

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ4

Мухаметдинов А.М., Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М. Обоснование параметров дискретных элементов цифровой модели почвенной среды.....4	4
Комоедов А.Д. Исследование автоматизированного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью.....18	18
Терёхин М.А. Анализ конструктивных особенностей однодисковых сошников современных зерновых сеялок33	33
Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Разработка и исследование энергоэффективного светодиодного фитооблучателя с эргономичным управлением47	47

РАЗДЕЛ 2. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АПК62

Сафиуллин Р.Р., Сафиуллин Р.Н., Хохлов А.В. Комплексная оценка эффективности процесса перевозки с применением интегрированных интеллектуальных технологий62	62
Галышев Ю.В., Ло Синьяо, Абызов О.В., Зайцев А.Б., Иванов А.К. Результаты численного моделирования рабочего процесса автотракторного газодизеля, работающего на аммиаке и диметиловом эфире.....71	71
Дидманидзе О.Н., Хакимов Р.Т., Цыплаков Г.О., Вальдман Т.Ю., Цыплакова И.В. Экспериментальные исследования коррозионно стойких защитных покрытий алюминиевых радиаторов автотракторной техники.....82	82
Корытов М.С., Кашапова И.Е., Щербаков В.С. Совершенствование виброзащитной системы сиденья оператора колесного трактора сельскохозяйственного назначения.....93	93
Перцев С.Н., Муравьев К.Е. Прогнозирование технического состояния гидронавесной системы трактора.....105	105
Куриленко А.В. Методика определения скорости трактора по видеонаблюдению.....120	120

РАЗДЕЛ 3. УПРАВЛЕНИЕ, ЭКОНОМИКА И ЭКОЛОГИЯ133

Гадельшина Р.А., Маковецкая-Абрамова О.В. Исследование влияния оптимального управления затратами на конкурентоспособность инвестиционно-строительного проекта..133	133
---	-----

РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 631.3

631.43

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-4-18

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПОЧВЕННОЙ СРЕДЫ

Айрат Мидхатович Мухаметдинов^{1✉}, Салават Гумерович Мударисов²,
Ильдар Мавляирович Фархутдинов³

Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия

¹airat102@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3802-8151>

²salavam@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>

³ildar1702@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>

Аннотация. В настоящее время компьютерное моделирование с цифровой моделью почвенной среды на основе метода дискретных элементов является энергосберегающим способом проведения многовариантных экспериментов при разработке рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин. Целью исследования является экспериментальное обоснование параметров дискретных элементов виртуальной модели почвенной среды со свойствами чернозема среднесуглинистого механического состава. При создании контактной модели почвенной среды использование частиц почвенной среды с диаметром от 7,5 до 8,0 мм и коэффициентом динамического трения почвы о почву равным 0,8 наиболее подходит для чернозема среднесуглинистого механического состава. Результаты калибровки параметров контактной модели МДЭ-модели почвенной среды показали, что из выбранных параметров (коэффициент Пуассона 0,31, коэффициент статического трения 0,91, модуль Юнга 100 МПа) на характер изменения усилия пенетрации моделируемой почвенной среды виртуального почвенного канала значительно влияет поверхностная энергия. В представленных исследованиях результаты моделирования почвенного канала показывают, что масштабирование длины модели не повлияет на результаты при соответствующей калибровке параметров. В исследовании разработана номограмма для выбора значения поверхностной энергии моделируемой почвенной среды в зависимости от влажности реальной почвы для контактной модели Герца-Миндлина JKR. Полученные результаты экспериментального обоснования параметров дискретных элементов цифровой модели почвенной среды, установленной по поверхностной энергии, позволяют моделировать процессы в диапазоне оптимальной влажности почвы от 12 % до 15 % в верхнем слое и от 16 до 24,8 % в нижнем слое почвы. При этом поверхностная энергия для моделирования почвенной среды находится в диапазоне 161 Дж/м² до 230 Дж/м².

Ключевые слова: цифровой двойник, физико-механические свойства почвы, модель почвенной среды, модель контакта, модель Герца-Миндлина, пенетрация.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-76-10070, <https://rscf.ru/project/23-76-10070/>.

Для цитирования: Мухаметдинов А.М., Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М. Обоснование параметров дискретных элементов цифровой модели почвенной среды // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 3(124). С. 4-18 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-4-18>

EXPERIMENTAL VALIDATION OF PARAMETERS OF DISCRETE ELEMENTS IN A DIGITAL MODEL OF SOIL ENVIRONMENT

Airat M. Mukhametdinov^{1✉}, Salavat G. Mudarisov²,
Ildar M. Farkhutdinov³
Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

¹airat102@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3802-8151>

²salavam@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>

³ildar1702@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>

Abstract. At present, computer modeling with a digital model of the soil environment based on the method of discrete elements is an energy-saving tool for multivariate experiments in designing the working parts of tillage and seeding machines. The study aimed to justify by experiments the parameters of discrete elements in a virtual model of the soil environment with the properties of medium-loamy chernozem. When creating a contact model of the soil medium, the use of a soil particle with 7.5 to 8.0 mm diameter and a 0.8 coefficient of dynamic soil-on-soil friction best imitated the medium loamy chernozem. The parameter calibration results of the MDE contact model of soil environment showed that out of selected parameters (Poisson's ratio of 0.31, static friction coefficient of 0.91, Young's modulus of 100 MPa) the surface energy had a significant effect on the variation nature in the penetration force of the simulated soil environment in the virtual soil channel. In the presented studies, the results of soil channel modeling show that scaling the length of the model will not affect the results with appropriate parameter calibration. The study developed a nomogram for selecting the surface energy value of the simulated soil environment depending on the humidity of the real soil for the Hertz-Mindlin JKR contact model. The obtained results of experimental substantiation of the parameters of discrete elements in a digital model of the soil environment based on surface energy make it possible to simulate the processes in the optimal soil moisture range from 12% to 15% in the upper soil layer and from 16 to 25% in the lower soil layer. In this case, the surface energy for modeling the soil environment was in the range of 161 J/m² to 230 J/m².

Keywords: digital twin, physical and mechanical soil properties, soil environment model, contact model, Hertz-Mindlin model, penetration.

Acknowledgements: The research was funded by the grant No. 23-76-10070 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/23-76-10070/>

For citation: Mukhametdinov A.M., Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M. Experimental validation of parameters of discrete elements in a digital model of soil environment. *AgroEcoEngineering*. 2025; 3(124): 4-18 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-4-18>

Введение. В настоящее время компьютерное моделирование с цифровой моделью почвенной среды на основе метода дискретных элементов является энергосберегающим способом проведения многовариантных экспериментов при разработке рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин [1, 2]. При проведении виртуального моделирования погодные условия не влияют на проведение испытаний разрабатываемых конструкций, что позволяет получить визуализацию процесса обработки почвенной среды перед проведением полевых испытаний в условиях предприятий с получением верифицированных данных. Также уменьшаются затраты на изготовление многовариантных натуральных образцов с различными конструктивными параметрами за счет создания

трехмерных моделей и импортирования их в программные комплексы для моделирования [3, 4].

В исследованиях использовали метод дискретных элементов (DEM) для моделирования деформации почвенного профиля от воздействия почвообрабатывающего орудия [5, 6]. Была разработана 3D-модель почвообрабатывающего орудия и почвенных частиц; проведены лабораторные и полевые испытания, позволившие оценить горизонтальные и вертикальные силы, а также изменение плотности почвы. Полученные результаты показали хорошую корреляцию с полевыми данными, подтвердив точность модели и её применимость для прогнозирования состояний почвы и выбора оптимальных режимов обработки.

Для калибровки параметров контактной модели использовался тест на определение угла естественного откоса [7, 8]. В исследованиях методика проведения натурных испытаний заключается в том, что образец сыпучего материала засыпается в полый цилиндр. Затем цилиндр поднимается на разную высоту. После подъема такого цилиндра остается колонна исследуемой почвы, у которой измеряется диаметр и угол естественного откоса. В исследовании установлена зависимость между коэффициентами трения качения и плотностью энергии сцепления и влияние на поведение почвы при моделировании с помощью дискретных элементов. Лучшую точность обеспечили сферические частицы диаметром 5 мм, а среди комковатых форм наименьшая ошибка наблюдалась при размере компонентов 2,5 мм.

Для моделирования технологического процесса обработки почвы почвообрабатывающим орудием используется метод дискретных элементов [9]. Представлено обоснование параметров виртуального почвенного канала с моделируемой почвенной средой длиной 1 м, шириной 0,5 м и высотой 0,4 м. В качестве параметров контактной модели почвенной среды использовался коэффициент восстановления 0,2, коэффициент статического трения о почву 0,45 и о сталь 0,55, диаметр частиц 5 мм.

В исследованиях по обоснованию конструктивно-технологических параметров представлено создание виртуального почвенного канала с различными слоями с моделируемой почвенной средой длиной 1 м, шириной 0,6 м и высотой 0,4 м [10]. В данном исследовании была использована модель Герца-Миндлина со связующим веществом (НМВ). В модели НМВ было добавлено связующее вещество, представляющее собой жидкий мостик между частицами с калибровкой на сдвиг, позволяющими определить параметры прочности почвенных образцов.

Для оценки значимости параметров контактной модели частиц при моделировании влажных различных типов почв использован метод дискретных элементов [11]. Полученные зависимости угла естественного откоса от влажности почвы и поверхностной энергии позволяют выбрать параметры для контактной модели Герца-Миндлина в зависимости от влажности для черноземных почв глинистого, легкосуглинистого и супесчаного механического состава.

В исследованиях Мударисова С.Г. представлены результаты калибровки физико-механических параметров частиц модели почвенной среды, описываемых методом дискретных элементов [12]. При этом калибровка параметров проведена по определению угла естественного откоса, сдвига, среза различных типов почвы. В качестве контактной модели была использована усовершенствованная модель Герца-Миндлина JKR, которая была реализована в программном комплексе Rocky DEM. На основе сопоставления результатов натурных и модельных экспериментов разработана номограмма для выбора значения поверхностной энергии моделируемой почвенной среды в зависимости от влажности реальной почвы для контактной модели Герца-Миндлина JKR для чернозема легкосуглинистого механического состава. Установлено, что с увеличением влажности почвы и поверхностной энергии моделируемой среды угол естественного откоса почвы увеличивается по линейной зависимости.

В статье представлен анализ применения твердомеров и результаты полевых исследований по определению усилия пенетрации среднесуглинистой почвы в зависимости от ее глубины, влажности и для разных культур. Однако не была определена влажность на разной глубине [13].

Анализ отечественных и зарубежных источников по исследованиям показывает, что основными методами калибровки параметров контактной модели почвы является сравнение результатов физических и модельных экспериментов, касающихся усилия пенетрации. При этом измеряется сопротивление почвы проникновению наконечника, которое позволяет оценить твердость, плотность различных типов почвы и угол естественного откоса, при котором почва находится в состоянии равновесия перед началом осыпания с поверхности. Свойства почвы по сопротивлению срезу и сжатию определяют прочность и устойчивость почвы к деформации и разрушению. При этом затруднено приобретение лабораторных стендов на трёхосное сжатие почвы. Эти данные помогают рассчитать коэффициенты сцепления и внутреннего трения почвы, которые учитываются в контактной модели. Однако в этих исследованиях не учитывались влияния влажности почвы и диаметра почвенных частиц на усилие пенетрации.

Процесс проведения экспериментов включает создание виртуальной модели почвенных частиц, характеристики которой соответствуют реальной среде. При этом правильно настроенная и откалиброванная модель обеспечивает хорошее согласование экспериментальных и натурных данных независимо от размеров цифрового двойника. Однако в существующих исследованиях не представлены параметры контактной модели для чернозема среднесуглинистого механического состава, который широко распространен в Российской Федерации. Средний суглинок, в отличие от легкого суглинка, имеет большее содержание мелких глинистых частиц, благодаря чему он обладает лучшей водоудерживающей способностью, но также большей плотностью и меньшей аэрацией. Данные, полученные в результате модельных исследований в цифровом двойнике, необходимы для оценки создания почвенных условий рабочими органами почвообрабатывающих и посевных машин. Эти параметры должны учитывать конкретные почвенные условия сельскохозяйственных предприятий. Усилие пенетрации почвы — это показатель механической прочности, определяющий силу, необходимую для внедрения наконечника инструмента на определенную глубину, используемый для оценки плотности, твердости и способности почвы к деформации.

Для этого необходимо создать цифровую модель почвенной среды в виртуальном почвенном канале и трехмерную модель разрабатываемой конструкции рабочего органа почвообрабатывающей машины.

Моделирование обработки почвы с использованием уточненных контактных моделей позволяет эффективно визуализировать взаимодействие рабочих органов почвообрабатывающих орудий с разными почвенными условиями.

Для создания цифровой модели почвенной среды необходимо:

- разработать методику натурных и модельных исследований;
- создать полноразмерную твердотельную модель лабораторной установки;
- разработать лабораторную установку для проведения натурных исследований;
- произвести выбор всех сочетаний параметров контактных моделей почвенной среды;
- провести моделирование в программном комплексе ROCKY DEM;
- оценить значимость параметров контактных моделей почвенной среды;
- провести проверку адекватности разработанных моделей;
- провести сравнительные испытания в цифровом двойнике почвенного канала, лабораторной установке на почвенном канале и в лабораторно-полевых условиях предприятия;
- провести валидацию контактной модели.

Цель исследования. Экспериментальное обоснование параметров дискретных элементов цифровой модели почвенной среды для разработки цифрового двойника почвообрабатывающего процесса.

Задачи исследования:

- провести калибровку параметров контактной модели Герца-Миндлина JKR для моделирования и визуализации почвенной среды в виртуальном почвенном канале для определения сопротивления деформации чернозема среднесуглинистого механического состава;
- создать цифровой двойник почвенного канала с почвенной средой, учитывающей различные физико-механические свойства чернозема среднесуглинистого механического состава.

Материалы и методы. При создании точных моделей почвенной среды методом дискретных элементов предложено проводить калибровку параметров модели по усилиям пенетрации исследуемых почв различной влажности в условиях предприятий Республики Башкортостан Российской Федерации, что позволяет непосредственно оценивать их прочность, уплотненность и сопротивление деформации.

Влияние влажности почвы на её физико-механические свойства, а в особенности на усилие пенетрации, изучалось путём отбора проб в металлические бюксы для последующего лабораторного определения содержания влаги.

Определение влажности почвы производили по ГОСТ 28268-89. «Почвы. Методы определения влажности» в сушильном шкафу в условиях лаборатории биохимического анализа и биотехнологии научно-образовательного центра ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ (Испытательная лаборатория почв, кормов, сельскохозяйственной и пищевой продукции).

Пенетромтр ПСГ-МГ4 производства ООО «СКБ Стройприбор» применялся для измерения физико-механических характеристик чернозёма легкосуглинистого механического состава согласно методике, описанной Мухаметдиновым А.М. [14]. Натурный эксперимент по определению усилия пенетрации почвы проводился путём плавного внедрения рабочего наконечника диаметром 22 мм в металлический цилиндр с почвой в течение 10 секунд с пятикратной повторностью.

Моделирование процесса определения усилия пенетрации почвы выполнено в программе Rocky DEM с применением улучшенной контактной модели Герца-Миндлина-JKR, показавшей зависимость между изменениями поверхностной энергии, характеризующей адгезию почвенных частиц, и величиной усилия проникновения, аналогично влиянию влажности на реальную почву в натуральных экспериментах [14].

Легкосуглинистые почвы по механическому составу характеризуются большим содержанием песчаных и пылеватых фракций и меньшим количеством глинистых частиц. Это делает почву менее плотной и более воздухопроницаемой. При создании контактной модели диаметр шарика был принят равным 5 мм. Среднесуглинистые почвы по механическому составу, напротив, имеют большее содержание мелких глинистых частиц, благодаря чему обладают лучшей водоудерживающей способностью, но также большей плотностью и меньшей аэрацией, а также имеют равномерное распределение частиц, включая песок, пыль и глину. При создании контактной модели диаметр шарика был принят в диапазоне от 7,5 до 8,0 мм. Коэффициент динамического трения почвы о почву для легкосуглинистой почвы по механическому составу составляет 0,7, а для среднесуглинистой почвы был принят 0,8.

Выбор параметров контактной модели происходит в дереве построения программного комплекса RockyDEM. На рисунке 1 показана визуализация процесса определения усилия пенетрации почвенных частиц в окне программного комплекса RockyDEM.

Для калибровочного теста по определению усилия пенетрации почвенной среды было проведено моделирование в диапазоне поверхностной энергии от 0 Дж/м² до 350 Дж/м². Результаты показали, что усилие пенетрации зависит от влажности почвы по

полиномиальной зависимости. Полученные экспериментальные данные соответствуют результатам ранее проведенных исследований [14].

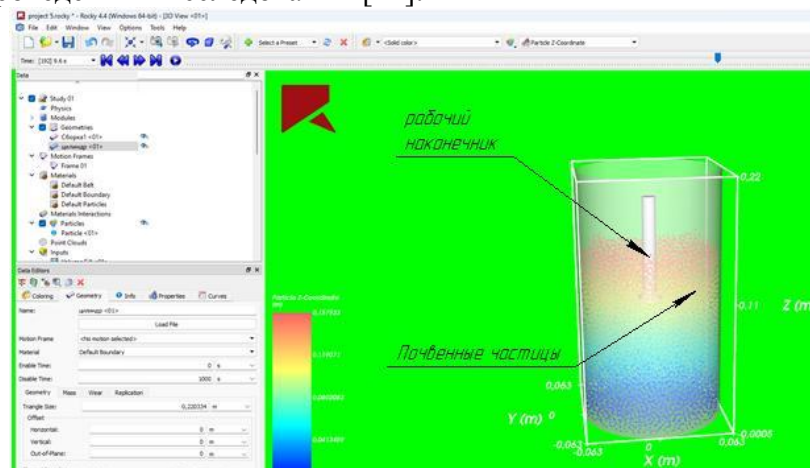


Рис. 1. Визуализация процесса определения усилия пенетрации почвенных частиц в окне программного комплекса RockyDEM

Fig. 1. Visual representation how the penetration force of soil particles is calculated in the RockyDEM software package

Валидация контактной модели почвенной среды при моделировании методом дискретных элементов заключалась в подтверждении адекватности воспроизведения физических свойств почвы различной влажности по усилию пенетрации. Для валидации разработанной контактной модели процесса определения усилия пенетрации почвенных частиц была проведена сравнительная оценка с результатами, полученными на натурном почвенном канале

Размеры почвенного канала составляют: длина $L=15$ м, ширина $B=2,5$ м, высота $H=0,5$ м, толщина слоя почвы $h=0,4$ м. Для проведения замеров почвенный канал был разделен на 5 участков одинаковой длины. На каждом участке проводилось измерение с четырех/пятикратной повторностью. В соответствии с руководством по эксплуатации КБСП.427333.037 РЭ для измерения использовался рабочий наконечник диаметром 22 мм, так как сила, воздействующая на рабочий наконечник, превышала 120 Н и в среднем составляла 235,2 Н в режиме грунт 1. Перед началом измерений была проведена калибровка зависимости $\rho(P)$ между плотностью почвы и сопротивлением пенетрации.

Для оперативного определения содержания влаги в почве использовался влагомер почв Soil Moisture Meter PCE-SMM 1 с рабочим диапазоном измерения от 0 до 50%. Для достоверности результатов отбирались пробы почвенных образцов в бюксы с двукратной повторностью для определения влажности в лаборатории биохимического анализа и биотехнологии научно-образовательного центра ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ.

На рисунке 2 представлено проведение лабораторных исследований на почвенном канале.

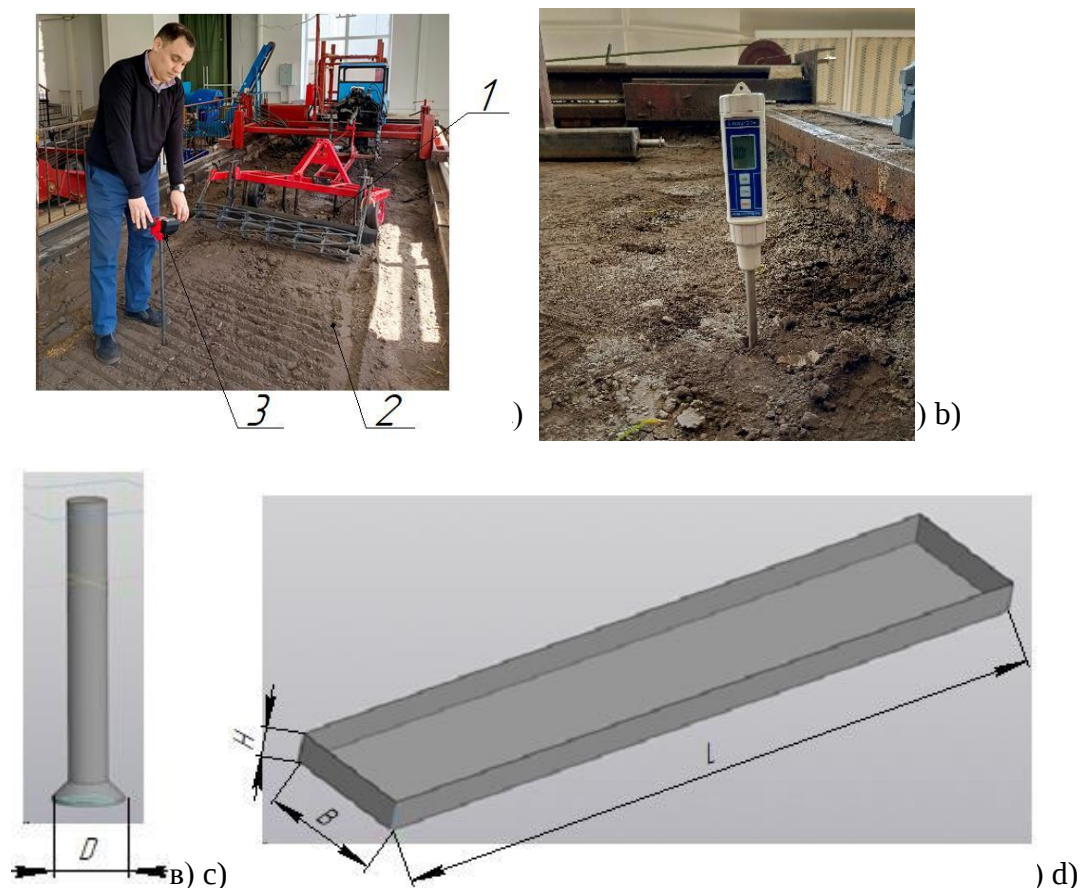


Рис. 2. Проведение лабораторных исследований на почвенном канале:
а) измерение усилия пенетрации почвы; б) определение влажности почвы: 1 –
почвообрабатывающая машина; 2 – почва в почвенном канале; 3 – пенетромметр ПСГ-МГ4
в) трехмерная модель наконечника пенетромметра (D – диаметр);
г) трехмерная модель почвенного канала (L – длина, B – ширина, H – высота)

Fig. 2. Laboratory tests on the soil channel:
a) measuring the soil penetration force; b) determining soil moisture: 1 – tillage machine; 2
– soil in the soil channel; 3 – PSG-MG4 penetrometer
c) three-dimension model of the penetrometer tip (D – diameter);
d) three-dimension model of the soil channel (L – length, B – width, H – height)

Для валидации разработанной контактной модели процесса определения усилия пенетрации почвенных частиц в виртуальном почвенном канале была проведена сравнительная оценка с результатами, полученными в лабораторно-полевых условиях.

Лабораторно-полевые исследования проводились в Благоварском районе Республики Башкортостан на четырех полях с типичной черноземной почвой среднесуглинистого механического состава.

На рисунке 3 представлено проведение лабораторно-полевых исследований в условиях подразделения «Кучербай» ООО «Башкир-агроинвест». Проводилось определение физико-механических параметров почвы, для чего измерялось усилие пенетрации, глубина обработки и влажность на разной глубине.



Рис. 3. Проведение лабораторно-полевых исследований:

1 – трактор; 2 - почвообрабатывающая машина; 3 – почва после культивации; 4 – измерение усилия пенетрации после культивации

Fig. 3. Laboratory and field research:

1 – tractor; 2 - tillage machine; 3 – soil after cultivation; 4 – measurement of penetration force after cultivation

Проводилось определение физико-механических параметров в области уплотненного посевного ложа: определение усилия пенетрации в области уплотненного посевного ложа; область уплотненного посевного ложа. Для определения усилия пенетрации в области уплотненного посевного ложа лопаткой убиралась мягкая почва на глубину культивации.

Трехмерная модель почвенного канала и почвообрабатывающей машины создаются и сохраняются в формате STL и импортируются в дерево построения программного комплекса ROCKY DEM в раздел «Геометрия для цифрового двойника почвенного канала», имитирующего реальные почвенные условия.

Результаты. В таблице 1 представлены результаты определения усилия пенетрации почвы в зависимости от влажности в лабораторных условиях.

Таблица 1. Результаты определения усилия пенетрации почвы в зависимости от влажности в лабораторных условиях

Table 1. Results of determining the soil penetration force as a function of humidity in laboratory conditions

Влажность почвы $\square$, %	12,0	15,0	18,0	22,0	25,0
Среднее усилие пенетрации R_z , Н	98	136	144	160	182

Установлено, что усилие пенетрации почвы минимально при оптимальной влажности (12–25%) от 98 Н до 182 Н, увеличиваясь при низком уровне увлажнения из-за плотности структуры и при избыточном увлажнении при более 25 % из-за потери прочности и повышения вязкости. При чрезмерном увлажнении почва размягчается, утрачивает структуру, становится пластичной или текучей массой, что увеличивает усилие пенетрации из-за возрастающего сопротивления, обусловленного вязкостью и липкостью между частицами почвенной среды. Это описывается в контактной модели Герца-Миндлина JKR [15], характеризующейся поверхностной энергией, учитывающей эффект адгезионной нормальной силы между частицами, которая определяется уравнением

$$F = \sqrt{8\pi G_s E a^3},$$

где G_s – поверхностная энергия, Дж/м²;

E – модуль Юнга, МПа

a – эффективный радиус частицы, м.

В таблице 2 представлены параметры дискретных элементов цифровой модели почвенной среды контактной модели Герца-Миндлина JKR [14, 15].

Таблица 2. Экспериментально обоснованные параметры дискретных элементов цифровой модели почвенной среды

Table 2. Experimentally validated parameters of discrete elements in the digital model of soil environment

Экспериментально обоснованные параметры	Значения
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Коэффициент статического трения почвы о почву f_{st}	0,9
Коэффициент динамического трения почвы о почву f_d	0,8
Диаметр частиц d , мм	8
Коэффициент статического трения $f_{st,k}$	0,31
Коэффициент динамического трения $f_{d,k}$	0,38
Модуль Юнга E , МПа	100

В таблице 3 представлены результаты анализа влажности почвы при проведении лабораторно-полевых исследований в Благоварском районе Республики Башкортостан и соответствующей поверхностной энергии.

Таблица 3. Результаты анализа влажности почвы при проведении лабораторно-полевых исследований в Благоварском районе Республики Башкортостан и соответствующей поверхностной энергии

Table 3. Results of soil moisture analysis during laboratory and field studies in the Blagovarsky district of the Republic of Bashkortostan and the corresponding surface energy

№ поля	Глубина слоя отбора проб, см	Влажность почвы $\square$, %	Поверхностная энергия для моделирования почвенной среды, G_s , Дж/м ²
1	0-5	12,1	161
		12,5	165
	5-10	23,8	223
		22,8	212
2	0-5	12,0	161
		13,1	168
	5-10	24,8	230
		24,4	226
3	0-5	15,3	178
		14,8	175
	5-10	24,3	224
		24,1	208
4	0-5	15,2	178
	5-10	23,0	218

Результаты по определению влажности в различных слоях почвы используются при создании цифрового двойника почвенной среды с различной поверхностной энергией в верхних и нижних слоях. Установлено, что влажность почвы на различных слоях находится в диапазоне от 12,0 % до 24,8 %; при этом поверхностная энергия для моделирования почвенной среды находится в диапазоне от 161 Дж/м² до 230 Дж/м².

По результатам сопоставления результатов натурных экспериментов по усилиям пенетрации в зависимости от влажности почвы (рисунок 4а) и в зависимости от поверхностной энергии по результатам моделирования (рисунок 4б) построена номограмма для выбора поверхностной энергии моделируемой почвенной среды.

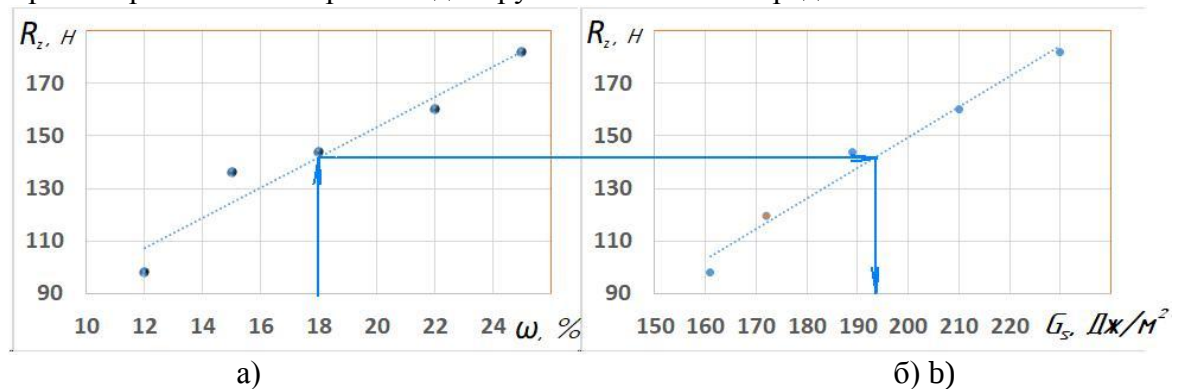


Рис. 4. Номограмма выбора значения поверхностной энергии моделируемой почвенной среды в зависимости от влажности реальной почвы
а) от влажности почвы; б) от поверхностной энергии почвенных частиц

Fig.4. Nomogram of the choice of the surface energy value of the simulated soil environment depending on the real soil humidity
а) on soil moisture; б) on the surface energy of soil particles

Валидация включала сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на натурном почвенном канале и при проведении лабораторно-полевых исследований. На основе полученных результатов создан цифровой двойник почвенного канала для визуализации почвообрабатывающего процесса. На рисунке 5 представлено окно программы программного комплекса ROCKY DEM с визуализацией процесса культивации.

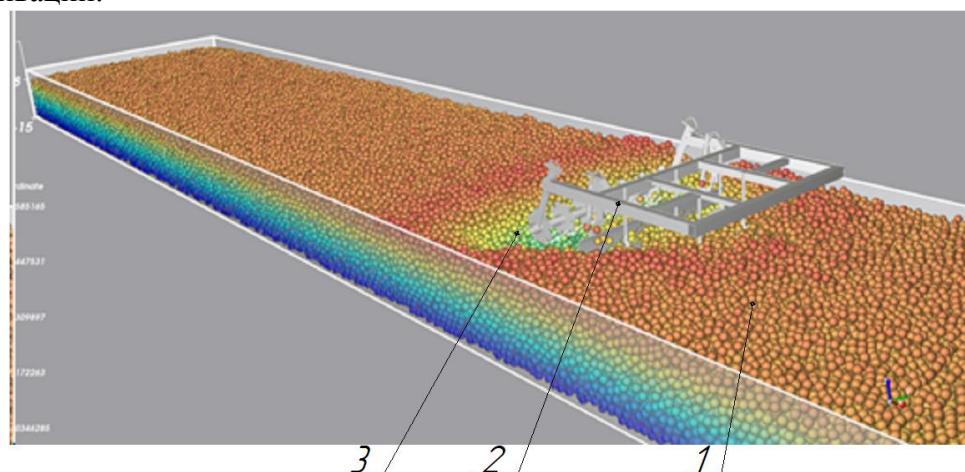


Рис. 5. Цифровой двойник почвенного канала для визуализации почвообрабатывающего процесса:

1 – почвенные частицы; 2 – почвообрабатывающая машина; 3 – визуализация области уплотненного посевного ложа после культивации

Fig. 5. Digital twin of the soil channel for visual representation of tillage process:

1 – soil particles; 2 – tillage machine; 3 – visualization of the area of compacted seedbed after cultivation

Реализация разработанного цифрового двойника почвенного канала с использованием метода дискретных элементов позволяет визуализировать процесс взаимодействия рабочего органа почвообрабатывающей машины с почвенной средой, обладающей свойствами

реальной почвы. Визуализация соответствует скорости перемещения почвенных частиц. Процессы сопротивления деформации, образования скола почвы и перемещения почвенных частиц соответствуют традиционным схемам взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих процессов с почвенным пластом в земледельческой механике.

Цифровой двойник почвенного канала позволяет создавать различную поверхностную энергию почвенных частиц по слоям в диапазоне от 160 Дж/м^2 до 230 Дж/м^2 , имитируя изменение влажности реальной почвы от 12 % до 25 %. При этом каждый слой обладает определенной плотностью и твердостью, характеризующей верхний мягкий слой, нижний слой – уплотненный.

Обсуждение. При проведении виртуального моделирования погодные условия не влияют на проведение испытаний разрабатываемых конструкций и позволяют получить визуализацию процесса обработки почвенной среды перед проведением полевых испытаний в условиях предприятий с получением верифицированных данных. Также уменьшаются затраты на изготовление многовариантных натуральных образцов с различными конструктивными параметрами за счет создания трехмерных моделей и импортирования их в программные комплексы для моделирования [15]. Процесс моделирования усилия пенетрации почвенной среды в цифровом двойнике почвенного канала осуществлялся в программе Rocky DEM с применением уточненной контактной модели Герца-Миндлина JKR, на основе комбинации модели Герца для нормальных сил, Миндлина-Дересевича для тангенциальных сил и JKR для учёта сил сцепления почвенных частиц. Таким образом в результате натуральных экспериментов установлено, что усилие пенетрации путем внедрения рабочего наконечника зависит от влажности почвы по полиномиальной зависимости: сначала уменьшается с увеличением влажности, достигая минимума при оптимальной влажности от 12 % до 25 %, а затем снова увеличивается при дальнейшем увлажнении. Полученные экспериментальные данные соответствуют результатам ранее проведенных исследований по калибровке параметров почвы [16]. При меньшей и большей влажности обработку почвы производить не рекомендуется.

Особое значение параметры дискретных элементов цифровой модели почвенной среды приобретают для моделирования свойств различных типов почв – легко, средне и тяжело суглинистого механического состава, которые существенно различаются по характеру уплотнения [17]. В представленных исследованиях результаты моделирования почвенного канала показывают, что масштабирование его длины не влияет на результаты при соответствующей калибровке параметров [18].

Выводы. Полученные результаты калибровки по поверхностной энергии от 161 до 230 Дж/м^2 соответствуют оптимальной влажности почвы в диапазоне от 12 % до 15 % в верхнем слое и от 16 до 24,8 % в нижнем слое почвы – чернозема среднесуглинистого механического состава. При создании контактной модели почвенной среды использование частицы почвенной среды с диаметром от 7,5 до 8,0 мм и коэффициентом динамического трения почвы о почву равным 0,8 наиболее имитирует чернозем среднесуглинистого механического состава. Результаты калибровки параметров контактной модели МДЭ-модели почвенной среды показали, что из выбранных параметров (коэффициент Пуассона 0,31, коэффициент статического трения 0,91, модуль Юнга 100 МПа) на характер изменения усилия пенетрации моделируемой почвенной среды виртуального почвенного канала значительно влияет поверхностная энергия.

Лабораторные исследования показали, что при определении усилия пенетрации почвенной среды методом дискретных элементов изменение значений поверхностной энергии, влияющей на адгезию почвенных частиц, аналогично влияет на усилие проникновения рабочего наконечника, как и влажность почвы в натуральных экспериментах. Усилие пенетрации в лабораторных исследованиях составило от 98 Н до 182 Н. Сравнение результатов моделирования и лабораторно-полевых исследований показывает валидацию разработанных контактных моделей. Данная область соответствует оптимальной влажности от 12 % до 25% в различных слоях почвы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Barr J., Desbiolles J., Ucgul M., Fielke J.M., Bentleg furrow opener performance analysis using the discrete element method // *Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 189. P. 99-115. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.008>
2. Chen X., Elliott J.A. On the scaling law of JKR contact model for coarse-grained cohesive particles // *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 227, 115906. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115906>
3. Лачуга Ю. Ф., Мударисов С. Г., Фархутдинов И. М., Шогенов Ю.Х., Зиганшин Б.Г., Устинов Н.Н. Повышение эффективности проектирования сельскохозяйственной техники с помощью цифровых двойников // *Вестник Российской академии наук*. 2025. № 6. С. 50-58. <https://doi.org/10.31857/S0869587325060068> EDN: FASITA
4. Кислицкий М. М., Миронов Д. А., Лылов А. С. Цифровые двойники сельскохозяйственных машин и оборудования в системе обеспечения продовольственной безопасности: значение и перспективы // *Теория и практика мировой науки*. 2022. № 12. С. 27-29. EDN: HHXIAW
5. Ucgul M., Saunders C. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil557 mouldboard plough interaction using discrete element modelling // *Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 190. P. 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.022>
6. Aikins K.A., Ucgul M., Barr J.B. et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis // *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 213, 105123. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105123>
7. Saunders C., Ucgul M., Godwin R. J. Discrete element method (DEM) simulation to improve performance of a mouldboard skimmer // *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 205, 104764 <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104764>
8. Hoseinian S.H., Hemmat A., Esehaghbeygi A. et al. Development of a dual sideways-share subsurface tillage implement: Part 1. Modeling tool interaction with soil using DEM // *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 215, 105201. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105201>
9. Makange N.R., Ji C., Innocent N. et al. Prediction of precise subsoiling based on analytical method, discrete element simulation and experimental data from soil bin // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11(1), 11082. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90682-w>
10. Wang X., Wei W., He J., Huang Yu. Effect of soil particle-size distribution (PSD) on soil-subsoiler interactions in the discrete element model // *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2021. Vol. 19 (1), e0205. <https://doi.org/10.5424/sjar/2021191-16584> EDN: SLLQXG
11. Mudarisov S., Farkhutdinov I., Khamaletdinov R., Khasanov E., Mukhametdinov A. Evaluation of the significance of the contact model particle parameters in the modelling of wet soils by the discrete element method // *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 215, 105228. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105228> EDN: CXGPSK
12. Mudarisov S. G., Lobachevsky Ya. P., Farkhutdinov I. M. et al. Justification of the soil DEM-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing // *Journal of Terramechanics*. 2023. Vol. 109. P. 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.06.001> EDN: PAXQZJ
13. Уланов А. С., Купряшкин В. Ф., Наумкин Н. И., Наумкин Д. А. Исследование твердости почвы в условиях личных подсобных и индивидуальных хозяйств населения // *Инженерные технологии и системы*. 2024. Т. 34. № 4. С. 530-548. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.530-548> EDN: AWROTP
14. Мухаметдинов А. М., Мударисов С. Г., Хасанов Э. Р. Экспериментальная калибровка параметров контактной модели цифрового двойника почвенной среды методом дискретных элементов // *Вестник аграрной науки Дона*. 2025. Т. 18. № 1(69). С. 4-18. https://doi.org/10.55618/20756704_2025_18_1_4-18 EDN: TFXOID
15. Mudarisov S., Gabitov I., Lobachevsky Ya. Farkhutdinov I., Kravchenko L. Systematic evaluation and experimental validation of discrete element method contact models for soil tillage

simulation // AgriEngineering. 2025. Vol. 7(8), 256.
<https://doi.org/10.3390/agriengineering7080256>

16. Yang L., Li J., Lai Q., et al. Discrete element contact model and parameter calibration for clayey soil particles in the Southwest hill and mountain region // *Journal of Terramechanics*. 2024. Vol. 111. P. 73-87. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.10.002>

17. Qiao Ya., Huang Sh., Yang Ch., et al. Calibration and testing of discrete element simulation parameters for ultrasonic vibration-cutter-soil interaction model // *Agriculture*. 2025. Vol.15(1), 20. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010020> EDN: RWCOEB

18. Aikins K.A., Antille D.L., Ucgul M., Barr J.B., Jensen T.A., Desbiolles J.M.A. Analysis of effects of operating speed and depth on bentleg opener performance in cohesive soil using the discrete element method // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 187(2), 106236. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106236>

REFERENCES

1. Barr J., Desbiolles J., Ucgul M., Fielke J.M., Bentleg furrow opener performance analysis using the discrete element method. *Biosystems Engineering*. 2020; 189: 99-115. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.008>

2. Chen X., Elliott J.A. On the scaling law of JKR contact model for coarse-grained cohesive particles. *Chemical Engineering Science*. 2020; 227, 115906. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115906>

3. Lachuga Yu.F., Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Shogenov Yu.Kh., Ziganshin B.G., Ustinov N.N. Improving the efficiency of agricultural machinery design using digital twins. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk = Vestnik of the Russian Academy of Sciences*. 2025;6:50-58. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869587325060068>. EDN: FASITA

4. Kislitsky M.M., Mironov D.A., Lylov A.S. Digital twins of agricultural machinery and equipment in the food security system: significance and prospects. *Teoriya i praktika mirovoi nauki = Theory and Practice of the World Science*. 2022;12:27-29. (In Russ.) EDN: HHXIAW

5. Ucgul M., Saunders C. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil557 mouldboard plough interaction using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*. 2020;190:58-70. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.0>

6. Aikins K.A., Ucgul M., Barr J.B., et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis. *Soil and Tillage Research*. 2021; 213,105123. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105123>

7. Saunders C., Ucgul M., Godwin R. J. Discrete element method (DEM) simulation to improve performance of a mouldboard skimmer. *Soil and Tillage Research*. 2021;205,104764 (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104764>

8. Hoseinian S.H., Hemmat A., Esehaghbeygi A. et al. Development of a dual sideways-share subsurface tillage implement: Part 1. Modeling tool interaction with soil using DEM. *Soil and Tillage Research*. 2022;215,105201. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105201>

9. Makange N.R., Ji C., Innocent N., et al. Prediction of precise subsoiling based on analytical method, discrete element simulation and experimental data from soil bin. *Scientific Reports*. 2021;11(1),11082.(In Eng.) <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90682-w>

10. Wang X., Wei W., He J., Huang Yu. Effect of soil particle-size distribution (PSD) on soil-subsoiler interactions in the discrete element model. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2021;19 (1), e0205. (In Eng.) <https://doi.org/10.5424/sjar/2021191-16584> EDN: SLLQXG

11. Mudarisov S., Farkhutdinov I., Khamaletdinov R., Khasanov E., Mukhametdinov A. Evaluation of the significance of the contact model particle parameters in the modelling of wet soils by the discrete element method. *Soil and Tillage Research*. 2022; 215, 105228. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105228> EDN: CXGPSK

12. Mudarisov S. G., Lobachevsky Ya. P., Farkhutdinov I. M. et al. Justification of the soil DEM-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. Journal of Terramechanics. 2023; 109: 37-44. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.06.001>
13. Ulanov A. S., Kupryashkin V. F., Naumkin N. I., Naumkin D. A. Investigating the soil hardness on personal subsidiary and individual peasant farms. Inzhenernye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems. 2024; 34(4):530-548. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.530-548> EDN: AWROTP
14. Mukhametdinov A.M., Mudarisov S.G., Khasanov E.R. Experimental calibration of parameters of the contact model of the digital twin of the soil environment by the method of discrete elements. Vestnik agrarnoi nauki Dona = Don Agrarian Science Bulletin. 2025;18 (1(69)): 4-18. (In Russ.) https://doi.org/10.55618/20756704_2025_18_1_4-18 EDN: TFXOID
15. Mudarisov S., Gabitov I., Lobachevsky Ya. Farkhutdinov I., Kravchenko L. Systematic evaluation and experimental validation of discrete element method contact models for soil tillage simulation. AgriEngineering. 2025; 7(8), 256. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/agriengineering7080256>
16. Yang L., Li J., Lai Q., et al. Discrete element contact model and parameter calibration for clayey soil particles in the Southwest hill and mountain region. Journal of Terramechanics. 2024; 111:73-87 (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.10.002>
17. Qiao Ya., Huang Sh., Yang Ch., et al. Calibration and testing of discrete element simulation parameters for ultrasonic vibration-cutter-soil interaction model. Agriculture. 2025;15(1), 20. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/agriculture15010020> EDN: RWCOEB
18. Aikins K.A., Antille D.L., Ucgul M., Barr J.B., Jensen T.A., Desbiolles J.M.A. Analysis of effects of operating speed and depth on bentleg opener performance in cohesive soil using the discrete element method. Computers and Electronics in Agriculture. 2021; 187(2), 106236. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106236>

Об авторах	About the authors
Мухаметдинов Айрат Мидхатович канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией (научно-исследовательской) «Цифровые двойники и конструирование машин для химической и биологической защиты растений», ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, Россия, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34, e-mail: airat102@mail.ru ORCID: 0000-0002-3802-8151	Airat M. Mukhametdinov , Cand. Sc. (Engineering), associate professor, head of the laboratory (research) “Digital twins and the design of machines for chemical and biological plant protection”, Bashkir State Agrarian University; 50th Anniversary of October Str., 34, Ufa, Russia, 450001; e-mail: airat102@mail.ru ORCID: 0000-0002-3802-8151
Мударисов Салават Гумерович академик Академии наук Республики Башкортостан, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой мехатронных систем и машин аграрного производства ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, Россия, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34, e-mail: salavam@gmail.com ORCID: 0000-0001-9344-2606	Salavat G. Mudarisov Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Mechatronic Systems and Machines of Agricultural Production, Bashkir State Agrarian University, 50th Anniversary of October Str., 34, Ufa, Russia, 450001 e-mail: salavam@gmail.com ORCID: 0000-0001-9344-2606;
Фархутдинов Ильдар Мавляирович д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры мехатронных систем и машин аграрного производства, Россия, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34, ORCID: 0000-0002-6443-8584	Ildar M. Farkhutdinov DSc (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechatronic Systems and Machines of Agricultural Production Bashkir State

eLibrary SPIN: 8646-6670 e-mail: ildar1702@mail.ru	Agrarian University, 50th Anniversary of October Str., 34, Ufa, Russia, 450001 e-mail: ildar1702@mail.ru ORCID: 0000-0002-6443-8584;
Вклад авторов: С.Г. Мударисов – концептуализация идеи, разработка методологии, создание моделей, утверждение финальной версии. И.М. Фархутдинов – моделирование, программирование, валидация. А.М. Мухаметдинов – поиск и анализ публикаций по теме статьи, оригинальный черновик, визуализация, проведение экспериментов и сбор данных, формальный анализ. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.	Authors' contribution: S.G. Mudarisov – conceptualization of the idea, development of methodology, creation of models, approval of the final version I.M. Farkhutdinov – modeling, programming, validation A.M. Mukhametdinov – search and analysis of publications on the topic of the article, original draft, visualization, conducting experiments and data collection, formal analysis. All authors approved the manuscript (the publication version), and also agreed to be responsible for all aspects of the work, ensuring proper consideration and resolution of issues related to the accuracy and integrity of any part of it.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interests The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	Authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 22.05.2025	Received: 22.05.2025
Одобрена после рецензирования: 28.08.2025	Approved after reviewing: 28.08.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

Научная статья
УДК 631.33.022.65

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-18-32

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ БОРЬБЫ С СОРНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

Алексей Дмитриевич Комоедов✉

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства
(ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

komoedov.alexej@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7718-6436>

Аннотация. Одной из основных целей внедрения наукоемких технологий является получение гарантированного урожая высокого качества за счет обеспечения благоприятных

условий для выращивания сельскохозяйственных культур. Однако, интенсификация сельскохозяйственного производства является основной причиной возрастания антропогенного воздействия на окружающую среду и одним из подходов для снижения экологических рисков может служить частичный переход к органическому земледелию, поскольку требования по исключению химических веществ по своей сути улучшают экологические показатели сельскохозяйственных систем. В связи с этим возникает проблема уничтожения сорной растительности. Так потери урожая от сорной растительности могут достигать 65-70%, а использование допустимых мер при органическом производстве, таких как механическая обработка и ручная прополка защитных зон, повышает стоимость работ и снижает эффективность затрат труда. Цель исследований – установление зависимости эффективности удаления сорной растительности от конструктивно-технологических параметров автоматизированного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью в рядах пропашных культур. Для решения обозначенной проблемы в Институте агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства был разработан автоматизированный рабочий орган для удаления сорной растительности в рядах пропашных культур. В ходе исследования рассмотрена конструкция секционного рабочего органа для прополки в рядах картофеля и разработана система управления с использованием нейросети YOLOv5. В статье представлены результаты исследований по изучению зависимости эффективности удаления сорной растительности от конструктивно-технологических параметров: глубина хода рабочего органа и угла бокового раствора рабочего органа автоматизированной секции. В результате экспериментальных исследований была получена зависимость удаления сорной растительности от конструктивно-технологических параметров. Рациональными параметрами для автоматизированного секционного рабочего органа являются: угол раствора боковых лезвий прополочного ножа 60,25 градусов, а глубина обработки 3,3 см. Наибольший процент удаления сорной растительности составил 92,2% в зоне обработки, при этом травмирование и повреждение культурных растений не выявлено.

