где B_p^i – рабочая ширина захвата агрегата при работе с трактором i -го тягового класса, м;

$B_{пб}$ – ширина перекрытия при использовании базового трактора, м.

При использовании беспилотных мобильных средств за счет применения точных систем вождения ширина перекрытия будет отличаться от базовой модели. Например, в соответствии с существующими агротехническими требованиями к проведению сплошной культивации перекрытие между смежными проходами

агрегата должно быть не менее 0,10...0,15 м [12]. Современные высокоточные системы геопозиционирования уже давно доказали свою эффективность и позволяют снизить ширину перекрытия до 0,02 м [13].

В таком случае будет справедливо неравенство:

$$B_{пб} > B_{пбс}, \quad (3)$$

где $B_{пбс}$ – ширина перекрытия при использовании беспилотных мобильных средств, м.

Таким образом, применение беспилотных (роботизированных) мобильных средств должно позволить увеличить значение коэффициента использования ширины захвата агрегата по сравнению с базовыми серийно выпускающимися тракторами:

$$\beta_6 < \beta_{6с}, \quad (4)$$

где $\beta_{6с}$ – коэффициент использования ширины захвата при применении беспилотных мобильных средств.

Среди рассматриваемых концептуальных моделей коэффициент использования ширины захвата будет значительно отличаться при применении беспилотных мобильных средств модели В, поскольку эквивалентное число агрегатов будет увеличиваться с ростом тягового класса заменяемого базового трактора, что приведет к увеличению числа смежных проходов агрегатов (рис. 1).

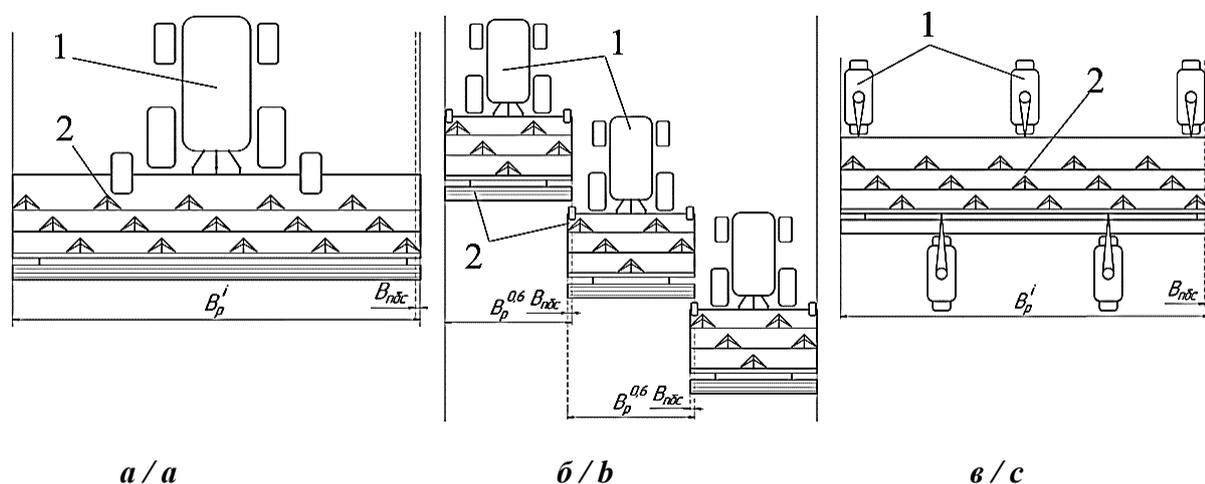


Рис. 1. Схема для расчета коэффициента использования ширины захвата агрегата в составе с беспилотными мобильными средствами: а – модель А; б – модель В; в – модель С; 1 – мобильное энергетическое средство, 2 – сельскохозяйственная машина /

Fig. 1. A scheme for calculating the utilization factor of the gripping width of the unit in combination with unmanned mobile vehicles: а – model А; б – model В; в – model С; 1 – mobile energy vehicle, 2 – agricultural machine

⁵Зангиев А. А., Скороходов А. Н. Указ. соч.

⁶Там же.

Как видно из схемы, при одинаковой ширине перекрытия для всех трех концептуальных моделей $B_{пбс}$ ширина захвата и производительность агрегата с беспилотным мобильным средством в концептуальной модели В при работе в одинаковых полевых условиях будет меньше, поскольку число смежных проходов на поле такого агрегата увеличится.