Ключевые слова: органическое производство, пропашные культуры, сорная растительность, прополка, автоматизированный рабочий орган культиватора.

Для цитирования: Комоедов А.Д. Исследование автоматизированного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 3(124). С. 18-33 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-18-32>

Research article

Universal Decimal Code 631.33.022.65

INVESTIGATION OF AN AUTOMATED WORKING TOOL FOR WEED CONTROL

Alexey D. Komoyedov✉

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia.

komoedov.alexey@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7718-6436>

Abstract. Primary aim of introducing knowledge intensive technologies is to achieve the guaranteed high-quality crop yields by creating favorable crop growing conditions. Agricultural intensification, yet, is the main reason for greater anthropogenic effect on the environment. One way to reduce environmental risks may be a partial transition to organic farming. This is because the ban from chemicals application naturally improves the environmental performance of agricultural systems. In this regard, there is a problem of destroying weeds. The crop loss from weeds can reach 65-70%. The use of measures acceptable in organic production, such as

mechanical treatment and manual weeding of protective zones, increase the work cost and reduce labor cost efficiency. The aim of research was to investigate the relationship between the efficiency of weed removal and the design and technical specifications of an automated working tool for weed control in row crops. To address this issue, the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production has developed an automated working tool for weed removing in row crops. The study considered a structural design of a sectional working tool for potato rows and created a control system based on YOLOv5 neural network. The article presents investigation results about the dependence of weed removal effectiveness and the damage degree of cultivated plants on structural and technological tool parameters. These were the travel depth of the tool and the inclination angle of side blades of the tool in the automated section. The experimental study resulted in the dependence between the weed removal and the structural and technological tool parameters. The study determined the rational parameters for an automated sectional tool. These were the inclination angle of the weeding knife side blades of 60, 25 degrees under the cultivation depth of 3,3 cm. The highest percentage of weed removal was 92.1% in the cultivated area. No injury or damage to cultivated plants was observed.

Keywords: organic production, row crops, weeds, weeding, automated cultivator working tool

For citation: Komoyedov A.D. Investigation of an automated working tool for weed control. *AgroEcoEngineering*. 2025; 3(124): 18-33 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-18-32>

Введение. На сегодняшний день в законодательных документах стратегического уровня чётко прослеживается линия снижения антропогенных нагрузок на окружающую среду, в том числе и от сельскохозяйственного производства. Основными вызовами являются обеспечение продовольственной безопасности и продовольственной независимости России, переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, разработка и внедрение систем рационального применения средств химической и биологической защиты сельскохозяйственных растений, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания, а также переход к развитию природоподобных технологий [1, 2].

Одной из основных целей внедрения наукоемких технологий является получение гарантированного урожая высокого качества за счет обеспечения благоприятных условий для выращивания сельскохозяйственных культур, использования роботизированных машин, автоматизированных систем и интеллектуальной обработки производственной информации [3, 4].

Практически всем вышеперечисленным вызовам отвечает направление производства органической продукции. 4 июля 2023 года Распоряжением Правительства РФ утверждена Стратегия развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года¹. В Стратегии обозначено состояние отрасли и перспективы её развития с индикаторными показателями по трем сценариям. Целевые показатели Стратегии при базовом сценарии показывают рост объема производства конечной органической продукции и только для внутреннего рынка составляют 9,1 млрд. руб. для 2021 года, а к 2030 году будут составлять 114,5 млрд. руб., что соответствует росту в 12,6 раз. А для оптимистического сценария целевые показатели составляют к 2030 году 220,1 млрд. руб., что соответствует росту в 24 раза. Расчет был проведен без учета объемов экспорта продукции органического

¹ Стратегия развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302171516> (02.06.2025)

производства (около 99% российского экспорта органической продукции составляет сырьевая продукция растениеводства).

Одним из подходов к повышению экологической устойчивости растениеводства является частичный переход на методы органического земледелия, поскольку требования по исключению химических веществ по своей сути улучшают экологические показатели сельскохозяйственных систем. Современное состояние органического сельского хозяйства в РФ представлено на рисунке 1.

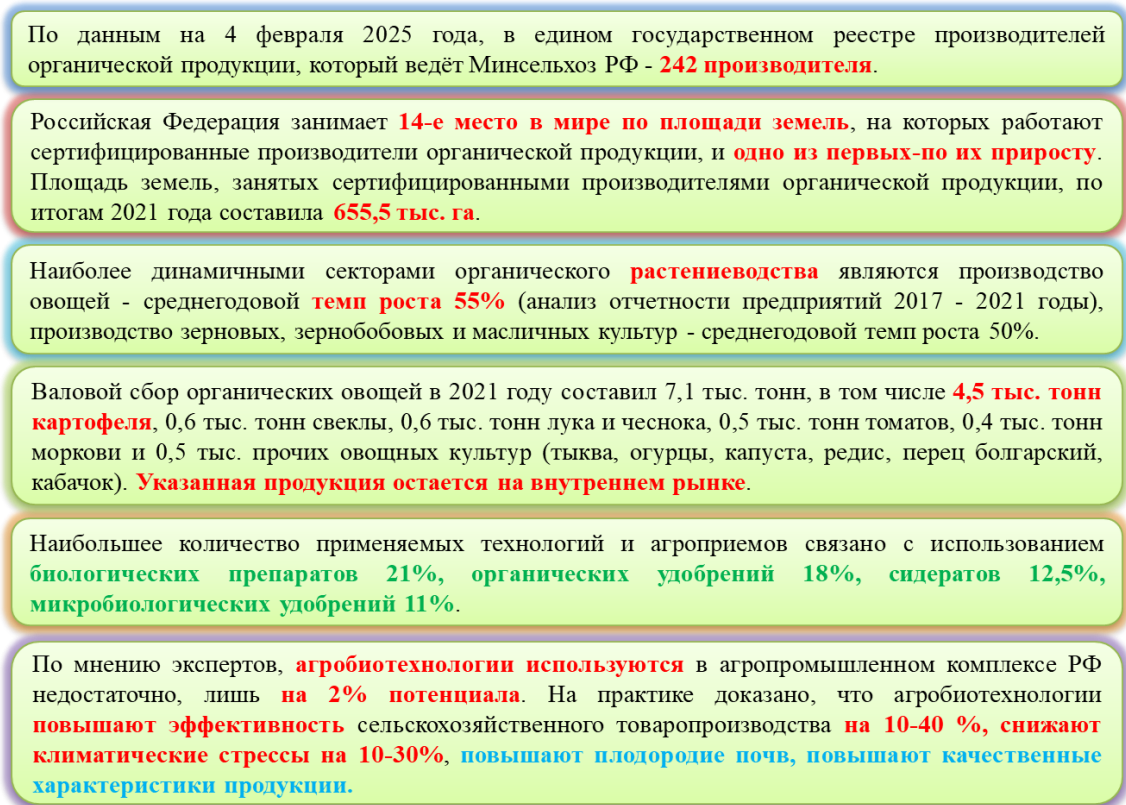


Рис.1. Показатели развития органического сельского хозяйства в РФ
Fig.1. Indicators of the development of organic agriculture in the Russian Federation

Производство органических продуктов решает ряд проблем в агропромышленном комплексе. Нормативно-правовая база, регулирующая органическое сельскохозяйственное производство, устанавливает ряд запретов на использование агрохимикатов, антибиотиков и стимуляторов роста химического происхождения.

Одним из основных продуктов питания, входящих в понятие «продуктовая корзина», то есть список базовых продуктов, на которые ориентируются при расчёте прожиточного минимума, является картофель [5]. Как в интенсивном, так и в органическом производстве, возделывание пропашных культур, в том числе картофеля, является основой производства [6, 7]. Качество получаемой продукции формируется и зависит от каждого этапа реализации технологии производства, начиная от правильной подготовки почвы и заканчивая способом предреализационной доработки и хранением полученной продукции [8-10]. Также на качество получаемой продукции, сроки её хранения и общее состояние почв будут влиять и применяемые средства питания и защиты растений.

В связи с жесткими требованиями органического производства по исключению из применения средств защиты растений гербицидов, возникает проблема уничтожения сорной растительности [11, 12]. Так потери урожая от сорной растительности могут достигать 65-70%, а использование допустимых мер при органической технологии, таких как

механическая обработка и ручная прополка защитных зон, повышает стоимость работ и снижает эффективность затрат труда [13-15].

В связи с этим разработка автоматизированного секционного рабочего органа (адаптера) для удаления сорной растительности в рядах пропашных культур является актуальной и важной задачей для технологии органического производства картофеля и других пропашных культур.

Цель исследований – установление зависимости эффективности удаления сорной растительности от конструктивно-технологических параметров автоматизированного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью в рядах пропашных культур.

Материалы и методы исследований. Для решения поставленных задач был использован комплекс общепринятых методов и подходов. Теоретические методы: математическое и компьютерное моделирование с использованием пакетов прикладных программ. Лабораторные испытания и статистические методы: анализ результатов численных и натурных экспериментов; машинное обучение моделей для разработки систем управления. Проектные методы: проектирование моделей установки и ее узлов в САПР, разработка технологической схемы. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась на ПК с использованием компьютерных программ MSExcel, Statistika 6.0. Для разработки программного обеспечения и программирования микроконтроллера использованы Microsoft Visual Studio 2019 и одноплатный компьютер RaspberryPI. При создании лабораторной установки использовали системы автоматизированного проектирования КОМПАС-3D, а также программы для 3D печати Repiter-Host.

Методика исследований автоматизированного рабочего органа для удаления сорной растительности в рядах пропашных культур разработана на основании положений ГОСТ 33677-2015 «Машины и орудия для междурядной и рядной обработки почвы. Методы испытаний» и РСТ РСФСР 740-87 «Картофель. Уход за посадками при гребневой технологии возделывания».

При изучении зависимости эффективности удаления сорной растительности и конструктивно-технологических параметров автоматизированного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью в рядах пропашных культур рассматривались углы наклона боковых лезвий и глубина обработки.

Результаты. В ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ была разработана лабораторная установка для исследования секционного рабочего органа для удаления сорной растительности в рядах пропашных культур (рис. 2).



Рис.2. Лабораторная установка автоматизированного секционного рабочего органа
1 – рама, 2 – мотор-колесо, 3 – автоматизированный секционный рабочий орган

Fig.2. Laboratory setup of an automated sectional working tool: 1 – frame, 2 – motor-wheel, 3 – automated sectional working tool

Экспериментальная установка для исследования зависимости эффективности удаления сорной растительности и конструктивно-технологических параметров автоматизированного секционного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью в рядах пропашных культур представляет собой раму 1 с приводными мотор-колесами 2; управление осуществляется от микрокомпьютера через драйвер в зависимости от установленной скорости. Схема прополочного ножа для секционного рабочего органа показана на рисунке 3.

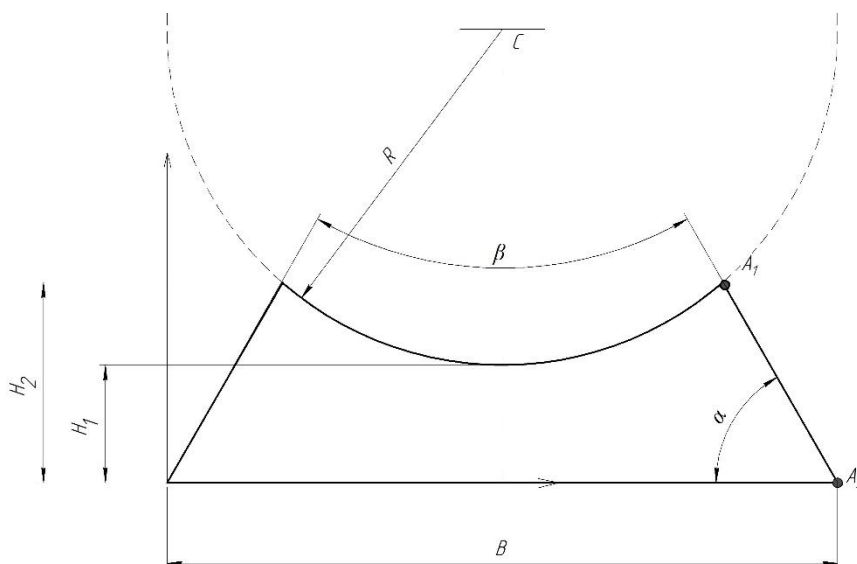


Рис.3. Схема прополочного ножа
Fig.3. Weeding knife diagram

Ширина прополочного ножа B равна ширине полки гребня, тогда радиус центральной части ножа равен:

$$R=B/2 \quad (1)$$

Угол раствора боковых лезвий β прополочного ножа определяется по формуле

$$\beta=180-2\alpha \quad (2)$$

При этом ширина ножа H_2 является фиксированной величиной и обеспечивает минимальную допустимую ширину прополочного ножа для взаимодействия с гребнем. Боковые кромки прополочного ножа симметричны и для расчета возьмем только одну сторону. Для расчета геометрических параметров прополочного ножа принимаем $R=const$ [16, 17].

Боковая кромка прополочного ножа проходит через $A_2 = (B, 0)$ и наклонена под углом α к основанию. Точка касания A_1 лежит на этой кромке на высоте H_2 , поэтому ее координаты (x_1, H_2) , x_1 определяются по формуле 3:

$$x_1 = B - H_2 \operatorname{ctg} \alpha \quad (3)$$

Окружность радиусом должна сопрягаться с прямой в точке A_1 перпендикулярно боковой кромке. Нормаль к кромке имеет угол $90^\circ - \alpha$ к горизонту, значит центр окружности C лежит на нормали, проходящей через A_1 , под этим углом и на расстоянии R :

$$C = A_1 + R [\cos(90^\circ - \alpha), \sin(90^\circ - \alpha)] = (x_1 + R \sin \alpha, H_2 + R \cos \alpha) \quad (4)$$

Тогда разница s между H_1 и H_2 определяется следующим уравнением:

$$s = H_2 - H_1 = H_2 - (yC - R) = H_2 - (H_2 + R \cos \alpha - R) = R(1 - \cos \alpha). \quad (5)$$

При фиксированных R и H_2 разница s зависит только от α :

$$s(\alpha) = R(1 - \cos \alpha). \quad (6)$$

Данное выражение показывает, что s растет с увеличением угла α , для определения характера провисания используется производная по углу

$$ds/d\alpha = R \sin \alpha \geq 0 \quad (7)$$

При этом граничные условия:

$$\alpha = 0^\circ \Rightarrow s = 0, H_1 = H_2 - R.$$

$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow s = R, H_1 = H_2 - R(1 - 0) = H_2 - R + 0 = H_2 - R(1 - \cos 90^\circ) = H_2 - R.$$

Необходимые условия принадлежности A_1 отрезку боковой кромки между вершинами по абсциссе для $\alpha \in (0, 90^\circ)$:

$$x_1 \leq B \Leftrightarrow H_2 \operatorname{ctg} \alpha \geq 0 \quad (8)$$

Для планирования эксперимента использовали двухфакторный трехуровневый центральный композиционный план согласно разработанной матрице в трехкратной повторности. Уровни варьирования глубины хода прополочного ножа h и угла раствора боковых лезвий α в натуральных обозначениях с интервалами варьирования приведены в таблице.

Таблица. Факторы и уровни их варьирования

Table. Factors and levels of their variation

Факторы	Кодированное обозначение	Уровни факторов			Интервал
		-1	0	+1	
Глубина хода лезвия ножа, см	X1	2	4	6	2
Угол раствора боковых лезвий ножа α , град.	X2	45	60	75	15

Глубина хода прополочного ножа изменялась от 2 см до 6 см, что позволяло определить глубину подрезания однолетних сорных растений до фазы четырех листов. Угол наклона боковых лезвий изменялся в диапазоне 45-75 градусов, так граница угла $\alpha = 90$ градусов будет иметь наибольшее сопротивление при взаимодействии с гребнем при возвращении в рядок, а теоретически обоснованный угол 60 градусов [16] должен позволить

наиболее эффективно удалить сорные растения, а изменение угла в выбранных пределах позволит экспериментально это подтвердить.

В экспериментальном исследовании определялась зависимость удаления сорной растительности S от конструктивно-технологических параметров: значения глубины хода h и угла раствора α .

Для проведения исследования влияния угла наклона боковых лезвий на степень удаления сорной растительности изготовлено три прополочных ножа (рис. 4).



Рис. 4. Прополочные ножи для определения геометрических параметров
Fig. 4. Weeding knives for determining geometric parameters

При проведении эксперимента в случайном порядке выбирался номер опыта и на секционный рабочий орган устанавливался соответствующий прополочный нож. Через блок управления вводилась соответствующая глубина обработки и подавалась команда на выполнение проезда с заданной скоростью. Управление лабораторной установкой с секционным рабочим органом выполнялось через подключение к RaspberryPi от ноутбука через интерфейс удалённого рабочего стола (VNC) по сети WiFi.

Для детекции кустов картофеля в полевых условиях и формирования сигнала управления на прополочный нож при обходе картофеля обучена и развернута нейросетевая модель YOLOv5. Результаты обучения представлены на рисунке 5. Так как используемый метод распознавания объектов является методом обучения с учителем, необходимо передавать модели информацию о местоположении ограничивающих рамок. Для этого использовалось приложение Roboflow, в котором произвели аннотирование изображений [18]. Для опыта выбрана конфигурация YOLOv5m с входным разрешением 640×640. Для этого был собран набор фотографий в разрешении 4000×1800. В результате визуального анализа было отобрано 250 фотографии, которые поделили в объеме 200 шт. для обучения, и 50 шт. для валидации. Далее фотографии обрезами до размера 640×640. Также емкость данного набора была искусственно увеличена до 363 фотографий путем аргументации, где использовались такие методы, как поворот на 90 градусов, изменение ориентации, яркости.

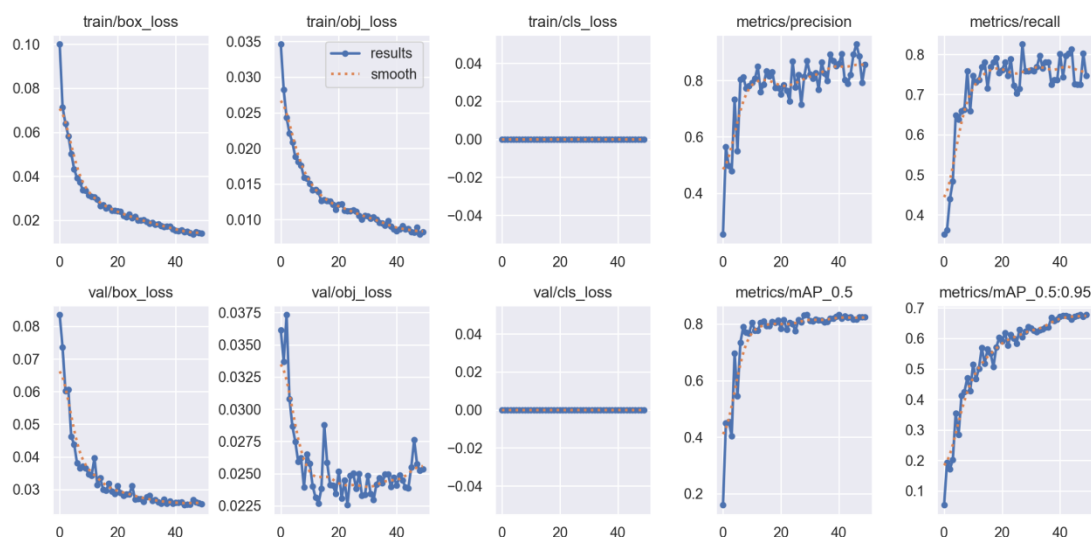


Рис. 5. Метрики обучения нейросети YOLOv5m
Fig. 5. Training metrics for the YOLOv5m neural network

Количество данных путем аргументации изображений было увлечено до 688 и по результатам 50 эпох функции потерь по координатам и объектности снижались без признаков переобучения. На контрольном наборе данных достигнуты следующие метрики: точность 0.90-0.93, полнота 0.78-0.85, mAP@0.5 около 0.95, mAP@0.5:0.95 на уровне 0.75-0.80. Графики динамики метрик демонстрируют быстрое нарастание mAP в первые 10-15 эпох и последующую стабилизацию. Пример распознавания картофеля с использованием обученной нейросети показан на рисунке 6.

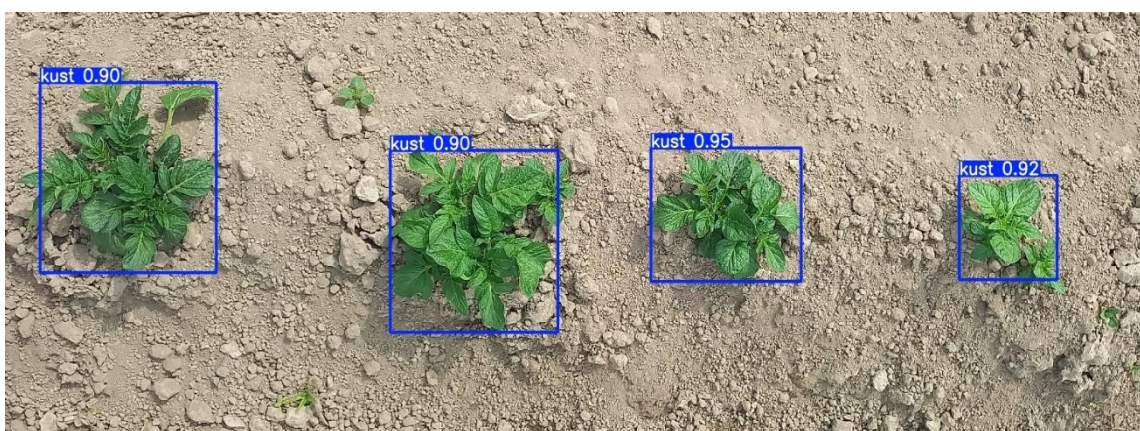


Рис. 6. Пример работы обученной модели
Fig. 6. Example of a trained model in action

Проведение опыта выполнялось на участке со схемой посадки картофеля 70x35. Участок представляет собой 27 гребней, длина которых составляет 10 м. При эксперименте были выбраны участки длиной 1,4 м и шириной 0,22 м. Степень уничтожения (подрезания) сорных растений определялась сравнением количества уничтоженных (подрезанных) и сохранившихся сорных растений на выбранных участках². На рисунке 7 показан процесс обхода куста картофеля без заглабления в почву.

² ГОСТ 20915-2011 Межгосударственный стандарт. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний. [Электронный ресурс] URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293788/4293788522.pdf> (дата обращения 14.05.2025)



Рис. 7. Обход картофеля растений прополочным ножом

Fig. 7. Bypassing potato plants with a weeding knife

При эксперименте скорость движения лабораторной установки составляла 0,8 м/с, что обосновывается сложными полевыми условиями и необходимостью контроля процесса взаимодействия прополочного ножа с гребнем. Засоренность однолетними сорными растениями составляла 53 шт. на 0,3 м². Опыт проводился после полного прорастания картофеля.

В результате экспериментальных исследований была получена математическая модель зависимости удаления сорной растительности S от угла наклона боковых лезвий α (град) и глубины хода ножа h (см):

$$S = 29,97 + 4,3117 * h + 1,8281 * \alpha - 2,8675 * h^2 + 0,2423 * h * \alpha - 0,0218\alpha^2 \quad (10)$$

По полученной математической модели построена поверхность отклика (рис. 8), показывающая взаимодействие факторов глубины хода прополочного ножа и угла раствора боковых лезвий при удалении сорной растительности.

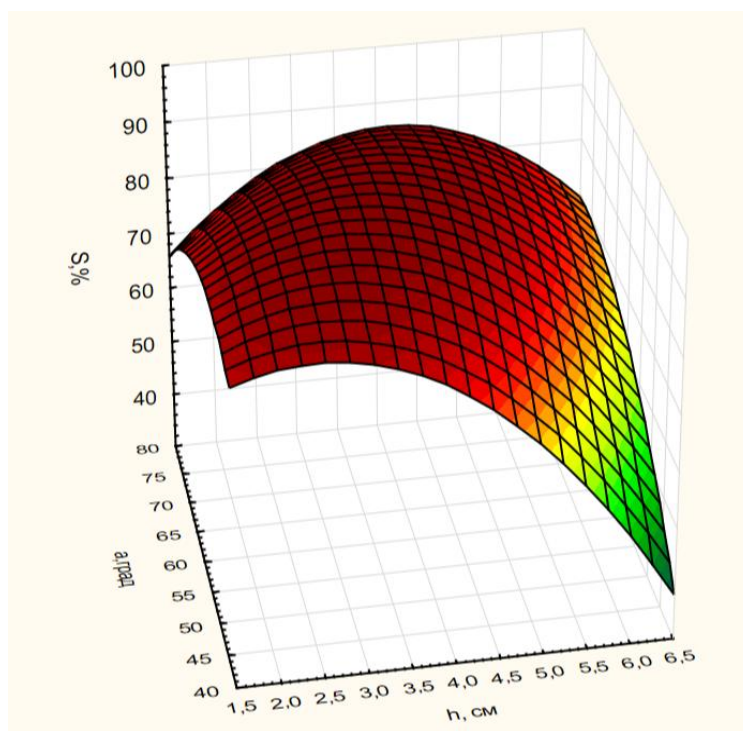


Рис. 8. Зависимость удаления сорной растительности от угла боковых лезвий и глубины хода.

Fig. 8. The dependence of weed removal on the angle of the side blades and the travel depth

Для анализа поверхности отклика воспользуемся математическим методом частных производных и найдем критическую точку M :

$$\frac{\partial S}{\partial h} = -5,735h + 0,2423 \alpha + 4,3117 \quad (11)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = 0,2423h - 0,0436 \alpha + 1,8288 \quad (12)$$

Решим систему уравнений для нахождения координат критической точки $M(h, \alpha)$:

$$\begin{cases} -5,735h + 0,2423 \alpha + 4,3117 = 0 \\ 0,2423h - 0,0436 \alpha + 1,8288 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h = 3,2997 \\ \alpha = 60,2544 \end{cases} \quad (13)$$

Найдем частные производные второго порядка:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial h \partial \alpha} = 0,2423 \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial h^2} = -5,735 \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial \alpha^2} = -0,0436 \quad (16)$$

Вычислим значения частных производных второго порядка в критической точке $M(h, \alpha)$. Для этого обозначим частные производные функции $S(h, \alpha)$ в критической точке M : A - вторая частная производная по переменной h , B - вторая частная производная по переменной α , C - смешанная вторая производная.

$$A = \frac{\partial^2 S}{\partial h^2} = -5,735 \quad (17)$$

$$C = \frac{\partial^2 S}{\partial \alpha^2} = -0,0436 \quad (18)$$

$$B = \frac{\partial^2 S}{\partial h \partial \alpha} = 0,2423 \quad (19)$$

Из выражений 17-19 следует, что

$$AC - B^2 = 0,1913 > 0 \quad (20)$$

Следовательно в точке M экстремум если $A < 0$, что говорит о том что в точке M максимум. Подставив значение координат в уравнение, находим $S(M) = 92,2\%$.

На основании анализа поверхности отклика определено, что при глубине обработки 3,3 см и угле раствора боковых лезвий равном 60,25 градусам, максимальный процент удаления сорной растительности составляет 92,2%.

Обсуждение. В работе [19] авторы приводят результаты испытаний вертикально вращающегося механического прополочного устройства в связке с роботизированной платформой. Система визуального контроля состоит из камер и бортовых компьютеров. С помощью искусственного интеллекта с глубоким обучением она формирует базы знаний для точного определения сорняков и культур, для которых определяется защитная зона. Система обнаружения, использующая технологию глубокого обучения, идентифицирует цель и на этой основе устанавливает защищенные и обрабатываемые зоны.

Рассмотренный в исследовании автоматизированный секционный рабочий орган может быть использован как исполнительное устройство для роботизированного средства с интеграцией в систему управления. Микрокомпьютер, на который загружена программа для управления прополочным ножом с использованием обученной нейросети YOLOv5, должен подключиться к блоку управления роботизированным средством для получения информации о скорости движения для корректной работы, а исполнительные механизмы секционного рабочего органа – к источнику питания.

В отличие от рассмотренной разработки, представленный в исследовании секционный рабочий орган может обрабатывать несимметричные культуры, выбирая сторону обхода растения.

Выводы. Развитие органического сектора в России необходимо рассматривать как составной элемент системы устойчивого развития сельского хозяйства и окружающей среды. С точки зрения, агротехнических приёмов, органические методы хозяйствования — это методы, которые позволяют поддерживать плодородие почв в течение длительного времени, а использование технологий, позволяющих получать органическую продукцию, не нарушает естественного функционирования природной среды.

В ИАЭП филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработана лабораторная установка для исследования зависимости эффективности удаления сорной растительности от конструктивно-технологических параметров автоматизированного секционного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью в рядах пропашных культур.

Теоретически обоснованы зависимости геометрии прополочного ножа от технологических параметров возделываемой культуры. Для детекции и обхода прополочным ножом растений картофеля подготовлен датасет для обучения и развертывания нейросетевой модели YOLOv5, включающий в себя 688 фотографий и позволяющий достичь точности распознавания растений картофеля 0,95.

В ходе экспериментальных исследований определена зависимость удаления сорной растительности от конструктивно-технологических параметров автоматизированного секционного рабочего органа. В результате анализа и поиска экстремума полученной зависимости установлено, что угол раствора боковых лезвий прополочного ножа должен составлять 60,25 градусов, а глубина обработки – 3,3 см. Наибольший процент удаления сорной растительности при этих параметрах составит 92,2% в зоне обработки. При этом травмирование и повреждение культурных растений не выявлено. В дальнейших исследованиях секционный рабочий орган использован как исполнительное устройство для роботизированного средства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Логинов Г.А., Фомин И.М., Орешин Е.Е., Захаров А.М. Экологические требования к технико-технологическим решениям при производстве картофеля // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2010. № 82. С. 51-57. EDN: TFYOSJ
2. Захаров А.М., Устроев А.А., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д. Методы проектирования технологий органического производства продукции растениеводства //

- Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. №19(1). С.13-21. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-13-21> EDN: EOWTQK
3. Казакиевич П.П., Комлач Д.И., Юрин А.Н., Воробей А.С. К разработке машин на основе искусственного интеллекта и систем технического зрения // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 1(114). С. 14-31 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-1114-14-31>
4. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии 2022. №16(4). С. 4-12 <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>
5. Орешин Е.Е., Захаров А.М. Повышение качества товарного картофеля // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 1. С. 8-9. EDN: UNJUDT
6. Фомин И.М., Васильев А.Н., Захаров А.М. Адаптация технико-технологических решений в картофелеводстве к условиям сельхозпроизводителя // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 5. С. 24-25. EDN: OHRZZB
7. Фомин И.М., Логинов Г.А., Захаров А.М. Техничко-технологическая модернизация картофелеводства в товаропроизводящих хозяйствах Северо-Запада РФ // Сборник научных докладов ВИМ. 2011. Т. 1. С. 95-103. EDN: OYZQKP
8. Фомин И.М., Орешин Е.Е., Логинов Г.А., Захаров А.М. Механизированная технология производства экологически чистого картофеля // Экология и сельскохозяйственные технологии: агроинженерные решения. Матер. 7-й Межд. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 17-19 мая 2011 г.). Санкт-Петербург: ИАЭП. 2011. Т. 2. С. 141-146. EDN: QEWOX
9. Фомин И.М., Захаров А.М. Энергетическая эффективность картофелеводства от технико-технологических решений // Техника и оборудование для села. 2012. № 1. С. 26-27. EDN: OOMPUJ
10. Джаббаров Н.И., Захаров А.М., Зыков А.В. Оценка эффективности применения аэродинамического способа для предреализационной обработки картофеля // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 95. С. 136-143. EDN: USSBTS
11. Угловский А.С., Семеренко Н.Ю. Автоматизированная система уничтожения сорных растений с использованием высоковольтного разряда и механизма обратной связи // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 1(122). С. 104-120. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-1122-104-119>
12. Захаров А.М., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д. Обоснование элементов конструкции машины для борьбы с сорной растительностью на основе морфологического анализа // АгроЭкоИнженерия. 2023. №. 1 (114). С. 42-53 EDN: XDHUQO
13. Оказова З.П., Адаев Н.Л., Ханиева И.М. Экологические аспекты вредоносности сорных растений в агроценозе картофеля // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 5 (395). С. 545-548 https://doi.org/10.55186/25876740_2023_66_5_545
14. Кафиев И. Р., Романов П. С., Романова И. П. Комплексная методика выбора наилучшего варианта робота для прополки сорняков по совокупности его характеристик // Вестник НГИЭИ. 2023. № 1 (140). С. 7-22. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-1-7-22>
15. Смелик В.А., Перекопский А.Н., Алексеева А.С. Оценка засоренности посевов тимофеевки луговой на семена по органической технологии // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 3(120). С. 32-45. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-3120-32-457>
16. Захаров А.М., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д. Теоретическое обоснование конструктивных параметров рабочего органа автоматизированной секции культиватора // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 2 (119). С. 58-71. EDN: AMYRAD
17. Захаров А.М., Комоедов А.Д., Мурзаев Е.А. Устройство для прополки в рядах пропашных культур. Патент на изобретение RU 2830875 C1, 26.11.2024. Заявка № 2024112890 от 14.05.2024.

18. Полещенко Д.А., Петров В.А., Михайлов И.С. Опыт применения нейронной сети YOLOv5 для детектирования растений подсолнечника // Инженерный вестник Дона. 2022. №10. С. 217-228. EDN: KXBXPА

19. Quan L., Jiang W., Li H., Wang QI., Chen L. Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode // Biosystems Engineering. 2022. Vol. 216. P. 13-31 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.019>

REFERENCES

1. Loginov G.A., Fomin I.M., Oreshin E.E., Zakharov A.M. Environmental requirements for technical and technological solutions in potato production. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2010;82:51-57. (In Russ.) EDN: TFYOSJ

2. Zakharov A.M., Ustroeв A.A., Murzaev E.A., Komoedov A.D. Methods for designing technologies of organic crop production. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2025;19(1):13-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-13-21> EDN: EOWTQK

3. Kazakievich P.P., Komlach D.I., Yuryn A.N., Verabei A.S. On development of machines based on artificial intelligence and vision systems. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2023; 1(114): 14-31 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-1114-14-31>

4. Lobachevskiy Ya. P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2022;16(4): 4-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>

5. Oreshin E.E., Zakharov A.M. Improving the quality of marketable potatoes. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve* = Agricultural Machinery. 2012;1:8-9. (In Russ.) EDN: UNJUDT

6. Fomin I.M., Vasiliev A.N., Zakharov A.M. Adaptation of technical and technological solutions in potato growing to the conditions of an agricultural producer. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2011; 5: 24-25. (In Russ.) EDN: OHRZZB

7. Fomin I.M., Loginov G.A., Zakharov A.M. Technical and technological modernization of potato growing in commodity-producing farms of the North-West of the Russian Federation. *Collection of Scientific Reports of VIM*. 2011;1:95-103. (In Russ.) EDN: OYZQKP

8. Fomin I.M., Oreshin E.E., Loginov G.A., Zakharov A.M. Mechanized technology for the production of environmentally friendly potatoes. In: *Ecology and Agricultural Technologies: Agroengineering Solutions. Proc. 7th Int. Sci. Prac. Conf. (Saint Petersburg, May 17-19, 2011)*. Saint Petersburg: IIEP. 2011; 2: 141-146. (In Russ.) EDN: QEWYOX

9. Fomin I.M., Zakharov A.M. Energy efficiency of potato growing depending on technical and technological solutions. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2012;1:26-27. (In Russ.) EDN: OOMPUJ

10. Dzhabborov N.I., Zakharov A.M., Zykov A.V. Evaluation of aerodynamic method of pre-sale treatment of potato. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2018; 95: 136-143. (In Russ.) EDN: USSBTS

11. Uglovskii A.S., Semerenko N.Yu. Automated weed killing system using high voltage discharge and feedback mechanism. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2025;1(122):104-120. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-1122-104-119>

12. Zakharov A.M., Murzaev E.A., Komoedov A.D. Morphological analysis-based justification of structural elements of a weed control machine. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2023; 1 (114): 42-53 (In Russ.) EDN: XDHUQO

13. Okazova Z.P., Adaev N.L., Khanieva I.M. Environmental aspects of harmful weed plants in potato agrocenosis. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal* = International Agricultural Journal. 2023; 5 (395): 545-548 (In Russ.) https://doi.org/10.55186/25876740_2023_66_5_545
14. Kafiev I. R., Romanov P. S., Romanova I. P. A comprehensive method of choosing the best work option for weeding weeds according to the totality of its characteristics. *Vestnik NGIEI* = Bulletin of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University. 2023;1 (140):7-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-1-7-22>
15. Smelik V.A., Perekopskiy A.N., Alekseeva A.S. Estimating the weed infestation of organic plantations of common timothy grown for seed. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2024; 3(120): 32-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-3120-32-457>
16. Zakharov A.M., Murzaev E.A., Komoyedov A.D. Theoretical substantiation of the design parameters of the working body of an automated cultivator section / *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2024; 2 (119): 58-71. (In Russ.) EDN: AMYRAD
17. Zakharov A.M., Komoyedov A.D., Murzaev E.A. Device for weeding in rows of row crops. Patent for invention RU 2830875 C1, 2024. (In Russ.)
18. Poleshchenko D.A., Petrov V.A., Mikhailov I.S. Experience with the YOLOv5 neural network for sunflower plant detection. *Inzhenernyi vestnik Dona* = Engineering Journal of Don. 2022;10: 217-228. (In Russ.) EDN: KXBXPA
19. Quan L., Jiang W., Li H., Wang QI., Chen L. Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode. *Biosystems Engineering*. 2022; 216: 13-31 (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.019>

Об авторах:	About the authors:
Комоедов Алексей Дмитриевич , младший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3) komoedov.alexej@yandex.ru , ORCID: 0009-0008-7718-6436	Alexey D. Komoyedov , junior researcher, Department of Agroecology in Crop Production, Institute of Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634 Russia) komoedov.alexej@yandex.ru , ORCID: 0009-0008-7718-6436
Заявленный вклад авторов Автор выполнил все функции проекта.	Author's contribution Single author article – the author fulfilled all the functions in the project
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interests The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации	The author has read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 05.08.2025	Received: 05.08.2025
Одобрена после рецензирования: 10.09.2025	Approved after reviewing: 10.09.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОДНОДИСКОВЫХ СОШНИКОВ СОВРЕМЕННЫХ ЗЕРНОВЫХ СЕЯЛОК

Михаил Александрович Терёхин✉

«Радиозавод», г. Пенза, Россия

m.a.terekhin@rf58.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1619-9627>

Аннотация. В настоящее время в конструкции зерновых сеялок стали достаточно широко применяться однодисковые сошники ввиду их универсальности, высоких качественных показателей работы при посеве семян в предварительно обработанную почву и сравнительно низкому тяговому сопротивлению. В статье представлены результаты исследований конструктивных особенностей однодисковых сошников современных зерновых сеялок Unia Amber, Väderstad Rapid, Junkkari S, Mascar Montana, C-6000 «Быстрица», Pöttinger Vitasem и Kverneland DA, предназначенных для посева семян в предварительно обработанную почву по так называемой «классической технологии». В результате исследований установлено, что однодисковые сошники различаются между собой способом размещения на раме сеялки, способом создания рабочего усилия, наличием или отсутствием механизма копирования рельефа поверхности почвы, его конструкцией, диаметром и формой диска и другими конструктивными особенностями, обеспечивающими им конкретное назначение и технические характеристики для работы в определенных агротехнических условиях. Проведено сравнение технических параметров однодисковых сошников рассмотренных моделей зерновых сеялок, таких как тип сошника, способ внесения семян и удобрений, тип подвески сошника, тип, форма и диаметр диска, тип опорного устройства, максимальное давление сошника на почву, а также ширина междурядья на сеялке. На основании проведенного анализа конструктивных особенностей однодисковых сошников предложена их классификация по ряду отличительных признаков. В результате проведения исследований сделан вывод, что самыми совершенными среди однодисковых сошников являются копирующие сошники, обеспечивающие при работе такие показатели, как соответствие фактической глубины заделки семян заданным значениям и равномерность заделки семян по глубине.

Ключевые слова: однодисковый сошник, комбинированный сошник, подвеска сошника, опорно-прикатывающее колесо, копирующий сошник

Для цитирования: Терёхин М.А. Анализ конструктивных особенностей однодисковых сошников современных зерновых сеялок // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 3(124). С. 33-47 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-33-47>

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF SINGLE-DISC COLLECTORS OF MODERN GRAIN SEEDERS

Mikhail A. Terekhin✉
Radiozavod, Penza, Russia

m.a.terekhin@rf58.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1619-9627>

Abstract. Currently, the design of grain seeders widely includes single-disc coulters. They can perform various operations when sowing seeds in pre-tilled soil and demonstrate high-quality performance and relatively low draft resistance. This article presents the research results on the design features of single-disc coulters from modern grain seeders, such as Unia Amber, Väderstad Rapid, Junkkari S, Masag Montana, S-6000 Bystrica, Pöttinger Vitasem, and Kverneland DA. These seeders are designed for sowing seeds in pre-tilled soil by the “classical” technique. The study established that single-disc coulters differ in how they are positioned on the seeder frame, how they generate a working force, whether they have a mechanism for copying the soil surface relief. They also vary in the structure, diameter and shape of the disc, as well as other design features that give them a specific purpose and technical characteristics for operation under certain agrotechnical conditions. The study compared the technical parameters of single-disc coulters in the considered grain seeder models. These parameters were the type of coulters, how seeds and fertilizers are applied, the suspension system for the coulters, the shape, diameter and type of disk, the support device, the greatest pressure the coulters exert on soil, and the width of row spacing on the seeder. Based on the design analysis of single-disc coulters, the study proposed their classification in terms of several distinctive features. The study concluded that the most advanced single-disc coulters are those following ground contour. Their operation provides such indicators as the correspondence between the actual seed placement depth and the specified values, as well as the uniformity of seed depth placement.

Keywords: single-disc coulters, combined coulters, coulters suspension, support and pressing wheel, follower hoe opener

For citation: Terekhin M.A. Analysis of the design features of single-disc coulters of modern grain seeders. *AgroEcoEngineering*. 2025; 3(124): 33-47 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-33-47>

Введение. Однодисковые сошники стали достаточно широко применяться в конструкциях современных зерновых сеялок ввиду их универсальности и высоких качественных показателей работы при посеве семян в предварительно обработанную почву [1, 2]. В настоящее время однодисковые сошники применяются в таких моделях сеялок, как С-6ПМЗ, С-7,2ПМЗ, С-6ПМ4, С-7,2ПМ4 и С-6000 «Быстрица» производства АО «Радиозавод», СЗ-6 производства завода «Ритм», сеялках СПУ производства ОАО «Лидагропромаш» [3], в семействах сеялок Nina, Pina, Pinta производства компании Maschio Gaspardo, моделях D9 и Citan производства компании Amazonen-Werke, моделях Vitasem и Aerosem производства компании PÖTTINGER Landtechnik GmbH, FM-400 и Amber производства компании Unia Group, моделях Satio, DL и DA производства компании Kverneland, моделях S и M производства компании Junkkari, сеялках Väderstad Rapid, Mascar Montana и многих других.

Ввиду значительного многообразия производителей сеялок, в конструкциях которых используются однодисковые сошники, целесообразно провести анализ их конструктивных особенностей, технических параметров, преимуществ и недостатков, а также классифицировать их по отличительным признакам.

Цель работы – анализ конструктивных особенностей и сравнение технических параметров однодисковых сошников современных зерновых сеялок отечественного и зарубежного производства.

Материалы и методы. Проведено аналитическое исследование конструкций однодисковых сошников зерновых сеялок, используемых в сельскохозяйственном производстве при посеве в предварительно обработанную почву. Проанализированы общее устройство и конструктивные особенности однодисковых сошников, их достоинства и недостатки, а также проведено сравнение их технических параметров и показателей работы.

Объект исследования: однодисковые сошники современных зерновых сеялок, предназначенных для посева семян в предварительно обработанную почву.

Предмет исследования: конструктивные особенности и технические параметры однодисковых сошников современных зерновых сеялок.

В перечень определяемых параметров однодисковых сошников входят тип сошника, способ внесения семян и удобрений, тип подвески сошника, тип, форма и диаметр диска, тип опорного устройства, максимальное давление сошника на почву, а также ширина междурядья на сеялке.

В исследовании сравнивали однодисковые сошники современных зерновых сеялок моделей Unia Amber, Väderstad Rapid, Junkkari S, Mascar Montana, C-6000 «Быстрица», Pöttinger Vitasem и Kverneland DA.

Результаты исследований. Относительно простую конструкцию имеют однодисковые сошники, устанавливаемые на раму посевной машины посредством рычажной подвески через резиновые эластомеры (эластичные жгуты). Примерами таких рабочих органов являются сошники сеялок С-6ПМЗ и С-7,2ПМЗ «Быстрица», Unia Amber и др. Конструктивно такие сошники напоминают стойки дисковых луцильников. За счет значительного давления вырезного диска на почву позволяют производить посев в почву с большим количеством пожнивных остатков на ее поверхности [4]. Часто такие сошники используются в конструкции комбинированных сеялок и посевных комплексов для предварительной предпосевной обработки почвы и отдельного внесения гранулированных минеральных удобрений. Примерами таких комбинированных посевных машин являются модели Farmet Falcon, Pöttinger Terrasem, Gaspardo Opera и др.

Рассмотрим подробнее особенности конструкции однодискового сошника сеялки Unia Amber³ (рис. 1).

³ Heavy mechanical row seed drills Unia Amber 3000/3, 3500/4. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://uniamachines.com/en/products/seed-drills/42-amber-3000-3500> (дата обращения 30.06.2025)

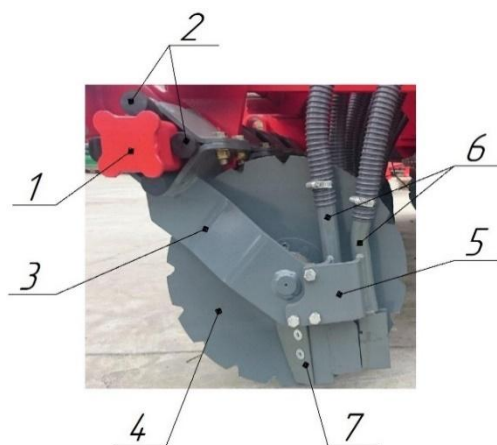


Рис. 1. Конструкция не копирующего однодискового сошника сеялки Unia Amber:

- 1 – брус рамы сеялки; 2 – жгут эластичный; 3 – рычаг подвески сошника;
4 – диск вырезной; 5 – корпус; 6 – семяпровод; 7 – чистик (анкер)

Fig. 1. Design of the not-following-ground-contour single-disc coulter of Unia Amber seed drill:

- 1 – seed drill frame beam; 2 – elastic harness; 3 – coulter suspension lever;
4 – notched disc; 5 – body; 6 – seed tube; 7 – scraper (anchor)

Сошник размещается на брус 1 рамы сеялки посредством эластичных жгутов 2. На рычаге 3 размещается корпус сошника 5, на котором устанавливаются плоский вырезной диск 4, семя- и тукопроводы 6 и чистик 7, выполняющий роль анкера. Семя- и тукопроводы 6 обеспечивают раздельную подачу семян и гранулированных минеральных удобрений в борозду, при этом обеспечивая их размещение на разной глубине.

За счет рычажной подвески на эластичных жгутах сошник способен оказывать на почву давление более 100 кг. Эластичные жгуты в конструкции подвески сошника также выполняют роль демпфера, предохраняя его от поломки в случае встречи диска с камнем в почве. Однодисковые сошники, выполненные на рычажной подвеске на эластичных жгутах, не имеют индивидуальных настроек, т.к. настройка глубины высева производится централизованно, из кабины трактора, путем изменения положения рамы сеялки по высоте относительно уровня поверхности поля.

Недостатком однодисковых сошников на рычажной подвеске на эластичных жгутах является отсутствие механизма копирования рельефа поверхности почвы, ввиду чего такие сошники не обеспечивают компактного размещения семян по глубине на полях, имеющих неровности. Поэтому наиболее часто они применяются для внесения гранулированных минеральных удобрений, требования к равномерности внесения которых по глубине не такие строгие, как для семян.

Указанный недостаток однодисковых сошников на рычажной подвеске на эластичных жгутах устранен в конструкции копирующего сошника сеялки Väderstad Rapid⁴, рычаг 3 подвески которого также размещается на раме 1 сеялки посредством эластичных жгутов 2 (рис. 2).

⁴ Универсальный посевной агрегат Väderstad Rapid. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.vaderstad.com/ru/podderzhka/guides-for-your-machine/rapid/> (дата обращения 30.06.025)

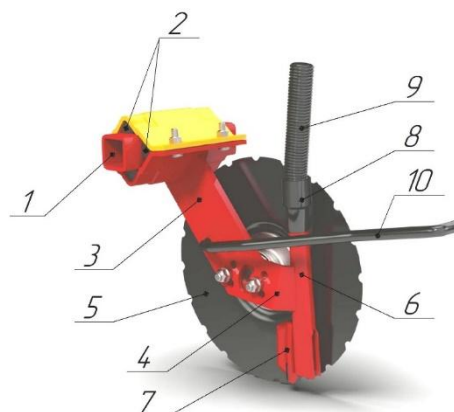


Рис. 2. Общее устройство копирующего однодискового сошника сеялки Väderstad Rapid:

- 1 – брус рамы сеялки; 2 – жгут эластичный; 3 – рычаг подвески сошника; 4 – корпус;
5 – диск вырезной; 6 – семяпровод; 7 – чистик; 8 – переходник резиновый;
9 – семяпровод гибкий; 10 – штанга механизма копирования сошника

Fig. 2. General structure of the Väderstad Rapid seed drill single-disc coulter following ground contour:

- 1 – seed drill frame beam; 2 – elastic harness; 3 – coulter suspension lever; 4 – body;
5 – notched disc; 6 – seed tube; 7 – scraper; 8 – rubber adapter;
9 – flexible seed tube; 10 – rod of coulter mechanism for following the ground contour

На рычаге 3 размещается корпус сошника 4, на котором с возможностью вращения в необслуживаемом подшипниковом узле устанавливается плоский вырезной диск 5, а также жестко крепится трубчатый семяпровод 6 с чистиком 7 в нижней части. К трубчатому семяпроводу 6 посредством резинового переходника 8 крепится гибкий семяпровод 9. Механизм копирования данного сошника выполнен в виде тяги 10, соединяющей рычаг 3 с батареей прикатывающих колес сеялки (не показаны).

Работает данный механизм копирования следующим образом: батарея прикатывающих колес сеялки перекачивается по неровностям поверхности поля, копируя их. За счет штанги 10 изменение положения опорно-прикатывающего колеса по высоте сказывается на положении рычага 3, и диск 5 сошника таким образом копирует неровности поверхности поля, обеспечивая постоянство величины заглубления. В силу этого, соединение сошника тягой 10 с прикатывающим колесом обеспечивает внесение семян на одну глубину по всей ширине захвата сеялки. Благодаря прочной и жесткой конструкции сошника сеялки Väderstad Rapid и высокому давлению на почву, достигающему 150 кг, он не выглубляется из почвы при встрече с малейшим препятствием в виде комка почвы или небольшого камня. В большинстве случаев сошник разрушает их или вдавливают в почву, не меняя глубины заделки семян. Однако, встретившись в почве с крупным камнем или иным препятствием, сошник выглубляется, преодолевая его, и затем возвращается в исходное положение. Соответственно, риск неравномерного размещения семян по глубине и возможность поломки сошника сводятся к минимуму.

Несмотря на явные преимущества подвески сошника на эластичных жгутах, наибольшее распространение все же в конструкциях зерновых сеялок получили однодисковые сошники на рычажной пружинной подвеске [2, 5]. В качестве примера

рассмотрим конструкцию сошника сеялки Junkkari S⁵, предназначенной для посева семян в предварительно обработанную почву (рис. 3). Данный сошник состоит из кронштейна 1, крепящегося к раме сеялки (не показана), к которому шарнирно посредством оси 2 крепится рычаг 3, в передней части которого имеется кронштейн 4 для крепления пружины растяжения (не показана). В задней части рычага 3 к нему крепится корпус 5, к которому в свою очередь крепятся плоский диск 6, трубчатый семяпровод 7 и чистик 8. В месте контакта диска 6 и чистика 8 образуется клин, раздвигающий почву и образующий борозду, в которую семена подаются через трубчатый семяпровод 7.

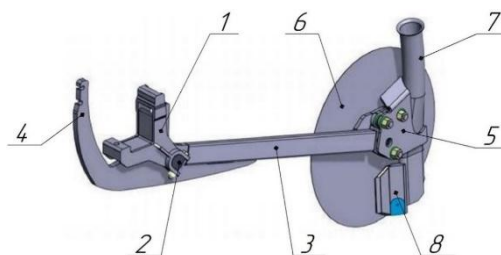


Рис. 3. Конструкция копирующего однодискового сошника сеялки Junkkari S:

1 – кронштейн; 2 – ось; 3 – рычаг подвески сошника; 4 – кронштейн пружины растяжения (не показана); 5 – корпус; 6 – диск; 7 – семяпровод трубчатый; 8 – чистик

Fig. 3. Construction of the single-disc coulter following the field surface in Junkkari S seeder:

1 – bracket; 2 – axle; 3 – coulter suspension lever; 4 – tension spring bracket (not shown); 5 – body; 6 – disc; 7 – tube-like seed pipe; 8 – scraper

У копирующего сошника сеялки Junkkari S нет отдельной регулировки глубины заделки семян, т.к. она определяется положением рамы сеялки. Давление сошника на почву настраивается механически и может составлять 20 или 30 кг. Для настройки давления сошника на почву зацеп пружины растяжения размещают в верхнем или нижнем посадочном месте рычага 4. При правильной настройке положения рамы сеялки Junkkari S и величины давления сошника на почву он имеет вертикальный ход величиной 150 мм, что дает ему возможность преодолевать препятствия на поверхности поля и копировать рельеф его поверхности. Однако отсутствие опорного устройства у сошника не гарантирует его заглубления на большую глубину, чем настроенная положения рамы сеялки, что является недостатком сошника такого типа.

Указанный недостаток однодискового сошника сеялки Junkkari S, связанный с возможностью его переаглубления, устранен в конструкции копирующего сошника сеялки Mascar Montana, рычажная подвеска которого состоит из кронштейна 1 и двуплечего рычага, верхняя часть 3 которого служит для крепления пружины 4 (рис. 4). На нижней части 2 двуплечего рычага размещается корпус 5, на котором в свою очередь размещаются диск 6, семяпровод 7 и дисковый чистик 8. В отличие от сошника сеялки Junkkari S, сошник сеялки Mascar Montana имеет индивидуальную регулировку заглубления, обеспечиваемую опорной пластиной 9, изменяющей свое положение по высоте относительно диска 6 за счет поворота

⁵ Operating Manual of Seed Drills Junkkari 300 S-M-D [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://junkkari.fi/en/tuote/junkkari-s-model/> (дата обращения 01.07.2025)

вокруг оси с последующей фиксацией выбранного положения посредством стопора 10, устанавливаемого в одно из нескольких регулировочных отверстий⁶.

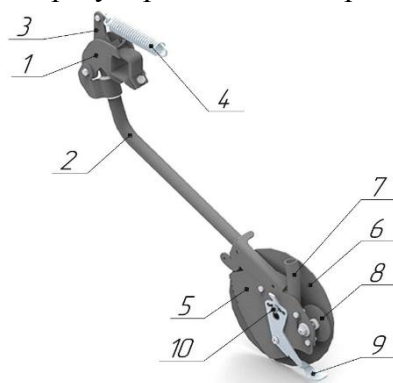


Рис. 4. Общее устройство копирующего однодискового сошника сеялки Mascar Montana:

1 – кронштейн; 2 – нижняя часть двуплечего рычага; 3 – верхняя часть двуплечего рычага; 4 – пружина растяжения; 5 – корпус; 6 – диск; 7 – семяпровод; 8 – чистик дисковый; 9 – пластина опорная; 10 – стопор

Fig. 4. General structure of the following-the-field-contour single-disc coulter of Mascar Montana seed drill:

1 – bracket; 2 – lower part of the double-arm lever; 3 – upper part of the double-arm lever; 4 – tension spring; 5 – body; 6 – disk; 7 – seed pipe; 8 – disc scraper; 9 – support plate; 10 – stopper

Благодаря значительному рабочему усилию на диске 6, достигающему 45 кг, и наличию опорной пластины 9, сошник сеялки Mascar Montana подходит для посева семян на почвах любого типа, включая почвы с большим количеством пожнивных остатков, а благодаря наличию резинового дискового чистика 8 обеспечивает возможность работы и на почвах высокой влажности.

В качестве недостатка рассматриваемого сошника сеялки Mascar Montana стоит отметить конструкцию опорной пластины 9, которая при движении по почве увеличивает его тяговое сопротивление, а также она подвержена сильному естественному износу при взаимодействии с почвой.

Более совершенную конструкцию имеет копирующий однодисковый сошник сеялки С-6000 «Быстрица»⁷, который на брус 1 рамы сеялки крепится кронштейном 2 (рис. 5). К кронштейну 2 шарнирно посредством втулок, выполняющих роль необслуживаемых подшипников скольжения, крепится рычаг 3, к уху которого крепится зацеп пружины растяжения 4, служащей для создания на сошнике рабочего давления на почву [6]. Степень натяжения пружины 4, а значит и величина давления сошника на почву, регулируется централизованно для группы сошников посредством поворотного механизма 5, к проушине которого крепится второй зацеп пружины 4. На нижней части рычага 4 смонтирован корпус 6, на котором установлены остальные элементы сошника, такие как диск 7, семяпровод 8, чистик 9 и рычаг 10 с опорным колесом 11 [7,8]. Настройка глубины борозды на сошнике

⁶ Универсальные сеялки Mascar Arizona / Florida / Montana. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pdf.mascar.it/pdf-en/mascar-spa/arizona-florida-montana/169664.html> (дата обращения 01.07.2025)

⁷ Новые образцы посевной техники АО «Радиозавод». Зерновая сеялка С-6000 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://promo-seyalki-bystrisa.ru/page34315254.html> (дата обращения 10.07.2025)

осуществляется посредством механизма 12, представляющего собой фиксатор, устанавливаемый в один из 6 регулировочных пазов, обеспечивая при этом 6 фиксированных положений опорного колеса 11. Однодисковый сошник сеялки С-6000 «Быстрица» обеспечивает возможность посева семян при высокой скорости движения сеялки, гарантирует высокую равномерность размещения семян в борозде по глубине, а также не требует технического обслуживания [6].

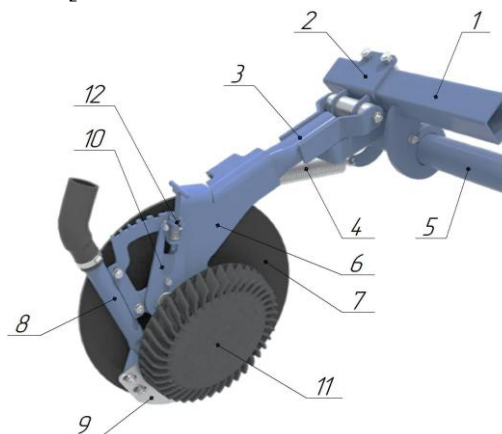


Рис. 5. Конструкция сошника сеялки С-6000 «Быстрица»:

1 – брус рамы сеялки; 2 – кронштейн; 3 – рычаг подвески сошника; 4 – пружина; 5 – механизм регулировки давления сошника на почву; 6 – корпус; 7 – диск; 8 – семяпровод; 9 – чистик; 10 – рычаг опорного колеса; 11 – колесо опорное; 12 – механизм регулировки глубины хода сошника

Fig. 5. The design of the coulter of the S-6000 «Bystritsa» seed drill:

1 – seeder frame beam; 2 – bracket; 3 – coulter suspension lever; 4 – spring; 5 – adjustment mechanism of coulter pressure on soil; 6 – body; 7 – disk; 8 – seed pipe; 9 – scraper; 10 – support wheel lever; 11 – support wheel; 12 – adjustment mechanism of coulter working depth

Пожалуй, единственным недостатком однодискового сошника рассмотренной конструкции является отсутствие в его конструкции заделывающих рабочих органов – прикатывающего колеса и загортача. Однако, в конструкции сеялки С-6000 «Быстрица» предусмотрена батарея прикатывающих колес и пружинных борон, что в полной мере компенсирует выявленный недостаток сошника [6].

Схожую с однодисковым сошником сеялки С-6000 «Быстрица» конструкцию имеет сошник сеялки Pöttinger Vitasem⁸. За исключением конструктивного исполнения элементов данных сошников, таких как кронштейн 1, рычаг 2 с проушиной 3 для крепления пружины 4, корпус 5, диск 6, чистик 7 и семяпровод 8 (рис. 6), они отличаются функциональным назначением и расположением опорных колес, за счет которых сошники выполняют копирование рельефа поверхности поля. Так у сошника сеялки Pöttinger Vitasem опорное колесо 11 является еще и прикатывающим, и осуществляет прижатие высеваемых семян к влажной почве дна борозды [9], в то время как колесо сошника сеялки С-6000 «Быстрица» является только опорным [7]. Опорно-прикатывающее колесо сошника сеялки Pöttinger Vitasem размещается на рычаге 10, который в свою очередь крепится к съемному

⁸ Механические сеялки Pöttinger Vitasem. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.poettinger.at/landtechnik/download/232.11.0311_VitasemADD.pdf (дата обращения 10.07.2025)

кронштейну 9 с возможностью изменения положения по высоте относительно диска 6 и фиксацией этого положения за счет механизма 12.

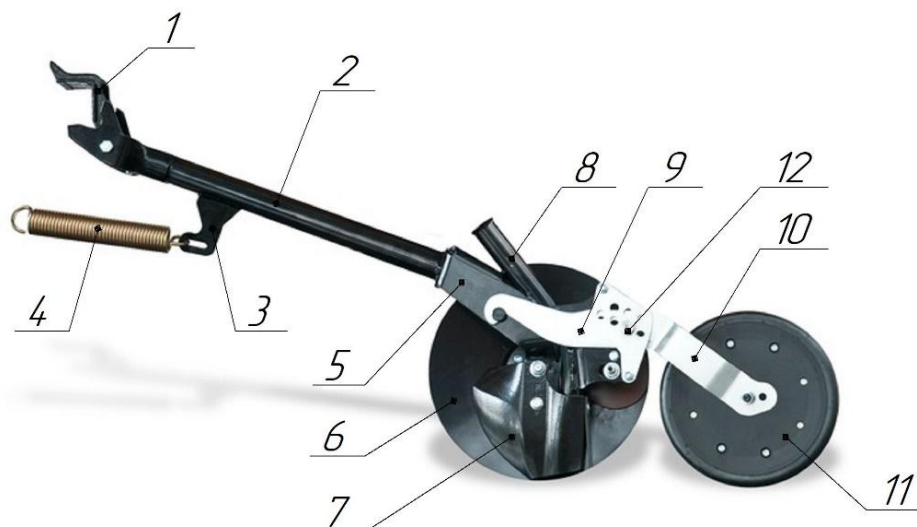


Рис. 6. Общее устройство однодискового сошника сеялки Pöttinger Vitasem:
1 – кронштейн; 2 – рычаг; 3 – кронштейн пружины; 4 – пружина растяжения; 5 – корпус;
6 – диск; 7 – чистик (анкер); 8 – семяпровод; 9 – кронштейн съемный; 10 – рычаг
опорно-прикатывающего колеса; 11 – колесо опорно-прикатывающее; 12 – механизм
регулировки глубины хода сошника

Fig. 6. General structure of the single-disc coulter of Pöttinger Vitasem seed drill:
1 – bracket; 2 – lever; 3 – spring bracket; 4 – tension spring; 5 – body; 6 – disk; 7 – scraper
(anchor); 8 – seed pipe; 9 – removable bracket; 10 – lever of the support and packing wheel;
11 – support and packing wheel; 12 – adjustment mechanism of coulter working depth

Конструктивными особенностями данного сошника также являются сферическая форма диска 6, устанавливаемого на корпусе 5 посредством двухрядного радиально-упорного шарикового подшипника с многокромочным уплотнением, литой износостойкий чистик 7, возможность комплектования сошника колесами 11 с различными диаметрами, шириной и формой профиля, а также возможность при необходимости быстрого демонтажа съемного кронштейна 9 вместе с опорно-прикатывающим колесом 11 без применения инструментов.

Одним из наиболее совершенных с точки зрения выполнения технологического процесса посева семян в предварительно обработанную почву является однодисковый сошник сеялки Kverneland DA, который обеспечивает точное размещение семян в условиях влажной и сухой почвы, имеет самое низкое тяговое сопротивление и обладает широким набором сменных опорно-прикатывающих колес с различными диаметрами, шириной и формой профиля⁹. Конструктивно он, как и рассмотренные выше однодисковые сошники, выполнен на рычажной подвеске, обеспечивающей ему вертикальный ход до 170 мм. Рычаг 3, также выполняющий роль семяпровода, шарнирно крепится к брусу 1 рамы сеялки посредством кронштейна 2 (рис. 7). На рычаге 3 имеется ушко 4, предназначенное для крепления к нему зацепа пружины растяжения, создающей дополнительное давление

⁹ Легкая пневматическая сеялка Kverneland DA. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kverneland.com/seyalki/navesnye-pnevmaticheskie-zernovye-seyalki/da> (дата обращения 10.07.2027)

сошника на почву. К задней части рычага 3 крепится корпус 5 сошника, на котором с возможностью вращения установлен сферический диск 6 и гибкий пластиковый диск 7, выполняющий роль чистика внутренней поверхности диска 6 и также являющийся бороздообразователем, формирующим одну из стенок борозды [10]. Также к корпусу 5 с возможностью поворота крепится рычаг 8 с размещенным на нем опорно-прикатывающим колесом 9, положение которого по высоте относительно диска 6 регулируется перестановкой фиксатора 10 в одно из нескольких регулировочных отверстий, выполненных в корпусе 5.

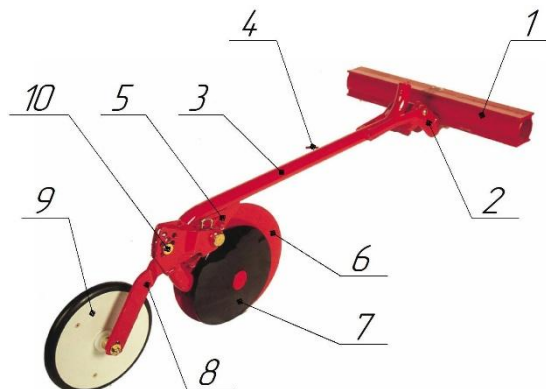


Рис. 7. Общий вид однодискового сошника сеялки Kverneland DA:

1 – брус рамы сеялки; 2 – кронштейн; 3 – рычаг подвески сошника; 4 – ушко крепления пружины; 5 – корпус; 6 – диск; 7 – диск гибкий; 8 – рычаг опорно-прикатывающего колеса; 9 – колесо опорно-прикатывающее; 10 – фиксатор

Fig. 7 General view of the single-disc coulter of Kverneland DA seed drill:

1 – seeder frame beam; 2 – bracket; 3 – coulter suspension lever; 4 – spring attachment eyelet; 5 – body; 6 – disc; 7 – flexible disc; 8 – support and packing wheel lever; 9 – support and packing wheel; 10 – lock

Положительным моментом, на наш взгляд, является наличие возможности установки рычага 8 в такое положение, при котором колесо 9 переводится в неактивное положение, что по сравнению со съёмными кронштейнами опорно-прикатывающих колес сошника сеялки Pöttinger Vitasem исключает необходимость их демонтажа с сеялки и отдельного хранения на машинном дворе при работе по влажной почве.

Как заявляет производитель сеялки Kverneland, малый угол установки диска 6 позволяет увеличивать рабочую скорость сеялки и снижать ее тяговое сопротивление, а выпуклая форма диска в сочетании с опорно-прикатывающим колесом создает хороший контроль глубины хода сошника. Гибкий пластиковый диск 7 поддерживает борозду открытой, что обеспечивает размещение семян точно на дне борозды [10], гарантируя соответствие фактической глубины размещения семян глубине, настроенной механизатором.

Обсуждение. На основании проведенного анализа конструктивных особенностей однодисковых сошников современных зерновых сеялок, предназначенных для посева семян в предварительно обработанную почву, нами сделан вывод, что в настоящее время производителями посевной техники разработано множество их компоновочных решений, различающихся способом размещения на раме сеялки, способом создания рабочего усилия, наличием или отсутствием механизма копирования рельефа поверхности почвы, его конструкцией, диаметром и формой диска, а также конструктивным исполнением указанных выше элементов [2,11,12]. Диск сошника нагружен достаточной силой для образования борозды глубиной до 8 см в предварительно обработанной почве. Некоторые из моделей сошников обладают более значительными силовыми характеристиками, позволяющими

производить посев в почву с высоким содержанием пожнивных остатков. При эксплуатации сеялок такие сошники не требуют технического обслуживания, имеют достаточное количество регулировок, одна из которых – давление сошника на почву, производится либо централизованно, посредством гидравлики, либо индивидуально.

Технические параметры однодисковых сошников рассмотренных выше моделей сеялок Unia Amber, Väderstad Rapid, Junkkari S, Mascar Montana, C-6000 «Быстрица», Pöttinger Vitasem и Kverneland DA представлены в таблице.

Таблица. Технические параметры однодисковых сошников сеялок, предназначенных для посева семян в предварительно обработанную почву

Table. Technical parameters of single-disc seed drill coulters designed for sowing seeds into pre-tilled soil

Параметр	Модель сеялки						
	Amber	Rapid	S	Montana	C-6000	Vitasem	DA
Тип сошника	некопирующий	копирующий					
Способ внесения семян и удобрений	раздельный, разноуровневый	совместный					
Тип подвески	рычажная, на эластичных жгутах		рычажная, пружинная				
Тип диска	вырезной		гладкий				
Форма диска	плоский				конический	сферический	
Диаметр диска, мм	400	410	320		400	320	325
Тип опорного устройства	-			пластина	колесо боковое	колесо заднее	
Максимальное давление сошника на почву, кг	100	150	30	45	35	25	30
Междурядье на сеялке, мм	125				150	125/150	

На основании проведенного обзора однодисковых сошников, их можно классифицировать по ряду признаков [13,14]:

- по отсутствию или наличию механизма копирования рельефа поверхности почвы – на некопирующие и копирующие;
- по форме диска – на сошники с плоским, коническим и сферическим дисками;
- по типу диска – на сошники с вырезным и гладким дисками;
- по способу внесения семян и удобрений – на сошники совместного и раздельного внесения;

- по типу рычажной подвески – на сошники с пружинной подвеской и подвеской на эластичных жгутах;
- по типу опорного устройства – на сошники с опорной пластиной, опорным колесом и опорно-прикатывающим колесом;
- по расположению опорного колеса – на сошники с боковым и задним расположением опорного колеса.

Выводы. В конструкциях однодисковых сошников применяются плоские, конические и сферические диски диаметром от 320 до 410 мм. Сошники сеялок, предназначенных для работы по почве без содержания пожнивных остатков на поверхности, оснащаются гладкими дисками, в то время как сошники сеялок, обеспечивающих возможность посева в почву со значительным содержанием пожнивных остатков, оснащаются вырезными дисками. Большинство моделей однодисковых сошников современных зерновых сеялок обеспечивают невысокое давление на почву в пределах 45 кг (чаще до 30...35 кг), ввиду чего качественно выполняют технологический процесс посева семян только в предварительно обработанную почву. Однодисковые сошники имеют вертикальный ход до 170 мм, обеспечивающий им возможность выглубления из почвы при встрече с препятствием в виде камня. На сеялках сошники размещаются с междурядьями 125 или 150 мм.

Наиболее совершенными среди однодисковых сошников являются копирующие сошники с опорными или опорно-прикатывающими колесами, обеспечивающие при работе такие показатели, как требуемая минимальная и максимальная глубина борозды (от 20 до 80 мм), соответствие фактической глубины заделки семян заданным значениям, и равномерность заделки семян по глубине (± 10 мм от настроенной глубины) [7]. Наличие прикатывающих колес в конструкции однодисковых сошников положительным образом сказывается на качестве посева семян, поскольку после прикатки семена оказываются прижатыми к влажной почве дна борозды, что провоцирует более ранние и дружные всходы [9]. Однако отсутствие прикатывающих колес в конструкции сошников может компенсироваться наличием в конструкции сеялки отдельного рабочего органа – батареи прикатывающих колес.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Солодун В. И., Зайцев А. М., Митюков С. А., Амакова Т. В. Эффективность посевных машин по разным фонам механической обработки почвы // Вестник ИрГСХА. 2019. № 94. С. 56-62. EDN SKETRR
2. Саитов, В. Е., Курбанов Р. Ф., Созонтов А. В. Современные ресурсосберегающие посевные комплексы. Saarbrücken: LAP LAMBERT. 2018. 93 с. EDN: YSUA AZ
3. Терехин М. А., Калабушев А. Н., Тонитров В. Л. Совершенствование конструкции однодискового сошника сеялки СПУ-3 // Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства: сб. статей X Межд. науч.-практ. конф. (Пенза, 30-31 мая 2025 г.). Пенза: Пензенский ГАУ. 2025. С. 247-253. EDN: UVOR II
4. Сипунов, В. А., Шумаев В. В. Результаты проведения лабораторно-полевых исследований пневматической сеялки, оснащённой сошниками с канавками по контуру в виде эпициклоиды // Нива Поволжья. 2024. № 1(69), 3004. <https://doi.org/10.36461/NP.2024.69.1.010> EDN: NTJGJB

5. Петровец В. Р., Коцуба В. И., Кузюр В. М., Будко С.И., Кузьменко И.В. Обзор и сравнительная оценка существующих конструкций сошников // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3(91). С. 44-50. EDN: TVVLSW
6. Ткач Е. Б., Никитин Д. Е., Безяева Л. П. Сеялка универсальная пневматическая полуприцепная с шириной захвата 6 м. Патент на полезную модель № RU 221913 U1. МПК A01C 7/00.: № 2023114047: заявл. 29.05.2023: опубл. 29.11.2023. EDN: CPYNRQ
7. Папшев М. А., Шумаев В. В., Калабушев А. Н. Лабораторные исследования однодискового сошника с копирующим колесом сеялки С-7,2ПМ4 // Нива Поволжья. 2022. № 4(64), 3002. <https://doi.org/10.36461/NP.2022.64.4.013> EDN: GZSKDX
8. Давлетшин М. М., Атнагулов Д. Т. Однодисковый конический сошник // Сельский механизатор. 2010. № 3. С. 6. EDN: OIKSWR
9. Петровец В. Р., Ильин В. И., Посканной С. Н. Результаты исследований однодискового сошника с опорно-прикатывающим каточком // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 4. С. 159-162. EDN: ZGHYED
10. Ларюшин Н. П., Ванин Д. В., Шумаев В. В., Кирюхина Т. А. Конструкция сошника сеялки для посева зерновых культур // Нива Поволжья. 2018. № 4(49). С. 137-143. EDN: YSKCCL
11. Терехин М. А. Исследование конструктивных недостатков двухдисковых сошников зерновых сеялок // Лучшая исследовательская работа 2024: сб. статей XV Межд. науч.-исслед. конкурса (Пенза, 27 декабря 2024 г.). Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2024. С. 39-43. EDN: RTHDVD
12. Терехин, М. А. Анализ конструктивных особенностей комбинированных двухдисковых сошников современных зерновых сеялок // Конкурс молодых учёных: сб. статей XVII Межд. науч.-исслед. конкурса (Пенза, 25 декабря 2024 г.) Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2024. С. 7-12. EDN: IPUOBN
13. Филатов М. И., Герасименко И. В., Курамшин М. Р. Анализ и классификация сошников зерновых сеялок // Сельский механизатор. 2024. № 8. С. 12-15. <https://doi.org/10.47336/0131-7393-2024-8-12-13-14-15> EDN: APXLHT
14. Терехин М. А. Обзор и классификация опорных устройств копирующих анкерных сошников зерновых сеялок // Лучшая научно-исследовательская работа 2025: сб. статей XI Межд. науч.-исслед. Конкурса (Пенза, 25 июля 2025 г.) Пенза: Наука и Просвещение. 2025. С.51-56. EDN: PPCZBB

REFERENCES

1. Solodun V.I., Zaitsev A.M., Mityukov S.A., Amakova T.V. Efficiency of seeding machines in different background of mechanical treatment of soil. Vestnik IrGSKhA = Vestnik IRGSHA. 2019;94:56-62. (In Russ.) EDN: CKETRR
2. Saitov, V. E., Kurbanov, R. F., Sozontov, A.V. Modern resource-saving sowing complexes. Saarbrücken: LAP LAMBERT. 2018. 93 p. (In Russ.) EDN: YSUAAZ
3. Terekhin M.A., Kalabushev A.N., Tonitrov V.L. Improving the design of the single-disc coulter of the SPU-3 planter. In: Resource-Saving Technologies and Technical Means for Crop And Livestock Production. Proc. X Int. Sci. Prac. Conf. (Penza, May 30-31, 2025). Penza: Penza State Agricultural University. 2025: 247-253. (In Russ.) EDN: UVORII
4. Sipunov V.A., Shumaev V.V. Results of the laboratory and field studies on the pneumatic seeder equipped with coulters with epicycloidal grooves along the contour. Niva Povolzh'ya = Volga

Region Farmland. 2024. № 1(69), 3004. (In Russ.) <https://doi.org/10.36461/NP.2024.69.1.010>
EDN: NTJGJB

5. Petrovets V.R., Kotsuba V.I., Kuzyur V.M., Budko S.I., Kuzmenko I.V. Overview and comparative assessment of existing coulter designs. Vestnik Bryanskoi GSKhA = VESTNIK of the Bryansk State Agricultural Academy. 2022;3(91):44-50. (In Russ.) EDN: TVVLSW

6. Tkach E. B., Nikitin D. E., Bezyaeva L. P. Universal pneumatic semitrailer-type seed drill with a working width of 6 m. Utility Model Patent No. RU 221913 U1. IPC A01C 7/00.: No. 2023114047: appl. 29.05.2023. publ. 29.11.2023. (In Russ.) EDN: CPYNRQ

7. Papshev M.A., Shumaev V.V., Kalabushev A.N. Laboratory studies of a single-disc coulter with a gauge wheel of the S-7.2PM4 seeder. Niva Povolzh'ya = Volga Region Farmland. 2022;4(64), 3002. (In Russ.) <https://doi.org/10.36461/NP.2022.64.4.013> EDN: GZSKDX

8. Davletshin M.M., Atnagulov D.T. Single-disc conical coulter. Sel'skii mekhanizator = Rural Specialist on Mechanization. 2010;3:6. (In Russ.) EDN: OIKSWR

9. Petrovets V. R., Ilyin V. I., Poskannoy S. N. Research results of a single-disc coulter with a support and packing roller. Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy. 2014;4:159-162. (In Russ.) EDN: ZGHYED

10. Laryushin N.P., Vanin D.V., Shumaev V.V., Kiryukhina T.A. Structure of the supply coulter of an opener seeder for sowing the cereal crops. Niva Povolzh'ya = Volga Region Farmland. 2018;4(49):137-143. (In Russ.) EDN: YSKCCL

11. Terekhin M.A. Investigation of design flaws two-disc coulters of grain seeders. In: The Best Research Paper of 2024. Coll. Papers XV Int. Sci. Res. Compet. (Penza, December 27, 2024). Penza: Science and Education. 2024: 39-43. (In Russ.) EDN: RTHDVD

12. Terekhin M.A. Analysis of design features combined two-disc coulters modern grain seeders. In: Competition of Young Scientists: Coll. Papers XVII Int. Sci. Res. Comp. (Penza, December 25, 2024) Penza: ICNS "Science and Education". 2024: 7-12. (In Russ.) EDN: IPUOBN

13. Filatov M.I., Gerasimenko I.V., Kuramshin M.R., Panin A.A., Bolshakov E.V. Analysis and classification of ploughshares of grain seeders. Sel'skii mekhanizator = Rural Specialist on Mechanization. 2024;8:12-15.(In Russ.) <https://doi.org/10.47336/0131-7393-2024-8-12-13-14-15>
EDN: APXLHT

14. Terekhin M.A. Overview and classification of support devices copying anchor coulters of grain seeders. In: The Best Research Paper of 2025. Coll. Papers XI Int. Sci. Res. Compet. (Penza, July 25, 2025). Penza: Science and Education. 2025. C.51-56. (In Russ.) EDN: PPCZBB

Об авторе:	About the author:
Терёхин Михаил Александрович канд. техн. наук, ведущий инженер конструкторского отделения по гражданской продукции АО «Радиозавод» 440039, г. Пенза, ул. Байдукова, д. 1, Россия m.a.terekhin@rf58.ru	Mikhail A. Terekhin Cand. Sc. (Engineering), leading engineer of the Design Department for Civil Products of JSC Radiozavod 440039, Penza, Baidukova Str., 1, Russia m.a.terekhin@rf58.ru
Заявленный вклад автора М.А. Терёхин – формулирование основных направлений исследования, цели и задач, анализ литературных источников для постановки цели, формальный анализ, проведение исследований, визуализация, создание черновика рукописи, окончательная версия (доработка)	Author's contribution formulating the main directions of the research, goals and objectives, analyzing literary sources to set the goal, formal analysis, conducting research, visualization, creating a draft manuscript, the final version (revision) of the manuscript and its editing, formulating general

рукописи и ее редактирование, формулирование общих выводов.	conclusions.
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов в отношении публикации этой статьи	Conflict of interests The author declare no conflict of interests regarding the publication of this paper
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации.	The author has read and agreed to the manuscript version for publication.
Статья поступила в редакцию: 20.07.2025	Received: 20.07.2025
Одобрена после рецензирования: 25.08.2025	Approved after reviewing: 25.08.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

Научная статья

УДК 628.979:581.035

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-47-61

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СВЕТОДИОДНОГО ФИТООБЛУЧАТЕЛЯ С ЭРГОНОМИЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Елена Николаевна Ракутько¹, Сергей Анатольевич Ракутько^{2✉}

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

¹ elena.rakutko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>

² sergej1964@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>

Аннотация. Актуальной задачей в светокультуре является регулирование спектрального состава излучения светодиодов. Существующие методы широтно-импульсного или амплитудного управления протекающим через светодиоды током либо приносят импульсный характер генерируемого светового потока, либо не обеспечивают номинальный режим работы светодиодов, что снижает эффективность применения светодиодного фитооблучения. Разработанный фитооблучатель позволяет совместить в одном узле функции регулирования и визуализации спектра, регулировать спектр без изменения номинального тока светодиодов, использовать один источник тока для всех групп монохроматических светодиодов, а также обеспечивает равномерное распределение по облучаемой поверхности излучения различного спектрального состава. Фитооблучатель содержит источник тока, радиатор, монохроматические светодиоды, шунтирующие переключатели, регуляторы, коллектор с краном и шкалу. Светодиоды, переключатели и регуляторы разделены на блоки по числу каналов регулирования. Регуляторы связаны между собой через систему цилиндров, заполненных несжимаемой жидкостью, и управляют шунтирующими переключателями, которые замыкают или размыкают цепь определённых групп светодиодов. При задании доли монохроматического потока в одном

из каналов управления в оставшихся каналах с помощью электро-гидравлической схемы обратной связи регулируется количество светодиодов в других группах за счет их частичного шунтирования. Моделирование в диапазоне мощностей от 50 до 300 Вт при различных спектрах показало, что минимальное отклонение реального спектра от требуемого составляет 0,5%, максимальное – 4,1%, в среднем по всему диапазону различных спектров и мощностей – 2,2%. Такие отклонения спектрального состава излучения являются вполне допустимыми в практике светокультуры.

Ключевые слова: светокультура, фитооблучатель, светодиоды, регулирование, спектральный состав излучения

Для цитирования: Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Разработка и исследование энергоэффективного светодиодного фитооблучателя с эргономичным управлением // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 3(124). С. 47-62 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-47-61>

Research article

Universal Decimal Code 628.979:581.035

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF ENERGY-EFFICIENT LED PHYTO-IRRADIATOR WITH ERGONOMIC CONTROL

Yelena N. Rakutko¹, Sergei A. Rakutko^{2✉}

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia.

¹ elena.rakutko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>

² sergej1964@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>

Abstract. An urgent task in the indoor plant lighting is to control the light quality of LED radiation. Existing methods use the pulse-width or amplitude control of the current flowing through LEDs. They either introduce a pulsed nature of the generated light flux or fail to maintain the nominal operating mode of LEDs. This reduces the efficiency of LED phyto-irradiation. The developed phyto-irradiator allows combining the functions of light quality control and its visualization in one unit. It controls the light quality without changing the nominal current of LEDs, using one current source for all groups of monochromatic LEDs. It also provides uniform distribution of radiation of different spectral composition over the irradiated surface. The phyto-irradiator has a current source, a radiator, monochromatic LEDs, shunt switches, regulators, a collector with a tap, and a scale. LEDs, switches and regulators are divided into blocks by the number of control channels. The regulators are interconnected via a system of cylinders filled with incompressible liquid. They control the shunt switches that close or open the circuit of certain groups of LEDs. When setting the proportion of the monochromatic flow in one of the control channels, the number of LEDs in other groups is adjusted by shunting some of them in other channels using an electrohydraulic feedback circuit. Modeling in the power range from 50 to 300 W with various radiation light quality showed that the minimum spectral difference was 0.5%, the maximum was 4.1%, and the average for the entire range of different spectra and powers was 2.2%.

Such deviations in the radiation light quality are quite acceptable in the practice of indoor plant lighting.

Key words: indoor plant lighting, phyto-irradiator, LEDs, regulation, radiation light quality

For citation: Rakutko E.N., Rakutko S.A. Development and investigation of energy-efficient LED phyto-irradiator with ergonomic control. AgroEcoEngineering. 2025; 3(124): 47-62 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-47-61>

Введение. В регионах с суровыми климатическими условиями и дефицитом естественного света широко применяется выращивание растений в культивационных сооружениях (светокультура). Это позволяет получать свежие овощи вне зависимости от сезона и значительно повысить продуктивность отрасли. В аграрном секторе активно развивается современная светотехника на основе передовых светодиодных (СД) технологий с применением фитооблучателей (ФО). Правильно подобранный спектр источников искусственного излучения способен стимулировать вегетацию, улучшить характеристики растений и повысить качество урожая [1].

В культивационном сооружении с помощью естественного освещения и источников искусственного излучения как особый фотоклиматический фактор формируется своя световая среда, под которой понимают совокупность оптических параметров электромагнитного излучения в диапазоне фотосинтетически активной радиации (ФАР, 400-700 нм) и смежных с ним диапазонов. Этот фактор является детерминирующим в процессах морфогенеза, фотосинтетической продуктивности и биосинтеза вторичных метаболитов у высших растений. Результаты современных исследований в области агрофизики и фотофизиологии растений позволяют оптимизировать характеристики световой среды с учетом видовой специфичности фоторецепторных систем растений, фенофазозависимой потребности в фотосинтетических фотонах, необходимости модуляции морфофизиологических ответов. Разработка энергоэффективных протоколов фотостимуляции представляет собой ключевую задачу при создании замкнутых агробиотехнологических систем с контролируемыми параметрами микроклимата [2].

Режимы световой среды критически важны в системе управления продуктивностью тепличных агроценозов. В современных агротехнологиях для точного контроля фотопериодических и спектральных характеристик излучения активно внедряются светодиодные фитотехнические системы. Данные установки позволяют точнее регулировать спектральный состав ФАР, оптимизировать энергопотребление системы досвечивания, программировать световые режимы в соответствии с фенологическими фазами развития культур, видовыми физиологическими особенностями и целевыми параметрами качества продукции. Использование СД-технологий в тепличных комплексах обеспечивает возможность создания адаптивных систем освещения с динамически изменяемыми параметрами ФАР [3].

В светокультуре оптимальное регулирование параметров световой среды, включая интегральную облученность ФАР и спектральный состав излучения, определяет не только продуктивность растений, но и экономическую эффективность всего производственного процесса. Регулирование параметрами позволяет достичь максимального выхода хозяйственно полезной биомассы при минимальных затратах электроэнергии. Современные исследования показывают, что эффективность использования искусственного фитооблучения в растениеводстве определяется сложным взаимодействием нескольких

факторов: видовых особенностей культуры, текущей стадии онтогенеза, условий окружающей среды и технических характеристик используемых фитооблучателей. При этом особое значение приобретает возможность динамической регулировки параметров излучения в соответствии с изменяющимися потребностями растений, что позволяет поддерживать высокую продуктивность фотосинтеза без избыточных энергозатрат. Практический опыт свидетельствует, что наиболее перспективным направлением развития светокультуры является создание интеллектуальных систем фитооблучения, способных автоматически адаптировать как интенсивность, так и спектральный состав излучения в реальном времени, учитывая множество внешних и внутренних факторов. Такой подход обеспечивает не только значительную экономию электроэнергии, но и позволяет получать стабильно высокие урожаи качественной растительной продукции в контролируемых условиях выращивания [4]. Таким образом, вопросы оптимального регулирования параметрами световой среды являются частью более широкого, энергоэкологического подхода в светокультуре [5].

Пока (на 2025 год) в области фитооблучения отсутствуют единые международные нормативные стандарты, строго регламентирующие все аспекты светотехники для растений. Следует отметить, что в России существуют стандарты, рекомендуемые научно обоснованные параметры и практические методики в этой области^{10, 11}.

Значение спектрального состава излучения для роста и других физиологических функций растений оказалось в центре внимания светокультуры как области научного знания с самых первых шагов ее становления. Разнообразие наблюдаемых эффектов изменения спектра излучения возникает через срабатывание различных фоторецепторов, неравномерную эффективность спектральных компонентов в управлении фотосинтезом и различную глубину проникновения спектральных компонентов в лист [6]. Реакция растений на спектральный состав излучения специфична, она зависит от вида растений и этапа вегетации. Разработаны различные стратегии управления спектром в зависимости от внешних факторов в условиях закрытых экосистем [7]. Рядом исследователей проводятся работы по повышению экономической эффективности использования облучательных установок для растений. Отмечается, что перспективным является создания светодиодных облучателей с физиологически обоснованной программой регуляции спектра и интенсивности излучения [8, 9, 10].

Для приближения спектрального состава излучения, генерируемого фитооблучателем, к требуемому широко применяется такой прием, как «заполнение» графика спектральной плотности потока суммарного излучения спектральными кривыми отдельных монохроматических источников [11, 12].

Современные системы для изучения влияния климатических факторов на рост и развитие растений (климатические камеры, фитотроны) выполняются на базе СД, которые предоставляют возможность управления спектральным составом оптического излучения путем управления режимом электрического питания [13]. Обычно регулировка тока источника питания СД происходит посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Применение ШИМ для управления протекающим через СД током обуславливает импульсный характер генерируемого ими светового потока, что является

¹⁰ ГОСТ Р 57671-2017. Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия. М.: Росинформагротех, 2017. 10 с

¹¹ ГОСТ Р 58461-2019. Освещение растений в сооружениях защищенного грунта. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

неконтролируемым фактором воздействия на растения и может привести к неверной интерпретации данных в экспериментальной и снижению эффективности в промышленной светокультуре. Так, в разработанном авторами ФО с настраиваемым спектром частота сигнала управления ШИМ составляет 500 Гц [14]. Другим распространенным способом регулирования спектра является изменение амплитуды питающего СД тока. Как правило, для регулирования спектра в каждой группе монохроматических СД необходим отдельный источник тока (драйвер) [15]. Это увеличивает материалоемкость и стоимость устройства. Регулирование амплитуды питающего СД тока означает уход от номинального режима их работы, что снижает эффективность преобразования электрической энергии в световую, т.е. эффективность фитооблучения.

Помимо технических ограничений, существующие методы управления часто игнорируют эргономику взаимодействия оператора с устройством, требуя сложной настройки через интерфейсы или калибровку. Предлагаемое решение устраняет и этот барьер, обеспечивая человеко-ориентированный способ управления спектром.