Поскольку при работе с беспилотными мобильными средствами в концептуальных моделях А и С используются практически одинаковые сельскохозяйственные машины одной ширины захвата, что также видно из схемы, коэффициент использования ширины захвата в концептуальных моделях А и С будет одинаковым, т. е. $\beta_A^i = \beta_C^i$, и определится по формуле:

$$\beta_A^i = \beta_C^i = \frac{B_p^i - B_{пбс}}{B_p^i}. \quad (5)$$

Коэффициент использования ширины захвата при применении беспилотных мобильных средств концептуальной модели В будет являться частным случаем использования беспилотных мобильных средств концептуальной модели А и определяться по формуле:

$$\beta_B = \frac{B_p^{0,6} - B_{пбс}}{B_p^{0,6}}. \quad (6)$$

В таком случае при любом $i > 0,6$ верно неравенство:

$$\beta_B < \beta_A^i = \beta_C^i. \quad (7)$$

Таким образом, при использовании агрегатов с беспилотными мобильными средствами различных концептуальных моделей с тяговыми классами выше 0,6 коэффициент использования ширины захвата агрегата с беспилотным мобильным средством в концептуальной модели В будет ниже.

Рабочая скорость агрегата зависит от конкретной марки применяемого трактора и определяется в первую очередь агротехническими требованиями [17], поэтому при проведении теоретических исследований считаем, что беспилотные средства всех рассматриваемых концептуальных моделей развития и традиционный пилотируемый трактор будут иметь одинаковую рабочую скорость.

Для оценки непроизводительных потерь времени используется коэффициент времени смены τ , который определяется по формуле⁷:

$$\tau = \frac{T_0}{T_{см}}, \quad (8)$$

где T_0 – время основной работы агрегата за смену, ч; $T_{см}$ – продолжительность смены, ч.

Время основной работы агрегата за смену T_0 рассчитывается по формуле⁸:

$$T_0 = \frac{T_{см} - (T_{пз} + T_{лн})}{(1 + K_{пов})(1 + K_{обс} + K_{отд}) \cdot 60}, \quad (9)$$

где $T_{пз}$ – время выполнения подготовительно-заключительных операций на агрегате, ч;

$T_{лн}$ – время на личные надобности оператора, ч;

$K_{отд}$ – коэффициент времени отдыха;

$K_{обс}$ – коэффициент обслуживания агрегата за смену; $K_{пов}$ – коэффициент затрат времени на повороты агрегата в конце гона.

В случае использования беспилотных средств исключаются затраты времени на личные надобности оператора и отдых. В таком случае время основной работы агрегатов за смену при использовании беспилотных средств $T_{обс}$ определяется по формуле:

$$T_{обс} = \frac{T_{см} - T_{пз}}{(1 + K_{пов})(1 + K_{обс}) \cdot 60}. \quad (10)$$

Коэффициент затрат времени на повороты агрегата в конце гона $K_{пов}$ при использовании трактора и беспилотных мобильных средств различных концептуальных моделей развития будет отличаться.

В общем случае коэффициент затрат времени на повороты агрегата в конце гона $K_{пов}$ определяется по формуле:

$$K_{пов} = \frac{t_{пов} \cdot V_p}{L}, \quad (11)$$

где $t_{пов}$ – время, затрачиваемое на поворот, с; V_p – рабочая скорость агрегата, м/с; L – длина гона, м.

Время, затрачиваемое на поворот $t_{пов}$, зависит от способа движения и вида поворота [14] и может быть определено по формуле:

$$t_{пов} = \frac{L_{пов}}{V_{пов}}, \quad (12)$$

где $L_{пов}$ – путь, проходимый агрегатом при повороте, м; $V_{пов}$ – скорость движения агрегата при совершении поворота, м/с.

Поскольку скорость движения агрегата при повороте сложно повысить, принимаем, что она одинакова как при использовании базового трактора, так и в случае применения беспилотных мобильных средств.

Путь, проходимый агрегатом при повороте, зависит от кинематических свойств агрегата и выбранного способа движения [15, 18, 19, 20]. При проведении расчетов принимаем челночный способ движения агрегата с петлевыми грушевидными разворотами (рис. 2).

⁷Зангиев А. А., Скороходов А. Н. Указ. соч.

⁸Там же.

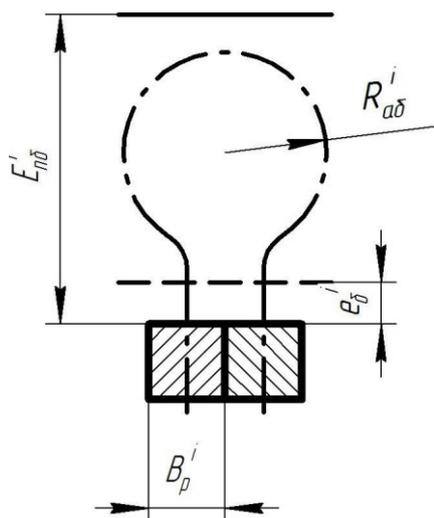


Рис. 2. Расчетная схема определения пути, проходимого агрегатом с базовым трактором i -го тягового класса при осуществлении петлевого грушевидного поворота: $R_{аб}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м; $e_б^i$ – длина выезда и въезда агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м; B_p^i – рабочая ширина захвата агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м; $E_{пб}^i$ – ширина поворотной полосы агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м /