Цель работы – создание и исследование фитооблучателя, обеспечивающего возможность совмещения в одном узле функции регулирования и визуализации спектра, регулирования спектра без изменения номинального тока СД, использования одного источника тока для всех групп монохроматических СД, а так же равномерного распределения по облучаемой поверхности излучения различного спектрального состава.

Материалы и методы. Предложена конструкция светодиодного фитооблучателя, в состав которого входит источник тока (драйвер) 1, радиатор 2, монохроматические СД 3, шунтирующие переключатели 4, регуляторы 5, коллектор 6, кран 7, шкалу 8, ламели 9, подвижный контакт 10, указатель 11, шток 12, поршень 13, цилиндр 14, штуцеры 15, шланги 16, проводники шнура 17 (рис. 1). На рис. 2 показано включение монохроматических диодов в общую цепь питания для частного случая положения указателей 11.

Монохроматические СД 3, шунтирующие переключатели 4 и регуляторы 5 сгруппированы в блоки B_i , количество которых соответствует числу каналов регулирования спектра M .

Драйвер 1 представляет собой серийно выпускаемый или изготовленный специально блок, обеспечивающий постоянство выходного тока I_n для последовательно соединённой цепи СД при изменении нагрузки, сопряженной с изменением напряжения на его выходах от U_{min} до U_{max} . Потребляемая нагрузкой мощность не превышает значения $P=I_n \cdot U_{max}$, с учетом коэффициента запаса.

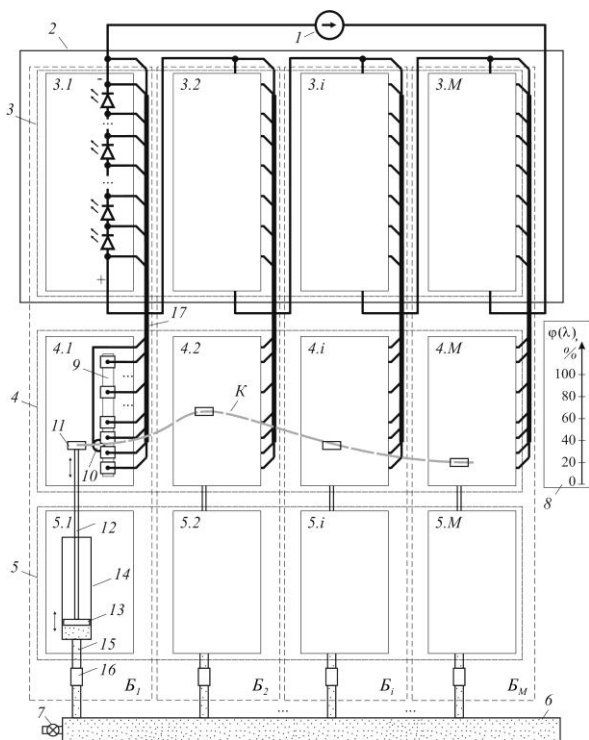


Рис. 1. Электрогидравлическая схема ФО
Fig. 1. Electrohydraulic diagram of the phyto-irradiator

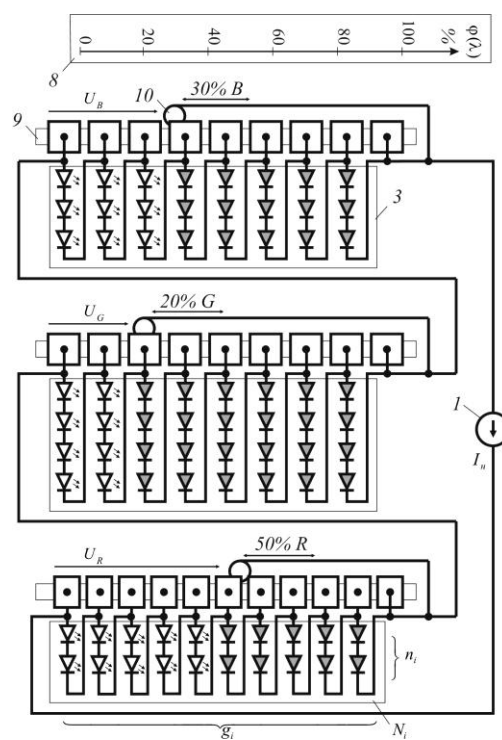


Рис. 2. Электрическая цепь питания СД
Fig. 2. LED power supply circuit

Радиатор 2 выполнен из алюминиевого сплава с высокой теплопроводностью и имеет рёбра для увеличения теплообмена с окружающей средой. На плоской поверхности радиатора равномерно размещены монохроматические СД 3.i различных блоков B_i (например, синего, зеленого, красного, дальнекрасного и др.), подключенные последовательно как внутри блока, так и последовательно блоками между собой и соединенные с выходами драйвера 1, с возможностью отключения части СД отдельных блоков путем их шунтирования без влияния на остальные блоки.

Шунтирующий переключатель 4.i каждого блока B_i содержит ламели 9, соединённые проводниками (собранными в шнур 17) с общими точками электрической цепи смежных СД 3.i. Подвижный контакт 10 механически связан с концом штока 12 и при его перемещении замыкает или размыкает участок цепи, тем самым исключая часть СД соответствующей группы из работы.

Каждый регулятор 5.i включает шток 12, связанный с подвижным контактом 10 и поршень 13, установленный в цилиндре 14, имеющем штуцеры 15. На верхнем конце штока 12 закреплён указатель 11. Цилиндры 14 всех регуляторов через штуцеры 15 и шланги 16 соединены с коллектором 6, снабженным краном 7 для заполнения гидравлической системы несжимаемой жидкостью (масло, вода).

Шкала 8 расположена рядом с указателями 11 регуляторов 5 и позволяет пользователю визуально контролировать степень включения/выключения определённого

спектрального канала. Кривая K на рис. 1 проходит по центрам указателей и является визуализацией спектра излучения ФО ¹².

Поскольку компоновка отдельных монохроматических СД с различным спектром в ФО подразумевает их размещение с некоторым шагом на радиаторе, возникает необходимость контроля равномерности создаваемого спектрального состава по облучаемой поверхности [16, 17]. По радиатору СД размещены так, что при любом количестве введенных СД соблюдается равномерность их размещения. При регулировании СД включаются последовательно, но предыдущие остаются светящимися. При большом количестве СД их компоновка может быть произведена путем использования известной квазислучайной последовательности Холтона, которая обладает свойством: каждое подмножество первых k точек из последовательности покрывает область заполнения равномерно [18].

Параметрами математической модели при исследовании ФО являются: номинальный ток СД I_n , А; требуемый спектр, задаваемый долями потоков в отдельных спектральных диапазонах k_{in} , %; требуемый поток ФО Φ_0 , мкмоль·с⁻¹. Паспортные данные СД различных каналов: напряжение на одном СД U_{i1} , В и его поток Φ_{i1} , мкмоль·с⁻¹.

Ориентировочное количество СД i -го канала управления $\bar{N}_i = \Phi / \Phi_{i1}$, шт. В каждом канале назначаются количества групп (ступеней задания спектра, по возможности близкое к десяти) g_i и СД в группе n_i , такие, что установленное количество СД $N_i = g_i \cdot n_i$ близко по величине $\bar{N}_i$. Напряжение на СД каналов управления при работе всех СД данного канала $\Delta U_i = U_{i1} \cdot N_i$, В. Минимальные и максимальные значения напряжения должны обеспечиваться драйвером при поддержании номинального значения тока I_n , А. Мощность каждого канала $P_i = I_n \cdot \Delta U_i$, Вт. Максимальное значение мощности (с учетом коэффициента запаса) должно соответствовать мощности драйвера. Количество включенных групп СД G_i определяется пропорционально положению указателей на шкале. Количество включенных СД $C_i = G_i \cdot n_i$. Напряжение на включенных в цепь СД $U_i = C_i \cdot U_{i1}$, В, суммарное напряжение $U = \sum U_i$, В. Поток от СД в каналах $\Phi_i = C_i \cdot \Phi_{i1}$, мкмоль·с⁻¹. Общий поток $\Phi = \sum \Phi_i$, мкмоль·с⁻¹. Реальный спектр определяется долями потока в отдельных каналах $k_i = \Phi_i / \Phi$, %. Различие спектров характеризуется средним значением абсолютной разницы между требуемыми и реальными долями потока в отдельных каналах $d = \sum |k_i - k_{in}| / 3$, %.

Математическую обработку результатов производили в электронных таблицах Excel.

Результаты. Был изготовлен опытный образец фитооблучателя. В качестве радиатора 2 использовали алюминиевый профиль с оребрением. К установке выбрали три типа монохроматических СД на алюминиевых теплоотводах типа *Star*: синие B ($U_{B1} = 3,6$ В; $\Phi_{B1} = 2,6$ мкмоль·с⁻¹), зеленые G ($U_{G1} = 3,5$ В; $\Phi_{G1} = 1,8$ мкмоль·с⁻¹), красные R ($U_{R1} = 2,4$ В; $\Phi_{R1} = 3,1$ мкмоль·с⁻¹). Номинальный ток через СД $I_n = 0,7$ А.

¹² Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Светодиодный фитооблучатель с автоматическим регулированием спектра. Заявка на изобретение № 2025118669, 07.07.2025.

Создаваемый ФО предназначен для экспериментов по светокультуре, проводимых в фитокамере на площади $S=0,25 \text{ м}^2$. Необходимая фотонная облученность для эксперимента $E=200 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Требуемый интегральный поток $\Phi_0 = S \cdot E = 0,25 \cdot 200 = 50 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$. С учетом запаса принят поток $\Phi_0 = 60 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$.

Ориентировочные количества монохроматических СД: синих $\bar{N}_B = 60/2,6=23,1$ шт (подключаемых по $n_B=3$ СД в $g_i=8$ группах между 9 контактами ламелей 9, итого установленное количество СД $N_B=24$ шт); зеленых $\bar{N}_G=60/1,8=33,3$ шт, (подключаемых по $n_G=4$ СД в $g_G=8$ группах между 9 контактами ламелей 9, итого установленное количество СД $N_G=32$ шт); красных $\bar{N}_R=60/3,1=19,4$ шт (подключаемых по $n_R=2$ СД в $g_R=10$ группах между 11 контактами ламелей 9, итого установленное количество СД $N_R=20$ шт).

Падение напряжения при включении всей группы СД: синей $\Delta U_B = 24 \cdot 3,6=86 \text{ В}$, зеленой $\Delta U_G=32 \cdot 3,5=112 \text{ В}$, красной $\Delta U_R=20 \cdot 2,4=48 \text{ В}$. Минимальное значение напряжения, поддерживаемое драйвером 1 при стабилизации тока составляет $U_{\min}=48 \text{ В}$ (только красные СД), максимальное $U_{\max}=112 \text{ В}$ (только зеленые СД). Мощность $P=I_n \cdot U_{\max}=112 \cdot 0,7=78 \text{ Вт}$. С учетом запаса принята мощность драйвера $P=100 \text{ Вт}$.

Длина хода подвижного контакта 10 составляет 42 мм. Расстояние между контактами ламелей в блоке регулирования синих СД составляет $42/8=5,25 \text{ мм}$, зеленых СД $42/8=5,25 \text{ мм}$, красных СД $42/10=4,2 \text{ мм}$.

Было проведено испытание работы фитооблучателя. Перед использованием системы регулирования в одной из групп поршень необходимо перевести в положение 100%, остальные поршни – в положение 0%. Через кран 7 систему заполнили водой, следя за отсутствием в системе воздушных пузырьков, и закрыли кран 7. После включения источника тока 1, передвижениями указателей 11 необходимо выставить требуемый спектр излучения, в примере $B : G : R = 30,0 \% : 20,0 \% : 50,0 \%$.

На рисунке 3 показан процесс регулирования спектрального состава излучения на модели регулятора.

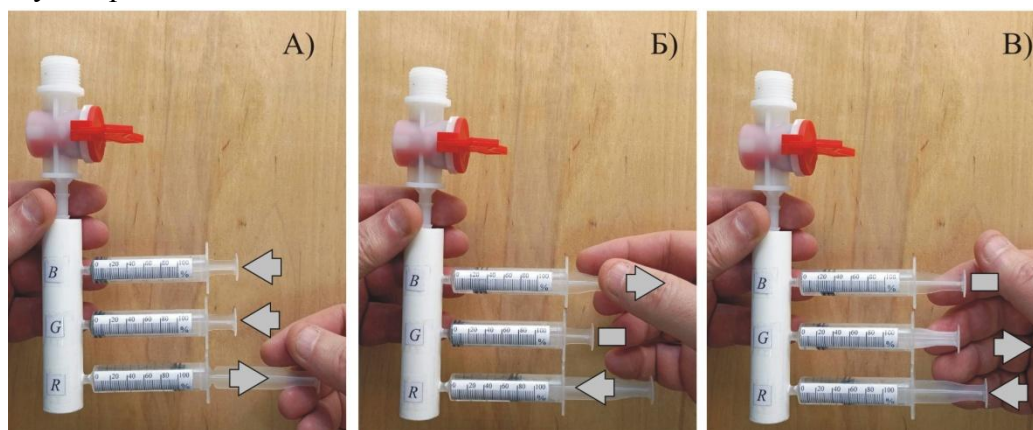


Рис. 3. Процесс установки спектрального состава излучения на натурной модели регулятора

Fig. 3. The process of setting the radiation light quality on a full-scale model of the regulator

При перемещении пользователем указателя 11 в каком либо блоке B_i вниз (по рис. 1) связанный с ним подвижный контакт 10 шунтирует все большее количество СД данной спектральной группы, подключенных между контактами ламелей 9, что приводит к снижению излучаемого СД этой группы потока. Одновременно усилие через шток 12

прикладывается к поршню 13, что приводит к выдавливанию жидкости из цилиндра данного блока регулирования и через штуцеры 15, шланги 16 и общий коллектор 6 к перераспределению ее между цилиндрами других блоков, что автоматически вызывает перемещение поршней в этих блоках вверх. При этом количество зашунтированных ранее в этих группах СД уменьшается, поток увеличивается. Интегральный поток, излучаемый всеми СД ФО при этом должен оставаться постоянным.

При указанных положениях указателя 11 в примере не зашунтированными останутся $G_B=3$ группы синих СД ($C_B=9$ шт, их поток $\Phi_B=9 \cdot 2,6=23,4$ мкмоль·с⁻¹), $G_G=2$ группы зеленых СД ($C_G=8$ шт, их поток $\Phi_G=8 \cdot 1,8=14,4$ мкмоль·с⁻¹) и $G_R=5$ групп красных СД ($C_R=10$ шт, их поток $\Phi_R=10 \cdot 3,1=31,0$ мкмоль·с⁻¹) (рис. 2). Суммарное напряжение на включенных в цепь СД $U=84,4$ В, что в пределах допустимого диапазона напряжений, поддерживаемого драйвером. Фактический интегральный поток $\Phi=68,8$ мкмоль·с⁻¹. Фактический спектральный состав излучения ФО: синий 34,0 %, зеленый 20,9 %, красный 45,1 % (таблица).

Результаты натурных измерений показателей опытного образца показали, что среднее различие требуемого и реального спектров составило $d=3,3\%$.

Таблица. Показатели экспериментального образца фитооблучателя
Table. Indicators of the experimental sample of the phyto-irradiator

Показатель	Канал регулирования		
	B	G	R
Требуемый спектр k_{in} , %	30,0	20,0	50,0
Напряжение на одном СД U_{i1} , В	3,6	3,5	2,4
Поток одного СД Φ_{i1} , мкмоль·с ⁻¹	2,6	1,8	3,1
Ориентировочное количество СД $\bar{N}_i$, шт	23,1	33,3	19,4
Количество групп СД g_i , шт	8	8	10
Количество СД в группе n_i , шт	3	4	2
Установленное количество СД N_i , шт	24	32	20
Напряжение на всех СД канала ΔU_i , В	86,4	112	48
Мощность всех СД канала P_i , Вт	60,5	78,4	33,6
Количество включенных групп G_i , шт	3	2	5
Количество включенных СД C_i , шт	9	8	10

Напряжение на включенных СД U_i , В	32,4	20,0	24,0
Поток от СД в каналах Φ_i , мкмоль·с ⁻¹	23,4	14,4	31,0
Реальный спектр k_i , %	34,0	20,9	45,1
Различие спектров по каналам d_i , %	4,0	0,9	4,9

Обсуждение. Практически показано, что при создании ФО с регулируемым спектром можно использовать единственный драйвер, питающий последовательную цепь монохроматических СД различного спектрального состава, что снижает материалоемкость устройства. Применение шунтирующих переключателей не изменяет величину питающего СД тока, так что они работают в номинальном режиме, при котором эффективность фитооблучения максимальна. Применение множества наборов монохроматических СД, сгруппированных в блоки с независимым регулированием, позволяет задавать различные варианты спектра, различающиеся не только количественно (интенсивностью энергии в отдельных спектральных диапазонах), но и качественно, то есть наличием этих диапазонов в общем спектре. Равномерное распределение СД каждой монохроматической группы по поверхности радиатора обеспечивает постоянство спектра в различных точках облучаемой поверхности, что является одним из требований к качеству световой среды в светокультуре. Применение электро-гидравлической схемы (цилиндров, поршней, штуцеров, шлангов, коллектора, подвижного контакта и ламелей) обеспечивает как независимое ручное задание количества включенных монохроматических СД в отдельной группе, так и автоматическое изменение количества СД в других группах, с соблюдением постоянства общего потока. Наличие шкалы, относительно которой отображается положение указателей, позволяет визуализировать суммарный спектр излучения ФО, что повышает эргономичность устройства.

Природа возникновения несоответствия между требуемым и реальным спектрами предложенного устройства двойственна. Во-первых, сказывается ошибка округления, когда вычисленное, исходя из необходимости обеспечить общий поток в данной группе, в общем случае дробное число $\bar{N}_i$ округляют до целого, причем допускающего разбиение на два целых сомножителя, g_i и n_i . Во-вторых, сказывается ошибка дискретизации, поскольку требуемый спектр задается указателем на непрерывной («аналоговой») шкале в диапазоне 0-100%, а реализуется ступенчато, с шагом n_i .

Можно предположить, что различие спектров будет тем большим, чем меньшее количество СД задействовано в каналах управления, т.е. чем меньше мощность ФО. Моделирование в диапазоне мощностей от 50 до 300 Вт при различных требуемых спектрах показало, что минимальное различие спектров составляет 0,5%, максимальное – 4,1%, в среднем по всему диапазону различных спектров и мощностей – 2,2%. Такие отклонения спектрального состава излучения являются вполне допустимыми в практике светокультуры.

При регулировании спектра возникают также различия интегральных потоков Φ_0 и Φ . Однако эти различия могут быть сведены к нулю коррекцией высоты подвеса ФО.

Применение визуальной шкалы 8 в сочетании с механическими указателями 11, положение которых напрямую отражает долю вклада каждого спектрального канала, обеспечивает интуитивно понятный и прямой контроль над спектральным составом излучения. Пользователь, перемещая один рычаг, сразу видит, как это влияет на весь спектр (кривая К), и получает обратную связь без необходимости интерпретации цифровых показателей или сложных меню. Такой подход соответствует принципам эргономичного дизайна: минимизация когнитивной нагрузки, прямая визуальная обратная связь и физическая аналоговость управления, что особенно ценно в условиях производственной среды, где оператору требуется быстро и безошибочно выставлять параметры. Именно поэтому в названии устройства подчёркивается его эргономичность как ключевое преимущество в практическом применении.

Выводы. В отличие от известных технических решений, предложенное устройство обеспечивает возможность дискретного изменения спектра излучения за счет шунтирования отдельных групп СД, управляемых регуляторами, связанными между собой через гидравлическую систему. Это позволяет точно и надёжно управлять спектральным составом света, адаптируя его под конкретные задачи выращивания растений. Возможна реализация предложенного управления спектром средствами механики либо электроники. Последние позволяют обеспечить шунтирование отдельных СД с помощью электронных ключей.

Предложенная конструкция и схема управления ФО могут быть использованы в тепличных хозяйствах, в комбинатах по производству растительной продукции, в научных экспериментах и учебном процессе, в бытовых условиях для выращивания овощных и зеленных культур, а также комнатных растений. Предложенная конструкция проста в изготовлении, позволяет эффективно управлять спектром излучения и, что принципиально важно, обеспечивает высокий уровень эргономичности управления за счёт визуально-механической обратной связи, интуитивно понятного интерфейса и отсутствия необходимости в цифровой калибровке или сложном программном обеспечении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бурынин Д.А., Смирнов А.А. Обзор источников освещения для тепличных хозяйств и фабрик растений // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 1 (42). С. 105-113. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-1-105-113>
2. Синявина Н.Г., Панова Г.Г., Кулешова Т.Э., Чесноков Ю.В. Светокультура растений в современных сооружениях искусственного климата (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2024. № 59(5). С. 869-892. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.5.869rus>
3. Калабкин А.А., Кузнецов Е.А., Ивлиев С.Н., Ашрятов А.А., Калабкин В.А., Мусатов А.С. Разработка светодиодного фитооблучателя для выращивания растений в теплицах // Инженерные технологии и системы. 2023. № 33(4). С. 585-598. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.585-598>
4. Егоров М.Ю., Федорова Г.С. Исследование влияния фотосинтетически активной радиации и спектрального состава света на развитие кресс-салата при его искусственном освещении // Вестник НГИЭИ. 2023. №8(147). С. 56-73. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-8-56-73>
5. Ракутько С.А. Становление и развитие энергоэкологии светокультуры как нового научного направления в институте агроинженерных и экологических проблем // Известия

Нижеволжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. №2(74). С. 331-346. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-02-40>

6. Ptushenko O.S., Ptushenko V.V., Solovchenko A.E. Spectrum of light as a determinant of plant functioning: a historical perspective // *Life*. 2020. Vol. 10(3), 25. <https://doi.org/10.3390/life10030025>

7. Stamford J.D., Stevens J., Mullineaux P.M., Lawson T. LED lighting: a grower's guide to light spectra // *HortScience*. 2023. Vol.58(2). P.180-196. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16823-22>

8. Тихомиров А.А., Величко В.В., Ушакова С.А. Фотобиологическая эффективность излучения облучателей со светодиодами для ценозов растений разного возраста применительно к условиям замкнутых экосистем // *Светотехника*. 2023. № 1. С. 30-34. EDN: JZXMNG

9. Шамукаев С.Б., Сафин Ф.Р., Катков А.А. Цифровой фитосветильник и его автоматическая система управления // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2025. №1(111). С. 94-99. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2025-111-1-94-99>

10. Трепуз С.В., Долгих П.П., Барсуков В.А. Система автоматизированного управления фитотроном со светокulturой и гидропонной технологией // *Современные наукоемкие технологии*. 2022. № 2. С. 143-149. <https://doi.org/10.17513/snt.39049>

11. Капитонов С.С., Винокуров А.С., Горбунов А.А., Кузнецов И.М., Чагрин Н.А., Кульчихина Т.И., Александров А.А. Применение современных светодиодных технологий для обеспечения спектрального состава излучения фитооблучателя, близкого к спектру поглощения растения // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2023. № 4. С. 88-90. EDN: FBVYTMX

12. Кульчин Ю.Н., Гольцева Д.О., Субботин Е.П. Регулирующее действие света на растения // *Фотоника*. 2020. №14(2). С. 192-210. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.192.210>

13. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокulturы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. №17(2). С. 40-48. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48>

14. Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Довлатов И.М., Соколов А.В., Качан С.А. Разработка фитооблучателей на основе светодиодов с настраиваемым соотношением спектра ФАР // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. № 4 (33). С. 247-254. EDN: WJFDXS

15. Бурынин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А. Разработка системы управления фитооблучением с обратной связью с применением подкормки растений молекулярным водородом // *Вестник НГИЭИ*. 2021. №11(126). С. 51-60. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2021-11-51-60>

16. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А., Васькин А.Н. Методика расчета параметров радиационной среды от светодиодного фитооблучателя // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2019. №1(98). С. 71-82. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10123>

17. Ракутько С.А., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н. Методика расчета комбинированного светодиодного облучателя для растений // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 95. С. 89-100. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10035>

18. Расулов А.С., Бакоев М.Т., Рахматов М.Й. Параллельные методы и квазислучайные последовательности для вычисления многомерных интегралов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2020. № 6(30). С. 79-92. EDN: QNPNVD

REFERENCES

1. Burynin D.A., Smirnov A.A. Overview of the grow lights used in greenhouses and plant factories. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK = Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2021;68 (1 (42): 105-113. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-1-105-113>
2. Sinyavina N.G., Panova G.G., Kuleshova T.E., Chesnokov Yu. V. Artificial light culture of plants in modern artificial climate facilities (review). *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 2024;59(5): 869-892. (In Russ.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.5.869eng>
3. Kalabkin A.A., Kuznetsov E.A., Ivliyev S.N., Ashryatov A.A., Kalabkin V.A., Musatov A.S. The development of LED grow light for greenhouse cultivation. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):585-598. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.585-598>
4. Egorov M.Yu., Fedorova G.S. Investigation of the influence of photosynthetically active radiation and the spectral composition of light on the development of cress under its artificial lighting. *Vestnik NGIEI = Bulletin of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University*. 2023;8 (147): 56-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-8-56-73>
5. Rakutko S.A. Formation and development of energy and ecology convergence in greenhouse horticulture as a new scientific field at the Institute of Agricultural Engineering and Environmental Problems. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2024;2 (74):331-346. (In Russ.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-02-40>
6. Ptushenko O.S., Ptushenko V.V., Solovchenko A.E. Spectrum of light as a determinant of plant functioning: A historical perspective. *Life*. 2020; 10(3), 25. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/life10030025>
7. Stamford J.D., Stevens J., Mullineaux P.M., Lawson T. LED lighting: A grower's guide to light spectra. *HortScience*. 2023;58(2):180-196. (In Eng.) <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16823-22>
8. Tikhomirov A.A., Velichko V.V., Ushakova S.A. Photobiological efficiency of radiation of LED irradiators for plant cenoses of different ages in relation to the conditions of closed ecosystems. *Svetotekhnika = Light & Engineering*. 2023; 1: 30-34. (In Russ.) EDN: JZXMNG
9. Shamukaev S.B., Safin F.R., Katkov A.A. Digital phytolamp and its automatic control system. *Izvestiya OGAU = Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025;1 (111):94-99. (In Russ.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2025-111-1-94-99>
10. Trepuz S.V., Dolgikh P.P., Barsukov V.A. Automated control system for a phytotron with artificial lighting and hydroponic technology. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*. 2022; 2: 143-149. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/snt.39049>
11. Kapitonov S.S., Vinokurov A.S., Gorbunov A.A., Kuznetsov I.M., Chagrin N.A., Kulchikhina T.I., Alexandrov A.A. Application of modern LED technologies to provide spectral composition of phytoirradiant radiation close to the absorption spectrum of the plants. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2023;4:88-90. (In Russ.) EDN: FBYTMX

12. Kulchin Yu.N., Goltsova D.O., Subbotin E. P. Regulating effect of light on plants. *Fotonika = Photonics Russia*. 2020;14(2):192-210. (In Russ.) <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.192.210>
13. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Development of an experimental phytotron and its application in the research on the energy-ecological efficiency of indoor plant lighting. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(2):40-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48>
14. Smirnov A.A., Proshkin Y.A., Dovlatov I.M., Sokolov A.V., Kachan S.A. Development of phyto-radiators based on LEDs with adjustable spectral composition of PAR. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve = Innovations in Agriculture*. 2019;4 (33):247-254. (In Russ.) EDN: WJFDXS
15. Burynin D.A., Smirnov A.A., Proshkin Yu.A., Kachan S.A. Development of a control system for phytoradiation with feedback using plant feeding with molecular hydrogen. *Vestnik NGIEI = Bulletin of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University*. 2021;11 (126):51-60. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2021-11-51-60>
16. Rakutko E.N., Rakutko S.A., Vaskin A.N. Calculation method of radiation environment parameters created by LED irradiator. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production*. 2019;1(98):71-82. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10123>
17. Rakutko S.A., Mishanov A.P., Rakutko E.N. Calculation method of combined LED irradiator for plants. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production*. 2018; 95: 89-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10035>
18. Rasulov A.S., Bakoev M.T., Raxmatov M.Y. Parallel methods and quasi-random sequences for calculation multidimensional integrals. *Problemy vychislitelnoi i prikladnoi matematiki = Problems of Computational and Applied Mathematics*. 2020; 6 (30): 79-92. (In Russ.) EDN: QNPNVD

Об авторах	About the authors
Елена Николаевна Ракутько, научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3, elena.rakutko@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3536-9639	Yelena N. Rakutko, researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoye Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia elena.rakutko@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3536-9639
Сергей Анатольевич Ракутько, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства	Sergei A. Rakutko, DSc (Engineering), Assistant Professor, chief researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal

(ИАЭП) - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3, sergej1964@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2454-4534	Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia, sergej1964@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2454-4534
Заявленный вклад авторов Все авторы статьи принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и поиске литературы.	Authors' contribution All authors of this paper have directly participated in the study planning and execution, and literature survey.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interests The authors declare no conflict of interests
Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант	All authors have read and approved the final version of the paper submitted
Статья поступила в редакцию: 20.08.2025	Received: 20.08.2025
Одобрена после рецензирования: 10.09.2025	Approved after reviewing: 10.09.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

РАЗДЕЛ 2. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АПК

Научная статья

УДК 656.13

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-62-71

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПЕРЕВОЗКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Руслан Равиллович Сафиуллин¹, Равилл Нуруллович Сафиуллин², Алексей
Владимирович Хохлов³✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-
Петербург, Россия

¹safiullin_rr@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2315-3678>

²safravi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8765-6461>

³lehasport98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2771-1318>

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексной оценки эффективности управления перевозочными процессами в условиях цифровизации транспортной отрасли. Существующие методы часто рассматривают технические и экономические аспекты изолированно, без учета их взаимосвязи с параметрами инфраструктуры. Цель работы – разработка алгоритма многокритериальной оценки эффективности перевозок с применением интеллектуальных технологий. В исследовании использованы методы математического моделирования, критериального и регрессионного анализа. Разработан интегральный критерий эффективности, объединяющий технико-эксплуатационные и экономические показатели через систему весовых коэффициентов. Установлено доминирующее влияние состояния дорожной инфраструктуры и скоростных характеристик транспорта на производительность перевозок. На основе модели создана автоматизированная система управления, включающая модули мониторинга, аналитики данных и оптимизации маршрутов с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. В исследовании учитывается большее количество параметров по сравнению с существующими решениями. Практическая значимость исследования подтверждается возможностью интеграции системы в национальные проекты развития транспортной инфраструктуры. Предложенный алгоритм обеспечивает комплексную оценку эффективности перевозок и динамическую оптимизацию логистических процессов.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, эффективность перевозок, критериальный анализ, математическое моделирование, оптимизация маршрутов, транспортная инфраструктура, автоматизированное управление

Благодарности: авторы выражают благодарность Комитету по транспорту Ленинградской области за предоставленные данные при проведении исследования.

Для цитирования: Сафиуллин Р.Р., Сафиуллин Р.Н., Хохлов А.В. Комплексная оценка эффективности процесса перевозки с применением интегрированных

Research article

Universal Decimal Code 656.13

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF TRANSPORTATION EFFICIENCY USING INTEGRATED INTELLIGENT TECHNOLOGIES

Ruslan R. Safiullin¹, Ravil N. Safiullin², Alexey V. Khokhlov^{3✉}

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

¹safiullin_rr@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2315-3678>

²safravi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8765-6461>

³lehasport98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2771-1318>

Abstract. The study addressed the need for a comprehensive assessment of transportation process efficiency in the context of industry digitalization. Existing approaches often focus on technical and economic aspects alone. They do not consider their interconnection with infrastructure parameters. The study aim was to develop a multi-criteria evaluation algorithm using intelligent technologies. The study employed mathematical modeling, criteria and regression analyses. The study developed an integral efficiency criterion. It combined technical, operational, and economic indicators through a system of weighted coefficients. The study identified that road infrastructure condition and vehicle speed characteristics had the dominant impact on transportation performance. The model was a basis for an automated management system. The system included the modules of monitoring, data analytics, and AI-based route optimization. The approach novelty was that it considered a larger number of parameters compared to existing solutions. The practical importance of the study is confirmed by the system's potential integration into national transport infrastructure development projects. The study conclusion is that the proposed algorithm enables a comprehensive assessment of transportation efficiency and dynamic logistics optimization.

Keywords: intelligent transport systems, transportation efficiency, criteria analysis, mathematical modeling, route optimization, transport infrastructure, automated management

Acknowledgements: the authors would like to express their gratitude to the Leningrad Region Transport Committee for providing the data during the study.

For citation: Safiullin R.R., Safiullin R.N., Khokhlov A.V. Comprehensive assessment of transportation efficiency using integrated intelligent technologies. *AgroEcoEngineering*. 2025; 3(124): 62-71 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-62-71>

Введение. Глобальные изменения геополитической и геоэкономической ситуации 2025 года существенно трансформировали условия функционирования транспортного комплекса России, потребовав его структурной модернизации. В условиях новых вызовов особую актуальность приобретает разработка научно обоснованных подходов к цифровизации перевозочного процесса. Несмотря на активное внедрение интеллектуальных транспортных систем, сохраняется дефицит комплексных решений, учитывающих взаимосвязь эксплуатационных характеристик транспортной инфраструктуры и показателей эффективности перевозочного процесса.

Актуальность работы обусловлена необходимостью реализации целей и задач Транспортной стратегии Российской Федерации, предусматривающей развитие цифровых технологий в отрасли¹³. Проведенный анализ современных исследований [1, 2, 3] выявил существенный пробел в существующих методиках – отсутствие единого подхода, интегрирующего параметры транспортной инфраструктуры, технико-экономические показатели подвижного состава, алгоритмы интеллектуального управления.

Анализ работ отечественных и зарубежных ученых [4, 5] показал, что существующие подходы к оценке эффективности перевозок преимущественно фокусируются либо на технических параметрах транспортных средств [6], либо на экономических показателях [7]. При этом параметры инфраструктуры рассматриваются изолированно, без учёта их комплексного влияния.

Цель исследования – разработка алгоритма многокритериальной оценки эффективности перевозок с применением интеллектуальных технологий.

Материалы и методы. В данном исследовании был применён метод комплексной оценки эффективности перевозочного процесса транспортными средствами с применением интеллектуальных технологий, основанный на критериальной оценке каждого этапа, из которых состоит технологический перевозочный процесс, с использованием математического аппарата.

На начальном этапе исследования был разработан интегральный критерий оценки эффективности автомобильных грузоперевозок, основанный на методе средневзвешенных показателей:

$$N = T_x \mathcal{E}_y \iint_D K_n dx dy = \varphi_0 \iint_D K_n dx dy, \quad (1)$$

где T_x – технические критерии эффективности;

K_n – единичные показатели эффективности, получаемые в результате оценки транспортного процесса с использованием интеллектуальных технологий;

$\mathcal{E}_y$ – экономические критерии эффективности;

D – область значений показателей оценки эффективности данного вида, регламентируемая стандартами;

φ_0 – определенная область значений показателей оценки эффективности данного вида, регламентируемая стандартами [8].

Данный критерий объединяет ключевые параметры транспортного процесса в единую систему оценки, учитывающую как технико-эксплуатационные характеристики, так и экономические показатели перевозочного процесса транспортными средствами. В основе критерия лежит математическая модель, позволяющая количественно оценить вклад каждого фактора в общую эффективность перевозок через систему весовых коэффициентов. Важной особенностью является его адаптивность – возможность корректировки весовых коэффициентов в зависимости от специфики конкретных перевозок и условий эксплуатации

¹³ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года N 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (с изменениями на 6 ноября 2024 года)». [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/727294161> (дата обращения 05.05.2025)

транспортной инфраструктуры. Применение средневзвешенного показателя обеспечивает объективность оценки за счет учета взаимного влияния различных факторов и позволяет получить комплексную характеристику эффективности перевозочного процесса.

Была сформулирована оптимизационная задача многокритериальной оценки эффективности перевозочного процесса, интегрирующая интеллектуальные технологии анализа данных с учётом экономических, технико-экономических, технико-эксплуатационных, качественных и технико-организационных критериев:

$$N = f(K_{11}, K_{12}, K_{13}, \dots K_{mn}, T_x \Xi_y). \quad (2)$$

В качестве ключевого показателя эффективности работы автомобильного транспорта в исследовании использована производительность транспортных средств, определяемая, как объём выполненной транспортной работы в единицу времени. Также определена зависимость производительности от эксплуатационных показателей в общем виде, а также количественное сравнение влияния каждого показателя на производительность с помощью выражения коэффициента μ_q^w .

$$\mu_q^w = \frac{W_{p2} / W_{p1}}{q_2 / q_1} = \frac{W_{p2} \cdot q_1}{W_{p1} \cdot q_2}, \quad (3)$$

где W_{p1} и W_{p2} – производительность автомобильного транспорта при показателе q_1, q_2 , соответственно.

Для формализации зависимости производительности автомобильного транспорта от ключевых технико-эксплуатационных параметров выведена формула следующего вида:

$$W_p = \frac{q\gamma_d}{1/(\nu_t \beta_e) + t_{пр} / l_{ер}} \quad (4)$$

где γ_d – коэффициент динамического использования грузоподъемности;

β_e – коэффициент использования пробега за несколько ездов;

ν_t – техническая скорость, км/ч;

P – выполненная транспортная работа, т-км;

q – грузоподъемность транспортного средства, т;

$l_{ер}$ – средняя длина ездки с грузом, км;

t_e – время ездки, ч;

$t_{пр}$ – время простоя, ч.

На основании проведённого регрессионного анализа установлена количественная зависимость эффективности перевозочного процесса (Y) от ключевых факторов влияния:

$$Y = 250,71X_1 - 0,196X_2 + 1618,802X_5 + 0,017X_6 - 12,283X_7 + 0,077X_8 + 13011,005, \quad (5)$$

где X_1 – коэффициент технической готовности подвижного состава;

X_2 – среднее время простоя под погрузкой-разгрузкой, ч;

X_5 – коэффициент использования пробега;

X_6 – техническая скорость, км/ч;

X_7 – эксплуатационный коэффициент, характеризующий состояние дорожной инфраструктуры;

X_8 – грузоподъёмность транспортного средства, т.

Проведённый анализ выявил доминирующее влияние двух ключевых факторов на эффективность грузоперевозок – это состояние дорожной инфраструктуры (эксплуатационный коэффициент дороги) и скоростные характеристики транспортных средств. Полученные результаты убедительно подтверждают первоначальную гипотезу о критической важности параметров транспортной инфраструктуры при организации перевозочного процесса.

На основании выявленных ключевых критериев эффективности перевозочного процесса осуществлен переход к этапу автоматизации, который включает создание интеллектуальной системы управления, объединяющей модуль мониторинга параметров инфраструктуры в реальном времени, аналитический блок обработки эксплуатационных данных и систему поддержки принятия решений на основе ИИ-алгоритмов. Разработанная система обеспечивает динамическое планирование маршрутов с учетом текущего состояния дорожной сети, технических характеристик транспорта, погодных условий и загруженности, а также оптимизацию скоростных режимов, графиков технического обслуживания и загрузки транспортных средств. Технологическая реализация системы включает внедрение IoT-устройств для сбора данных, использование облачных вычислений для обработки информации и применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования.

Результаты. На основании проведённых исследований был разработан алгоритм оценки эффективности перевозочного процесса, позволяющий комплексно анализировать и оптимизировать ключевые параметры автомобильных перевозок. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке.

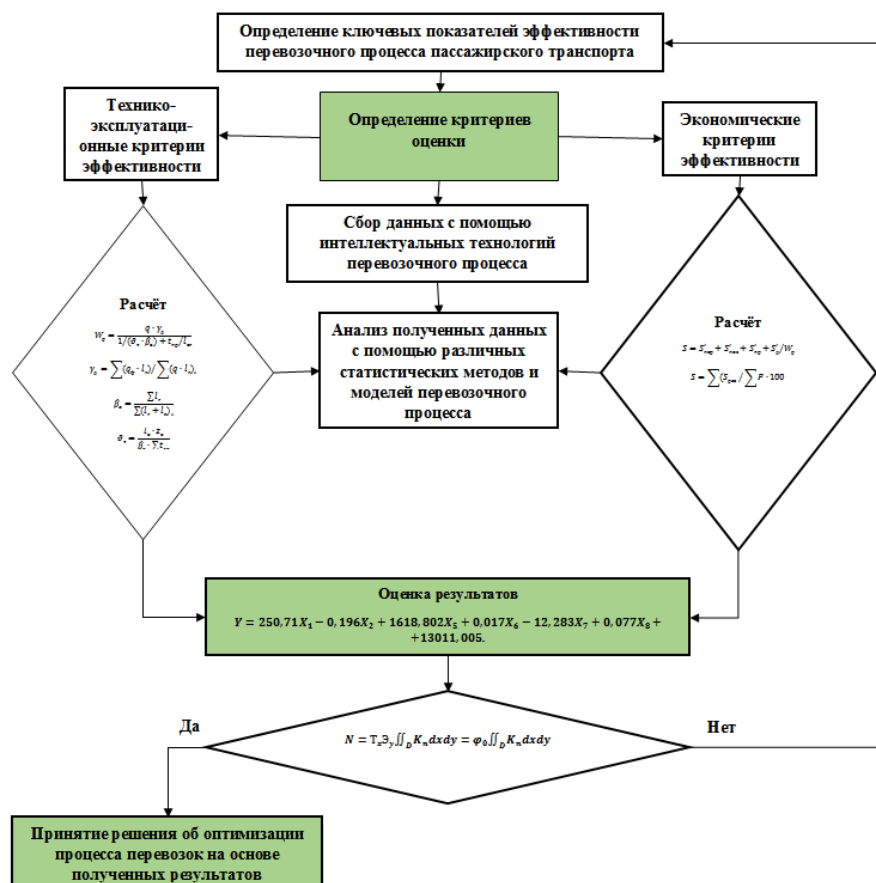


Рис. Блок-схема алгоритма интегральной оценки эффективности перевозочного процесса (N) [составлено авторами]

Fig. Block diagram of the algorithm for the integral assessment of transportation efficiency (N) [compiled by the authors]

Разработанный алгоритм реализует последовательную оценку эффективности перевозочного процесса. На первом этапе осуществляется сбор и предварительная обработка исходных данных о параметрах инфраструктуры (состояние покрытия, загруженность), технических характеристиках подвижного состава (грузоподъемность, техническая скорость) и экономических показателях (себестоимость, тарифы). На втором этапе на основе формул (3) и (4) рассчитываются единичные показатели эффективности и производительность. Третий этап включает расчет технических и экономических критериев согласно заданным метрикам. На четвертом этапе применяется интегральный критерий N (формула 1), объединяющий все рассчитанные показатели через систему весовых коэффициентов. Итоговый этап предполагает интерпретацию значения N : сравнение с эталонными значениями или предыдущими периодами, выявление уязвимых мест и формирование рекомендаций для системы поддержки принятия решений (выбор оптимального маршрута, корректировка скорости, назначение ТО).

Обсуждение. Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал разработанного алгоритма комплексной оценки эффективности перевозочного процесса. В отличие от традиционных подходов, фокусирующихся на изолированном анализе технических или экономических показателей, предложенная методика обеспечивает интеграцию ключевых параметров транспортной системы, включая состояние инфраструктуры, характеристики подвижного состава и логистические факторы. Это позволяет более точно оценивать эффективность перевозок и выявлять критические точки для оптимизации.

Новизна предложенного нами подхода комплексной оценки эффективности процесса перевозки подтверждена в результате сравнения с ранее опубликованными работами по данному направлению. Например, работы [7, 9] рассматривают преимущественно экономические аспекты перевозок, тогда как исследования [10, 11] делают акцент на технических параметрах транспортных средств. В отличие от них, наше исследование предлагает системный анализ, учитывающий взаимосвязь всех компонентов перевозочного процесса. Особое значение имеет включение параметров дорожной инфраструктуры, что особенно актуально для регионов с неоднородным качеством дорожного покрытия.

Важным результатом является выявление доминирующего влияния состояния дорожной сети и скоростных характеристик транспорта на общую эффективность перевозок. Это согласуется с выводами исследования [12], однако в нашей работе предложена количественная модель, позволяющая оценить степень такого влияния в динамике. Кроме того, разработанная автоматизированная система управления, сочетающая мониторинг инфраструктуры и ИИ-алгоритмы оптимизации, предоставляет инструмент для практического применения полученных результатов.

Критический анализ методики выявил и ряд ограничений. Например, точность оценки зависит от качества исходных данных, что требует развития систем мониторинга в реальном времени. Кроме того, адаптация алгоритма для различных типов грузоперевозок может потребовать дополнительной настройки весовых коэффициентов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением числа учитываемых параметров, таких как экологические факторы и влияние погодных условий, а также с интеграцией предложенного подхода в масштабные интеллектуальные транспортные системы.

Выводы. Разработан комплексный алгоритм оценки эффективности управления перевозочными процессами, который устраняет ключевые недостатки существующих подходов путем интеграции технических, экономических и инфраструктурных параметров в единую систему оценки. Предложенная модель отличается способностью адаптироваться к различным условиям эксплуатации благодаря гибкой системе весовых коэффициентов, что обеспечивает более точный и объективный анализ эффективности перевозок.

Практическая значимость исследования заключается в создании автоматизированной системы управления, которая позволяет оптимизировать маршруты и эксплуатационные показатели за счет учета реального состояния транспортной инфраструктуры и характеристик подвижного состава. Разработанное решение соответствует современным тенденциям цифровизации транспортной отрасли и может быть интегрировано в существующие интеллектуальные транспортные системы.

Перспективы дальнейшего развития исследований связаны с расширением функциональности алгоритма за счет включения дополнительных критериев оптимизации, включающие в себя наиболее весомые экологические показатели оценки и влияние внешних факторов, а также с адаптацией системы для работы в условиях мультимодальных перевозок. Для успешной реализации потенциала предложенного подхода необходимо развитие инфраструктуры сбора данных в реальном времени и стандартизация процессов обмена информацией между участниками транспортного процесса.