Fig. 2. Calculation scheme for determining the path traversed by an aggregate with a basic tractor of the i -th traction class during a looped pear-shaped turn: $R_{аб}^i$ – the minimum turning radius of the unit with a basic tractor of the i -th traction class, m; $e_б^i$ – the length of the exit and entrance of the unit with a basic tractor of the i -th traction class, m; B_p^i – the working width of the unit with a basic tractor of the i -th traction class, m; $E_{пб}^i$ – the width of the turning lane of the unit with a basic tractor of the i -th traction class, m

В таком случае проходимый агрегатом с базовым трактором путь при повороте определяется по формуле:

$$L_{повб}^i = 6R_{аб}^i + 2e_б^i, \quad (13)$$

где $R_{аб}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м; $e_б^i$ – длина выезда и въезда агрегата с базовым трактором i -го тягового класса (расстояние от

центра агрегата до самых крайних рабочих органов машины), м.

Для МТА с навесными рабочими машинами наименьший радиус поворота может быть принят равным конструктивному радиусу поворота трактора.

Кинематическая схема поворота беспилотных мобильных средств различных концептуальных моделей представлена на рисунке 3.

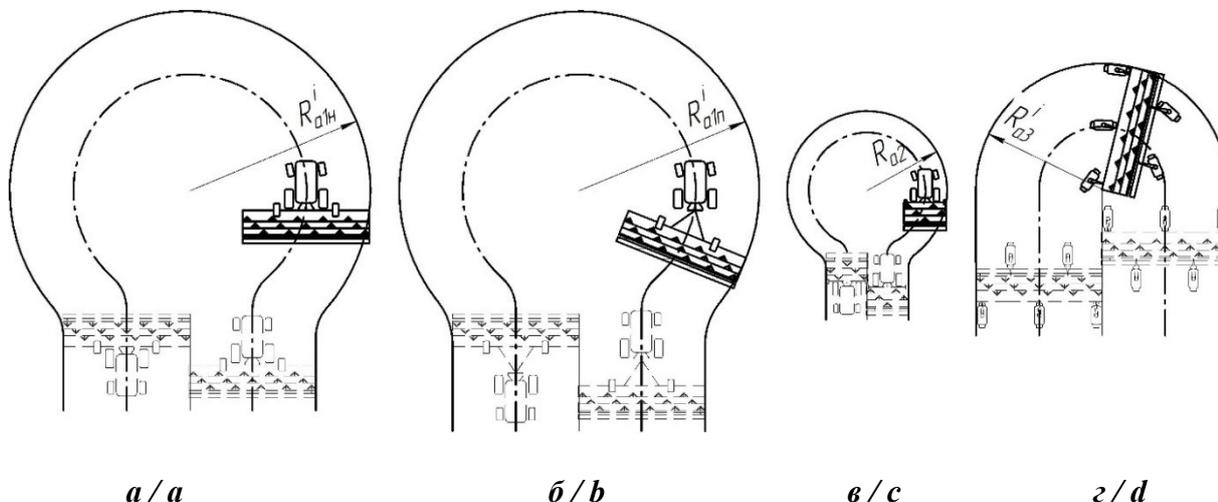


Рис. 3. Кинематическая схема поворота агрегатов на основе беспилотных мобильных средств: а – концептуальная модель А с навесной сельскохозяйственной машиной; б – концептуальная модель А с прицепной сельскохозяйственной машиной; в – концептуальная модель В; г – концептуальная модель С; $R_{аАн}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата в составе из беспилотного мобильного средства i -го тягового класса концептуальной модели А и навесной сельскохозяйственной машины, м; $R_{аАп}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата в составе из беспилотного мобильного средства i -го тягового класса концептуальной модели А и прицепной сельскохозяйственной машины, м; $R_{аВ}$ – минимальный радиус поворота агрегата в составе с беспилотным мобильным средством концептуальной модели В, м; $R_{аС}$ – минимальный радиус поворота агрегата в составе с энергомодулями концептуальной модели С /