Исследование подтверждает важность системного подхода к оценке эффективности перевозок и создает основу для разработки более совершенных инструментов управления транспортными процессами в условиях цифровой экономики. Полученные результаты открывают новые возможности для повышения качества и конкурентоспособности транспортных услуг.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бегишев И.Р. Правовое регулирование беспилотных транспортных средств // Транспортное право. 2021. № 3. С. 7-10. EDN: BFFKKJ
2. Glistau E., Coello Machado N.I. Smart logistics in the context of Industry 4.0: esearch prospects and future perspectives // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 181. P. 609-616
3. Caris A., Macharis C., Janssens G. K. Decision support in intermodal transport: A new research agenda // Computers in Industry. 2013. Vol. 64(2). P. 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.12.001>
4. Safiullin R., Parra Arias Z. Comprehensive assessment of the effectiveness of passenger transportation processes using intelligent technologies // The Open Transportation Journal. 2024. Vol. 18. <http://dx.doi.org/10.2174/0126671212320514240611100437>
5. Борисов С. В., Колтунова Е. А., Кладиев С. Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 114-121. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.12>

6. Курганов В.М., Грязнов М.В., Колобанов С.В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 10-21. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.10>
7. Добринов, А. В. Методологический подход к современному проектированию сельскохозяйственных машин // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2008. № 80. С. 177-186. EDN: THYQFD
8. Великанов В.С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 29-36. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.29>
9. Семенов М. А., Большунова О. М. Контроль загрузки карьерных автосамосвалов // Записки Горного института. 2008. Т. 178. С. 143-145. EDN: LHPXFN
10. Авксентьев С.Ю., Семенов П.А., Афанасьев А.С. Комплексные решения по управлению хвостовым хозяйством на Усольском калийном комбинате // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. № 16 (1). С. 7-18. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-7-18>
11. Колцун Н.В., Гурко А.В., Внедрение искусственного интеллекта в горнодобывающем секторе // Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности, на транспорте и в логистике. Сб. тр. XXIV Межд. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 23-25 апреля 2024 г.). Санкт-Петербург: ПГУПС. 2024. С. 223-229. EDN: VSTJBN
12. Клебанов А. Ф., Бондаренко А. В., Жуковский Ю. Л., Клебанов Д. А. Организация удаленных центров управления горным предприятием: стратегические предпосылки и этапы реализации // Горная промышленность. 2024. № 4. С. 174-183. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-174-183>

REFERENCES

1. Begishev I.R. The legal regulation of unmanned means of transport. *Transportnoe pravo = Transportation Law*. 2021;(3):7-10. (In Russ.) EDN: BFFKKJ
2. Glistau E., Coello Machado N.I. Smart logistics in the context of Industry 4.0: Research prospects and future perspectives. *Procedia Computer Science*. 2021;181:609-616 (In Eng.)
3. Caris A., Macharis C., Janssens G.K. Decision support in intermodal transport: A new research agenda. *Computers in Industry*. 2013;64(2):105-112. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.12.001>
4. Safiullin R., Parra Arias Z. Comprehensive assessment of the effectiveness of passenger transportation processes using intelligent technologies. *The Open Transportation Journal*. 2024;18,e26671212320514. (In Eng.) <https://doi.org/10.2174/0126671212320514240611100437>
5. Borisov S.V., Koltunova E.A., Kladiev S.N. Traction asynchronous electric drive of mine electric locomotive simulation model structure improvement. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2021;247:114–121. (In Eng.) URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/issue/view/737/en247>
6. Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Kolobanov S.V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;241:10-21. (In Eng.) URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/issue/view/303/vol241en>

7. Dobrinov A. V. Methodological approach to modern design of agricultural machinery. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanized crop and livestock production. 2008;80:177-186. (In Russ.) EDN: THYQFD
8. Velikanov V.S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logistic model. Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute. 2020;241:29-36. (In Eng.) URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/issue/view/303/vol241en>
9. Semenov M.A., Bolshunova O.M. Control of loading of dump trucks. Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute. 2008;178:143-145. (In Russ.) EDN: LHPXFN
10. Avksentiev S.Y., Semenov P.A., Afanasev A.S. Comprehensive solutions for tailings management at the Usolsky potash plant. Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories. 2024;16(1):7-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-7-18>
11. Koltsun N. V., Gurko A. V. Implementation of artificial intelligence in the mining sector. In: Analysis and Forecasting of Management Systems in Industry, Transport and Logistics. Proc. XXIV Int. Sci. Prac. Conf. (Saint Petersburg, April 23-25, 2024). Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. 2024:223-229. (In Russ.) EDN: VSTJBN
12. Klebanov A.F., Bondarenko A.V., Zhukovsky Yu. L., Klebanov D.A. Establishing remote control centers of a mining operation: strategic prerequisites and implementation stages. Gornaya promyshlennost' = Mining Industry Journal. 2024;4:174-183. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-174-183>

Об авторах:	About the authors:
Сафиуллин Руслан Равиллович , канд. техн. наук, доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Средний пр. Васильевского острова, д. 82, Санкт-Петербург, 199106 Россия safiullin_rr@pers.spmi.ru , https://orcid.org/0000-0003-2315-3678	Ruslan R. Safiullin , Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Sredny Prospekt V.O., 82, Saint Petersburg 199106, Russia safiullin_rr@pers.spmi.ru , https://orcid.org/0000-0003-2315-3678
Сафиуллин Равилл Нуруллович , доктор техн. наук, профессор кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Средний пр. Васильевского острова, д. 82, Санкт-Петербург, 199106 Россия safravi@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8765-6461	Ravil N. Safiullin , Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Sredny Prospekt V.O., 82, Saint Petersburg 199106, Russia safravi@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8765-6461
Хохлов Алексей Владимирович , аспирант кафедры транспортно- технологических процессов и машин, Санкт- Петербургский горный университет	Alexey V. Khokhlov Postgraduate student of the Department of Transport and Technological Processes and Machines,

императрицы Екатерины II, Средний проспект Васильевского острова, д. 82, Санкт-Петербург, 199106 Россия lehasport98@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-2771-1318	Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Sredny Prospekt V.O., 82, Saint Petersburg 199106, Russia lehasport98@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-2771-1318
Заявленный вклад авторов Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования.	Authors' contribution All authors of this study were directly involved in its design, execution, and analytical work.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	Conflict of interests The authors declare no conflict of interest.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 26.05.2025	Received: 26.05.2025
Одобрена после рецензирования: 28.08.2025	Approved after reviewing: 28.08.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

Научная статья
УДК 621.436

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-71-82

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА АВТОТРАКТОРНОГО ГАЗОДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА АММИАКЕ И ДИМЕТИЛОВОМ ЭФИРЕ

Юрий Виталиевич Галышев^{1✉}, Ло Синьяо², Олег Витальевич Абызов³, Алексей Борисович
Зайцев⁴, Александр Константинович Иванов⁵

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия

¹ galyshev57@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7915-0623>

² losinyao181031@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-2815-7231>

³ oleg.abyzov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9898-4279>

⁴ abzaytsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7443-1909>

⁵ alkoniv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1348-8853>

Аннотация. Аммиак привлекает большое внимание исследователей разных стран и считается одним из перспективных альтернативных топлив для сельскохозяйственной

техники с целью сокращения выбросов парниковых газов. Известны исследования по применению аммиака в газодизельном цикле с использованием запального дизельного топлива. Замена дизельного топлива диметиловым эфиром в силу его физико-химических свойств может обеспечить более высокую эффективность сжигания аммиака. Цель работы – исследование рабочего процесса и вредных выбросов с отработавшими газами автотракторного газодизеля при работе на аммиаке и диметиловым эфире методом численного моделирования. В качестве объекта исследования выбран современный автотракторный дизельный двигатель ЯМЗ-53415. Для моделирования рабочего процесса газодизельного двигателя, работающего на аммиаке и диметиловым эфире, использовался программный комплекс Ansys Forte. Численное моделирование рабочего процесса и вредных выбросов двигателя ЯМЗ-53415 при работе на аммиаке с использованием диметилового эфира в качестве запального топлива показало следующее: наиболее целесообразная величина запальной дозы топлива – 20%, оптимальный угол опережения впрыска топлива – 14 град. до ВМТ, давление наддува – 2,5 бар, коэффициент избытка воздуха – 1,5. При этом по сравнению с работой дизеля только на диметиловом эфире индикаторный КПД уменьшается на 5 %, выбросы оксидов азота уменьшаются на 11 %, выбросы парникового газа CO₂ уменьшаются на 79 %, выбросы твердых частиц уменьшаются на 71 %.

Ключевые слова: газодизель, аммиак, диметиловый эфир, рабочий процесс, вредные выбросы.

Для цитирования: Галышев Ю.В., Ло Синьяо, Абызов О.В., Зайцев А.Б., Иванов А.К. Результаты численного моделирования рабочего процесса автотракторного газодизеля, работающего на аммиаке и диметиловом эфире // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 3(124). С. 71-82 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-71-82>

Research article

Universal Decimal Code 621.436

RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF THE WORKING PROCESS OF A DUAL FUEL ENGINE FUELLED BY AMMONIA AND DIMETHYL ETHER

Yuriy V. Galyshev^{1✉}, Xinyao Luo², Oleg V. Abyzov³, Alexey B. Zaitsev⁴, Alexander K. Ivanov⁵

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

¹ galyshev57@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7915-0623>

² losinyao181031@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-2815-7231>

³ oleg.abyzov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9898-4279>

⁴ abzaytsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7443-1909>

⁵ alkoniv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1348-8853>

Abstract. Ammonia attracts much attention from researchers in different countries. It is considered a promising alternative fuel for agricultural machinery to reduce greenhouse gas emissions. There are studies on the use of ammonia in the gas-diesel cycle using diesel fuel as a pilot one. Dimethyl ether due to its physical and chemical properties can provide higher efficiency of ammonia combustion when it replaces the diesel fuel. The objective was a computational study

of the working process and harmful emissions with exhaust gases of a motor-tractor dual fuel engine when running on ammonia and dimethyl ether. The study object was the modern motor-tractor diesel engine YaMZ-53415. To simulate the working process of a gas-diesel engine running on ammonia and dimethyl ether, the Ansys Forte software package was used. Numerical modeling of the working process and harmful emissions of the YaMZ-53415 engine when running on ammonia using dimethyl ether as a pilot fuel showed the following. The most appropriate value of the pilot fuel dose was 20%; the optimal fuel injection advance angle was 14 degrees before TDC; the boost pressure was 2.5 bar; the excess air coefficient is -1.5. At the same time, compared to the operation of a diesel engine on dimethyl ether only, the indicated efficiency was reduced by 5%, nitrogen oxide emissions were reduced by 11%, CO₂ greenhouse gas emissions were reduced by 79%, and particulate emissions were reduced by 71%.

Keywords: dual fuel engine, ammonia, dimethyl ether, working process, harmful emissions.

For citation: Galyshchev Yu. V., Xinyao Luo, Abyzov O. V., Zaitsev A. B., Ivanov A. K. Results of numerical simulation of the working process of a dual fuel engine fuelled by ammonia and dimethyl ether. *AgroEcoEngineering*. 2025; 3(124): 71-82 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-71-82>

Введение. Переход на экологически чистые виды топлива необходим для решения проблемы глобального потепления и достижения устойчивого развития. Аммиак давно используется в различных промышленных процессах, однако его применение в качестве топлива для двигателей рассматривается как относительно новое и перспективное направление. Это связано с рядом преимуществ, которые предлагает аммиак в качестве топлива:

- отсутствие углерода и серы в аммиаке обеспечивает чистое сгорание с почти нулевым образованием углекислого газа и оксидов серы, что является значительным преимуществом для снижения загрязнения окружающей среды;
- широкое использование аммиака в промышленных процессах и сельском хозяйстве делает его коммерчески привлекательным продуктом;
- высокая объемная плотность энергии аммиака делает его эффективным для использования в энергетических установках;
- дешевизна и легкость транспортировки и хранения аммиака в сравнении с другими альтернативными видами топлив, требующими криогенных температур, представляет собой значительное экономическое преимущество;
- низкая взрывоопасность аммиака делает его относительно безопасным для транспортировки и хранения.

Однако аммиачно-воздушные смеси обладают узким пределом воспламеняемости, высокой температурой самовоспламенения и медленным распространением пламени. Учитывая эти факторы, использовать аммиак предпочтительно в газодизельном цикле, в котором аммиачно-воздушная смесь поджигается с помощью запальной дозы дизельного топлива. В двигателях с искровым зажиганием значительно сложнее обеспечить эффективный рабочий процесс на аммиаке. Известны исследования по применению аммиака в газодизельном цикле с использованием запального дизельного топлива [1-10]. Установлено, что при незначительном снижении КПД, уменьшаются выбросы углекислого газа и твердых частиц на 65-80 %, однако возможно увеличение выбросов оксидов азота.

Замена дизельного топлива диметиловым эфиром (ДМЭ) в силу его физико-химических свойств может обеспечить более высокую эффективность сжигания аммиака [11,12].

ДМЭ представляет собой кислородсодержащее углеводородное топливо, которое рассматривается как экологически чистая альтернатива традиционным углеводородным топливам. ДМЭ можно производить из возобновляемых ресурсов, таких как биомасса, органические отходы и сельскохозяйственные культуры, а также путем переработки природного газа и угля. Результаты исследований [11,12] подтвердили, что ДМЭ является эффективной заменой дизельного топлива. Установлено, что сгорание ДМЭ приводит к снижению выбросов оксидов азота и продуктов неполного сгорания, а также твердых частиц. Также стоит отметить, что ДМЭ обладает превосходными свойствами распыления и испарения по сравнению с обычным дизельным топливом и имеет более высокое цетановое число.

Определение величины запальной дозы ДМЭ, оптимального угла опережения впрыска топлива и других параметров возможно путем моделирования рабочего процесса газодизеля с помощью современного программного обеспечения.

Цель работы – исследование рабочего процесса и вредных выбросов с отработавшими газами автотракторного газодизеля при работе на аммиаке и диметиловым эфире методом численного моделирования.

Материалы и методы. Для исследования рабочего процесса и экологических показателей оценки эффективности двигателя при работе на смеси диметилового эфира и аммиака было проведено моделирование рабочего цикла на основе трехмерной модели цилиндра. Для расчета использовался современный программный комплекс Ansys Forte. В комплексе газодинамика определяется уравнениями Навье-Стокса, для расчета массовой диффузии используется закон Фика, для определения теплового состояния – закон Фурье. Реакции, протекающие при сгорании топлива, описываются кинетическим механизмом. Для решения уравнений используется метод конечных объёмов.

В качестве объекта исследования выбран рабочий процесс автотракторного дизельного двигателя ЯМЗ-53415. Это тракторная модификация дизельного двигателя для К-708.4. Дизель 4-тактный, 4-цилиндровый, рабочим объёмом 4,43 л с жидкостным охлаждением, имеет номинальную мощность 140кВт при частоте вращения коленчатого вала 2300 об/мин. Топливная система аккумуляторного типа Common Rail.

Моделирование производилось для временного отрезка, начиная с момента закрытия впускного клапана до момента открытия выпускного клапана. На рис. 1 представлены модель и расчетная сетка камеры сгорания данного двигателя. Расчёты проводились на номинальном режиме работы двигателя. При этом теплота, вводимая в рабочий цикл, при изменении состава топлива оставалась неизменной и равной теплоте выделяемой массой диметилового эфира при работе двигателя в дизельном режиме на номинальной мощности. Подача аммиака осуществляется во впускной канал, для воспламенения аммиачно-воздушной смеси непосредственно в цилиндр при помощи форсунки впрыскивается запальная доза диметилового эфира.

В таблице 1 представлены основные характеристики топлив, рассматриваемых в данном исследовании.

Таблица 1. Характеристики топлив
Table 1. Specifications of fuels

	ДМЭ	Дизельное топливо	Аммиак
Химическая формула	$\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$	C_xH_y	NH_3
Температура кипения, °C	-24.9	180-360	-33.3
Плотность жидкой фазы, кг/м ³	668	840	602.8
Стехиометрическое соотношение, кг/кг	9.0	14.7	6.05
Цетановое число	55-66	40-55	-
Теплота парообразования, кДж/кг	410	250	1370
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	27600	42500	18800
Температура самовоспламенения, К	508	523	924

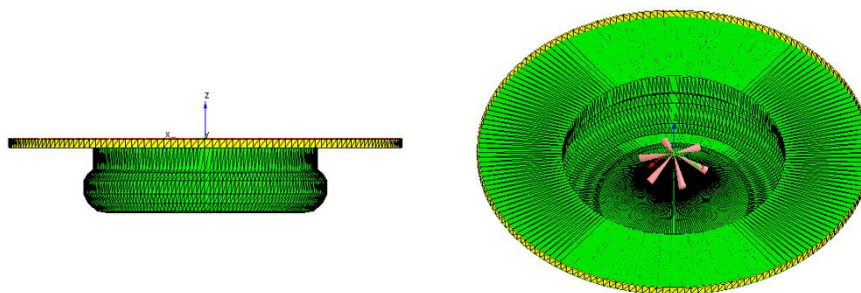


Рис. 1. Разбивка расчётной области на элементы
Fig. 1. Breakdown of the calculation area into elements

Результаты. На рис. 2 показано, что максимальное давление сгорания в цилиндре снижается при уменьшении запальной дозы ДМЭ. Из рис. 3 следует, что с увеличением доли аммиака в топливной смеси наблюдается рост периода задержки воспламенения и постепенное увеличение продолжительности выделения теплоты. На рис. 4 показано температурное поле внутри цилиндра на различных стадиях процесса сгорания. Видно, что при увеличении доли аммиака, температура в цилиндре уменьшается, однако образование оксидов азота при этом не уменьшается, что связано с увеличением концентрации азота в зоне реакций. На рис. 5 представлены показатели вредных выбросов двигателя: эмиссия NO_x демонстрирует колебательный характер при увеличении доли аммиака, выбросы NH_3 продолжают монотонно расти, выбросы CO_2 и сажи значительно снижаются.

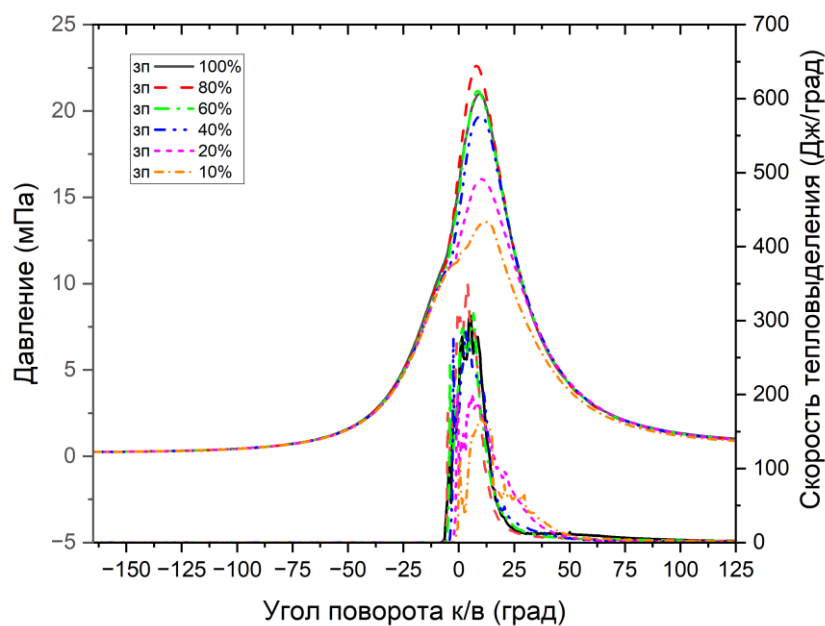


Рис. 2. Зависимость давления и скорости тепловыделения в цилиндре газодизеля ЯМЗ-53402, работающего на аммиаке, при различных запальных дозах ДМЭ.

Fig.2. The dependence between the pressure and heat release rate in the cylinder of the YaMZ-53402 ammonia-fueled diesel engine and various ignition doses of dimethyl ether (DME)

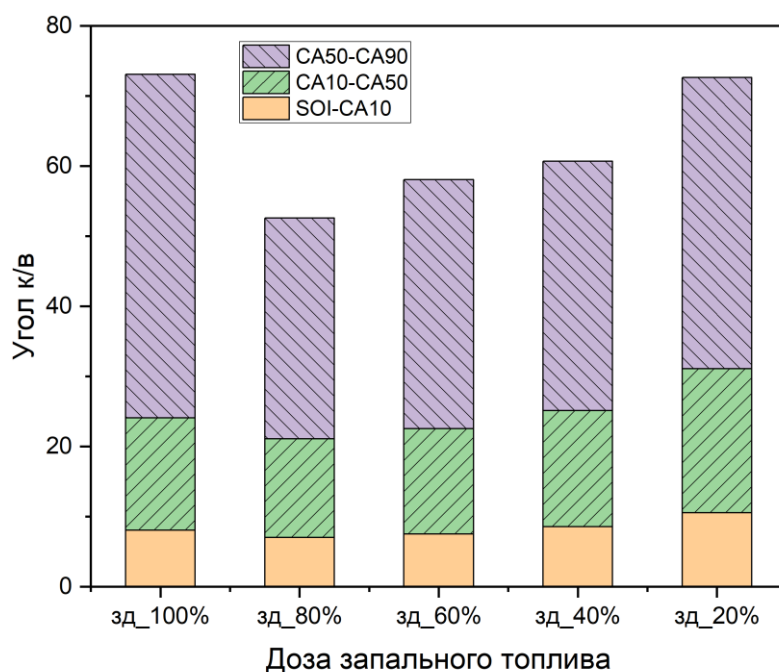


Рис. 3. Влияние величины запальной дозы ДМЭ на длительность различных фаз тепловыделения: 0-10 – длительность периода от начала впрыска топлива до сгорания 10 % топлива; 10-50 – длительность периода сгорания 50 % топлива; 50-90 – длительность периода сгорания 90 % топлива

Fig. 3. Effect of ignition dose of DME on the length of various phases of heat generation: 0-10 – the period length from the fuel injection start to the combustion of 10% of fuel; 10-50 – length of the combustion period of 50% of fuel; 50-90 – length of the combustion period of 90% of fuel

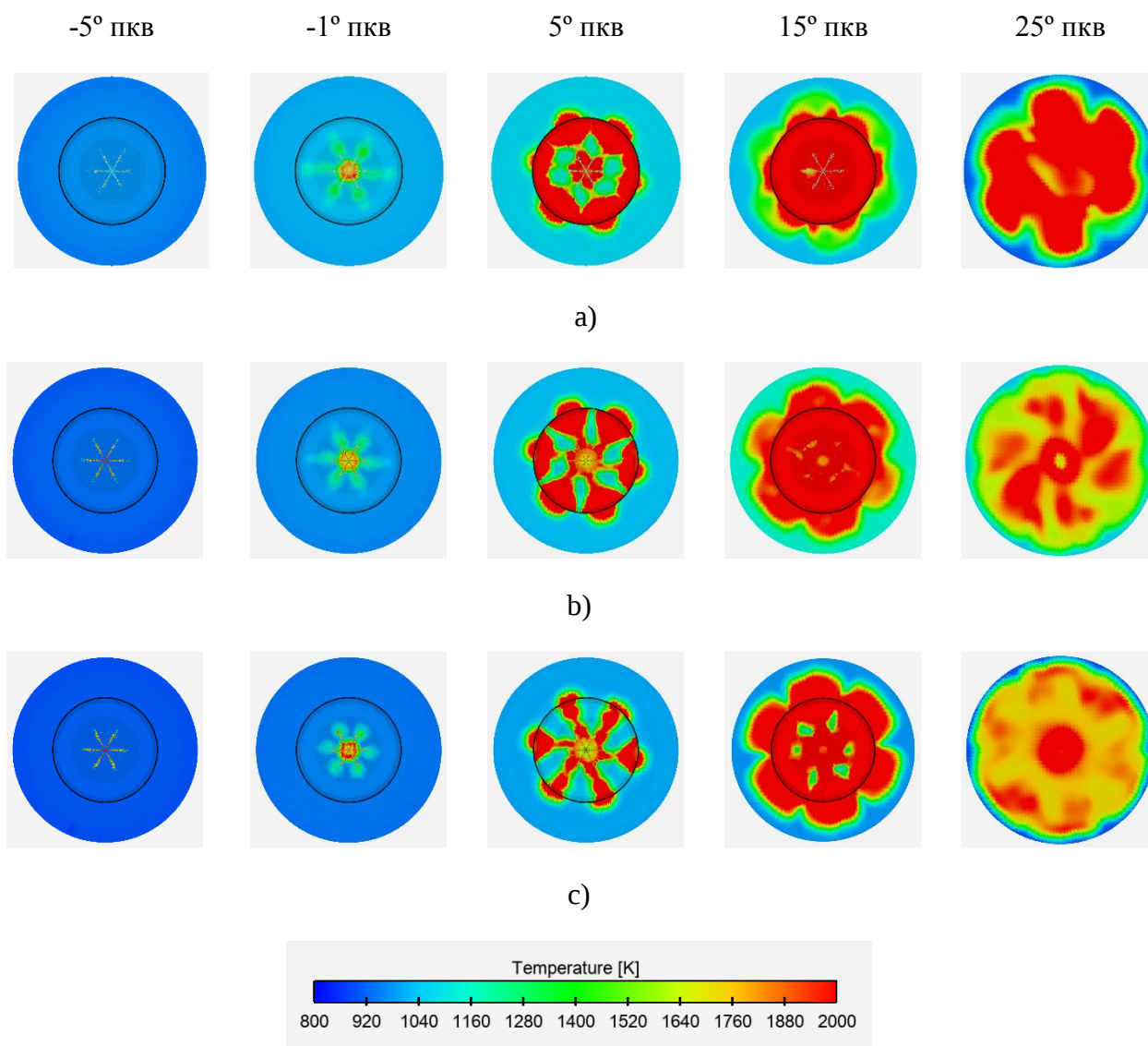
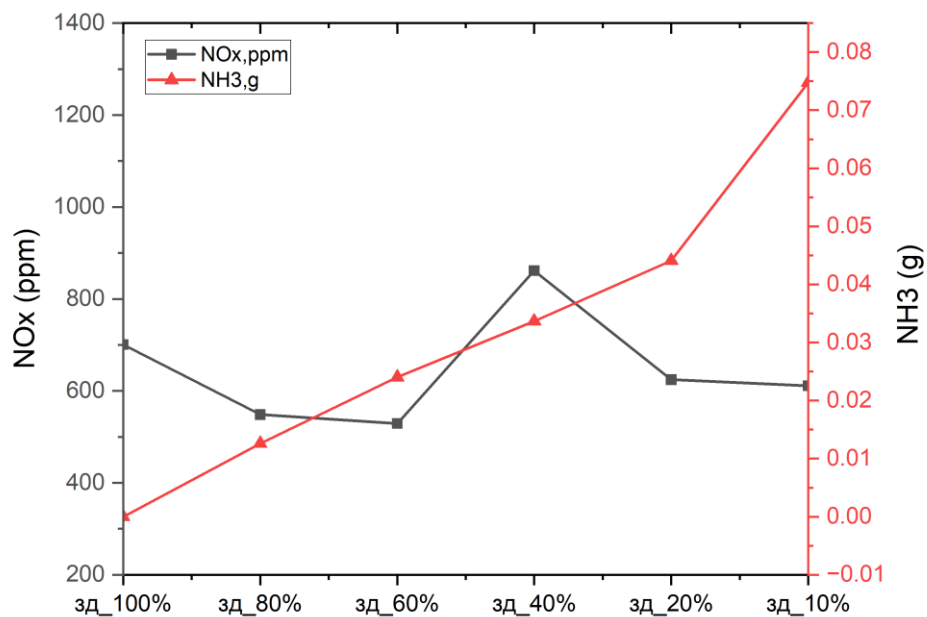
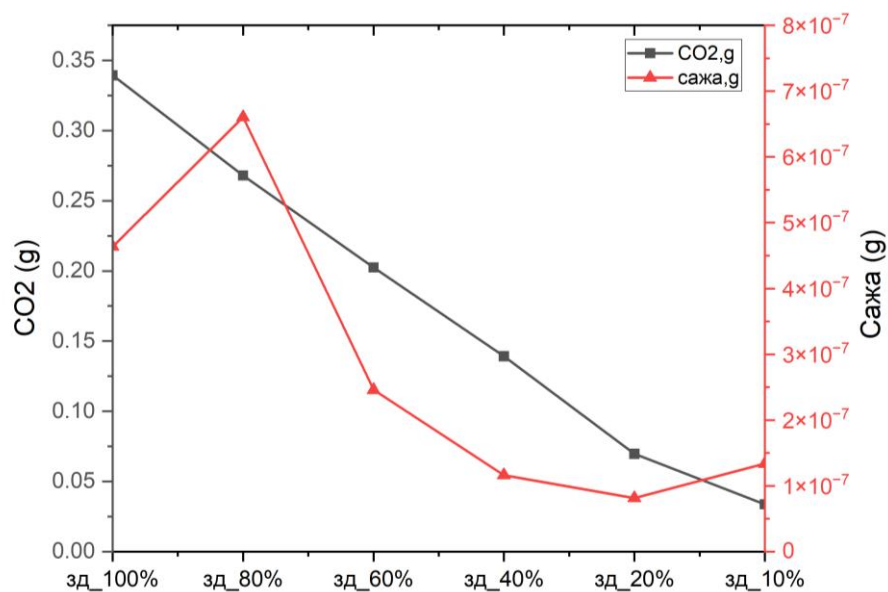


Рис. 4. Температурное поле внутри цилиндра при сгорании ДМЭ-аммиачной смеси в двигателе при различных запальных дозах ДМЭ: а) 100 %, б) 60 %, в) 20 %

Fig. 4. The temperature field inside the cylinder during the combustion of a DME-ammonia mixture in the engine at various ignition doses of DME: a) 100%, b) 60%, c) 20%



a)



b)

Рис. 5. Зависимости концентраций выбросов в отработавших газах газодизеля от запальной дозы диметилового эфира: а) NO_x , NH_3 ; б) CO_2 , сажа.

Fig. 5. Dependences of emission concentrations in diesel exhaust gases on the ignition dose of dimethyl ether: a) NO_x , NH_3 ; б) CO_2 , soot

Обсуждение. Результаты исследований свидетельствуют о том, что использование аммиака в газодизельном цикле может стать альтернативой углеводородному топливу, сокращая выбросы парниковых газов в атмосферу, что отмечается также в работах [1-4].

Наилучшие результаты по вредным выбросам и КПД двигателя достигаются при использовании в качестве запального топлива ДМЭ вместо дизельного топлива, что видно из рис. 5 и отражено в работах [11,12].

В результате расчетов проведена оптимизация количества запальной дозы ДМЭ, а также угла опережения впрыска топлива. Установлено, что содержание аммиака на уровне 80 % в смеси обеспечивает наилучшие результаты, увеличивая КПД и мощность двигателя, а также снижая вредные выбросы сажи, оксидов азота и углекислого газа.

Серьезной проблемой остается наличие несгоревшего аммиака в отработавших газах, что опасно для здоровья даже в малых дозах. С уменьшением запальной дозы ДМЭ выбросы несгоревшего аммиака увеличиваются, что требует принятия специальных мер – установки нейтрализатора или добавки водорода для активизации процесса сгорания [3].

Выводы. Численное моделирование рабочего процесса и вредных выбросов двигателя ЯМЗ-53415 при работе на аммиаке с использованием диметилового эфира в качестве запального топлива показало следующее. Наиболее целесообразная величина запальной дозы топлива – 20 %, оптимальный угол опережения впрыска топлива – 14 град. до ВМТ, давление наддува – 2,5 бар, коэффициент избытка воздуха -1,5. При этом по сравнению с работой дизеля только на диметиловом эфире индикаторный КПД уменьшается на 5 %, выбросы оксидов азота уменьшаются на 11 %, выбросы углекислого газа CO₂ уменьшаются на 79 %, выбросы частиц (загрязняющий веществ) уменьшаются на 71 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Müller-Casseres E., Edelenbosch O. Y., Szklo A., Schaeffer R., van Vuuren D. P. Global futures of trade impacting the challenge to decarbonize the international shipping sector // *Energy*. 2021. Vol. 237, 121547 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121547>
2. Serra P., Fancello G. Towards the IMO's GHG goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping // *Sustainability*. 2020. Vol. 12 (8). P. 3220-3220. <https://doi.org/10.3390/su12083220>
3. Галышев Ю.В., Ло Синьяо, Абызов О.В., Зайцев А.Б. Моделирование рабочего процесса газодизеля, работающего на аммиаке с добавкой водорода. // *Тракторы и сельхозмашины*. 2024. Т. 91. № 6. С. 748-759. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-635228>
4. Абызов О.В., Галышев Ю.В., Метелев А.А. Исследование рабочего процесса газодизельного двигателя, работающего на аммиаке // *Турбины и дизели*. 2023. № 4 (109). С. 58-64. EDN: WOZPID
5. Лазарев Е.А., Росляков А.Д., Курманова Л.С., Петухов С.А., Лазарев В.Е., Плахов С.В. Особенности использования аммиака в качестве компонента моторного топлива в дизелях // *Двигателестроение*. 2024. № 4 (298). С. 83-100. EDN: QQBEKS
6. Заев И.А., Смирнов С.В. Исследование возможностей использования смесевых топлив на основе аммиака и продуктов его разложения для двигателя внутреннего сгорания // *Двигателестроение*. 2024. № 4 (298). С. 55-68. EDN: EVQQBK
7. Кулешов А.С., Кулешов А.А., Марков В.А., и др. Расчётные исследования параметров рабочего процесса дизельного двигателя с добавками аммиака во впускную систему // *Двигателестроение*. 2023. № 3 (293). С. 71-93. <https://doi.org/10.18698/jec.2023.3.71-93>
8. Са Бовэнь, Лю Ин, Марков В.А., и др. Характеристики процесса сгорания и экологические показатели двухтопливного дизельного двигателя, работающего на аммиаке // *Двигателестроение*. 2023. № 4 (294). С. 73-87. <https://doi.org/10.18698/jec.2023.4>

9. Reiter A. J., Kong S. C. Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel // *Engineering, Environmental Science. Fuel*. 2011. Vol. 90(1). P. 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.055>
10. Ковалев Л.Г., Захаров С.В. Возможности использования аммиака – носителя водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания // *Вестник КрасГАУ*. 2007. № 4. С. 158-161. EDN: IAFLHD
11. Gross C.W., Kong S.C. Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia-DME mixtures // *Fuel*. 2013. Vol. 103 (1). P. 1069-1079. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.026>
12. Ryu K., Zacharakis G., Kong S.C. Performance characteristics of compression-ignition engine using high concentration of ammonia mixed with dimethyl ether // *Applied Energy*. 2014. Vol. 113(1). P. 488-499. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.065>

REFERENCES

1. Müller-Casseres E., Edelenbosch O. Y., Szklo A., Schaeffer R., van Vuuren D. P. Global futures of trade impacting the challenge to decarbonize the international shipping sector. *Energy*. 2021;237, 121547 (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121547>
2. Serra P., Fancello G. Towards the IMO's GHG goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping. *Sustainability*. 2020; 12(08):3220-3220. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/su12083220>
3. Galyshev Yu.V., Luo Xinyao, Abyzov O.V., Zaitsev A.B. Modeling the working process of a gas-diesel engine running on ammonia with the addition of hydrogen. *Traktory i sel'khoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(6):748-759. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-635228>
4. Abyzov O.V., Galyshev Yu.V., Metelev A.A. Study of the working process of a gas-diesel engine using ammonia as a main fuel. *Turbiny i dizeli = Turbines and Diesels*. 2023;4(109):58-64. (In Russ.) EDN: WOZPID
5. Lazarev E.A., Roslyakov A.D., Kurmanova L.S., Petukhov S.A., Lazarev V.E., Plakhov S.V. Specifics in using ammonia as the motor fuel component in the diesel engines. *Dvigatelistroenie = Engines Construction*. 2024;4 (298):83-100. (In Russ.) EDN: QQBEKS
6. Zaev I.A., Smirnov S.V. Studying the possibility of using mixed fuels based on the ammonia and its decomposition products in the internal combustion engines. *Dvigatelistroenie = Engines Construction*. 2024; 4 (298):55-68. (In Russ.) EDN: EVQQBK
7. Kuleshov A.S., Kuleshov A.A., Markov V.A., et al. Computational studies of parameters of working process of diesel engine with ammonia additives in the intake system. *Dvigatelistroenie = Engines Construction*. 2023;3(293):71-93. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/jec.2023.3.71-93>
8. Sa Bowen, Liu Ying, Markov V.A., et al. Combustion Process Characteristics and Ecological Indicators of the Two-Fuel Diesel Engine Running on Ammonia. *Dvigatelistroenie = Engines Construction*. 2023;4(294):73-87. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/jec.2023.4.73-87>
9. Reiter A. J., Kong S. C. Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel. *Engineering, Environmental Science. Fuel*. 2011; 90(1): 87-97. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.055>
10. Kovalev L.G., Zakharov S.V. Possibilities of using ammonia- hydrogen carrier as fuel for internal combustion engines. *Vestnik KrasGAU = Bulletin of KSAU*. 2007; 4: 158-161. (In Russ.) EDN: IAFLHD

11. Gross C.W., Kong S.C. Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia-DME mixtures. Fuel. 2013;103(01): 1069-1079. (In Eng.)
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.026>

12. Ryu K., Zacharakis G., Kong S.C. Performance characteristics of compression-ignition engine using high concentration of ammonia mixed with dimethyl ether. Applied Energy. 2014;113(01):488-499. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07>

Галышев Юрий Виталиевич, д-р техн. наук, профессор Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. ORCID: 0000-0001-7915-0623; eLibrary SPIN: 8258-1827; e-mail: galyshev57@yandex.ru	Yuriy V. Galyshev, DSc (Engineering), Professor of the Higher School of Power Engineering, Institute of Energy. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya Str., 195251 Saint Petersburg, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7915-0623; eLibrary SPIN: 8258-1827; e-mail: galyshev57@yandex.ru
Ло Синьо, аспирант Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. ORCID: 0009-0005-2815-7231; e-mail: losinyao181031@gmail.com	Xinyao Luo, Postgraduate student of the Higher School of Power Engineering, Institute of Energy. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya Str., 195251 Saint Petersburg, Russian Federation. ORCID: 0009-0005-2815-7231 e-mail: losinyao181031@gmail.com
Абызов Олег Витальевич, канд. техн. наук, доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. ORCID: 0000-0001-9898-4279; eLibrary SPIN: 3068-4970; e-mail: oleg.abyzov@yandex.ru	Oleg V. Abyzov, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Higher School of Power Engineering, Institute of Energy. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya Str., 195251 Saint Petersburg, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9898-4279; eLibrary SPIN: 3068-4970; e-mail: oleg.abyzov@yandex.ru
Зайцев Алексей Борисович, канд. техн. наук, доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. ORCID: 0000-0002-7443-1909; eLibrary SPIN: 8443-3030; e-mail: abzaytsev@mail.ru	Alexey B. Zaitsev, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Higher School of Power Engineering, Institute of Energy. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya Str., 195251 Saint Petersburg, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-7443-1909; eLibrary SPIN: 8443-3030; e-mail: abzaytsev@mail.ru
Иванов Александр Константинович, канд. техн. наук, доцент Высшей школы	Alexander K. Ivanov, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of

энергетического машиностроения Института энергетики. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. ORCID: 0000-0003-1348-8853 eLibrary SPIN: 4998-4018 e-mail: alkoniv@mail.ru	the Higher School of Power Engineering, Institute of Energy. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya Str., 195251 Saint Petersburg, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-1348-8853 eLibrary SPIN: 4998-4018 e-mail: alkoniv@mail.ru
Заявленный вклад авторов Ю.В. Галышев – руководство исследованием, проведение критического анализа материалов, расчётов и выводов; Ло Синьяо – обзор литературы, построение 3D расчётной модели, проведение расчётов; О.В. Абызов – методология; А.Б. Зайцев – написание текста; А.К. Иванов - анализ полученных данных и подготовка выводов	Stated authors' contribution Yu. V. Galyshev – research management, critical analysis of materials, calculations and conclusions; Luo Xinyao – literature review, construction of 3D calculation model, calculations; O. V. Abyzov – methodology; A. B. Zaitsev – writing the text; A. K. Ivanov – analysis of the obtained data and preparation of conclusions
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interest The authors declare that there is no conflict of interest
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 26.05.2025	Received: 26.05.2025
Одобрена после рецензирования: 01.07.2025	Approved after reviewing: 01.07.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

Научная статья
УДК 620.193.28.1

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-82-93

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА РЕСУРС АЛЮМИНИЕВЫХ РАДИАТОРОВ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭКОСИСТЕМУ

Отари Назирович Дидманидзе¹, Рамиль Тагирович Хакимов^{2✉}, Георгий Олегович Цыплаков³, Татьяна Юрьевна Вальдман⁴, Ирина Викторовна Цыплакова⁵

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, Москва, Россия

^{2,4,5} Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова, Санкт-Петербург, Россия

¹ didmanidze@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2558-0585>

² haki7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4858-3586>

³ Stepbysky@yandex.ru

⁴ vtu_46@mail.ru

⁵ tkm-wear@mail.ru

Аннотация. Использование алюминиевых радиаторов системы охлаждения автотракторной техники в полевых условиях эксплуатации зависит не только от режимов работы двигателя, вида охлаждающей жидкости, но и от условий воздействия окружающей среды на поверхность оребренной части пластин или трубок теплообменника, которые подвергаются коррозии, что приводит к ухудшению функционирования системы, а также пагубно влияет на экосистему. Огромную роль в данном случае имеет развитие технологий по нанесению защитных антикоррозионных покрытий на поверхность алюминиевых металлов и его сплавов. В статье указывается, что основной целью работы является использование технологии по защите алюминиевых поверхностей из сплава марки АМц активными веществами на основе оксидных, хроматных, фосфатных покрытий для повышения ресурса работы радиаторов системы охлаждения автотракторной техники в полевых условиях. Нанесения защитных пленок на поверхность алюминиевых пластин или трубок радиаторов повышает ресурс теплообменника в 3-4 раза, при этом снижается риск образования оксида алюминия, который отрицательно влияет не только на работоспособность охлаждающей системы, но вредит окружающей среде. Решением в данной ситуации является защита поверхности охлаждающей пластины радиаторов оксидными покрытиями, что подробно описано в данной статье. В представленном исследовании пока отработана технология по антикоррозионному нанесению на поверхность алюминиевых изделий радиаторов. При этом ведется работа по внедрению технологии в производственные условия для создания и производства радиаторов, использующих алюминиевые или медно-латунные пластины в сердцевине теплообменника, которые обеспечат не только высокую производительность, но и спрос.

Ключевые слова: коррозия, технология, радиатор, защита поверхности, жидкость, раствор, автотракторная техника

Для цитирования: Дидманидзе О.Н., Хакимов Р.Т., Цыплаков Г.О., Вальдман Т.Ю., Цыплакова И.В. Экспериментальные исследования коррозионно стойких защитных покрытий алюминиевых радиаторов автотракторной техники // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 3(124). С. 82-93 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-82-93>

Research article

Universal Decimal Code 620.193.28.1

EFFECT OF PROTECTIVE COATINGS ON THE LIFE OF ALUMINUM VEHICLE AND TRACTOR RADIATORS AND ECOSYSTEM

Otari N. Didmanidze¹, Ramil T. Khakimov², Georgy O. Tsyplakov³, Tatiana Yu. Waldman⁴, Irina V. Tsyplakova⁵

¹Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

^{2,4,5} Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

³Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov, Saint Petersburg, Russia

¹ didmanidze@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2558-0585>

² haki7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4858-3586>

³ Stepbysky@yandex.ru

⁴vtu_46@mail.ru

⁵tkm-wear@mail.ru

Abstract. The field application of aluminum radiators in the cooling system of vehicles and tractors depends not only on the operating modes of the engine but also on environmental conditions. The corrosive effects on the finned parts of plates or tubes in the heat exchanger can lead to poorer system's performance and have a negative impact on the ecosystem. The development of technologies for applying protective anticorrosive coatings to the surfaces of aluminum metals and aluminum-based alloys plays a crucial role in addressing these issues. The aim of research was to use a special technology to protect aluminum surfaces made of AMz alloy with active substances based on oxide, chromate, and phosphate coatings that would increase the field service life of radiators in the cooling system of automotive equipment. Applying protective films to the surface of aluminum plates or radiator tubes increases the heat exchanger life by three to four times. At the same time, it reduces the risk of aluminum oxide formation. The latter has an adverse effect not only on the cooling system's performance but it also harms the environment. The solution to this problem is to protect the surface of the radiator cooling plate with oxide coatings. The article describes this technique in detail. So far, the presented study has developed a technology for corrosion-resistant coating of aluminum radiator products. At the same time, efforts are underway to introduce this technology into production to manufacture the radiators with aluminum or copper-brass cores in heat exchangers. This will not only ensure high productivity but also meet demand.

Keywords: corrosion, technology, radiator, surface protection, liquid, solution, vehicles and tractors

For citation: Didmanidze O. N., Khakimov R.T., Tsyplakov G. O., Waldman T. Yu., Tsyplakova I.V. Effect of protective coatings on the life of aluminum vehicle and tractor radiators and ecosystem. *AgroEcoEngineering*. 2025; 3(124): 82-93 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-82-93>

Введение. Современная автотракторная техника, эксплуатируемая в сельском хозяйстве, использует классическую систему охлаждения с традиционными жидкостными радиаторами, изготовленными из алюминиевых и медно-латунных сердцевин, которые в свою очередь при внешнем (тепловом, химическом, жидкостном, вибрационном, механическом и др.) воздействии имеют способность окисляться, что вызывает дальнейшее неконтролируемое распространение коррозии по всей поверхности охлаждающей пластины или трубки радиаторов, преждевременно сокращая срок службы.

Теоретический анализ ранее исследуемых технологий ведущих отечественных и зарубежных ученых [1-6] показал, что работы в этой области до сих пор ведутся. При этом иногда фундаментальные исследования химических реакций различных реагентов на молекулярном уровне при взаимодействии с цветными металлами становятся невыгодными с точки зрения экономики и заменяются на более дешевые классические методы анодирования, что вызывает справедливое противоречие – современное и новое – это хорошо, но есть классическая технология и она пока работает.

По техническим условиям, в меньшей степени внешняя поверхность и в большей степени внутренняя полость пластин или трубок радиаторов подвергается химическому воздействию: антифриза, тосола при температуре от -40°C до $+100^{\circ}\text{C}$, водопроводной, почвенной воды разной степени агрессивности при температурах от 0°C до температуры кипения.

Анализ источников [1, 7, 8, 9] показал, что алюминиевые и медно-латунные сердцевин радиаторов нуждаются в поверхностной защите при использовании модернизированной классической технологии, разработанной в СПбГАУ, по нанесению антикоррозионных покрытий, обеспечивающей надежную и долговечную оксидную пленку на внешней и внутренней поверхности пластины или трубки с продолжительным ресурсом эксплуатации 15-20 лет. Ранее публиковались статьи [8, 9], в которых представлялись экспериментальные исследования алюминиевых пластин автотракторных радиаторов в агрессивных средах. В данной работе представлено продолжение ранее проведенных исследований по нанесению антикоррозионных покрытий на поверхность пластин или трубок радиаторов из сплава алюминия марки АМц.

Целью настоящей работы является использование технологии по защите алюминиевых поверхностей (пластин, трубок, оребрений) из сплава марки АМц активными веществами на основе оксидных, хроматных, фосфатных покрытий для повышения ресурса работы радиаторов системы охлаждения автотракторной техники в полевых условиях.

Материалы и методы. Исследовательская работа проводилась в несколько этапов.

1. Выбор способа нанесения коррозионностойкого защитного покрытия для пластин или трубок радиаторов автотракторной техники.

2. Нанесение защитного покрытия на опытную партию алюминиевых сердцевин радиаторов и проведение испытания в лабораторных и полевых условиях.

Дальнейшая работа по изысканию способа защиты радиаторов из алюминиевого сплава марки АМц проводилась в направлении уточнения технологических характеристик процесса нанесения хромофосфатных пленок.

Трудности заключались в подборе способа подготовки внутренней поверхности трубок радиатора перед нанесением защитной пленки, корректировании и срабатываемости хромо-фосфатирующего раствора, в разработке технологического процесса покрытия секций радиаторов.

Процесс покрытия отрабатывался отдельно для пластин и для сварных секций. Были взяты запассивированные пластины размером 35x55 мм и обработаны в объемах ~ 1,25 л. Перед покрытием образцы обезжиривались в растворе, содержащем тринатрийфосфат, жидкое стекло и едкий натр.

С целью повышения смачиваемости поверхности в раствор для обезжиривания добавляли катионоактивные и неионогенные поверхностно-активные вещества (НПАВ), применяемые в текстильной промышленности в качестве смачивателей: алкамон (Н), алкамон (ОС-2), выравниватель (А), алкилсульфонат и (ОП-7) в концентрации 3 г/л. После обезжиривания в растворах, содержащих эти добавки, и в растворах без добавок образцы тщательно промывались и загружались в ванну хромо-фосфатной обработки, представленной в источнике [9], (см. табл. 2, раствор 6). После промывки образцы загружались в ванну наполнения, состоящую из 0,5% раствора хромового ангидрида, на 10 минут, после чего следовала естественная сушка на воздухе в течение 24 часов.

Результаты. Для последующих коррозионных испытаний была изготовлена партия образцов с защитным хромо-фосфатным покрытием с естественной и принудительной сушкой. Размер образцов соответствовал половине ширины радиаторной пластины. В каждую колбу загружалось по пять таких образцов, следовательно, их реакционная площадь была примерно такой же, как при предварительных испытаниях. Однако, образцы меньшего размера в виде пластинок (а не полутрубок), имеют относительно небольшой вес и при

испытаниях к кипящей воде были неустойчивы и постоянно перемещались, задевали друг друга и стенки колбы и тем самым механически разрушали защитную пленку.

При проверке сплошности пленки капельным методом было установлено, что добавка смачивающих веществ не оказывает существенного влияния на качество и свойства покрытия.

Авторами процесса [10, 12] было отмечено, что минимальное время, необходимое для так называемого созревания пленки, составляет 24 часа, в дальнейшем процесс старения и упрочнения пленки продолжается. Поэтому были проведены опыты по изучению влияния продолжительности выдержки на воздухе на стойкость покрытия. Кроме того, для уменьшения времени общего цикла обработки была проверена возможность принудительной сушки при температуре 200°C в течение 20 минут. Данные этих опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние режима сушки и продолжительности выдержки образцов на воздухе на устойчивость пленки при испытаниях капельным методом

Table 1. Effect of drying mode and duration of sample exposure to air on film stability during filter paper test

Наблюдаемая величина	Стойкость пленки после выдержки в течение			
	2 суток		120 суток	
	температура сушки в градусах, °С			
	20	200	20	200
Время наполнения в растворе хромового ангидрида, мин.	10	-	10	-
Продолжительность сушки, час	24	0,3	24	0,3
Устойчивость пленки, мин.	13	2	25	4
Внешний вид образцов после нанесения защитной пленки	Бледно-салатный с оттенком			
	оливковый	голубой	оливковый	голубой

Устойчивость пленки при увеличении времени старения до 120 суток повышается в 2 раза, как при сушке в естественных условиях, так и при температуре сушки 200°C. При испытаниях капельным методом устойчивость пленки с повышением температуры сушки понижается.

Результаты последующих испытаний показывают, что как в агрессивной, так и в водопроводной воде, и при естественной и при принудительной сушке защитная пленка в отдельных местах нарушена (табл. 2).

Нарушения хромо-фосфатной пленки как по размерам, так и по сплошности, значительно меньше нарушений хроматной пленки.

На местах нарушений наблюдается и точечная коррозия. Скорость коррозии в этом случае также, как и скорость коррозии образцов без покрытия, незначительна и достигает максимальной величины 0,0045 г/м² час. Однако, показательным является то, что коррозионный процесс на образцах с защитным покрытием протекает на участках с нарушенной пленкой, то есть на площади во много раз меньшей, чем на образцах без защитного покрытия. Скорость же коррозии образцов с незначительно нарушенным защитным покрытием и без защитного покрытия одинакова, а в некоторых случаях скорость коррозии образцов с нарушенным защитным покрытием больше скорости коррозии образцов без защитного покрытия.

Осмотр образцов при увеличении в 12 раз показывает, что глубина точечной коррозии на местах нарушений защитного покрытия глубже, нежели на образцах без защитного покрытия, и в некоторых случаях поражения видны невооруженным глазом.

Таблица 2. Результаты испытаний образцов с хромо-фосфатным покрытием
(температура испытаний 100°С, длительность 1000 час)
Table 2. Test results of samples with chromium-phosphate coating (test temperature of
100°С, duration – 1000 hours)

Способ сушки	Среда	№ образца	До удаления накипи		После удаления накипи		
			Средняя скорость образования накипи	Состояние пленки и поверхности металла	Средняя скорость коррозии, г/м ² час	Состояние пленки и поверхности металла	
Естественная сушка на воздухе, время 24 часа	Вода агрессивная	12	0,0015	Цвет пленки изменился с светло-салатного до темно-салатного. На всех образцах отдельные нарушения пленки. В местах нарушения местная и точечная коррозия при x12	0,003	То же, что и до удаления накипи	
		13					
		14					
		15					
		16					
	Вода водопроводная	21	-0,0014	То же	0,0045		
		23					
		24					
		25					
		26					
	Антифриз	27	0,004	Пленка не нарушена, коррозии нет	0		
		28					
		29					
		30					
		31					
Сушка при 200° С, время сушки 10 мин	Вода спрессованная	10	0,0037	Цвет пленки изменился до темного. Имеются незначительные повреждения и незначительная местная коррозия	0,0015		
		11					
		17					
		18					
		19					
	Вода водопроводная	33	0,001	Изменение цвета незначительное. Нарешние пленки на изгибах канавок. На местах нарушений - местная точечная коррозия	0,0039		
		34					
		35					
		36					
		37					
	Антифриз	38	0,0006	Пленка не нарушена, коррозии нет	Привес 0,0003		—
		39					
		40					
		41					
		42					

Как следует из таблицы 2, коррозионная стойкость защитного покрытия с принудительной сушкой несколько выше.

Обсуждение. Сравнивая результаты предварительных и последующих исследований образцов с хромо-фосфатным покрытием, необходимо сделать вывод о том, что отдельные нарушения защитного покрытия происходят за счет механического воздействия на пленку перемещающихся при кипении образцов, но не за счет воздействия агрессивной среды.

В процессе работы с одним и тем же раствором было замечено, что цвет образующейся пленки изменяется от салатного и темно-салатного до бледно-салатного. Методов анализа данного раствора в настоящее время нет. Поэтому корректирование раствора производили на основании литературных данных [13, 14] по визуальным наблюдениям в зависимости от изменения цвета образцов. Опыты показали, что раствор следует корректировать после пропускания $\sim 2 \text{ дм}^2$ поверхности через 1 л раствора. Более частое корректирование не оказывает существенного влияния на стойкость пленки (табл. 3).

Таблица 3. Влияние продолжительности обработки в растворе на внешний вид и устойчивость пленки

Table 3. Effect of treatment duration in solution on film appearance and stability

Площадь обработанных образцов в $\text{дм}^2/\text{л}$	Испытание устойчивости капельным методом	Корректирование растворов фтористым натрием в г/л	Внешний вид образцов
0,64	6; 7	-	салатный
7,4	6; 6	-	бледно-салатный
7,7	5,5; 5	1,8	цвет стал интенсивней
11,9	6; 7	-	бледно-салатный
12,5	6,5; 5,5	1,8	темно-салатный
18	7,5; 6	-	бледно-салатный

При покрытии образцов, изготовленных из радиаторов, сваренных в секции с распорным кольцом по ранее применяемой технологии, включающей обезжиривание, промывку, обработку в хромо-фосфатном растворе, промывку, наполнение в растворе хромового ангидрида и сушку в течение 24 часов на воздухе, на сварных швах оставались черные точки, на которых защитная пленка не образуется [15-17]. В дальнейшем они становятся очагами коррозии. Необходимо было изменить процесс подготовки поверхности с тем, чтобы полученное покрытие стало однородным. Для выполнения этой задачи образцы перед хромо-фосфатной обработкой травились в растворе едкого натра концентрацией 80 г/л, в течение двух, трех и пяти минут. После щелочного травления следовало осветление в растворах азотной кислоты различных концентраций:

- концентрированной – уд. вес 1,34;
- разбавленной в отношении 1:1 – уд. вес 1,27;
- разбавленной в отношении 1:2 – уд. вес 1,45;
- в растворе, состоящем из 250-260 г/л азотной кислоты и 30 г/л хромового ангидрида;
- в растворе, состоящем из 2,5 г/л азотной кислоты и 250 г/л хромового ангидрида.

На основании проведенных опытов предложена схема технологического процесса нанесения защитной пленки на секции радиатора, изготовленные по методу контактно-роликовой сварки:

- травление в растворе едкого натра концентрацией 80 г/л в течение 2-3 мин. при температуре $60 \pm 10^\circ\text{C}$;
- промывка в холодной проточной воде;
- осветление в азотной кислоте, разбавленной в отношении 1:1 – уд. вес 1,27 в течение 15-20 сек;
- промывка в холодной проточной воде;
- обработка в хромо-фосфатирующем растворе в течение 50 мин. при температуре $48 \pm 2^\circ$;
- промывка в холодной проточной воде;
- наполнение в 0,5% растворе хромового ангидрида в течение 10 мин.;
- сушка в течение 24 часов на воздухе или (при исключении операций 6 и 7) при температуре $150-200^\circ\text{C}$ в течение 10 мин.

Образцы концов секций с распорным кольцом покрывались защитной пленкой с естественной сушкой по выбранной технологии и затем испытывались на коррозионную стойкость. Длительность испытаний – 1000 часов. Вес образцов был относительно большим и образцы при кипении воды не перемещались.

Результаты испытаний показали, что нарушений пленки на наружной и внутренней поверхностях и на сварных соединениях нет. Коррозия полностью отсутствует.

Этот результат полностью подтверждает ранее сделанный вывод о том, что нарушение защитного покрытия происходит за счет механического воздействия на пленку, а не за счет действия агрессивной среды.

Наличие дюралюминиевого распорного кольца, также покрытого хромо-фосфатной пленкой, не влияет на стойкость защитного покрытия. Испытания образцов с хромо-фосфатным покрытием в антифризе дали положительные результаты.

По избранной технологии (нанесения защитных пленок в хроматных и фосфатных растворах) обрабатывали опытную партию радиаторов, предназначенную для эксплуатационных испытаний, в количестве 10 штук.

Выводы

1. Установлено, что процесс хромо-фосфатирования обладает малой производительностью. Для повышения производительности процесса необходимо продолжить исследование как в направлении увеличения продолжительности работы раствора - р его корректирования и регенерации, так и в направлении интенсификации самого процесса нанесения защитной пленки.

2. Антифриз не вызывает коррозии сплава алюминия марки АМц и не разрушает хромо-фосфатное покрытие.

3. Сплав алюминия марки АМц в синтетической воде и в водопроводной воде подвержен по всей поверхности незначительной точечной коррозии.

4. Нанесено защитное покрытие на партию сварных секций, из которых в ОНИЛТА СПбГАУ собраны четыре радиатора для испытания в лабораторных и полевых условиях на автотракторной технике.

5. Поскольку исследованные жидкости вызывают незначительную коррозию сплава алюминия марки АМц, считаем целесообразным провести работу по изысканию ингибиторов, обеспечивающих коррозионную стойкость радиаторов из сплава алюминия марки АМц без нанесения дополнительных защитных покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Красников Г. Я., Трухачев В. И., Дидманидзе О. Н., Парлюк Е. П. Гибридный трактор – основа современного сельского хозяйства // Чтения академика В. Н. Болтинского: сб. статей по матер. конф. (Москва, 22-23 января 2025 г.). Москва: Сам Полиграфист. 2025. С. 17-35. EDN: АНОЕСК
2. Годжаев З.А., Зубина В. А., Годжаев Т. З. Разработка автоматизированной базы данных по функциональным характеристикам МЭС в агропромышленном комплексе // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2025. № 1. С. 71-76. EDN: SVQSDO
3. Годжаев З.А., Овчинников Е. В., Овчаренко А. С., Уютов С. Ю. Перспективное мобильное энергетическое средство // Экология промышленного производства. 2024. № 1(125). С. 60-62. EDN: SRUNBM
4. Федотов В.Н., Барнови Н. В., Богданов М. В., Афанасьев А. С. Мониторинг загрязнений окружающей среды при эксплуатации АТС: учебное пособие. Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. 2025. 76 с. EDN: MSHAFT
5. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия: учебник. М.: Высшая школа. 2006. 528 с.
6. Клейн Е.В., Разговоров П. Б., Ситанов С. В., Горшков В.К., Симунова С.С. Особенности формирования фосфатных пленок на алюминии и его сплавах // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2006. № 49 (7). С. 45-48. EDN: OGGVPH
7. Шувалов Д.А., Архипов Е.А., Григорян Н.С., Жирухин. Д.А., Смирнов К.Н., Ваграмян Т.А. Исследование процессов электроосаждения кадмиевых покрытий // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 13(209). С. 42-43. EDN: YRRXBJ
8. Хакимов Р.Т., Ланглиц К.О., Долгушин В.А., Огнев О.Г., Цыплаков Г.О. Результаты экспериментальных исследований коррозионной стойкости алюминиевых радиаторов автотракторной техники // Известия Международной академии аграрного образования. 2023. № 67. С. 145-152. EDN: PHOTHD
9. Хакимов Р.Т., Ланглиц К.О., Долгушин В.А., Огнев О.Г., Цыплаков Г.О. Экспериментальные исследования алюминиевых пластин автотракторных радиаторов в агрессивных средах // Известия Международной академии аграрного образования. 2023. № 67. С. 153-158. EDN: MCFQNE
10. Кошель С.Г., Соболева Е.С., Павлов А.В. Химические реакторы. Ярославль: Изд-во ЯГТУ. 2013. 76 с.
11. Томашов Н.Д., Тюкина М.Н., Заливалов Ф.П. Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов. М.: «Машиностроение». 1968. 157 с.
12. Верник С., Пиннер Р. Химическая и электролитическая обработка алюминия и его сплавов / Пер. с англ. М. В. Порман; Под ред. Б.А. Зеленова, Н.И. Веселовой. Л.: Судпромгиз. 1960. 387 с.
13. Кротов И.В., Гринин В.В., Запольская И.А. Получение пленок фосфатов алюминия и хрома на алюминии и его сплавах // Журнал прикладной химии. 1975. Т. 31. 33 с.
14. Алекин О.А. Основы гидрохимии: учеб. пособие для вузов. Л.: Гидрометеиздат. 1953. 296 с.
15. Салова Т.Ю., Смирнов Д.В. Разработка инструментария оценки температурного режима системы охлаждения двигателя // Известия Международной академии аграрного образования. 2021. № S55. С. 71-76. EDN: YYGGHT
16. Постников Н.С. Коррозионностойкие алюминиевые сплавы. М.: Металлургия. 1976. 300 с.
17. Nichols V. R. Protective coating and method of applying same to metal parts. US patent 2760891, 28 August, 1956. Petting 1956, Vol. 43(12), 1446. <https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/static/pages/ppubsbasic.html>

REFERENCES

1. Krasnikov G.Y., Trukhachev V.I., Didmanidze O.N., Parlyuk E.P. Hybrid tractor – the basis of modern agriculture. In: Readings of Academician V. N. Boltinsky: Proc. Conf. (Moscow, January 22-23, 2025). Moscow: Sam Poligrafist. 2025:17-35 (In Russ.) EDN: AHOESK
2. Godzhaev Z.A., Zubina V.A., Godzhaev T.Z. Development of an automated database on the functional characteristics of moving power units (MPU) in the agro-industrial complex. Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Problems of mechanical engineering and automation. 2025;1:71-76. (In Russ.) EDN: SVQSDO
3. Godzhaev Z.A., Ovchinnikov E.V., Ovcharenko A.S., Uyutov S.Yu. A promising mobile energy vehicle. Ekologiya promyshlennogo proizvodstva = Industrial Ecology. 2024;1(125): 60-62. (In Russ.) EDN: SRUHBM
4. Fedotov V.N., Barnovi N. V., Bogdanov M. V., Afanasyev A. S. Monitoring of environmental pollution during motor vehicles operation: textbook. Saint Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions. 2025. 76 p. (In Russ.) EDN: MSHAFT
5. Stromberg A.G., Semchenko D.P. Physical chemistry: textbook. Moscow: Higher School Publ. 2006. 528 p. (In Russ.)
6. Kleyn Ye.V., Razgovorov P.B., Sitanov S.V., Gorshkov V.K., Simunova S.S. Specific features of phosphate films formation on aluminum and aluminum-based alloys. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Chemistry and Chemical Technology. 2006;49(7):45-48. (In Russ.) EDN: OGGVPH
7. Shuvalov D.A., Arhipov E.A., Grigoryan N.S., Zhiruhin D.A., Smirnov K.N., Vagramyan T.A. Research of the processes of electrodeposition of cadmium coatings. Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii = Successes in Chemistry and Chemical Technology. 2018; 32(13(209)): 42-43. (In Russ.) EDN: YRRXBJ
8. Khakimov R.T., Langlitz K.O., Dolgushin V.A., Ognev O.G., Tsyplakov G.O. Results of experimental studies of corrosion resistance of aluminum radiators of automotive equipment. Izvestiya Mezhdunarodnoi akademii agrarnogo obrazovaniya = Izvestiya International Academy of Agrarian Education. 2023;67:145-152. (In Russ.) EDN: PHOTHD
9. Khakimov R.T., Langlitz K.O., Dolgushin V.A., Ognev O.G., Tsyplakov G.O. Experimental studies of aluminum plates of automotive radiators in aggressive environments. Izvestiya Mezhdunarodnoi akademii agrarnogo obrazovaniya = Izvestiya International Academy of Agrarian Education. 2023;67:153-158. (In Russ.) EDN: MCFQNE
10. Koshel S.G., Soboleva E.S., Pavlov A.V. Chemical reactors. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University Publishing House. 2013. 76 p. (In Russ.)
11. Tomashov N.D., Tyukina M.N., Zalivalov F.P. Thick-layer anodizing of aluminum and its alloys. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1968. 157 p. (In Russ.)
12. Wernick S., Pinner R. The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and Its Alloys. Teddington, Middlesex: Draper. 1956. (In Russ: Wernick S., Pinner R. Chemical and electrolytic treatment of aluminum and its alloys. (Zelenov B.A. and Veselova N.I. (eds.)). Leningrad: Sudpromgiz Publ., 1960. 387 p.
13. Krotov I.V., Grinin V.V., Zapolskaya I.A. Obtaining films of aluminum and chromium phosphates on aluminum and its alloys. Zhurnal prikladnoi khimii = Journal of Applied Chemistry. 1975;31:33 (In Russ.)
14. Alekin O.A. Fundamentals of hydrochemistry. Textbook for universities. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. 1953. 296 p. (In Russ.)
15. Salova T.Yu., Smirnov D.V. Development of tools for assessing the temperature regime of the engine cooling system. Izvestiya Mezhdunarodnoi akademii agrarnogo obrazovaniya = Izvestiya International Academy of Agrarian Education. 2021;S55:71-76. (In Russ.) EDN: YYGGHT
16. Postnikov N.S. Corrosion-resistant aluminum alloys. Moscow: Metallurgical Engineering. Publ. 1976. 300 p. (In Russ.)

17. Nichols V. R. Protective coating and method of applying same to metal parts. US patent 2760891, 28 August, 1956. Petting 1956, Vol. 43(12), 1446.
<https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/static/pages/ppubsbasic.html>

Об авторах	About the authors
Дидманидзе Отари Назирович, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49.) ORCID: 0000-0003-2558-0585; eLibrary SPIN: 4645-3145; e-mail: didmanidze@rgau-msha.ru	Otari N. Didmanidze, Academician of the Russian Academy of Sciences, DSc (Engineering), Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Moscow, Timiryazev Str., 49, Russian Federation) ORCID: 0000-0003-2558-0585; eLibrary SPIN: 4645-3145; e-mail: didmanidze@rgau-msha.ru
Хакимов Рамиль Тагирович, д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (196601, Российская Федерация г. Санкт-Петербург-Пушкин, Петербургское шоссе, 2) ORCID: 0000-0003-4858-3586; eLibrary SPIN: 7784-6537; e-mail: haki7@mail.ru	Ramil T. Khakimov, DSc (Engineering), Associate Professor, Saint Petersburg State Agrarian University (196601, Saint Petersburg-Pushkin, Peterburgskoje Shosse, 2, Russian Federation) ORCID: 0000-0003-4858-3586; eLibrary SPIN: 7784-6537; e-mail: haki7@mail.ru
Цыплаков Георгий Олегович, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова (Российская Федерация, 197045, г. Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, д. 17/1) e-mail: Stepbysky@yandex.ru	Georgy O. Tsyplakov, Cand. Sc. (Engineering), senior lecturer, Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov (197045, Saint Petersburg, Ushakovskaja Emb., 17/1? Russian Federation) e-mail: Stepbysky@yandex.ru
Вальдман Татьяна Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (Российская Федерация, 196601, г. Санкт-Петербург-Пушкин, Петербургское шоссе, 2) eLibrary AuthorID: 284871; e-mail: vtu_46@mail.ru	Tatiana Yu. Waldman, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Saint Petersburg State Agrarian University (196601, Saint Petersburg-Pushkin, Peterburgskoje Shosse, 2, Russian Federation) eLibrary AuthorID: 284871; e-mail: vtu_46@mail.ru
Цыплакова Ирина Викторовна, ст. преподаватель, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (Российская Федерация, 196601, г. Санкт-Петербург-	Irina V. Tsyplakova, senior lecturer, Saint Petersburg State Agrarian University (196601, Saint Petersburg-Pushkin, Peterburgskoje Shosse, 2, Russian Federation) eLibrary SPIN: 2702-4222;

Пушкин, Петербургское шоссе, 2) eLibrary SPIN: 2702-4222; e-mail: tkm-wear@mail.ru	e-mail: tkm-wear@mail.ru
Заявленный вклад авторов О.Н. Дидманидзе – руководство исследованием; Р.Т. Хакимов – проведение критического анализа материалов, расчётов и выводов; Г.О. Цыплаков – методология; Т.Ю. Вальдман – анализ полученных данных и подготовка выводов; И.В. Цыплакова – написание текста.	Stated authors' contribution O.N. Didmanidze – research management; R.T. Khakimov – critical analysis of materials, calculations and conclusions; G.O. Tsyplakov – methodology; T.Yu. Waldman – analysis of the obtained data and preparation of conclusions; I.V. Tsyplakova – writing the text.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interest The authors declare that there is no conflict of interest
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 26.08.2025	Received: 26.08.2025
Одобрена после рецензирования: 09.09.2025	Approved after reviewing: 09.09.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

Научная статья

УДК 62-752.2

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-93-105

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ СИДЕНЬЯ ОПЕРАТОРА КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Михаил Сергеевич Корытов^{1✉}, Ирина Евгеньевна Кашапова², Виталий Сергеевич Щербаков³

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия

¹ kms142@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5104-7568>

² kashapova_ie@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0631-564X>

³ sherbakov_vs@sibadi.org, <https://orcid.org/0000-0002-3084-2271>

Аннотация. Актуальной остается проблема защиты операторов тракторов сельскохозяйственного назначения от динамических воздействий. Значительные вибрации на рабочем месте тракториста возникают при взаимодействии ходового оборудования с неровностями обрабатываемой местности. Использование навесного оборудования, такого как плуги, культиваторы и др., может создавать дополнительные вибрации из-за взаимодействия с почвой. Рама колесного трактора не имеет амортизаторов, в связи с этим остро встает вопрос о применении виброзащитных подвесок кабины и сиденья оператора. Перспективным направлением является создание виброзащитных систем сидений с эффектом квазинулевой жесткости. Они эффективно защищают оператора от низкочастотных вибраций. Авторами предложена пассивная виброзащитная система с эффектом квазинулевой жесткости на основе параллелограммного механизма. Конструктивные элементы скомпонованы так, что обеспечивают постоянное значение вертикальной силы подвески сиденья при увеличении силы пружины растяжения за счет уменьшения плеча силы пружины относительно оси вращения. Нерастяжимый трос с помощью роликов закрепляется на звеньях параллелограммного механизма. Целью настоящей работы является исследование влияния координаты точки закрепления троса на нижнем подвижном звене параллелограммного механизма на наклон основной рабочей участка статической силовой характеристики вертикальной возвращающей силы механизма. С использованием геометрических зависимостей получены выражения в символьном виде для вычисления направленной вертикально силы, создаваемой предложенным механизмом сиденья. При этом учитываются расстояния между точками закрепления троса. При различных значениях исследуемого геометрического параметра x получены статические силовые характеристики механизма. Представленные результаты показывают, что все полученные статические силовые характеристики близки к горизонтальным. Преимуществом конструкции является использование только одной пружины растяжения и гибкого нерастяжимого троса, что значительно упрощает и удешевляет её. Предложенный способ позволит подстраиваться под переменную массу оператора трактора сельскохозяйственного назначения.

Ключевые слова: трактор, обработка почвы, виброзащита, параллелограммный механизм, квазинулевая жесткость

Благодарности: Авторы статьи выражают благодарность за нелегкий труд и экспертное мнение рецензенту, работавшему с данной статьей.

Для цитирования: Корытов М.С., Кашапова И.Е., Щербаков В.С. Совершенствование виброзащитной системы сиденья оператора колесного трактора сельскохозяйственного назначения // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 3(124). С. 93-105 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-93-105>

Research article

Universal Decimal Code 62-752.2

IMPROVEMENT OF THE VIBRATION PROTECTION SYSTEM OF THE OPERATOR'S SEAT IN AN AGRICULTURAL WHEELED TRACTOR

¹ kms142@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5104-7568>

² kashapova_ie@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0631-564X>

³ sherbakov_vs@sibadi.org, <https://orcid.org/0000-0002-3084-2271>

Abstract. The problem of protecting agricultural tractor operators from dynamic impacts continues to be a concern. Significant vibrations at the tractor driver's workplace occur when the chassis interacts with uneven terrain. The use of such implements as plows, cultivators, and others can create extra vibrations due to their interaction with soil. The frame of a wheeled tractor has no shock absorbers. In this regard, the acute issue is the use of vibration-protective suspensions for the operator's cabin and seat. A promising direction is the creation of vibration-protective seat systems with a quasi-zero rigidity effect. They effectively protect the operator from low-frequency vibrations. The authors propose a passive vibration-protective system with a quasi-zero rigidity effect based on a parallelogram mechanism. The design elements are arranged in such a way that they provide a constant value of the vertical force of the seat suspension with an increase in the extension spring force due to a decrease in the spring force arm relative to the rotation axis. An inextensible cable is secured to the links of a parallelogram mechanism using rollers. The purpose of this work was to study the influence of the coordinate of the cable attachment point on the lower movable link of the parallelogram mechanism on the slope of the main working section of the static force characteristic of the vertical restoring force of the mechanism. Using geometric dependencies, symbolic expressions were obtained for calculating the vertically directed force created by the proposed seat mechanism. In this case, the distances between the cable attachment points were taken into account. For different values of the studied geometric parameter x , the static force characteristics of the mechanism were obtained. The presented results show that all the obtained static force characteristics are close to horizontal. The advantage of the design is the use of only one tension spring and a flexible, inextensible cable. This significantly simplifies and reduces its cost. The proposed method allows for adjustment to the variable mass of the agricultural tractor operator.

Keywords: tractor, tillage, vibration protection, parallelogram mechanism, quasi-zero stiffness

Acknowledgements: The authors of the article express their gratitude for the hard work and expert opinion of the reviewer who worked with this article.

For citation: Korytov M.S., Kashapova I.E., Sherbakov V.S. Improvement of the vibration protection system of the operator's seat of an agricultural wheeled tractor. *AgroEcoEngineering*. 2025; 3(124): 93-105 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-93-105>

Введение. Проблема обеспечения продовольствием в условиях роста населения и сокращения ресурсов актуальна для всего мира, включая Россию. Сельское хозяйство играет ключевую роль в решении этой проблемы, и повышение урожайности является одним из ключевых направлений. Традиционные тракторы остаются основным инструментом в сельском хозяйстве, но их использование сопряжено с рядом проблем, включая воздействие вибрации на операторов [1]. Виброзащита тракторов сельскохозяйственного назначения является важнейшим аспектом обеспечения безопасности и комфорта операторов. Основными причинами вибраций на рабочем месте тракториста являются движение машины

по неровной поверхности и взаимодействие навесного оборудования с обрабатываемой почвой [2].

Вибрации негативно сказываются не только на здоровье человека-оператора, вызывая профессиональные заболевания, но и в некоторых случаях приводят к выходу машины из строя. Так как шасси колесного трактора не имеет амортизаторов, то снижение вибрационных воздействий достигается за счет применения систем виброзащиты кабины и сиденья оператора [3].

Методы виброзащиты условно подразделяются на активные и пассивные. Несмотря на свои преимущества активные средства виброизоляции, требующие подвода внешней энергии, уступают пассивным системам [4]. Пассивные системы просты в обслуживании, надежны и характеризуются низкой стоимостью, такие подвески не требуют постоянного обслуживания [5].

Виброзащитные системы сидений в общем случае могут иметь статическую силовую характеристику, обладающую существенной нелинейностью, либо, в частном случае, кусочно-линейную характеристику. Эффект квазинулевой жесткости считается перспективным, и его использование выступает одним из основных направлений развития пассивных и активных виброзащитных систем, поскольку при его использовании достаточно эффективно подавляются не только высокочастотные, но и низкочастотные вибрации и удары [5, 6]. Последние характерны для рабочего процесса трактора сельскохозяйственного назначения, и возникают, в частности, при воздействиях со стороны почвы на ходовые элементы трактора и сельскохозяйственное оборудование [7].

Системы с эффектом квазинулевой жесткости характеризуются малым или даже нулевым углом наклона среднего участка статической силовой характеристики, в котором происходят основные колебания. То есть, сила, создаваемая механизмом такой системы, остается приблизительно постоянной [8].

Одним из распространенных вариантов создания виброзащитной системы с эффектом квазинулевой жесткости является использование в одном механизме комбинации из двух механизмов, обеспечивающих положительную и отрицательную жесткость. Положительная жесткость при этом характеризуется возрастанием силы, возвращающей механизм в положение равновесия, при отклонении от положения равновесия. Отрицательная жесткость также характеризуется возрастанием силы, еще больше отклоняющей механизм от положения равновесия. Комбинация указанных двух механизмов в одном обеспечивает квазинулевую жесткость. Возможно также обеспечение эффекта квазинулевой жесткости путем использования внешней энергии, т.е. при использовании активных виброзащитных систем. Последние могут быть построены на применении электромагнитных эффектов, гидравлического привода, пневматического привода, их комбинации, и т.д. [4, 7].

Эффективное и качественное функционирование машинно-тракторных агрегатов зависит не только от правильного их комплектования, агрегатирования и работы в оптимальных режимах [9], но и от обеспечения эргономических требований, в частности совершенствования конструктивных параметров виброзащитного сиденья оператора [10].

При создании новых эффективных виброзащитных систем сидений операторов тракторов целесообразно использовать обладающие высокой надежностью механизмы пассивного вида на основе рычагов, пружин и тросов. Это позволит обеспечить нелинейность статической силовой характеристики и эффект квазинулевой жесткости. Примером такой конструкции может служить параллелограммная подвеска [11].

Преимуществом параллелограммной подвески является тот факт, что для достижения квазинулевой жесткости не требуется механизма с отрицательной жесткостью, достаточно в механизм ввести лишь одну пружину растяжения. С учетом сказанного, совершенствование виброзащитной системы сиденья, обеспечивающее улучшение условия труда оператора колесного трактора сельскохозяйственного назначения, является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование влияния координаты точки закрепления троса на нижнем подвижном звене параллелограммного механизма на наклон основного рабочего участка статической силовой характеристики вертикальной возвращающей силы механизма F_g , расположенного между крайними участками. В качестве исследуемой координаты выступает параметр x , т.е. расстояние от точки 0 до точки 2 на нижнем звене параллелограмма.

Материалы и методы исследования. В настоящем исследовании использован подход, суть которого кратко можно выразить как обеспечение постоянного значения силы F_g виброзащитного механизма, направленной вертикально вверх (рис. 1) [12]:

$$F_g = \frac{M}{L_h} = \frac{F_s \cdot h}{L_h} = \text{const}, \quad (1)$$

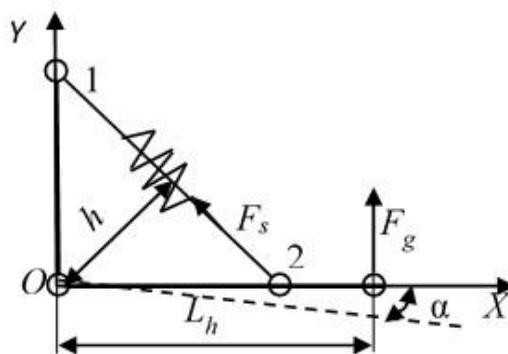


Рис. 1. Расчетная схема для определения вертикально направленной возвращающей силы виброзащитной системы

Fig. 1. Calculation scheme for determining the vertically directed restoring force of the vibration protection system

Сила растяжения пружины и троса F_s при подъеме и опускании сиденья меняется, поскольку меняется расстояние между точками 1 и 2, вследствие чего меняется длина троса и пружины. В то же время меняет свое значение и плечо h силы растяжения троса относительно точки 0, находящейся в левом нижнем углу параллелограмма. В результате вертикально направленная возвращающая сила механизма F_g , которая компенсирует силу тяжести сиденья и в рассматриваемой схеме приложена к правому звену параллелограмма, будет оставаться постоянной (см. рис. 1).

При увеличении длины плеча h , т.е. при подъеме сиденья, значение силы натяжения пружины и троса F_s уменьшается, поскольку уменьшается расстояние между точками 1 и 2.

Описываемый механизм виброзащитной системы сиденья построен на основе параллелограммного механизма. Дополнительно в него включены нерастяжимый трос и пружина растяжения, которая может быть различного типа [11]. В конструкции предлагаемого виброзащитного механизма реализуется сформулированный выше принцип обеспечения постоянного значения возвращающей вертикально направленной силы.

Виброзащитный механизм сиденья оператора трактора сельскохозяйственного назначения рассматривается в правой декартовой системе координат OXY . Начало указанной системы координат находится в точке O , которая располагается в левом углу параллелограммного механизма, в нижней его части (рис. 2).

В настоящей работе использовались следующие условные обозначения: L – длина горизонтально расположенных звеньев параллелограммного механизма, м; h_g – высота подъема либо опускания точки крепления сиденья от уровня, принятого за нулевой, соответствующего прямоугольной форме параллелограмма, м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; m – масса сиденья с оператором в точке крепления в правой части механизма, кг; α – угол поворота верхнего и нижнего звеньев параллелограмма относительно горизонтального положения, град; F_g – сила подъема виброзащитного механизма, направленная вертикально, Н; x_0 – длина отрезка $0-2$ до коррекции, м; x – длина отрезка $0-2$ после коррекции, м; y – постоянная длина отрезка $0-1$, м; L_{s0} – длина пружины растяжения, соответствующая прямоугольной форме параллелограмма, м; L_s – длина пружины растяжения текущая, м; c_s – коэффициент жесткости пружины, Н/м; F_s – сила растяжения пружины, Н; h – плечо действия силы растяжения пружины и натяжения троса относительно нижней левой точки механизма, м.

Предполагается, что расстояние от точки O до точки 2 , находящейся на нижнем звене параллелограмма, может быть переменным, а расстояние y от точки O до точки 1 – постоянным.

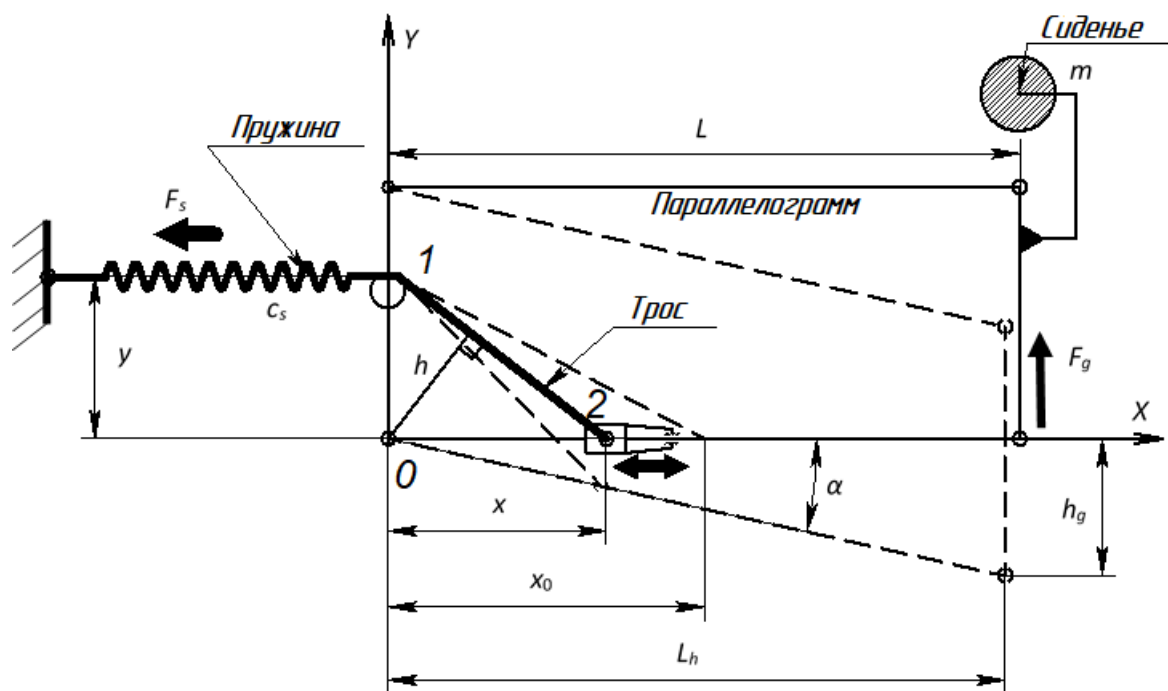


Рис. 2. Расчетная схема для нахождения зависимости вертикальной силы F_g на сиденье оператора трактора от длины отрезка $0-2$

Fig. 2. Calculation scheme for finding the dependence between the vertical force F_g on the tractor operator's seat and the segment $0-2$ length

На начальном этапе определяется величина ΔL_{s0} равновесной длины пружины растяжения при прямоугольной форме параллелограмма, т.е. в среднем положении виброзащитного механизма, т.е. при прямоугольной форме параллелограммного механизма. В указанном положении виброзащитным механизмом уравнивается сила тяжести сиденья с оператором F_g . Значение ΔL_{s0} определяется при x_0 – номинальной и одновременно начальной длине отрезка 0-2 до коррекции.

Результаты. Нами были разработаны аналитические зависимости для определения вертикальной силы от прочих геометрических параметров механизма сиденья оператора трактора, последовательность которых заключалась в выполнении следующих пунктов.

1. Вычисляется плечо силы натяжения пружины и троса на участке 1-2 относительно точки 0 левого нижнего шарнира параллелограммного механизма в среднем положении h_0 и начала системы координат:

$$h_0 = y \sqrt{1 - \frac{y^2}{y^2 + x_0^2}}, \quad (2)$$

2. Определяется значение коэффициента жесткости пружины c_s исходя из условия квазиулевой жесткости, то есть горизонтальности в средней точке статической силовой характеристики параллелограммного механизма виброзащитной системы сиденья [7]:

$$c_s = \frac{L \cdot g \cdot m}{x_0 \cdot y}, \quad (3)$$

3. Определяется значение момента M_0 силы тяжести сиденья с оператором общей массой m относительно точки 0, в которой расположены шарнир и начало системы координат, при среднем положении механизма, т.е. прямоугольной форме параллелограмма:

$$M_0 = m \cdot g \cdot L, \quad (4)$$

Момент, создаваемый силой растяжения пружины и натяжения троса на участке 1-2, уравнивает момент силы тяжести сиденья с оператором M_0 :

$$M_0 = F_{s0} \cdot h_0, \quad (5)$$

где F_{s0} – сила натяжения троса и растяжения пружины при $x=x_0$ и прямоугольной форме параллелограмма:

$$F_{s0} = c_s \cdot \Delta L_{s0}, \quad (6)$$

Из условия уравнивания моментов сил было записано следующее уравнение:

$$m \cdot g \cdot L = c_s \cdot \Delta L_{s0} \cdot y \sqrt{1 - \frac{y^2}{y^2 + x_0^2}}, \quad (7)$$

Приведенное уравнение позволяет получить выражение требуемой величины номинальной деформации пружины ΔL_{s0} :

$$\Delta L_{s0} = \frac{m \cdot g \cdot L}{c_s \cdot y \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{y^2 + x_0^2}}} = \frac{m \cdot g \cdot L}{\frac{L \cdot g \cdot m}{x_0 \cdot y} \cdot y \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{y^2 + x_0^2}}} = \frac{x_0}{\sqrt{1 - \frac{y^2}{y^2 + x_0^2}}}, \quad (8)$$

4. По известной формуле нахождения расстояния между точкой и прямой определяется h – плечо силы натяжения троса на участке 1-2 относительно точки 0 [13]:

$$h = \frac{|x_2 \cdot y_1 - y_2 \cdot x_1|}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}, \quad (9)$$

Учитывая, что $x_1 = 0$; $y_1 = y$; $x_2 = x \cdot \cos(\alpha)$; $y_2 = x \cdot \sin(\alpha)$, выражение примет вид:

$$h = \frac{|x \cdot y \cdot \cos(\alpha)|}{\sqrt{x^2 \cdot (\cos(\alpha))^2 + (y - x \cdot \sin(\alpha))^2}}, \quad (10)$$

Из расчетной схемы (см. рис. 2) видно, что угол поворота параллелограммного механизма α связан с высотой подъема правого звена h_g :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h_g}{L}\right), \quad (11)$$

После преобразования выражение примет вид:

$$h = \frac{x \cdot y \cdot \sqrt{1 - \frac{h_g^2}{L^2}}}{\sqrt{x^2 \cdot \left(1 - \frac{h_g^2}{L^2}\right) + \left(y - x \cdot \frac{h_g}{L}\right)^2}}, \quad (12)$$

5. Текущее расстояние L_{12} между точками 1 и 2 определено из треугольника 0-1-2:

$$L_{12} = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 - 2 \cdot x \cdot y \cdot \left(\frac{h_g}{L}\right)}, \quad (13)$$

6. Текущая деформация пружины растяжения ΔL_s представляет сумму номинальной деформации пружины ΔL_{s0} , и разности между текущей и номинальной длинами отрезка 1-2:

$$\Delta L_s = L_{12} - \sqrt{x^2 + y^2} + \Delta L_{s0}, \quad (14)$$

7. Сила растяжения пружины и натяжения троса F_s на участке 1-2 создает вращающий момент относительно точки 0. Его текущее значение определяется выражением:

$$M = F_s \cdot h = c_s \cdot \Delta L_s \cdot h, \quad (15)$$

Сила подъема F_g , приложенная к правой верхней точке параллелограмма, где закрепляется сиденье, и компенсирующая силу тяжести сиденья с оператором, создается указанным вращающим моментом пружины и троса M . Поэтому может быть записано соотношение:

$$M = F_g \cdot L_h, \quad (16)$$

где L_h – плечо действия силы F_g относительно точки 0, в которой расположен шарнир.

Плечо L_h равно:

$$L_h = \sqrt{L^2 - h_g^2}, \quad (17)$$

С учетом условия равенства моментов сил F_s на участке 1-2 и F_g на плече L_h , вертикальная сила F_g имеет вид:

$$F_g = \frac{M}{L_h} = \frac{c_s \cdot \Delta L_s \cdot h}{\sqrt{L^2 - h_g^2}}, \quad (18)$$

После преобразования формула вертикальной силы F_g примет вид:

$$F_g = \frac{g \cdot m \cdot x \cdot \left(\sqrt{L \cdot (x_0^2 + y^2)} - \sqrt{L \cdot (x^2 + y^2)} + \sqrt{L \cdot x^2 - 2 \cdot h_g \cdot x \cdot y + L \cdot y^2} \right)}{x_0 \cdot \sqrt{L \cdot x^2 - 2 \cdot h_g \cdot x \cdot y + L \cdot y^2}}, \quad (19)$$

На рис. 3 приведены результаты верификации полученной формулы вертикальной силы F_g в виде статических силовых характеристик, полученных при различных значениях x .

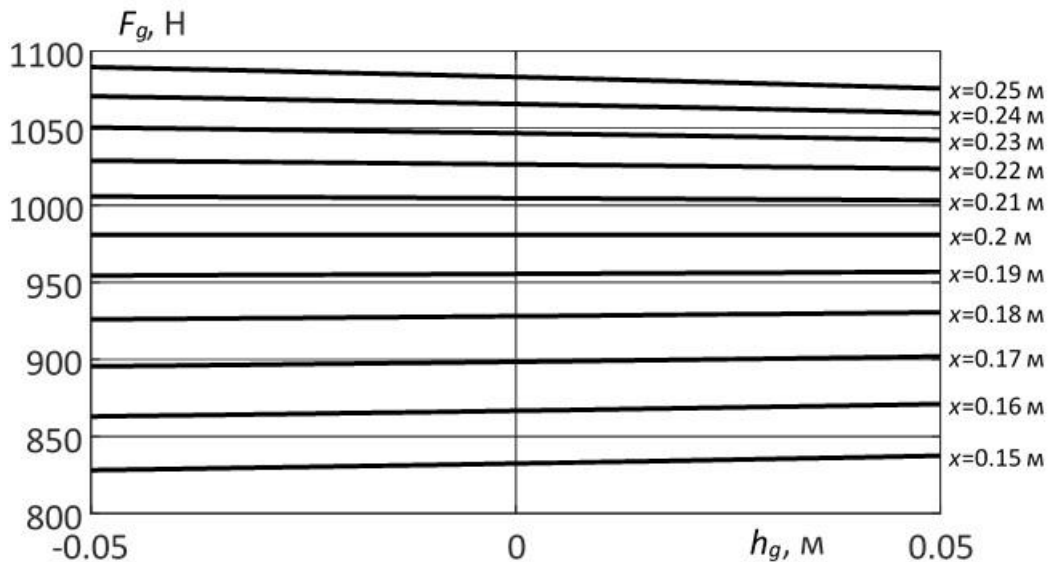


Рис. 3. Статические силовые характеристики параллелограммного механизма, полученные при различных значениях размера x

Fig. 3. Static power characteristics of a parallelogram mechanism obtained at different values of the x -size

В качестве примера масса сиденья с оператором составляла $m = 100$ кг, длина отрезка 0-2 до коррекции принимала значение $x_0 = 0,2$ м, конструктивные размеры принимали значения: $y = 0,2$ м; $L = 0,5$ м. Жесткость пружины $c_s = 12262,5$ Н/м. Номинальная деформация пружины $\Delta L_{s0} = 0,283$ м.

Обсуждение. Вертикальная сила F_g представляет собой функцию 6 параметров:

$$F_g = f(x_0, x, y, L, m, h_g), \quad (20)$$

Полученные результаты показывают, что все полученные статические силовые характеристики близки к горизонтальным. При совпадении значений $x = x_0$ наблюдается горизонтальность характеристики.