Fig. 3. Kinematic scheme of rotation of units based on unmanned mobile vehicles: a – conceptual model A with a mounted agricultural machine; b – conceptual model A with a trailed agricultural machine; c – conceptual model B; d – conceptual model C; $R_{аАн}^i$ – the minimum turning radius of the unit consisting of an unmanned mobile vehicle of the i -th traction class of the conceptual model A and a mounted agricultural machine, m; $R_{аАп}^i$ – the minimum turning radius of the unit consisting of an unmanned mobile vehicle of the i -th traction class of the conceptual model A and a trailed agricultural machine, m; $R_{аВ}$ – the minimum turning radius of the unit in combination with an unmanned mobile vehicle of the conceptual model B, m; $R_{аС}$ – the minimum turning radius of the unit in the composition with energy modules of the conceptual model C

Поскольку кинематические свойства агрегата с базовым трактором i -го тягового класса и беспилотным мобильным средством в концептуальной модели А i -го тягового класса одинаковые, то минимальный радиус поворота мобильного средства в концептуальной модели А с навесной сельскохозяйственной машиной будет равен минимальному конструктивному радиусу поворота базового трактора:

$$R_{aAn}^i = R_{aBn}^i = R_{\phi}^i, \quad (14)$$

где R_{aAn}^i – минимальный радиус поворота агрегата в составе с мобильным средством концептуальной модели А i -го тягового класса и навесной сельскохозяйственной машиной, м; R_{aBn}^i – минимальный радиус поворота агрегата в составе с базовым трактором i -го тягового класса и навесной сельскохозяйственной машиной, м; R_{ϕ}^i – минимальный конструктивный радиус поворота базового трактора i -го тягового класса, м.

При составлении широкозахватных агрегатов с прицепными сельскохозяйственными машинами радиус поворота принимается равным ширине захвата агрегата, т. е.

$$R_{aAn}^i = R_{aBn}^i = B_p^i, \quad (15)$$

где R_{aAn}^i – минимальный радиус поворота агрегата в составе с базовым трактором i -го тягового класса и прицепной сельскохозяйственной машиной, м; R_{aBn}^i – минимальный радиус поворота агрегата в составе с беспилотным мобильным средством концептуальной модели А i -го тягового класса и прицепной сельскохозяйственной машиной, м.

При использовании беспилотных мобильных средств в концептуальной модели В, как частного случая использования беспилотных мобильных средств концептуальной модели А, минимальный радиус поворота беспилотных мобильных средств концептуальной модели В будет равен минимальному конструктивному радиусу поворота базового трактора тягового класса 0,6:

$$R_{aB}^{0,6} = R_{a\phi}^{0,6} = R_{\phi}^{0,6}, \quad (16)$$

где $R_{\phi}^{0,6}$ – минимальный радиус поворота базового трактора тягового класса 0,6, м.

Конструкция агрегата на базе энергомодулей в концептуальной модели С позволяет реализовать поворот относительно центра агрегата, однако, при выполнении полевых работ челночным способом наиболее оптимальным является поворот относительно крайней точки агрегата с радиусом поворота, равным ширине

захвата агрегата. Поэтому при использовании агрегатов с энергомодулями радиус поворота принимаем равным ширине захвата агрегата:

$$R_{aC}^i = B_p^i. \quad (17)$$

В таком случае использование энергомодулей модели С позволяет по сравнению с беспилотными средствами модели А, агрегатируемыми с не широкозахватными агрегатами, обеспечить меньший радиус поворота, проходимость при повороте путь, и затрачиваемое на поворот время.

Длина выезда агрегата e_{ϕ}^i характеризует расстояние, на которое необходимо отвести центр агрегата для выведения рабочих органов машины на контрольную линию. В общем случае для навесных сельскохозяйственных машин она рассчитывается по формуле:

$$e_{\phi}^i = l_{\phi}^i + l_{\text{мнб}}^i, \quad (18)$$

где l_{ϕ}^i – кинематическая длина базового трактора i -го тягового класса, м; $l_{\text{мнб}}^i$ – кинематическая (габаритная) длина навесной машины для работы с базовым трактором i -го тягового класса, м.

При использовании однотипных навесных сельскохозяйственных машин их кинематическая длина считается одинаковой:

$$l_{\text{мб}}^i = l_{\text{ма}}^i = l_{\text{мв}}^i = l_{\text{мс}}^i. \quad (19)$$

В случае использования прицепных сельскохозяйственных машин длина выезда агрегата рассчитывается по формуле:

$$e_{\phi}^i = l_{\phi}^i + l_{\text{мпб}}^i, \quad (20)$$

где $l_{\text{мпб}}^i$ – кинематическая (габаритная) длина прицепной машины для работы с базовым трактором i -го тягового класса, м.

Как видно из представленной на рисунке 3 схемы поворота, кинематическая длина прицепной машины больше, чем при использовании навесной машины той же ширины захвата.