Перемещение точки 2 позволяет подстраиваться под переменную массу оператора сельскохозяйственного трактора.

Выводы.

1. Разработанная конструкция виброзащитной системы сиденья [11] с эффектом квазинулевой жесткости может быть использована в качестве виброзащитной системы сиденья оператора трактора сельскохозяйственного назначения. Предложенная конструкция обладает преимуществом, так как содержит только одну пружину растяжения.

2. Для разработанной конструкции получены аналитические зависимости для определения вертикально направленной силы F_g с учетом 6 конструктивных параметров. При анализе статических характеристик в качестве примера параметры имели следующие значения: масса сиденья с оператором $m=100$ кг, длина отрезка 0-2 до коррекции $x_0=0.2$ м, конструктивные размеры $y=0,2$ м; $L=0,5$ м. Значение параметра x варьировалось от 0,15 м до 0,25 м с шагом 0,01 м.

3. Представленные на рис. 3 зависимости близки к горизонтальным, при совпадении значений $x=x_0$ наблюдается горизонтальность характеристики. Это позволяет сделать вывод, что перемещение точки 2 позволит подстраиваться под переменную массу оператора сельскохозяйственного трактора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Поливаев О.И., Болотов Д.Б., Лощенко А.В., Химченко А.В., Дерканосова Н.М. Совершенствование систем подвесок сидений операторов сельскохозяйственных тракторов // Вестник Воронежского ГАУ. 2024. Т. 17. № 2(81). С. 60-67. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_2_60-67
2. Линник Д.А., Свистун А.Ч. К вопросу оценки вертикальных колебаний сиденья водителя при движении колесного трактора по неровностям опорной поверхности // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 3. С. 112-119. URL: <https://elibrary.ru/njhcol>
3. Лиханов В.А., Анфилатов А.А. Снижение вибрации при улучшении экологических показателей трактора // Вестник Вятского государственного агротехнологического университета. 2023. № 4(18). С. 33-41. URL: <https://elibrary.ru/bpdqhx>
4. Корытов М.С., Щербаков В.С., Почекуева И.Е. Сравнительный анализ пружинных механизмов виброзащитных кресел дорожно-строительных машин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 62-72. <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-01-62-72>
5. Burian Yu.A., Silkov M.V., Sitnikov D.V. Vibration isolation support with quasi zero stiffness effect with a rubber-cord air spring in the stiffness corrector // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2412, 030019. <https://doi.org/10.1063/5.0075036>
6. Chang Y., Zhou J., Wang K. et al. A quasi-zero-stiffness dynamic vibration absorber // Journal of Sound and Vibration. 2021. Vol. 494, 115859. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115859>
7. Корытов М.С., Кашапова И.Е., Щербаков В.С. Условие квазинулевой жесткости статической силовой характеристики параллелограммного механизма виброзащитной системы сиденья // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19. № 2(84). С. 144-155. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-144-155>

8. Burian Yu. A., Silkov V.M., Sitnikov V.D. Quasi-zero stiffness vibration isolation support with stiffness corrector based on a rubber-cord air spring // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2285, 030007. <https://doi.org/10.1063/5.0027543>
9. Джаббаров Н.И., Добринов А.В. Оптимальное проектирование почвообрабатывающих машин с учетом их потребной мощности // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 1(106). С. 50-62. <https://doi.org/10.24411/2713-2641-2021-10277>
10. Xie P., Che Y., Liu Z., et al. Research on vibration reduction performance of electromagnetic active seat suspension based on sliding mode control // Sensors. 2022. Vol. 22, 5916. <https://doi.org/10.3390/s22155916>.
11. Почекуева И.Е., Кoryтов М.С., Щербаков В.С. Виброзащитная система сиденья оператора. Патент на изобретение №206711 РФ, заявл. 26.04.2021; опубл. 23.09.2021. Бюл. №27. URL: <https://new.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=50aad417d033c27465aa91408990cbc8>
12. Алабужев П.М., Гритчин А.А., Ким Л.И. Мигиренко Г.С., Хон В.Ф., Степанов П.Т. Виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью: монография. М: Машиностроение, 1986. 100 с.
13. Larson R., Hostetler R. P. Precalculus: A Concise Course. Boston: Houghton Mifflin. 2007. 526 p. URL: https://www.pps.net/cms/lib/OR01913224/Centricity/Domain/2858/precalculus_7th_-_larson_hostetler_2.pdf

REFERENCES

1. Polivaev O.I., Bolotov D.B., Loshchenko A.V., Khimchenko A.V., Derkanosova N.M. Improvement of seat suspension systems for agricultural tractor operators. Vestnik Voronezhskogo GAU = Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2024;17(2):60-67. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_2_60-67
2. Linnik D.A., Svistun A.Ch. On the issue of assessing the vertical vibrations of the driver's seat when moving a wheeled tractor over the irregularities of the bearing surface. Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy. 2024; 3:112-119. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/njhcol>
3. Likhanov V.A., Anfilatov A.A. Vibration reduction while improving the environmental performance of the tractor. Vestnik Vyatskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Vyatka State Agrotechnological University. 2023; 4(18):33-41. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/bpdqhx>
4. Korytov M. S., Sherbakov V. S., Pochekueva I. E. Comparative analysis of spring mechanisms of vibroprotective chairs of road construction machines. Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta = Scientific and Technical Journal of Bryansk State University. 2020; 1:62-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-01-62-72>
5. Burian Yu.A., Silkov M.V., Sitnikov D.V. Vibration isolation support with quasi zero stiffness effect with a rubber-cord air spring in the stiffness corrector. AIP Conference Proceedings. 2021; 2412, 030019 (In Eng.). <https://doi.org/10.1063/5.0075036>
6. Chang Y., Zhou J., Wang K. et al. A quasi-zero-stiffness dynamic vibration absorber. Journal of Sound and Vibration. 2021; 494, 115859. (In Eng.). <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115859>
7. Korytov M.S., Kashapova I.E., Sherbakov V.S. Quasi-zero rigidity condition for static force characteristic of parallelogram mechanism for seat vibration protection system. Vestnik SibADI =

The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19(2):144-155. (In Russ.)
<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-144-155>

8. Burian Yu. A., Silkov V.M., Sitnikov V.D. Quasi-zero stiffness vibration isolation support with stiffness corrector based on a rubber-cord air spring. AIP Conference Proceedings. 2020; 2285, 030007. (In Eng.). <https://doi.org/10.1063/5.0027543>

9. Dzhaborov N.I., Dobrinov A.V. Optimal designing of tillage machines with due account for their required power. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2021; 1(106): 50-62. (In Russ.)
<https://doi.org/10.24411/2713-2641-2021-10277>

10. Xie P., Che Y., Liu Z., et al. Research on vibration reduction performance of electromagnetic active seat suspension based on sliding mode control. Sensors. 2022; 22, 5916. (In Eng.).
<https://doi.org/10.3390/s22155916>

11. Pohekueva I. E., Korytov M.S., Sherbakov V.S. Vibration-proof operator's seat system. Patent No. 206711 Russian Federation. 2021. (In Russ.) Available at:
<https://new.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=50aad417d033c27465aa91408990cbc8> (accessed 07.03.2025)

12. Alabuzhev P.M., Gritchin A.A., Kim L.I. et al. Vibration protection systems with quasi-zero rigidity: monography. Moscow: Mechanical Engineering Publ. 1986. 100 p. (In Russ.)

13. Larson R., Hostetler R. P. Precalculus: A Concise Course. Boston: Houghton Mifflin. 2007. 526 p. (In Eng.)

URL: https://www.pps.net/cms/lib/OR01913224/Centricity/Domain/2858/precalculus_7th_-_larson_hostetler_2.pdf

Об авторах:	About the authors:
Корытов Михаил Сергеевич д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)». 644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, д. 5 kms142@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-5104-7568	Mikhail S. Korytov DSc (Engineering), Associate Professor, Professor of Automobile Transport Department at FSBEI HE “The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)” 644080, Russia, Omsk, Mira Ave., 5 kms142@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-5104-7568
Кашапова Ирина Евгеньевна канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» 644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, д. 5 kashapova_ie@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-0631-564X +7-950-798-06-25	Irina E. Kashapova Cand.Sc. (Engineering) Senior Lecturer of Automation and Power Engineering Department at FSBEI HE “The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)” 644080, Russia, Omsk, Mira Ave., 5 kashapova_ie@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-0631-564X +7-950-798-06-25

Щербаков Виталий Сергеевич д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)». 644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, д. 5 sherbakov_vs@sibadi.org https://orcid.org/0000-0002-3084-2271	Vitaliy S. Sherbakov DSc (Engineering), Professor, Professor of Automation and Power Engineering Department at FSBEI HE “The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)” 644080, Russia, Omsk, Mira Ave., 5 sherbakov_vs@sibadi.org https://orcid.org/0000-0002-3084-2271
Заявленный вклад авторов М.С. Кoryтов – методология, проведение исследований, верификация данных. И.Е. Кашапова – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, проведение исследований. В.С. Щербаков – концептуализация, формальный анализ.	Contribution of the authors M.S. Korytov – methodology, conducting research, data verification. I.E. Kashapova – creation of the final version (revision) of the manuscript and its editing, conducting research. V.S. Sherbakov – conceptualization, formal analysis.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interest The authors declare that there is no conflict of interest.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 20.07.2025	Received: 20.07.2025
Одобрена после рецензирования: 27.08.2025	Approved after reviewing: 27.08.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

Научная статья

УДК [631.3+629.114.2].004.5(07)

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-105-120

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОНАВЕСНОЙ СИСТЕМЫ ТРАКТОРА

Сергей Николаевич Перцев^{1✉}, Константин Евгеньевич Муравьев²

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

¹sn-percev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0668-4266>

²kons-muravev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4503-2781>

Аннотация. Надежность функционирования гидронавесных систем в агропромышленном комплексе в значительной мере зависит от их технического состояния. Прогнозирование технического состояния гидросистем тракторов является актуальной задачей, так как на гидравлическую систему тракторов приходится порядка 20% всех отказов трактора. На базе тракторов «BELARUS» были применены единые диагностические критерии для оценки характерных неисправностей насоса и распределителя. Наглядная оценка рисков возникновения отказов при эксплуатации гидронавесных систем позволяет увеличить эффективность применения прогнозирования. В отношении этого прогнозирования изменения технического состояния гидронавесной системы тракторов с использованием комплексного анализа параметров вибрации представляет собой важную задачу. Проведенные исследования для оценки технического состояния насоса и распределителя виброакустическим методом позволили осуществлять прогноз изменения технического состояния техники для управления ее обслуживанием. Эффективность выбранных диагностических методов диагностирования дает возможность применения на практике результатов оценки и прогнозирования процессов изменения технического состояния гидронавесных систем трактора для реализации в условиях сельскохозяйственных предприятий. Полученные выводы показывают целесообразность применения системного подхода к организации мониторинга агрегатов гидронавесных систем на протяжении всей эксплуатации трактора. Комплексное применение методов технической диагностики и алгоритмов оценки остаточного ресурса гидронавесных систем позволяет уменьшить количество отказов и оптимизировать процесс обслуживания. Экономический эффект от применения результатов исследований достигается в процессе эксплуатации за счет уменьшения времени диагностирования основных параметров гидронавесных систем трактора, что, в свою очередь, приводит к снижению годовых эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: гидронавесная система трактора, техническое диагностирование, диагностические параметры, прогнозирование технического состояния

Для цитирования: Перцев С.Н., Муравьев К.Е. Прогнозирование технического состояния гидронавесной системы трактора // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 3(124). С. 105-120 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-105-120>

Research article

Universal Decimal Code [631.3+629.114.2].004.5(07)

FORECASTING THE TECHNICAL CONDITION OF THE TRACTOR'S HYDRAULIC SUSPENSION SYSTEM

Sergey N. Pertsev^{1✉}, Konstantin E. Muraviev²

Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

¹sn-percev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0668-4266>

²kons-muravev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4503-2781>

Abstract. Reliability of hydraulic suspension systems in the agro-industrial complex for the most part depends on their technical condition. Its forecasting for tractor hydraulic systems is an

important task as these are responsible for about 20% of all tractor failures. The study used the unified diagnostic criteria to estimate the most common pump and distributor malfunctions on the example of BELARUS tractors. An illustrative assessment of failure risks during in hydraulic system's operation makes it possible to improve the forecasting effectiveness. In this context, forecasting changes in the technical state of the tractor's hydraulic suspension system through a comprehensive analysis of vibration parameters is an important task. The conducted research to assess the technical condition of the pump and distributor by the vibroacoustic method allowed forecasting the changes in the technical condition of the equipment for further management of equipment maintenance. The selected diagnostic methods proved to be efficient. The results of assessment and forecasting how the technical condition of the tractor's hydraulic system changes may be applied in practice in agricultural enterprises. The conclusions drawn from the study demonstrate the importance of adopting a systematic approach to monitoring hydraulic suspension systems during the entire life cycle of a tractor. Integrated application of technical diagnostics methods and algorithms for assessing the remaining lifetime of the hydraulic system allows reducing the number of failures and streamline the maintenance process. The economic effect of the study results is best shown during the operation. The operational complexity of monitoring the main parameters of the tractor's hydraulic system decreases. This results in lower annual operating costs.

Keywords: tractor hydraulic suspension system, maintenance, prediction of technical condition

For citation: Pertsev S.N., Muravyev K.E. Forecasting the technical condition of the tractor hydraulic suspension system. *AgroEcoEngineering*. 2025; 3(124): 105-120 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-105-120>

Введение. Эффективная эксплуатация машин и оборудования в сельском хозяйстве обеспечивается правильно организованной системой технического сервиса. Важной составляющей технического обслуживания машин и оборудования является техническая диагностика [1].

Гидронавесная система (ГНС) тракторов сегодня является важным элементом, который позволяет выполнять необходимые механизированные сельскохозяйственные работы. Отказ гидросистемы в работе может привести к производственным потерям, поэтому необходимо постоянно контролировать ее техническое состояние [2]. Понимание физической природы процессов изнашивания позволит прогнозировать остаточный ресурс на основе анализа и обработки актуальной информации о состоянии ГНС. Гидросистемы весьма часто выходят из строя (суммарно около 20% из всех отказов) [3].

Прогнозирование и оценка остаточного ресурса играют важную роль в повышении эффективности эксплуатации тракторов. Они способствуют сокращению расходов на ненужную разборку и сборку, а также обеспечивают полное использование срока службы и других показателей надежности узлов и механизмов и трактора в целом [1]. Исследование различных механизмов и машин с использованием вибрационного метода диагностики, а также вопросы прогнозирования их технического состояния на основе вибрационных сигналов остаются в недостаточной степени разработанными [3].

Преимущества комплексного подхода к вибродиагностике ГНС трактора заключаются в возможности контролировать диагностические параметры и их предельно допустимые значения вибрации с помощью актуализации существующих прогнозных математических моделей [4].

В сфере вибродиагностики в настоящее время отсутствует решение для разработки универсальных моделей прогнозирования на рынке специализированного программного обеспечения и в научных публикациях [5]. Новая модель должна точно отражать процессы деградации агрегатов ГНС и комплексно анализировать параметры вибраций. Это даст возможность прогнозировать техническое состояние ГНС — сложного единого технического устройства [7].

Наиболее надежные прогнозы остаточного ресурса достигаются путем анализа динамики изменения диагностического параметра для конкретного трактора. Полученные данные используются для построения аппроксимирующей функции, описывающей зависимость параметра от наработки [7]. Форма функции определяется на основе предварительных результатов специальных исследований, проведенных на группе однотипных машин, а коэффициенты рассчитываются или уточняются с учетом данных, собранных с конкретного трактора. Проводимые исследования дают возможность определить зависимости между диагностическими показателями и фактическим состоянием оборудования, например, между уровнем износа и определенным диагностическим параметром, посредством специальных исследований. Затем на основе технико-экономических расчетов устанавливаются предельные или допустимые значения этого диагностического параметра, которые гарантируют необходимый остаточный ресурс механизма или узла, учитывая выявленную зависимость со структурным параметром [8].

Цель исследования – обосновать диагностические параметры оценки работоспособности ГНС трактора, учитывая специфические особенности её основных компонентов. Объект исследования: гидронавесная система тракторов «BELARUS». Предмет исследований – шестерёнчатый насос и гидрораспределитель трактора как наиболее важные элементы для функционирования всей системы.

В соответствии с целью исследования были определены следующие задачи: провести анализ методов и средств технической диагностики сельскохозяйственных тракторов; аналитически оценить критерии и методы повышения эффективности работы отдельных элементов ГНС и установить их взаимосвязь; определить возможности для экспериментального обоснования диагностических критериев оценки работоспособности гидросистемы с учетом улучшения параметров сопряжений в основных элементах системы; обосновать рациональные критерии оценки работоспособности элементов ГНС трактора, применив системный анализ.

Материалы и методы. Исходными материалами в работе являются научно-техническая информация и результаты экспериментальных исследований и испытаний, посвященных анализу эффективности методов и алгоритмов изменения технического состояния ГНС трактора на основе мониторинга. В работе применяются собственные наработки и многолетний опыт, накопленный в области совершенствования стратегий обслуживания и повышения эксплуатационной надежности ГНС [9].

Идентификация свойств, характеризующих предельное состояние ГНС тракторов, и разработка унифицированных диагностических критериев для оценки текущего состояния и прогнозирования технического состояния ГНС возможны с помощью прогностических математических моделей [5]. Высокая степень вероятности этих моделей может предсказать процесс износа в гидравлической системе трактора, основываясь на анализе параметров вибрации. Основной проблемой остается сложность корреляции экспериментально полученных данных [10].

Всестороннее исследование вибрации ГНС трактора основывалось на комплексном анализе, учитывающем взаимосвязь различных параметров и условий эксплуатации [11]. Последующий анализ включал результаты спектрального анализа в стандартных и расширенных частотных и динамических диапазонах. В данной работе обобщается существующий научный опыт и на основе разработанных диагностических критериев создается математическая модель для прогнозирования износных процессов на примере ГНС трактора.

Прогнозирование износных процессов ГНС основывается на комплексных знаниях о ресурсах. В качестве критериев оценки ресурса используются как отдельные диагностические параметры, так и обобщенные показатели [7]:

1. Отклонение параметра от номинального значения (степень износа).
2. Значение предельного отклонения параметра (износа).
3. Скорость износного процесса.
4. Объемный коэффициент полезного действия элементов гидропривода.

С помощью модели системы технического диагностирования, основываясь на достаточной полной информации об объекте и его текущем состоянии, можно получить рекомендации о необходимости и объеме обслуживающих работ. Динамика изменения технического состояния отдельных параметров и характеристик объекта дает возможность количественной оценки в целом [12]. В этом случае необходим переход к автоматизированной системе технической эксплуатации ГНС. Составление интерактивных электронных каталогов, документации по ремонту и эксплуатации поможет управлять техническим обслуживанием.

Современные тракторы обеспечивают непрерывный контроль технического состояния (диагностику) через следующие функции [13]:

- непрерывный контроль жизненно важных предельных значений параметров с целью предупреждения оператора и аварийной автоматической остановки (например, температура масла в гидросистеме и другие);
- постоянный контроль критичных параметров долговечности (например, загрязнение фильтрующих элементов) с уведомлением;
- контроль периодичности технического обслуживания с визуализацией срока следующего планового ТО.

В целях долговременного архивирования данных о состоянии трактора предпочтительнее использовать не мгновенные значения измеряемых параметров, а усредненные или нормализованные показатели [7], поскольку они более стабильны. Это позволит оптимизировать и повысить точность разработанных методов прогнозирования остаточного ресурса и индивидуального прогноза на основе динамики параметров.

Результаты. В Санкт-Петербургском государственном аграрном университете разработан виброакустический метод для диагностики в условиях эксплуатации внутренних утечек в системе «гидронасос - распределитель» и оценки технического состояния насоса [14]. Исследование технического состояния гидронасоса проводилось с помощью виброакустического метода. Эта технология диагностики гидроагрегатов тракторов в реальных условиях позволяет оценить состояние насоса, распределителя и других агрегатов гидравлической системы. Анализ амплитудно-частотных характеристик выявил, что диагностические параметры напрямую связаны со структурными параметрами и общим техническим состоянием агрегатов ГНС.

Шестеренные насосы гидравлического привода являются сложной механической системой [15], а техническое состояние оценивается на выходе подачей, что определяет надежность гидросистемы. Оценка технического состояния насосов в эксплуатации основывалась на выборе основных параметров, влияющих на работу.

При использовании насоса происходит износ сопряжений насоса (в частности, износ подшипников скольжения). Это приводит к увеличению межцентрового расстояния и угла зацепления шестерен. Поэтому часть масла переносится обратно во всасывающую камеру, что уменьшает производительность насоса. Таким образом, можно сделать вывод о зависимости производительности от конструктивных параметров подшипниковых узлов насоса, от межцентрового расстояния шестерен насоса в эксплуатации. Производительность насоса, таким образом, будет определяться функцией

$$Q = f(S), \quad (1)$$

где Q – производительность насоса, $\text{м}^3/\text{с}$, S – межцентровое расстояние, определяемое виброакустическим методом, м.

Силы инерции вращающихся масс вызывают наибольшие вибрации в гидронасосе [15]. Они зависят от величины эксцентриситета и вызывают интенсивные низкочастотные вибрации корпуса гидронасоса. Возникающий неравномерный износ увеличивает зазор в подшипниках скольжения и является причиной дисбаланса, что, в свою очередь, приводит к увеличению вибрации на частоте, кратной частоте вращения вала гидронасоса. Сила инерции от действия центробежных сил определяется по формуле:

$$P_{\text{и}} = m\varepsilon\omega^2, \quad (2)$$

где $P_{\text{и}}$ – сила инерции, Н; m – масса цапфы, кг; ε – угловая скорость цапфы подшипника скольжения гидронасоса, с^{-1} ; ω – эксцентриситет, м.

Вращение цапфы в подшипнике совершается на упругой масляной подушке [14]. При этом не имеет значение, постоянная ли нагрузка или она отсутствует. Постоянная угловая скорость цапфы со стороны смазки будет воспринимать силу давления $P_{\text{е}}$, которая направлена радиально, и силу трения $P_{\text{с}}$, направленную касательно поверхности цапфы. Результирующая реакция смазочного слоя от действия этих сил остается постоянной.

Для теоретического анализа рассмотрена механическая колебательная система для конкретных условий с первичным преобразователем, благодаря чему устанавливается зависимость технического состояния подшипника скольжения от колебания корпуса гидронасоса. Колебательное движение материальных тел при вибрации описывается уравнением вынужденных колебаний корпуса шестеренчатого насоса под действием суммы сил. Дифференциальное уравнение движения сосредоточенных масс запишется в виде:

$$a = \left(\frac{m\varepsilon\omega^2}{M} \right) - B, \quad (3)$$

$$\text{где } B = \frac{P_{\text{с}} + P_{\text{е}} - W}{M} - c,$$

a – ускорение движения сосредоточенных масс системы, кг ,

$M = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ – приведенная масса системы, кг ,

m_1 – масса вибропреобразователя, кг ,

m_2 – масса гидронасоса, кг ,

$c = \omega_0^2 x$ – величина, зависящая от жесткости крепления измерительного вибропреобразователя к объекту и демпфирования системы «объект-датчик», определяется опытным путем.

Центробежная сила $c = \omega_0^2 x$ является функцией периодической, с периодом частоты

вращения вала насоса. Получаемые на измерительном преобразователе на насосе вибрации, будут по величине прямо пропорциональны эксцентриситету цапфы, увеличивающемуся при износе деталей и увеличении зазора в сопряжении «подшипник-цапфа».

Таким образом, величина зазора в подшипнике скольжения шестеренчатого насоса будет отражаться на амплитуде диагностического сигнала, и производительность будет уменьшаться из-за увеличения межцентрового расстояния в насосе. В процессе эксплуатации зазоры в сопряжениях увеличиваются, что влечет за собой увеличение ударных нагрузок, повышение уровня вибрации. Используя виброакустический метод, экспериментально было подтверждено наличие зависимости производительности насоса от состояния подшипниковых узлов по виброамплитуде сигнала на корпусе насоса на частотах, кратных частоте вращения вала насоса (рис.1).

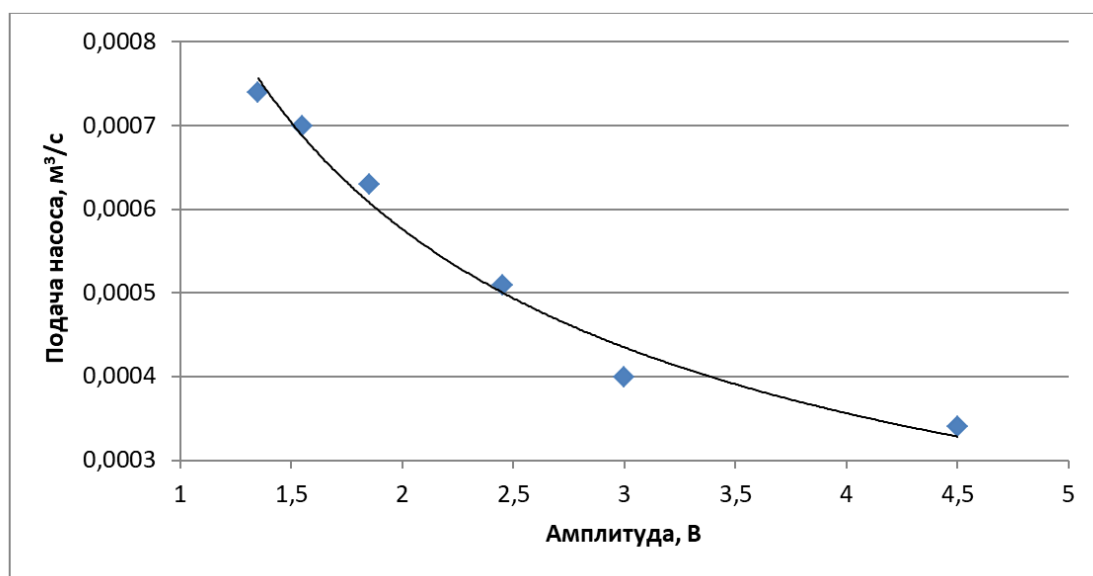


Рис. 1. Зависимость подачи насоса от амплитуды вибросигнала его корпуса

Fig.1. Dependence between the pump flow and the amplitude of the vibration signal from the pump body

Наиболее чувствительна к изменению зазора в подшипнике скольжения гидронасоса частота, кратная частоте вращения вала насоса. Данный режим наиболее стабилен и устойчив. При этом наблюдается уменьшение дисперсии диагностического параметра. Этот режим обеспечивает наименьшую погрешность измерений с вероятностью 90-95 %. Это связано с присутствием передаточного отношения между коленчатым валом и валом насоса, поэтому вибрации от вращения деталей двигателя не являются помехой по отношению к вибрациям от работающего насоса и могут использоваться при диагностировании с достаточной точностью.

Исследования показали, что при изменении диагностического параметра на 20% значение структурного параметра изменялось на 25,6%, относительная погрешность составила 9,8%, что обеспечивает достоверность измерений.

При диагностировании поддерживался определенный скоростной режим – 2000 мин⁻¹ коленчатого вала. Данный режим обеспечивает наименьшую погрешность измерений с вероятностью 90,5%.

С увеличением температуры масла уменьшается вязкость рабочей жидкости в насосе, снижаются демпфирующие свойства масляного слоя в подшипнике насоса, увеличивая

амплитуду вибраций. Оптимальный тепловой режим выбран в пределах 50-55 °С. Зависимость диагностического сигнала от температуры аппроксимируется уравнением:

$$A = 1,12 + 0,014t \quad (4)$$

Для исключения влияния на диагностический сигнал необходимо применение фильтра с более узкой полосой пропускания 0,5 кГц. Это позволило исключить влияние помех с частотами, отличными от оборотной, и одновременно влияние неравномерности вращения дизеля.

В процессе исследований был установлен нелинейный характер теоретической и экспериментальной зависимостей диагностического параметра от подачи гидронасоса (рис.1).

Результаты исследований доказывают, что оценка технического состояния может быть наиболее достоверной при создании диагностических моделей, описывающих сущность процесса изменения основных параметров. Для получения регрессионной модели с соответствующими коэффициентами использовались экспериментальные данные геометрических размеров элементов и подачи для насосов одного типа, отработавших до различной степени износа этих элементов. Проведенные исследования позволили получить аналитическую зависимость для определения подачи насоса как функции его производительности от вибросигнала – износа подшипников скольжения. На основании полученных данных установлены регрессионные модели изменения подачи насоса:

$$A = 13,5 - 0,004Q^2. \quad (5)$$

Сравнение результатов, полученных с помощью аналитической зависимости и регрессионной модели определения подачи насоса с учетом изменения межосевого расстояния в насосе, приведены на рисунке 1.

Использование регрессионных уравнений позволяет прогнозировать состояние выходных параметров шестеренного насоса в зависимости от изменения геометрических размеров элементов конструкции.

Экстраполяция аппроксимирующей функции позволила спрогнозировать дату наступления предельного состояния подшипника. Ошибка прогноза (запаздывание) составила 4 %.

Прогнозирование технического состояния насоса можно осуществлять методом замера подачи насоса на работающей машине посредством расходомера, устанавливаемого в систему после редукционного клапана и распределителя.

Увеличение амплитуды вибросигналов происходит по мере увеличения времени эксплуатации ГНС. Но надо иметь в виду, что в реальности при одной и той же наработке насосов может происходить довольно значительное рассеивание амплитуды сигналов. Это связано с различными условиями эксплуатации, такими как нагрузка на ГНС и характер выполняемых трактором сельскохозяйственных операций (например, транспортировка, уход за растениями, работа с погрузчиком и т. д.). Рассеивание амплитуды может происходить из-за точности изготовления деталей, ошибки монтажа, технологии производства или восстановления компонентов.

Виброакустический метод для диагностики внутренних утечек в системе «гидронасос - распределитель» основан на анализе колебаний клапана распределителя. Установлена зависимость колебаний корпуса распределителя от натяжения пружины предохранительного клапана и давления, при котором клапан срабатывает (рис. 2).

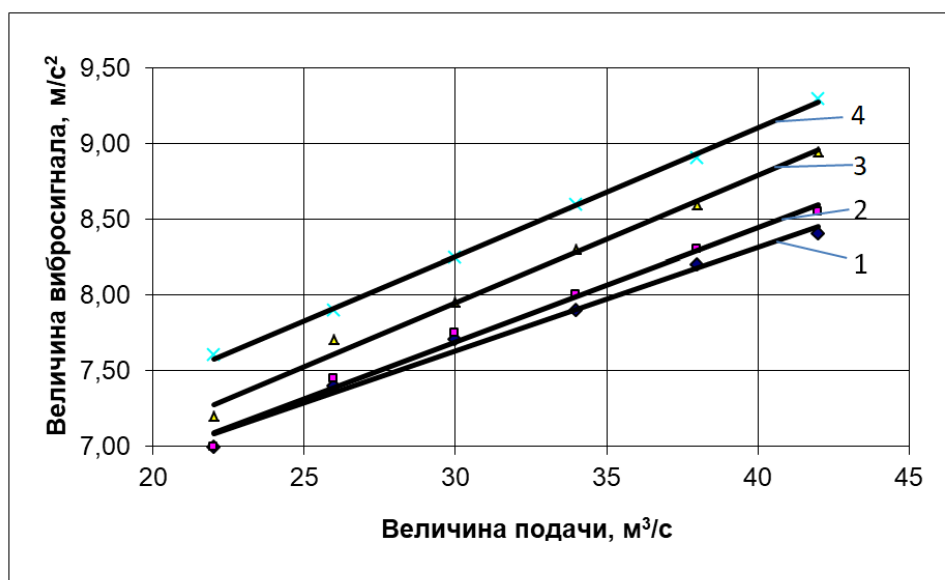


Рис. 2. Зависимость диагностического параметра от величины подачи при различном давлении срабатывания предохранительного клапана:

1 – 14,5 МПа, 2 – 15,0 МПа, 3 – 15,5 МПа, 4 – 16,0 МПа

Fig. 2. Dependence between the diagnostic parameter and the supply value at different operating pressure of the safety valve: 1 – 14.5 MPa; 2 – 15.0 MPa; 3 – 15.5 MPa; 4 – 16.0 MPa

Работа перепускного клапана гидрораспределителя связана с колебаниями корпуса от влияния инерционной возмущающей силы движущегося штока клапана. Инерционная сила противоположно направлена равному вибрационному воздействию.

Для определения давления срабатывания предохранительного клапана применялся фильтр с частотой пропускания 4 кГц перепускного клапана, и частотой 6 кГц предохранительного клапана. При этом поддерживалась частота вращения двигателя равная 2000 мин^{-1} .

Давления срабатывания предохранительного клапана описывается дифференциальным уравнением:

$$P = D + \frac{F_{np}}{M}, \quad (6)$$

где: $D = \frac{P_1 f_5 - \delta h_k - N - F_T + m_k g}{M} - c_2$, F_{np} – сила предварительного натяжения пружины предохранительного клапана, Н; h_k – высота подъема клапана, м; N – осевая составляющая гидродинамической силы, Н; f_5 – площадь предохранительного клапана, м^2 ; F_T – сила трения потока рабочей жидкости о боковую поверхность предохранительного клапана, Н; m_k – масса предохранительного клапана, кг.

В процессе исследований была установлена линейная зависимость амплитуды вибраций корпуса распределителя от объема жидкости, проходящей через перепускной клапан. Это дало возможность оценить техническое состояние системы «гидронасос-распределитель». Установленная зависимость амплитуды вибраций предохранительного клапана от предварительного натяжения пружины (рис. 2) позволила настраивать клапан на заданное давление срабатывания. Наибольшая вибрационная чувствительность была

зафиксирована в режиме перегрузки гидросистемы, когда работал предохранительный клапан.

По результатам обработки экспериментальных данных на основе методов математической статистики определены параметры вибропроцессов распределителя гидросистемы трактора, вызванных прохождением через перепускной клапан рабочей жидкости, обладающей определенными эксплуатационными характеристиками. Модель вибропроцессов ГНС трактора имеет вид:

$$A = 0,738 + 0,54P. \quad (7)$$

Полученная модель дает полное представление об условиях диагностирования вибродатчиком, установленным на распределителе гидросистемы трактора, по параметрам виброускорения.

Виброамплитуда сигналов в ультразвуковом спектре позволяет оценивать техническое состояние и прогнозировать остаточный ресурс компонентов ГНС [2]. Выход параметра за пределы допустимых значений приводит к потере работоспособности ГНС в результате нарушения работы отдельных гидроагрегатов.

Новизна предложенной в рамках данного исследования математической модели прогнозирования технического состояния заключается в анализе вибропараметров элементов ГНС с учетом их фактического состояния, режима эксплуатации, а также истории отказов и ремонтов. В рамках математической модели оценки фактического состояния объекта диагностики для определения остаточного ресурса давались точечные оценки среднего и гамма-процентного ресурсов и их нижние доверительные границы [15]. При определении остаточного ресурса требуется определение фактического состояния оборудования ГНС на момент диагностики и оценка входящих данных на наличие тренда по критерию Стьюдента.

Для получения точного описания фактического состояния диагностируемых объектов была проведена экстраполяция выявленного полезного диагностического тренда, основанная на результатах прогнозирования износных процессов оборудования ГНС тракторов. Также были определены погрешности прогнозирования и количество данных, необходимых для построения эффективного прогноза. Изменение вибрационных сигналов с наработкой описывается степенной функцией, общий вид которой для амплитуды вибросигналов [1]:

$$A(t) = A_1 + V_c t^\alpha + f(t) \quad (8)$$

где $A(t)$ – текущее значение амплитуды сигналов, мВ; A_1 – амплитуда при номинальном значении зазора, мВ; V_c – интенсивность изменения амплитуды вибраций в зависимости от изменения зазора, мВ/мото-ч; t – наработка, мото-ч; α – показатель степени, характеризующий крутизну кривой; $f(t)$ – постоянный показатель, характеризующий действия случайных внешних факторов, мВ.

Остаточный ресурс, то есть ресурс до предельного состояния, отсчитанный от момента диагностирования определяется как:

$$t_{\text{ост}} = t_i \left[\left(\frac{A(t)}{A_n} \right)^{1/\alpha} - 1 \right], \quad (9)$$

где t_i – наработка на момент диагностирования, мото-ч; $A(t)$ – текущее значение амплитуды на момент диагностирования, мВ; A_n – предельное значение амплитуды, мВ; α – коэффициент, зависящий от вида сопряжения.

Обсуждение. На основе языка программирования Python была разработана программа для определения технического состояния элементов ГНС. В ней используются данные вибродиагностики для оценки работоспособности ГНС в сельском хозяйстве.

Применение цифровых технологий и информационных систем в классическом процессе диагностики позволяет сократить трудоёмкость практически всех операций с учётом автоматизации получения и обработки информации о техническом состоянии машин различных типов. Системы автоматического сбора и анализа информации базируются на технологиях передачи данных, улучшают показатели эффективности работы и экономичности техники в режиме реального времени [13].

Комплексный подход к анализу параметров вибрации при работе элементов ГНС трактора объединяет результаты спектрального анализа в установленных диапазонах. Сбор и обработка первичной диагностической информации для выявления дефектов гидрооборудования требуют наличия дорогостоящего диагностического оборудования.

Для описания процессов износа технического состояния ГНС применялись разрабатываемые математические модели прогнозирования технического состояния, которые основываются на анализе параметров вибрации от конструктивных элементов ГНС. Диагностические признаки подшипниковых узлов насоса и распределителя, влияющие на общее состояние ГНС, применяются в качестве параметров математической модели. Это позволяет с помощью математических моделей прогнозировать истинное положение в развитии износов и неисправностей и определять предельные значения вибраций.

Существующие математические модели несовершенны до конца, что ограничивает точный прогноз технического состояния. Решение этой проблемы возможно при применении интеллектуальной системы технического диагностирования [12]. Информационные технологии можно рассматривать как один из методов индивидуального непрерывного прогнозирования технических состояний ГНС [13].

Использование современного программного обеспечения позволяет осуществлять систематический сбор и обработку информации о техническом состоянии ГНС по результатам диагностирования, планировать обслуживающие воздействия, автоматически определять дефекты и неисправности, прогнозировать техническое состояние. Такой подход к применению диагностики ГНС трактора обеспечивает наилучшие результаты при переходе от планово-предупредительной системы обслуживания к системе обслуживания по состоянию [4].

Заключение. Обоснована целесообразность системной организации мониторинга параметров, характеризующих качество, надёжность и работоспособность ГНС на протяжении всей эксплуатации трактора. Комплексное применение разработанных методик технической диагностики и алгоритмов оценки остаточного ресурса ГНС позволяет уменьшить количество отказов и оптимизировать процесс обслуживания. Применение указанного метода позволит проводить диагностирование гидросистемы более качественно, снизить потери, исключить внедрение в замкнутый контур.

Полученные в рамках проведенных исследований результаты прогнозирования процессов изменения технического состояния ГНС трактора обладают определенной достоверностью и могут применяться для решения практических задач. Направлением дальнейших исследований станет совершенствование проведения широкой апробации программного комплекса, способного решать большинство задач, связанных с прогнозированием технического состояния машин.

Результаты прогнозирования предоставляют информацию об объекте исследования в плане продолжительности функционирования до ближайшего обслуживания или ремонта. Детерминированные методы определения трендов составляющей виброакустического сигнала и оптимального обобщения разнородных диагностических данных помогли найти решение ограниченного применения существующих прогнозных моделей. При создании прогноза развития дефектов гидравлического оборудования тракторов была предпринята попытка описания изменения фактического состояния.

Результаты прогнозирования, полученные в ходе проведенных исследований, подтвердили свою достоверность и могут быть применены на практике в технической эксплуатации ГНС на предприятиях. Применение разработанных методик определения ресурса и возможного появления отказов ГНС трактора показало свою состоятельность.

Экономический эффект от внедрения результатов исследований достигается во время эксплуатации за счёт снижения оперативной трудоемкости контроля основных параметров гидросистемы трактора, и, как следствие, уменьшения годовых эксплуатационных издержек.

Актуальность выбора эффективных методов прогнозирования изменений технического состояния и оценки остаточного ресурса оборудования в процессе эксплуатации является необходимым условием обоснованного планирования и оптимизации обслуживания ГНС, а также снижения вероятности внезапных отказов и аварий.

Совершенствование методов моделирования процессов износа и анализа вибрационных характеристик ГНС трактора позволит в будущем осуществлять обслуживание техники в реальных эксплуатационных условиях, ориентируясь на ее фактическое состояние. Это минимизирует вероятность появления неисправностей и сокращает время простоя техники машинно-тракторного парка.

Оценка остаточного ресурса энергетических объектов по фактическому состоянию позволяет наиболее достоверно прогнозировать их долговечность.

Развитие технологий в области искусственного интеллекта будет способствовать созданию более эффективных диагностических систем, которые смогут интегрироваться со стандартными диагностическими устройствами и программами. Это позволяет быстро анализировать информацию о состоянии техники и точно прогнозировать возможные неисправности. Искусственный интеллект сможет предложить конкретные действия для их устранения, а обслуживающему персоналу – оперативно оценить их состояние и выявить частичные отказы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пугин К. Г., Пираматов У. А. Совершенствование современных методов диагностирования гидропривода сельскохозяйственной техники // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса. Сб. науч. тр. XIII Межд. науч.-практ. конф. (Ростов-на-Дону, 26-28 февраля 2020 г.). Ростов-на-Дону: ДГТУ-ПРИНТ. 2020. Т. 2. С. 563-564. <https://doi.org/10.23947/интерагро.2020.2.563-564> EDN: QQSCWR

2. Перцев С. Н. Диагностирование гидравлической системы трактора по параметрам вибраций // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сб. науч. тр. Межд. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава «Научное обеспечение развития сельского хозяйства и снижение технологических рисков в продовольственной сфере» (Санкт-Петербург, 26-28 января 2017 г.). Санкт-Петербург: СПбГАУ. 2017. Часть I. С. 492-496. EDN: YKKCRL

3. Гринчар Н. Г., Попова Т. А. Анализ причин отказов гидроприводов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в машиностроении, дорожной и строительной отраслях. Матер. Межд. науч.-практ. конф. (Белгород, 21-23 сентября 2023 г.). Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. С. 38-44. EDN: PTUXHL
4. Муравьев К. Е., Перцев С. Н. Частотная и временная селекция электрического сигнала при диагностировании дизелей по вибропараметрам // Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики. Матер. Межд. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава. (Санкт-Петербург-Пушкин, 24-26 мая 2023 г.) Санкт-Петербург: СПбГАУ. 2023. С. 148-153. EDN: DIADIS
5. Миллер А. П., Пугин К. Г., Шаихов Р. Ф., Бондаренко Д. В. Перспективные методы технической диагностики гидравлических систем строительных машин // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Матер. XV Межд. науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение» (Киров, 14 февраля 2022 г.). Киров: Вятский государственный агротехнологический университет. 2022. Вып. 18. С. 7-9. EDN: CMRJNY
6. Новиков М. А., Смелик В. А., Рожков А. С., Алдохина Н. П. Вибрационный метод диагностирования подшипников механизма привода очистки в режиме разгона // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве. Сб. науч. статей Межд. науч.-практ. конф. (Минск, 23–24 ноября 2023 г.) Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет. 2023. С. 180-183. EDN: ETVDWV
7. Герике П. Б., Герике Б. Л. Прогнозирование остаточного ресурса горных машин и оборудования // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2020. № 6. С. 144-150. EDN: DHAGWQ
8. Пираматов У. А., Пугин К. Г. Повышение надежности гидропривода строительно-дорожных машин // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2019. № 1. С. 104-107. EDN: BPXXGZ
9. Чистоклетов А. А., Пугин К. Г. Использование вибродиагностики для определения технического состояния гидравлического оборудования // Химия. Экология. Урбанистика. 2021. № 3. С. 276-280. EDN: ZYSRGF
10. Новиков М. А., Бутусов Д. В., Перекопский А. Н., Гудков Д.А., Сидыганов Ю.Н. Диагностирование и технологическая настройка как факторы повышения эффективности функционирования агрегатов зерноуборочных комбайнов // Экология и сельскохозяйственная техника: Матер. 3-й науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 05-06 июня 2002 г.) Санкт-Петербург: СЗНИИМЭСХ. 2002. Т. 3. С. 296-302. EDN: TUJTZN
11. Миллер А. П., Пугин К. Г., Шаихов Р. Ф. Совершенствование диагностики гидравлических систем строительных машин // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2022. № 1. С. 15-20. EDN: LKUPQB
12. Миллер А. П., Шаихов Р. Ф., Чепикова Т. П., Бондаренко Д. В. Техническая диагностика гидравлических систем технологических машин с использованием технологии искусственного интеллекта // Молодежная наука 2022: технологии, инновации. Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и обучающихся (Пермь, 28 марта – 01 апреля 2022 г.) Пермь: Прокрость. 2022. Часть 2. С. 41-43. EDN: ZTVTUD
13. Ганус Ю. А., Порфирьев А. С. Теоретические основы моделирования интегрированной логистической поддержки // Экономика высокотехнологичных производств. 2023. № 4(1). С. 51-72. <https://doi.org/10.18334/evp.4.1.119518> EDN: WEBKHU

14. Перцев С. Н. Повышение эффективности функционирования гидронавесной системы трактора // Вызовы и инновационные решения в аграрной науке. Матер. XXVII Межд. науч.-производ. конф. (Майский, 12 апреля 2023 г.). Майский: Белгородский ГАУ. 2023. Т. 4. С. 172-173. EDN: PLVFFM

15. Чумаков П. В., Мартынов А. В., Коломейченко А. В. и др. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов // Инженерные технологии и системы. 2020. № 30 (3). С. 426-447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>. EDN: XWSTMT

REFERENCES

1. Pugin K. G., Piramatov U. A. Improvement of modern methods for diagnosing a hydraulic drive of agricultural machines. In: State and Prospects of Development of the Agro-Industrial Complex. Proc. XIII Int. Sci. Prac. Conf. (Rostov-on-Don, February 26-28, 2020). Rostov-on-Don: DSTU-PRINT. 2020;2:563-564. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/interagro.2020.2.563-564> EDN: QQSCWR

2. Pertsev S. N. Diagnostics of the tractor hydraulic system by vibration parameters. In: Scientific Support for the Development of Agriculture in the Context of Import Substitution: Proc. Int. Sci. Prac. Conf. of the teaching staff “Scientific support for the development of agriculture and reducing technological risks in the food sector” (Saint Petersburg, January 26-28 2017). Saint Petersburg: Saint Petersburg State Agrarian University. 2017; I: 492-496. (In Russ.) EDN: YKKCRL

3. Grinchar N. G., Popova T. A. Analysis of the causes of hydraulic drive failures. In: Energy and Resource Saving Technologies and Equipment in the Machine-Building, Road and Construction Industries. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Belgorod, September 21-23, 2023). Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2023:38-44. (In Russ.) EDN: PTUXHL

4. Muraviev K. E., Pertsev S. N. Frequency and time selection of an electrical signal in the diagnosis of diesel engines by vibration parameters. In: Priorities of Agro-Industrial Complex Development in the Context of Digitalization and Structural Changes in the National Economy. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. of the teaching staff (Saint Petersburg-Pushkin, May 24-26, 2023). Saint Petersburg: Saint Petersburg State Agrarian University. 2023:148-153. (In Russ.) EDN: DIADIS

5. Miller A. P., Pugin K. G., Shaikhov R. F., Bondarenko D. V. Promising methods of technical diagnostics of hydraulic systems of construction machinery. In: Improving the Performance of Internal Combustion Engines: Proc. XV Int. Sci. Prac. Conf. “Science – Technology – Resource Conservation” (Kirov, February 14, 2022). Kirov: Vyatka State Agrotechnological University. 2022;18: 7-9. (In Russ.) EDN: CMRJNY

6. Novikov M. A., Smelik V. A., Rozhkov A. S., Aldokhina N. P. Vibration diagnostic method for bearings of the cleaning drive mechanism in acceleration mode. In: Technical Support of Innovative Technologies in Agriculture. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Minsk, November 23-24, 2023) Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University. 2023: 180-183. (In Russ.) EDN: ETVDWV

7. Gericke P. B., Gericke B. L. Forecasting the residual resource of mining machinery and equipment. Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov = High-tech Technologies for the Development and Use of Mineral Resources. 2020;6: 144-150. (In Russ.) EDN: DHAGWQ

8. Piramatov U. A., Pugin K. G. Improving the reliability of hydraulic drive of construction and road vehicles. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* = Modernization and Research in Transportation Industry. 2019;1:104-107. (In Russ.) EDN: BPXXGZ

9. Chistokletov A. A., Pugin K. G. Using vibration diagnostics to determine the technical condition of hydraulic equipment. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* = Chemistry. Ecology. Urban Science. 2021; 3:276-280. (In Russ.) EDN: ZYSRGF

10. Novikov M. A., Butusov D. V., Perekopskij A. N., Gudkov D.A., Sidyanov Yu. N. Diagnostics and service adjustment as the ways to higher performance efficiency of grain harvester units. In: *Ecology and Agricultural Machinery: Proc. 3rd Sci. Prac. Conf.* (Saint Petersburg, June 5-6, 2002). Saint Petersburg: SZNIIMESH. 2002;3: 296-302. (In Russ.) EDN: TUJ TZH

11. Miller A. P., Pugin K. G., Shaikhov R. F. Improving the diagnostics of hydraulic systems of construction machinery. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* = Modernization and Research in Transportation Industry. 2022;1:15-20. (In Russ.) EDN: LKUPQB

12. Miller A. P., Shaikhov R. F., Chepikova T. P., Bondarenko D. V. Technical diagnostics of hydraulic systems of technological machines using artificial intelligence technology. In: *Youth Science 2022: Technologies, Innovations. Proc. All-Russian Sci. Prac. Conf. of young scientists, postgraduates and students.* (Perm, March 28-April 01, 2022) Perm: Procrust Publ. 2022; 2: 41-43. (In Russ.) EDN: ZTVTUD

13. Ganus Yu. A., Porfirev A. S. Theoretical foundations of integrated logistics support modeling. *Ekonomika vysokotekhnologichnykh proizvodstv* = High-Tech Enterprises Economy. 2023;4 (1):51-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/evp.4.1.119518> EDN: WEBKHU

14. Pertsev S. N. Improving the efficiency of the tractor hydraulic suspension system. In: *Challenges and Innovative Solutions in Agricultural Science. Proc. XXVII Int. Sci. Prod. Conf.* (Maisy, April 12, 2023). Maisy: Belgorod State Agrarian University. 2023;4:172-173. (In Russ.) EDN: PLVFFM

15. Chumakov P. V., Martynov A.V., Kolomeychenko A.V., Hasan I.H., Kolomeychenko A.S. Evaluation of technical condition of round gear hydraulic pumps of tractor mounted hydraulic systems. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020;30(3):426-447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447> EDN: XWSTMT

Об авторах	About the authors
Перцев Сергей Николаевич канд. техн. наук, <i>доцент</i> кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис», Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Петербургское шоссе, д. 2 г. Санкт-Петербург, Россия sn-percev@yandex.ru	Sergey N. Pertsev, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Automobiles, Tractors and Technical Service, Saint Petersburg State Agrarian University, Peterburgskoe Shosse, 2, Saint Petersburg, Russia sn-percev@yandex.ru
Константин Евгеньевич Муравьев канд. техн. наук, <i>доцент</i> кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис», Санкт-Петербургский	Konstantin E. Muraviev, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Automobiles, Tractors and Technical Service, St. Petersburg State

государственный аграрный университет, Петербургское шоссе, д. 2 г. Санкт- Петербург, Россия kons-muravev@yandex.ru	Agrarian University, Peterburgskoe Shosse, 2, St. Petersburg, Russia kons-muravev@yandex.ru
Заявленный вклад авторов Все авторы внесли равный вклад в работу, в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность	Stated authors' contribution All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	Conflict of interest The authors declare that there is no conflict of interest The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 26.05.2025	Received: 26.05.2025
Одобрена после рецензирования: 22.08.2025	Approved after reviewing: 22.08.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

Научная статья

УДК 629.366: 629.3.032.2: 629.3.052.9

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-120-132

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ТРАКТОРА ПО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЮ

Алексей Викторович Куриленко✉

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,
Москва, Россия

a.kurilenko@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3661-1121>

Аннотация. Одним из направлений повышения эффективности тракторов является определение их буксования во время работы, так как это оказывает влияние на экологические и экономические свойства МТА. В статье приведён анализ существующих способов определения действительной скорости тягово-транспортных средств, включая показатели буксования. Подробно рассмотрен метод определения действительной скорости трактора с помощью видеорегистрации опорной поверхности у трактора. Цель исследования – проверить возможность использования видеорегистрации опорной поверхности для

определения буксования в ходе выполнения технологических операций. В статье предлагается оригинальный принцип измерения действительной скорости движения по кадрам видеорегистрации с устройства, установленного на лабораторной установке. Показана зависимость между параметрами кадра и частотой съёмки с оценкой погрешности определения скорости движения. Дисперсия отклонения значений результатов видеорегистрации от значений датчика ИСД 3.1 составила 0,037 и может быть уменьшена за счет монтажа видеорегистратора на трактор через демпфирующее устройство, что планируется сделать в дальнейшем. Результаты экспериментальных исследований показали правомерность предложенного подхода и целесообразность продолжения исследований по этой теме.