При реализации модели В, как частного случая использования концептуальной модели В, длина выезда агрегата $e_{\phi}^{0,6}$ определяется по формуле:

$$e_{\phi}^{0,6} = l_{\phi}^{0,6} + l_{\text{мнб}}^{0,6}, \quad (21)$$

где $l_{\phi}^{0,6}$ – кинематическая длина базового трактора тягового класса 0,6, м; $l_{\text{мнб}}^{0,6}$ – кинематическая (габаритная) длина навесной машины для работы с мобильным средством тягового класса 0,6, м.

При реализации концептуальной модели С за счет энергомодулей, расположенных непосред-

ственно на раме сельскохозяйственной машины, длина выезда агрегата e_C^i будет равна кинематической длине сельскохозяйственной машины, т. е. $e_C^i = l_{MC}^i$.

В этом случае минимальный радиус поворота агрегата в составе с энергомодулями модели С составит половину длины дуги окружности с радиусом R_{aC}^i , а путь, проходимый агрегатом при повороте, определится по формуле:

$$L_{пов С}^i = \pi \cdot R_{aC}^i + 2 \cdot l_{MC}^i = \pi \cdot B_p^i + 2 \cdot l_{MC}^i \quad (22)$$

Тогда коэффициент затрат времени на повороты агрегата с энергомодулями модели С в конце гона $K_{пов С}^i$ будет определяться по формуле:

$$K_{пов С}^i = \frac{\pi \cdot B_p^i + 2 \cdot l_{MC}^i}{L} \quad (23)$$

Таким образом, коэффициент затрат времени на повороты агрегатов с беспилотными мобильными средствами на базе энерго-

модулей напрямую связан с шириной захвата и кинематической длиной сельскохозяйственной машины.

С использованием предложенных методологических подходов осуществлена сравнительная оценка производительности агрегатов для сплошной культивации почвы в составе с беспилотными мобильными средствами предлагаемых концептуальных моделей беспилотных мобильных средств по сравнению с традиционным пилотируемым трактором (базовый трактор).

Агрегат для сплошной культивации почвы формировался из мобильного средства и культиватора для сплошной обработки почвы. Расчетные значения коэффициента использования ширины захвата агрегатов для сплошной культивации приведены в таблице 1.

Расчетные значения коэффициента затрат времени на повороты агрегата в конце гона и коэффициента использования времени смены приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 1 – Коэффициент использования ширины захвата агрегатов для сплошной культивации / Table 1 – The coefficient of use of the width of the gripping units for continuous cultivation

Модель / Model	Тяговый класс / Traction class						
	1,4	2	3	4	5	6	8
А	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
В	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
С	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Базовый трактор / Basic tractor	0,95	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99

Таблица 2 – Расчетные значения коэффициента затрат времени на повороты агрегата в конце гона / Table 2 – Calculated values of the coefficient of time spent on the rotation of the unit at the end of the run

Модель / Model	Тяговый класс / Traction class						
	1,4	2	3	4	5	6	8
А	0,06	0,08	0,09	0,09	0,11	0,12	0,15
В	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
С	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,09
Базовый трактор / Basic tractor	0,06	0,08	0,09	0,09	0,11	0,12	0,15

Таблица 3 – Расчетные значения коэффициента использования времени смены / Table 3 – Calculated values of the shift time utilization factor

Модель / Model	Тяговый класс / Traction class						
	1,4	2	3	4	5	6	8
А	0,90	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,83
В	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
С	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,87
Базовый трактор / Basic tractor	0,83	0,81	0,80	0,80	0,79	0,79	0,77

С учетом полученных расчетных значений рассчитана сменная производительность агрегатов (табл. 4), а также осуществлена сравнительная оценка производительности агрегатов для сплошной культивации в составе с беспилотными мобильными средствами раз-

личных концептуальных моделей относительно агрегатов в составе с традиционными пилотируемыми тракторами соответствующих тяговых классов в форме процента прироста сменной производительности (рис. 4).

Таблица 4 – Расчетные значения сменной производительности агрегатов, га/см
Table 4 – Calculated values of the replaceable productivity of aggregates, ha/cm

Тяговый класс / Traction class	Модель / Model			Базовый трактор / Basic tractor
	A	B	C	
1,4	28,79	26,07	26,72	25,32
2	42,17	39,1	44,31	37,61
3	55,92	52,13	58,77	50,17
4	69,67	78,2	73,06	63,02
5	82,49	91,23	86,81	74,87
6	109,23	117,29	107,58	99,45
8	159,84	169,42	167,76	145,82

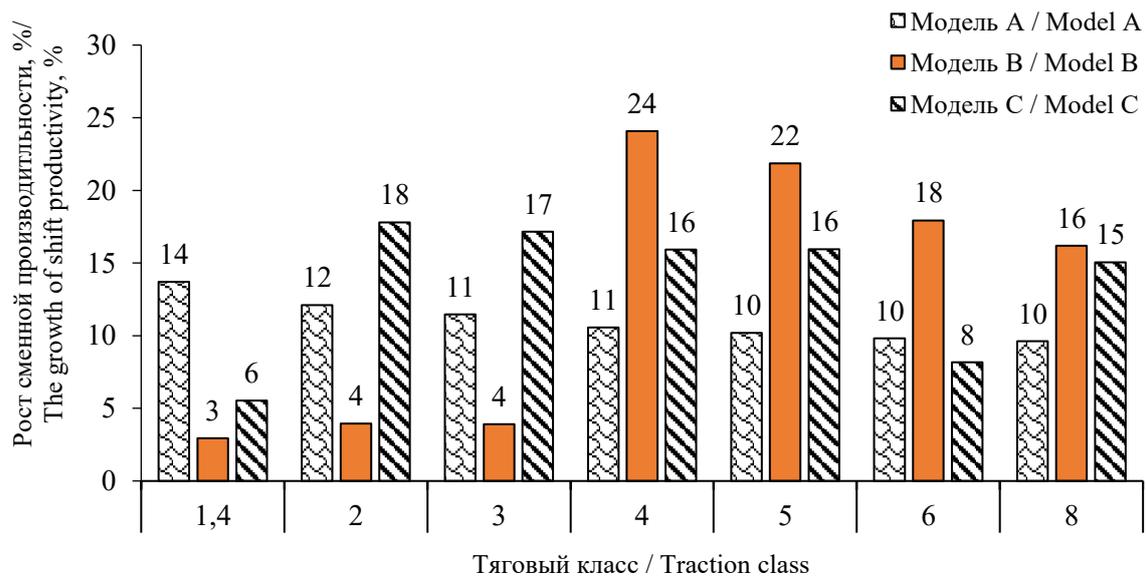


Рис. 4. Процент прироста сменной производительности агрегатов для сплошной культивации в составе с беспилотными мобильными средствами различных концептуальных моделей относительно агрегатов в составе с традиционными пилотируемыми тракторами соответствующих тяговых классов / Fig. 4. Percentage increase in the replaceable productivity of units for continuous cultivation in combination with unmanned mobile vehicles of various conceptual models relative to units in combination with traditional manned tractors of the corresponding traction classes

Выводы. Проведенный анализ влияющих на производительность сельскохозяйственного агрегата при выполнении полевых операций факторов показывает, что при применении беспилотных мобильных средств может быть обеспечен рост производительности агрегата за счет увеличения коэффициента использования ширины захвата и времени основной работы за счет исключения затрат времени на

отдых и личные нужды оператора, сокращения затрат времени при разворотах агрегата в конце гона. Разработанные методологические подходы к вопросу расчета производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами сельскохозяйственного назначения предусматривают изменения в формулах расчета коэффициента использования времени основной

работы путем исключения затрат времени на отдых и личные нужды оператора, сокращения затрат времени при разворотах агрегата в конце гона, что позволяет более точно оценить рост производительности агрегатов при использовании беспилотных мобильных средств различных концептуальных моделей и осуществить их сравнительную оценку.

С использованием предложенных методологических подходов осуществлена сравнительная оценка производительности агрегатов для сплошной культивации почвы в составе с беспилотными мобильными средствами пред-

лагаемых концептуальных моделей беспилотных мобильных средств по сравнению с традиционным пилотируемым трактором, которая показывает, что применение беспилотных мобильных средств рассматриваемых концептуальных моделей может позволить повысить сменную производительность агрегатов для сплошной культивации по сравнению с традиционными пилотируемыми тракторами на уровень от 3 до 24 % в зависимости от применяемой концептуальной модели беспилотного мобильного средства и тягового класса, в котором осуществляется сравнение.

Список литературы

1. Лобачевский Я. П., Бейлис В. М., Ценч Ю. С. Аспекты цифровизации Системы технологий и машин. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019;(3(36)):40–45. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192528> EDN: RLCДНО
2. Rondelli V., Franceschetti B., Mengoli D. A Review of Current and Historical Research Contributions to the Development of Ground Autonomous Vehicles for Agriculture. Sustainability 2022;14(15):9221. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159221>
3. Аксенов А. Г. Анализ интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сельском хозяйстве. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019;(3(36)):46–51. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192529> EDN: CECДАН
4. Старостин И. А., Давыдова С. А., Ещин А. В. Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами: формирование структуры. Агроинженерия. 2023;25(3):49–56. DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56> EDN: SUYDSC
5. Fountas S., Mylonas N., Malounas I., Rodias E., Hellmann Santos C., Pekkeriet E. Agricultural Robotics for Field Operations. Sensors. 2020;20(9):2672. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092672>
6. Lytridis C., Kaburlasos V. G., Pachidis T., Manios M., Vrochidou E., Kalampokas T., Chatzistamatis S. An Overview of Cooperative Robotics in Agriculture. Agronomy. 2021;11(9):1818. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>
7. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021;15(4):6–10. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10> EDN: YFRZDV
8. Starostin I. A., Eshchin A. V., Davydova S. A. Global trends in the development of agricultural robotics. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2023;(1138):012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1138/1/012042>
9. Ramírez-Ochoa D.-D., Pérez-Domínguez L. A., Martínez-Gómez E.-A., Luviano-Cruz D. PSO, a Swarm Intelligence-Based Evolutionary Algorithm as a Decision-Making Strategy: A Review. Symmetry. 2022;14(3):455. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030455>
10. Grimstad L., From P. J. The Thorvald II Agricultural Robotic System. Robotics. 2017;6(4):24. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics6040024>
11. Союнов А. С., Прокопов С. П., Головин А. Ю., Сабиев У. К., Мальцева Е. И. Изыскание современных факторов, влияющих на эффективность работы машинно-тракторных агрегатов. Вестник Омского государственного аграрного университета. 2021;(4(44)):232–240. DOI: https://doi.org/10.48136/2222-0364_2021_4_232 EDN: AIDMXZ
12. Старовойтов С. И., Ценч Ю. С., Коротченя В. М., Личман Г. И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020;14(1):16–21. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21> EDN: HYFQAN
13. Бобков С. И. Эффективность навигационных систем при проведении сельскохозяйственных работ. Техника и оборудование для села. 2020;(3(273)):8–12. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-3-8-12> EDN: AUCOEA
14. Маршанин Е. В., Сурин Р. О., Михайлов А. В., Беляков Д. В., Кузнецов Е. Е., Щитов С. В. Оценка влияния физико-механических свойств почвы на производительность колёсного агрегата. АгроЭкоИнфо. 2023;(3(57)):23. Режим доступа: <https://elibrary.ru/iwovnk> EDN: IWOVNK
15. Damanauskas V., Janulevičius A. Validation of Criteria for Predicting Tractor Fuel Consumption and CO2 Emissions When Ploughing Fields of Different Shapes and Dimensions. AgriEngineering. 2023;5(4):2408–2422. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040148>

16. Мардарьев С. Н., Акимов А. П., Медведев В. И., Зайцев П. В., Казаков Ю. Ф., Юнусов Г. С., Ларкин С. В. Основные параметры работы трактора К-424 (Кирюша) в составе пахотного агрегата в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018;13(2(49)):118–123. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b3508d43df482.45257283 EDN: TMENEW
17. Лобачевский Я. П., Лонин С. Э., Алексеев И. С., Гончаров Н. Т., Афонина И. И., Ильченко Е. Н. Разработка алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного почвообрабатывающего агрегата. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019;13(2):48–52. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-6-48-52> EDN: PLAHMR
18. Wang Q., He J., Lu C., Wang C., Lin H., Yang H., Li H., Wu Z. Modelling and Control Methods in Path Tracking Control for Autonomous Agricultural Vehicles: A Review of State of the Art and Challenges. Applied Sciences. 2023;13(12):7155. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127155>
19. Пухов Е. В., Мешкова С. С., Кочкин С. С. Разработка имитационной модели движения сельскохозяйственных агрегатов на поле. Международный технико-экономический журнал. 2022;(3):16–26. DOI: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2022-84-3-16-26> EDN: GKLIMZ
20. Han X., Kim H.-J., Jeon C. W., Kim J. H. Simulation Study to Develop Implement Control and Headland Turning Algorithms for Autonomous Tillage Operations. Journal of Biosystems Engineering. 2019;44(1):245–257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-019-00035-9>

References

1. Lobachevskiy Ya. P., Beylis V. M., Tsench Yu. S. Digitization aspects of the system of technologies and machines. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019;(3(36)):40–45. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192528>
2. Rondelli V., Franceschetti B., Mengoli D. A Review of Current and Historical Research Contributions to the Development of Ground Autonomous Vehicles for Agriculture. *Sustainability* 2022;14(15):9221. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159221>
3. Aksenov A. G. Analysis of intelligent decision support systems in agriculture. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019;(3(36)):46–51. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192529>
4. Starostin I. A., Davydova S. A., Eshchin A. V. Intelligent agricultural robot control system: structure formation. *Agroinzheneriya = Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(3):49–56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>
5. Fountas S., Mylonas N., Malounas I., Rodias E., Hellmann Santos C., Pekkeriet E. Agricultural Robotics for Field Operations. *Sensors*. 2020;20(9):2672. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092672>
6. Lytridis C., Kaburlasos V. G., Pachidis T., Manios M., Vrochidou E., Kalampokas T., Chatzistamatis S. An Overview of Cooperative Robotics in Agriculture. *Agronomy*. 2021;11(9):1818. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>
7. Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
8. Starostin I. A., Eshchin A. V., Davydova S. A. Global trends in the development of agricultural robotics. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2023;(1138):012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1138/1/012042>
9. Ramírez-Ochoa D.-D., Pérez-Domínguez L. A., Martínez-Gómez E.-A., Luviano-Cruz D. PSO, a Swarm Intelligence-Based Evolutionary Algorithm as a Decision-Making Strategy: A Review. *Symmetry*. 2022;14(3):455. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030455>
10. Grimstad L., From P. J. The Thorvald II Agricultural Robotic System. *Robotics*. 2017;6(4):24. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics6040024>
11. Soyunov A. S., Prokopov S. P., Golovin A. Yu., Sabiev U. K., Maltseva E. I. The investigation of modern factors affecting the efficiency of machine and tractor aggregates. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Omsk SAU*. 2021;(4(44)):232–240. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.48136/2222-0364_2021_4_232
12. Starovoytov S. I., Tsench Yu. S., Korotchenya V. M., Lichman G. I. Technical Systems for Digital Soil Quality Control. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(1):16–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21>
13. Bobkov S. I. Efficiency of navigation systems when performing agricultural works. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(3(273)):8–12. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-3-8-12>
14. Marshanin E. V., Surin R. O., Mikhaylov A. V., Belyakov D. V., Kuznetsov E. E., Shchitov S. V. Assessment of the influence of the physical and mechanical properties of the soil on the performance of the wheel unit. *AgroEkoInfo = AgroEcoInfo*. 2023;(3(57)):23. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/iwovnk>

15. Damanauskas V., Janulevičius A. Validation of Criteria for Predicting Tractor Fuel Consumption and CO₂ Emissions When Ploughing Fields of Different Shapes and Dimensions. *AgriEngineering*. 2023;5(4):2408–2422. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040148>
16. Mardar'ev S. N., Akimov A. P., Medvedev V. I., Zaytsev P. V., Kazakov Yu. F., Yunusov G. C., Larkin S. V. Main parameters of tractor K-424 (Kiryusha) work in the composition of the aperry unit in the conditions of adaptive landscape agriculture. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2018;13(2(49)):118–123. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b3508d43df482.45257283
17. Lobachevsky Ya. P., Lonin S. E., Alekseev I. S., Goncharov N. T., Afonina I. I., Il'chenko E. N. Development of Algorithms and Software Systems for Motion Control of a Robotic Tillage Unit. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2019;13(2):48–52. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-6-48-52>
18. Wang Q., He J., Lu C., Wang C., Lin H., Yang H., Li H., Wu Z. Modelling and Control Methods in Path Tracking Control for Autonomous Agricultural Vehicles: A Review of State of the Art and Challenges. *Applied Sciences*. 2023;13(12):7155. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127155>
19. Pukhov E. V., Meshkova S. S., Kochkin S. S. Development of a simulation model of the movement of agricultural aggregates in the field. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal*. 2022;(3):16–26. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2022-84-3-16-26>
20. Han X., Kim H.-J., Jeon C. W., Kim J. H. Simulation Study to Develop Implement Control and Headland Turning Algorithms for Autonomous Tillage Operations. *Journal of Biosystems Engineering*. 2019;44(1):245–257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-019-00035-9>

Сведения об авторах

✉ **Старостин Иван Александрович**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозирования систем машин и технологий в АПК, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>, e-mail: starwan@yandex.ru

Давыдова Светлана Александровна, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории прогнозирования систем машин и технологий в АПК, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

Ещин Александр Вадимович, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозирования систем машин и технологий в АПК, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

Годжаев Теймур Захидович, аспирант, заведующий сектором моделирования и оптимизации мобильных энергосредств, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4496-0711>

Information about the authors

✉ **Ivan A. Starostin**, PhD in Engineering, senior researcher, the Laboratory of Forecasting of Machine Systems and Technologies in the Agroindustrial Complex, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>, e-mail: starwan@yandex.ru

Svetlana A. Davydova, PhD in Engineering, leading researcher, the Laboratory of Forecasting of Machine Systems and Technologies in the Agroindustrial Complex, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

Aleksandr V. Eshchin, PhD in Engineering, senior researcher, the Laboratory of Forecasting of Machine Systems and Technologies in the Agroindustrial Complex, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

Teimur Z. Godzhaev, graduate student, Head of the sector of Modeling and optimization of mobile energy facilities, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4496-0711>

✉ – Для контактов / Corresponding author