Ключевые слова: трактор, видеорегистрация, режим видеосъёмки, действительная скорость, буксование.

Для цитирования: Куриленко А.В. Методика определения скорости трактора по видеонаблюдению // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 3(124). С. 120-133 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-120-132>

Research article

Universal Decimal Code 629.366: 629.3.032.2: 629.3.052.9

VIDEO SURVEILLANCE METHOD FOR DETERMINING THE TRACTOR SPEED

Alexey V. Kurilenko✉

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

a.kurilenko@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3661-1121>

Abstract. One way to improve the tractor efficiency is to find out if they slip during operation. This affects environmental and economic characteristics of machine-and-tractor units. The article presents an analysis of available approaches for determining the actual speed of traction vehicles, including the slippage indicators. The article considers in detail the relevant method that uses the video recording of the tractor's supporting surface. The study aimed to investigate the possibility of using video recording of the supporting surface to detect the tractor slippage during technological operations. The article proposes an original method for measuring the actual travelling speed based on analysis of video frames produced by a device installed in a laboratory setup. The article shows the relationship between the frame parameters and shooting frequency and the estimates of the travelling speed error. The variance in the deviation between the video recording results and those from the ISD 3.1 sensor was found to be 0.037. It could be reduced by mounting the video recorder on the tractor via a damping device. This is our plan for the future. Experimental studies have shown the viability of our approach and the need for further research in this area.

Keywords: tractor, video recording, video mode, actual speed, slipping

For citation: Kurilenko A.V. Video surveillance method for determining the tractor speed. AgroEcoEngineering. 2025; 3(124): 120-133 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-120-132>

Введение. Одним из направлений повышения эффективности тракторов является определение их буксования во время работы, так как это оказывает влияние на экологические и экономические показатели машинно-тракторного агрегата (МТА). Так, например, при увеличенном буксовании происходит увеличенный износ шин, падает производительность МТА, происходит нарушение структуры почвы, что снижает урожайность сельскохозяйственных культур [1-3].

Также измерение действительной скорости трактора необходимо для подсчёта норм внесения удобрений, поддержания выбранного режима работы МТА во время полевых работ. Информация о действительной скорости работы трактора в масштабе нескольких сезонов позволяет определить рациональный диапазон скорости работы трактора для обеспечения эффективного функционирования МТА. Во время работы почвообрабатывающих агрегатов при отсутствии датчика погружения в почву, сопоставив скорость МТА и расход топлива, можно определить среднюю глубину погружения рабочих органов в почву [4-6] и т.д.

Проведенные полевые исследования показали, что область допустимых значений буксования должна лежать в пределах 8-12% в зависимости от условий работы.

Как известно буксование определяется по формуле [7]:

$$\delta = \frac{V_m - V_o}{V_m} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где V_m – теоретическая скорость трактора, м/с;

V_o – действительная скорость трактора, м/с.

Если теоретическую скорость трактора V_m можно определить по угловой частоте вращения коленчатого вала двигателя $\omega_{\text{дв}}$, передаточного отношения трансмиссии $i_{\text{мп}}$ и радиуса колеса r_k по формуле:

$$V_m = \frac{\omega_{\text{дв}}}{i_{\text{мп}}} r_k, \quad (2)$$

то определение действительной скорости V_o в процессе выполнения МТА технологических операций вызывает затруднения.

Согласно ГОСТ 30745-2001¹⁴ и ГОСТ Р 52777-2007¹⁵ тяговые показатели трактора определяют при заданной влажности, твёрдости, типе опорной поверхности и уклоне в пределах габаритов трактора на заданном участке одинаковой длины, а буксование

¹⁴ ГОСТ 30745-2001. Межгосударственный стандарт. Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294815/4294815750.pdf> (дата обращения 01.05.2025)

¹⁵ ГОСТ Р 52777-2007. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293835/4293835734.pdf> (дата обращения 01.05.2025)

определяется с учетом разности скоростей на участке заданной протяженности и оно должно быть в пределах 15 % для специального трека и 30 % для почвенного фона.

На практике же применение тяговых показателей для выбора оптимального режима работы трактора является скорее вектором, чем утверждением. Так как поле, на котором работает трактор не однородно по своей структуре и составу, содержанию влаги и другим показателям, вследствие чего буксование движителей трактора будет постоянно меняться в процессе работы, а значит и режим работы трактора тоже желательно подстраивать под непрерывно меняющиеся условия [8].

Для этих целей может применяться технологическое колесо, которое крепится к трактору без подвода мощности. Колесо предназначено для качения с действительной скоростью трактора, так как не выполняет тяговых функций [9]. Также для определения действительной скорости трактора разрабатывались датчики, работающие на явлении эффекта Доплера. Согласно эффекту, частота принятого датчиком акустического сигнала, отражённого от опорной поверхности, отличается от частоты излучённого сигнала, и разница зависит от скорости объекта относительно поверхности отражения. Погрешность измерения с помощью таких датчиков находится в пределах ± 1 км/ч или 8 % для рабочей скорости трактора 10-12 км/ч.

В последнее время рассматривается способ определения действительной скорости трактора с помощью GPS систем в «агронавигаторах», в которых буксование трактора определяется разницей теоретической скорости трактора по известной частоте вращения вала двигателя, используемой передачи и радиуса ведущего колеса (формула 2) и значении действительной скорости, полученной с помощью спутниковой навигации. Основным недостатком работы такой системы является низкая точность позиционирования; требуется большой участок движения трактора для получения достоверной информации по среднему значению действительной скорости. Такой подход пока не позволяет оперативно принимать решения по управлению буксованием. Кроме того, в полевых условиях не всегда есть возможность реализовать GPS навигацию для этих целей. Для повышения точности позиционирования трактора и определения действительной скорости движения предлагается использовать специальные ретрансляторы сигнала, которые устанавливаются в пределах обрабатываемых полей, что в свою очередь накладывает некоторые ограничения и сложности в эксплуатации таких систем [10].

Описанные методы определения действительной скорости МТА имеют свои ограничения и недостатки в эксплуатации и обслуживании.

Цель исследования – проверить возможность использования видеорегистрации опорной поверхности для определения буксования трактора в ходе выполнения технологических операций.

Материалы, методы и объекты исследования. Измерения проводились на территории ФГБОУ ВО «РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева»; запись опорной поверхности производилась на камеру Sony IMX363, а проверка результатов полученной скорости производилась при помощи эталонного пробора ИСД 3.1. Доклад о планировании эксперимента был представлен на ежегодном семинаре «Чтения академика В.Н. Болтинского» в январе 2024 г.

В ходе исследований была использована лабораторная установка, имитирующая движение МТА; запись данных с прибора ИСД 3.1 велась на ноутбук через COM порт при помощи программного обеспечения ISD_Ethernet_Ru.exe, как показано на рисунке 1.

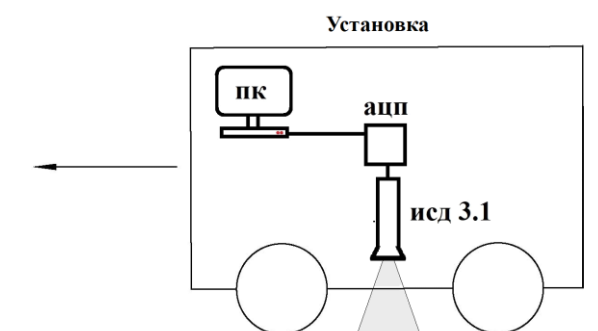


Рис. 1. Принципиальная схема измерения скорости
Fig. 1. Schematic diagram of speed measurement

При движении машины велась регистрация скорости при помощи оптического датчика ИСД. Сигнал с датчика поступал в аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и далее передавался и записывался в персональном компьютере (ПК). Принципиальная схема записи опорной поверхности на видеорегистратор показана на рисунке 2.

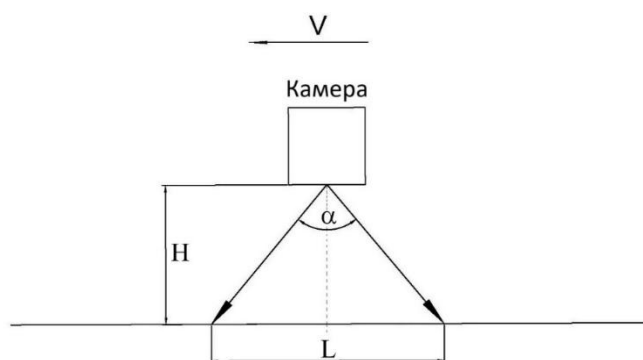


Рис. 2. Принципиальная схема записи опорной поверхности на видеорегистратор
Fig 2. Schematic diagram of the supporting surface recording on the video recorder

На видео во время просмотра наблюдается опорная поверхность, которая никогда не является идеально монотонной – на ней могут быть пятна, камни, листва, разные вкрапления в асфальте и др. Фиксируя и находя положения этих объектов на последующих кадрах видео, можно проследить их перемещение.

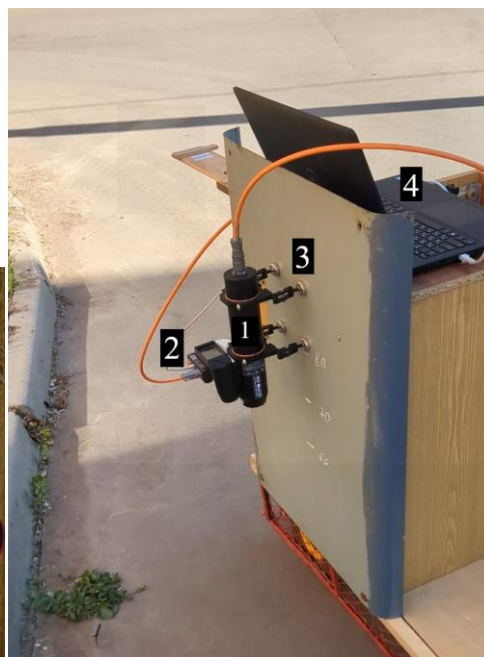
Размер регистрируемого участка опорной поверхности зависит от расположения камеры и угла захвата видеоизображения α , как показано на рисунке 2. Длина регистрируемого участка L опорной поверхности может быть найдена по высоте расположения камеры H и угле захвата α :

$$L = 2H \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

Прибор ИСД 3.1 предназначен для высокоточного измерения скорости и пройденного пути транспортного средства относительно дороги в автомобильной промышленности, а также для измерения скорости и длины материалов, движущихся относительно датчика в индустрии. Принцип измерения – растровая пространственная фильтрация изображения объекта. Характеристика прибора приведена в таблице 1. Внешний вид прибора и его монтаж на лабораторной установке представлены на рисунке 3.



а)



б) b)

Рис. 3. Прибор ИСД 3.1 (а) и его монтаж на лабораторной установке (б):
1 – измерительный модуль; 2 – модуль обработки сигнала; 3 – кронштейны крепления; 4 – ПК

Fig. 3. ISD 3.1 device (a) and its assembly on the laboratory setup (b):
1 – measuring module; 2 – signal processing module; 3 – mounting brackets; 4 – PC

Таблица 1. Техническая характеристика прибора ИСД 3.1

Table 1. Technical characteristics of ISD 3.1 device

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых скоростей	0,2-50 м/с
Пределы абсолютной погрешности измерения скорости	$\pm 0,5-0,1\%$ СКО
Точность измерения расстояния	$< \pm 0,05 \%$ СКО
Определение направления движения	Есть
Частота измерений	10- 0Гц (47 Гц типично)
Номинальное расстояние до объекта и допустимый диапазон изменения	15-60 см, $\pm 30\%$ от номинала*
Напряжение питания (диапазон)	12 В номинальное (10 – 14,5 В), 24В (9-36 В)
Потребляемая мощность	Сенсор: 7 Вт. Модуль обработки: 1,5 Вт
Диапазон рабочих температур сенсора	-20...+ 50°C
Вес сенсора + крепежные хомуты	280 г + 120 г
Размеры сенсора	Ø 55 x 205 мм + осветитель
Длина кабеля сенсора	3 м
Длина кабеля питания	1,5 м

Защита сенсора от окружающей среды	IP67
Магнитные крепления сенсора	4 магнита по 12 Кг прижимной силы
Блок обработки сигнала:	
Размеры корпуса	120x100x35, мм
Вес	350 г
Выходные сигналы блока обработки: Аналоговый: Частотный:	Скорость, 65-150 мВ/м/с, до 3,3 В. Путь, 1000 Имп/м (= скорость 1000 Гц/м/с), меандр 0-5 В либо 0-Упит, до 200 КГц.
Цифровой:	Передача всех параметров и настройка датчика по Ethernet (протокол UDP) либо по COM-USB (UART)
Физическая задержка обновления выходных сигналов	0,5/(частота измерений)

Результаты. Для проверки предложенного нами способа измерений была использована мобильная лабораторная установка. На нее на известной высоте был установлен прибор, который был направлен на опорную поверхность во время движения установки, с заданным разрешением съёмки и частотой кадров (рисунок 3б).

После включения измерительной системы начиналось движение установки и производилась регистрация полученного сигнала на ПК. Данные записывались в файл формата txt в виде массива: время; скорость движения; пройденный путь; отношение сигнал/шум. Полученный файл был импортирован в Microsoft Excel для дальнейшей обработки. Обработка видео материала проводилась при помощи программного обеспечения Filmora с алгоритмом компьютерного зрения Planar Tracking и Krita с включённым отображением поля кадра для подсчёта перемещения.

На полученных кадрах после обработки выделяются особые точки на отображении движущихся объектов с оценкой пиксельного смещения этих точек при переходе к следующим кадрам; единицей времени выступает величина обратная частоте регистрации кадра, а расстоянием – пиксели на кадрах видеоряда.

Для определения скорости МТА по видео регистрации указывается положение зафиксированного фрагмента на i -ом кадре a_i положение фрагмента на следующем кадре a_{i+1} время регистрации i -ого кадра t_i и время регистрации следующего кадра t_{i+1} (рис. 4), тогда скорость движения рассчитывается по формуле:

$$v' = \frac{a_i - a_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} = \frac{\Delta a}{\Delta t} \left(\frac{\text{пиксель}}{\text{секунда}} \right) \quad (4)$$

Для нахождения скорости в метрах в секунду применяется следующая формула:

$$v = \frac{a_i k_a - a_{i+1} k_a}{\Delta t} = \frac{(a_i - a_{i+1}) k_a}{\Delta t} \left(\frac{\text{метр}}{\text{секунда}} \right), \quad (5)$$

где k_a — коэффициент пропорциональности, метр/пиксель

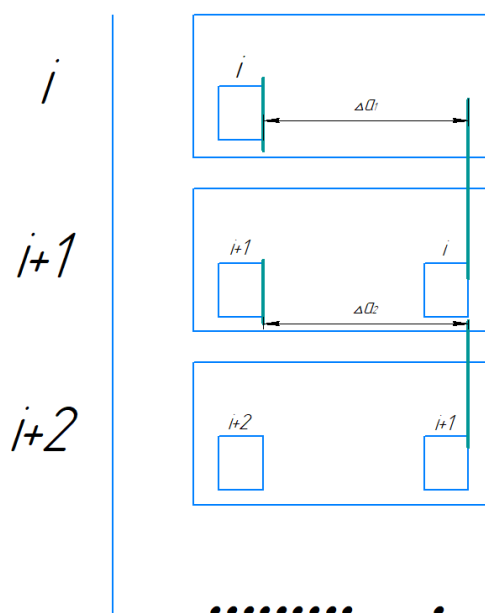


Рис. 4. Схема нахождения разницы зафиксированных фрагментов в пикселях (Δa)
 Fig. 4. Diagram for finding the difference between recorded fragments in pixels (Δa)

Перемещение фрагмента в пикселях на кадре зависит от разрешения видеорегистратора или количества пикселей по горизонтали a_p и вертикали кадра b_p , которые формируют изображение (рис. 5).

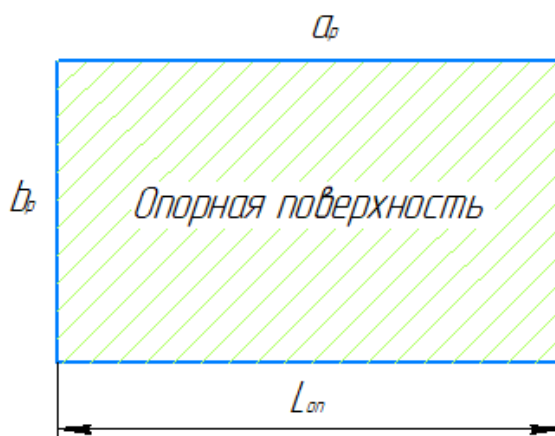


Рис. 5. Схема определения площади видеосъёмки
 Fig. 5. Diagram for determining the area of video filming

Для нахождения действительного перемещения объекта относительно опорной поверхности необходимо знать масштаб преобразования или коэффициент пропорциональности k_a , который может быть определен опытным путем.

Коэффициент пропорциональности k_a связывает действительный размер отрезка по длине кадра на опорной поверхности $L_{оп}$ с количеством пикселей на кадре по горизонтали a_p и определяется по формуле:

$$k_a = \frac{L_{on}}{a_p}, \quad (6)$$

где L_{on} — это длина отрезка опорной поверхности, уместяющегося по длине кадра при видеорегистрации, м;

a_p, b_p — это количество пикселей $k_a = \frac{L_{on}}{a_p} \quad k_a = \frac{L_{on}}{a_p}$ по направлению движения.

Время $t_{кадра}$, за которое происходит смена кадров на видеорегистраторе, определяется частотой кадров f (количество сделанных кадров в секунду) по формуле:

$$t_{кадра} = \frac{1}{f} \quad (7)$$

Таким образом, данные позволяют рассчитать скорость движения на каждом кадре видеорегистратора выделенного фрагмента и определить действительную скорость по известному коэффициенту пропорциональности k_a по формуле:

$$v = k_a \cdot v' = k_a \cdot \frac{\Delta a_i}{t_{кадра}}, \quad (8)$$

где: v' — относительная скорость фрагмента на кадре, пиксел/с;

Δa_i — смещение фрагмента на i -ом кадре, пикселей.

Полученные в результате обработки данные и график изменения действительной скорости по времени регистрации приведены на рисунке 6 и рисунке 7.

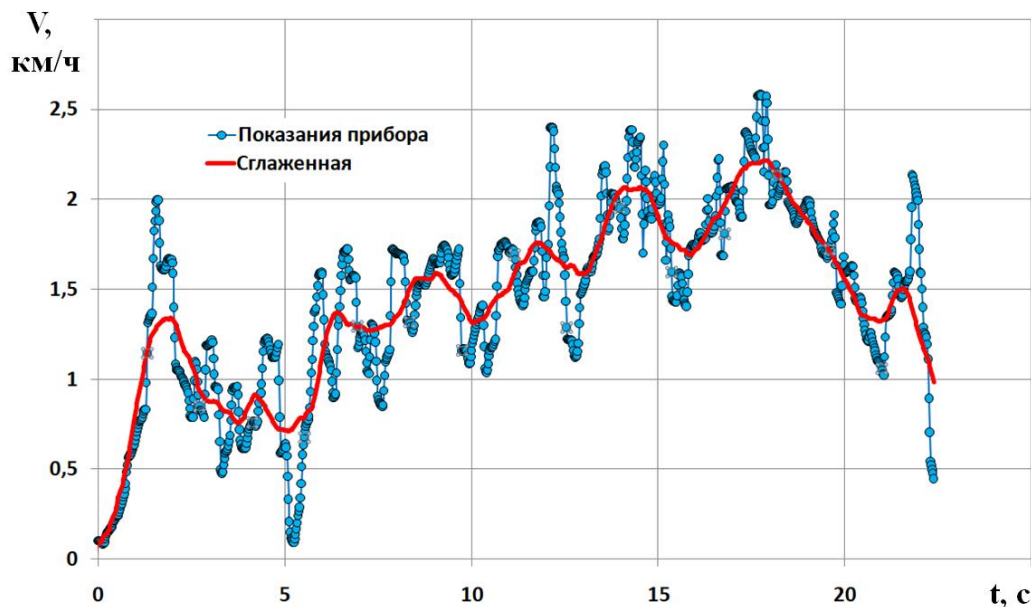


Рис. 6. Результаты измерений действительной скорости движения установки

Fig.6. Measurement results of the actual speed of the laboratory setup

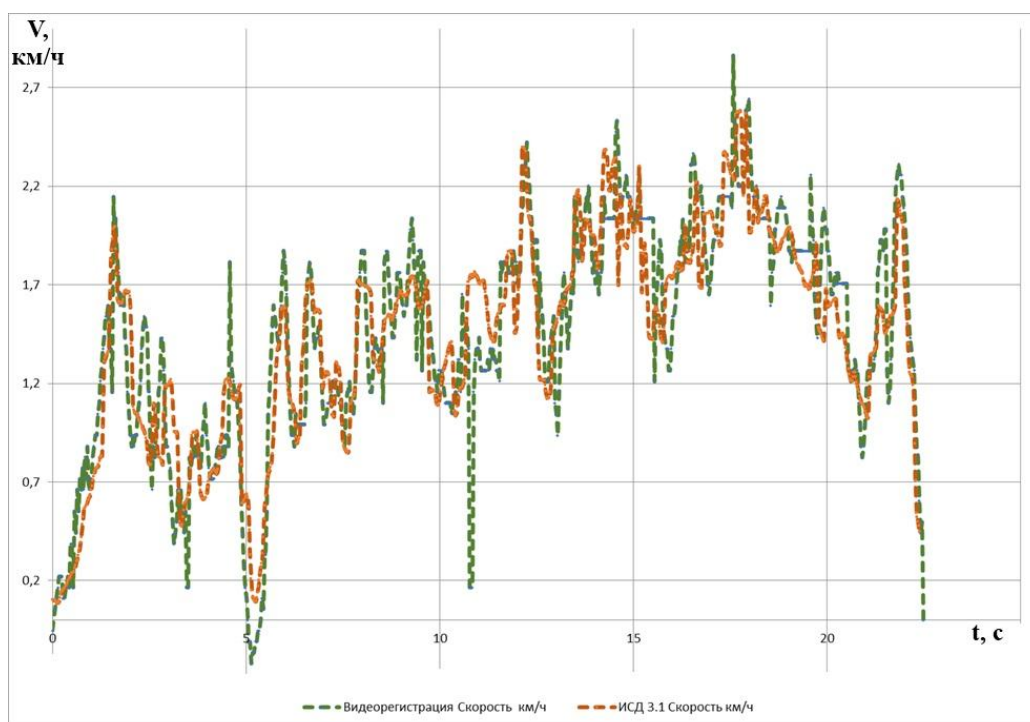


Рис. 7. Сравнительный график действительной скорости, полученный при помощи видеорегистрации и ИСД 3.1

Fig. 7. Comparative graph of the actual speed obtained using video recording and by ISD 3.1

Представленные на рисунках результаты измерений скорости показывают наличие высокочастотных колебаний, причина которых, вероятно, связана с колебаниями лабораторной установки во время движения и вибрацией видео регистрирующего устройства на элементе крепления. Поэтому при монтаже видеорегистратора на трактор необходимо предусмотреть систему демпфирования возникающих колебаний. Сглаживание зарегистрированных значений позволяет улучшить результаты измерений.

Обработка и сравнение результатов определения скорости МТА по видео регистрации с результатами, полученными с помощью датчика ИСД 3.1, значения которого были приняты за эталонные, позволили определить значения дисперсии скорости $D = 0,037$.

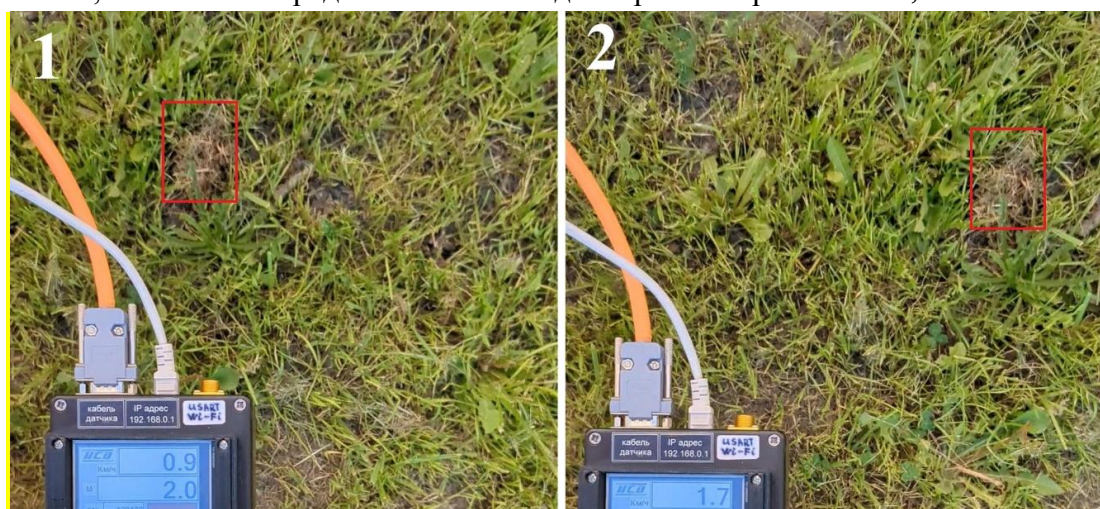


Рис. 8. Пример кадров, по которым рассчитывалось смещение отслеживаемого участка опорной поверхности: 1 – 1-й кадр записи участка опорной поверхности; 2 – 20-й кадр записи участка опорной поверхности

Fig. 8. Example of frames used to calculate the displacement of the tracked section of the supporting surface: 1 – 1st frame of the record of the support surface section; 2 – 20th frame of the record of the support surface section

Обсуждение. Как следует из представленных данных, значения действительной скорости могут быть получены через 0,02 секунды, что вполне достаточно для оценки буксования ведущих колес трактора и принятия решений при превышении допустимого по агротребованиям значения. Однако в процессе измерений присутствуют большие колебания измеренной скорости, величина которых может составлять до 20 % и более от средней скорости движения, что усложняет процесс управления. Гораздо лучшие результаты получаются после сглаживания действительной скорости движения, представленной на рисунке 6. Таким образом, при использовании видеорегистрации для определения действительной скорости с целью определения величины буксования необходимо производить сглаживание результатов регистрации скорости. Анализ кривой сглаженной скорости показывает возможность регистрации колебаний скорости с частотой 1 Гц и менее. Полученная дисперсия отклонения значений результатов видеорегистрации от значений датчика ИСД 3.1 составила 0,037 и может быть уменьшена за счет монтажа видеорегистратора на трактор через демпфирующее устройство, что планируется сделать в дальнейшем.

Выводы. Проведенные исследования показали возможность использования видеорегистрации опорной поверхности в процессе движения для определения действительной скорости трактора.

Разработана методика обработки данных видеорегистрации для расчета действительной скорости, результаты использования которой показали высокую степень соответствия с результатами, полученными с помощью датчика ИСД 3.1.

Результаты исследований показали присутствие больших колебаний амплитудой до 20% от средней скорости движения, что связано с колебаниями видеорегистратора и лабораторной установки в процессе движения, поэтому при монтаже видеорегистратора необходимо предусмотреть установку демпфера и производить сглаживание зарегистрированных значений.

Использование видеорегистрации позволяет определять действительную скорость трактора за 0,02 секунды, что обеспечивает контроль и оперативное управление скоростью движение трактора по значениям буксования ведущих колес.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анисимов Н. Л., Ефимов Э. И., Добрецов Р. Ю., Дмитриев М.И. Выбор расчетной зависимости для оценки буксования колесного сельскохозяйственного трактора «Кировец» К-7 // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. № 17 (1). С. 25-33. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-120130>
2. Куриленко А. В. Буксование ведущих колес трактора и его эффективность работы // Наука без границ и языковых барьеров. Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. с межд. участием (Орел, 27-28 апреля 2023 г.). Орел: Орловский ГАУ. 2023. С. 214-217. EDN: YJVVXRN
3. Дидманидзе О. Н., Пуляев Н. Н., Гузалов А. С. Формирование подхода к созданию цифрового двойника трактора сельскохозяйственного назначения // Известия Международной академии аграрного образования. 2022. № 61. С. 33-37. EDN: NBCUYG

4. Пуляев Н. Н., Павлов А. С., Куриленко А. В. Методика создания цифровых двойников трактора на основе имитационных моделей // Чтения академика В. Н. Болтинского, (Москва, 25-26 января 2023 г.). М.: Сам полиграфист. 2023. Т. 2. С. 50-55. EDN: UDTXVK
5. Черников О. Н., Быченин А. П. Влияние режимов буксования колесного движителя энергетического средства МТА на физические свойства почвы // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 3 (4). С. 44-49. EDN: YIUIJV
6. Дидманидзе О. Н., Парлюк Е. П., Пуляев Н. Н., Прокофьев М. М. Перспективы развития тракторостроения в России // Техника и оборудование для села. 2023. № 5(311). С. 2-7. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-5-2-7>
7. Кутьков Г. М. Тракторы и автомобили. М.: ИНФРА-М. 2014. 504 с.
8. Джаббаров Н. И. Влияние скорости движения почвообрабатывающего агрегата на его механический и энергетический коэффициенты полезного действия // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 1(106). С. 82-91. <https://doi.org/10.24411/2713-2641-2021-10280> EDN: RPXITT
9. Спинов А.Р., Кристальный С.Р., Попов Н.В. Учебные дорожные испытания автомобиля. М.: МАДИ. 2015. 48 с.
10. Федоренко В. Ф., Таркинский В. Е. Цифровые беспроводные технологии для оценки показателей сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. № 14(1). С. 10-15. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-1-10-15>

REFERENCES

1. Anisimov N.L., Efimov E.I., Dobretsov R.Yu., Dmitriev M.I. Selection of the analytical dependency for assessment of slipping of the Kirovets K-7 wheeled agricultural tractor. Izvestiya MGTU MAMI = Bulletin of Moscow State Technical University MAMI. 2023;17 (1):25-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/2074-0530-120130>
2. Kurilenko A.V. Driving wheel slip and tractor efficiency. In: Science without Borders and Language Barriers. Proc. All-Russian Sci. Prac. Conf. with Int. Participation (Orel, April 27-28, 2023). Orel: Orel State Agrarian University. 2023: 214-217. (In Russ.) EDN: YJVXRN
3. Didmanidze O.N., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Forming an approach to creating a digital twin of agricultural tractor. Izvestiya Mezhdunarodnoi akademii agrarnogo obrazovaniya = Izvestiya International Academy of Agrarian Education. 2022;61:33-37. (In Russ.) EDN: NBCUYG
4. Pulyaev N. N., Pavlov A. S., Kurilenko A.V. Methodology for creating digital twins of a tractor based on simulation models. In: Readings of Academician V. N. Boltinsky. (Moscow, January 25-26, 2023). Moscow: Sam Polygraphist Publ. 2023;2:50-55. (In Russ.) EDN: UDTXVK
5. Chernikov O. N., Bychenin A. P. Influence of slipping modes of the wheeled running gear of machine-and-tractor-unit power means onto physical properties of the soil. Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin Samara State Agricultural Academy. 2018;3(4):44-49. (In Russ.) EDN: YIUIJV
6. Didmanidze O.N., Parlyuk E.P., Pulyaev N.N., Prokofiev M.M. Prospects for the development of tractor construction in Russia. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2023;5(311):2-7. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-5-2-7>
7. Kutkov G. M. Tractors and Automobiles. Moscow: INFRA-M. 2014. 504 p. (In Russ.)

8. Dzhabborov N.I. Effect of travelling speed of a tillage unit on its mechanical and energy efficiency. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2021;1(106):82-91. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2713-2641-2021-10280> EDN: RPXITT

9. Spinov A.R., Kristalny S.R., Popov N.V. Educational Road Tests of a Car. Moscow: MADI. 2015. 48 p. (In Russ.)

10. Fedorenko V.F., Tarkivskiy V.E. Digital wireless technology to measure agricultural performance. *Sel'skokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(1):10-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-1-10-15>

Об авторе:	About the author:
Куриленко Алексей Викторович , ассистент кафедры тракторов и автомобилей, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, 127434, Россия; ORCID: 0000-0003-3661-1121 SPIN-код: 4336-3064, Scopus AuthorID: 58989590900; e-mail: a.kurilenko@rgau-msha.ru.	Alexey V. Kurilenko , assistant Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya str., Moscow, 127434, Russia ORCID: 0000-0003-3661-1121, SPIN-код: 4336-3064, Scopus AuthorID: 58989590900; e-mail: a.kurilenko@rgau-msha.ru.
Заявленный вклад автора. Автор выполнил все функции проекта.	Author's contribution. Single author article – the author fulfilled all the functions in the project
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interests The author declares no conflict of interest
Статья поступила в редакцию: 11.08.2025	Received: 11.08.2025
Одобрена после рецензирования: 10.09.2025	Approved after reviewing: 10.09.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025

РАЗДЕЛ 3. УПРАВЛЕНИЕ, ЭКОНОМИКА И ЭКОЛОГИЯ

Обзорная статья

УДК 658.512

DOI 10.24412/2713-2641-2025-3124-133-146

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАТРАТАМИ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТА

Римма Альбертовна Гадельшина^{1✉}, Ольга Валентиновна Маковецкая-Абрамова²

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия

¹gadelshina.rimma99@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7848-4263>

²mak-abramova.olga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0672-6980>

Аннотация. В данной статье рассматривается актуальная проблема управления затратами и снижения издержек как стратегического преимущества для конкурентоспособности инвестиционно-строительных проектов. Строительная отрасль сталкивается с растущей конкуренцией, вызванной глобализацией рынка и усложнением требований заказчиков, что делает оптимизацию затрат ключевым фактором успеха. На основе анализа научных публикаций за период 2014-2024 гг., полученных из баз данных Scopus, Web of Science и Google Scholar, определены основные подходы к управлению затратами. Исследование показывает значимость раннего планирования бюджета и использования современных технологий для минимизации рисков перерасходов и повышения эффективности проектов. Особое внимание уделяется роли взаимодействия со стейкхолдерами и управлению рисками как факторам, способствующим снижению издержек и улучшению результатов проекта. Выявлены барьеры внедрения инновационных решений, такие как высокие начальные затраты и недостаток квалифицированных специалистов. Управление затратами становится первостепенным условием привлечения инвестиций и обеспечения доверия заказчиков, что особенно важно в условиях экономической неопределенности и роста спроса на устойчивое развитие. Результаты исследования показывают, что эффективное управление затратами напрямую влияет на успешность реализации инвестиционно-строительных проектов. Комплексный подход, включающий использование современных технологий, управление рисками, тесное взаимодействие со стейкхолдерами и оптимизацию цепочек поставок, позволяет существенно повысить экономическую эффективность проектов и минимизировать риски перерасхода бюджета. Проведенные расчеты свидетельствуют, что внедрение современных технологий и методик позволит сэкономить 20,2% от общего бюджета инвестиционно-строительного проекта. Выводы подчеркивают важность раннего планирования затрат, внедрения инновационных решений и грамотного управления изменениями для достижения конкурентоспособности и устойчивости проектов в условиях экономической неопределенности.

Ключевые слова: управление затратами, контроль затрат, процессы управления проектами

Для цитирования: Гадельшина Р.А., Маковецкая-Абрамова О.В. Исследование влияния оптимального управления затратами на конкурентоспособность инвестиционно-

Review article

Universal Decimal Code 658.512

INVESTIGATING THE INFLUENCE OF EFFECTIVE COST MANAGEMENT ON THE COMPETITIVENESS OF INVESTMENT AND CONSTRUCTION PROJECTS

Rimma A. Gadelshina^{1✉}, Olga V. Makovetskaya-Abramova²

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

¹gadelshina.rimma99@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7848-4263>

²mak-abramova.olga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0672-6980>

Abstract. This article explores the current challenge of cost management and cost reduction. These are regarded as a strategic advantage for the competitiveness of investment and construction projects. The construction industry is facing increasing competition due to market globalization and the complexity of customer demands. It makes cost optimization a key factor for success. The study analyzed scientific publications from Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases for the years from 2014 to 2024. The main approaches to cost management were identified. The study highlights the importance of early budget planning and the use of modern technologies to minimize the risks of cost overruns and enhance project efficiency. Particular attention is paid to the role of stakeholder engagement and risk management as factors contributing to cost reduction and improved project outcomes. Barriers to the implementation of innovative solutions were specified. These are high initial costs and a lack of qualified specialists. Cost management becomes a paramount condition for attracting investment and ensuring client trust. This is especially important in the context of economic uncertainty and the growing demand for sustainable development. The research results demonstrate that effective cost management has a direct impact on the success of investment and construction projects. A comprehensive approach, which includes the use of modern technologies, risk management, close interaction with stakeholders, and supply chain optimization, can significantly improve the economic efficiency of projects and minimize the risks of budget overruns. The calculations show that the implementation of modern technologies and methodologies can save 20,2% of the total budget of an investment and construction project. The conclusions emphasize the importance of early cost planning, the introduction of innovative solutions, and competent change management to achieve competitiveness and project sustainability in conditions of economic uncertainty.

Key words: cost management, cost control, project management processes

For citation: Gadelshina R.A., Makovetskaya-Abramova O.V. Investigating the influence of effective cost management on the competitiveness of investment and construction projects. *AgroEcoEngineering*. 2025; 3(124): 133-146 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-3124-133-146>

Введение. Актуальность темы данной статьи обусловлена тем, что строительная отрасль становится все более конкурентной за счет увеличения количества участников рынка, глобализации и усложнения требований заказчиков. В данных условиях управление

затратами и снижением издержек становятся критически важными для повышения конкурентоспособности компаний, поскольку умение оптимизировать затраты позволяет компаниям выделяться на фоне конкурентов и успешно привлекать новые проекты и разрабатывать предложения более выгодных условий клиентам без ущерба для качества и привлечения инвесторов, которые внимательно следят за эффективностью использования средств.

При этом многие инвестиционно-строительные проекты сталкиваются с финансовыми ограничениями, вызванными колебаниями цен на материалы и оборудование и экономической нестабильностью (инфляция, валютные колебания и др.). В таких случаях эффективное управление затратами помогает минимизировать влияние этих факторов и обеспечивает стабильность реализации проекта.

В современном мире всё большее значение приобретают принципы устойчивого развития (ESG – Environmental, Social, and Governance) и компании, которые успешно сочетают снижение издержек с экологическими инициативами, получают дополнительное конкурентное преимущество.

Повышение эффективности управления затратами напрямую влияет на умение избежать проблемы перерасхода бюджета и срывов сроков, что повышает успешность проекта и удовлетворенность заказчиков. Компании, которые могут гарантировать соблюдение бюджета и сроков, имеют лучшие шансы получить финансирование, поэтому управление затратами становится ключевым фактором привлечения инвестиций. Успешное снижение издержек, сэкономленные средства следует направлять на социальные инициативы, например, создание рабочих мест, поддержку местных сообществ. Это положительно влияет на репутацию компаний.

Оптимальное управление затратами дает значительные преимущества перед конкурентами и позволяет успешно развиваться даже в сложных рыночных условиях, что подтверждает актуальность темы данной статьи.

Исходя из актуальности рассматриваемой темы, целью работы является анализ влияния и инструментов управления затратами и снижения издержек на конкурентоспособность инвестиционно-строительного проекта.

Основная часть. Обзор научных источников позволяет сделать вывод, что в развитие концептуального подхода к управлению стоимостью инвестиционно-строительных проектов внесли вклад значительное число специалистов.

Результаты исследования ряда публикаций в Scopus-индексированных журналах по теме управления затратами как стратегического преимущества конкурентоспособности инвестиционно-строительных проектов легли в основу материала данной статьи.

Отбор статей учитывал включение релевантных показателей и качественных исследований по теме данной работы. Обзор сосредоточился на рецензируемых журнальных статьях, опубликованных в период 2014-2024 гг., предоставляя десятилетнюю перспективу эволюции практик управления затратами. Использовались такие базы данных, как Scopus, Web of Science и Google Scholar.

В процессе исследования были проанализированы статьи, которые соответствовали следующим требованиям:

- рецензируемые и опубликованные на английском языке, сфокусированные на управлении затратами в строительстве;
- содержащие эмпирические данные или комплексный теоретический анализ;

– опубликованные в период 2014-2024 гг.

Тематический анализ проводился с использованием шестиступенчатой схемы Вирджинии Браун и Виктории Кларк (ознакомление, формирование ключевых слов, поиск работ, анализ работ, определение и наименование тем, подготовка отчета). Это позволило получить детальное представление о практике управления затратами и ее последствиях [1].

Надежность и обоснованность выводов обеспечивались за счет системы контроля, в ходе которого проводились перекрестные ссылки на информацию из нескольких источников.

В исследовании «Cost Management Evolution in Building Projects: A Review of Innovations and Challenges» проанализированы распространенные практики и проблемы управления затратами в строительстве, такие как прогнозирование бюджета, методы контроля затрат, управление рисками и интеграция передовых технологий, таких как информационное моделирование зданий (BIM – Building Information Modeling) [2]. В исследовании подчеркивается важность сотрудничества с заинтересованными сторонами и эффективной коммуникации для снижения перерасхода средств. Что еще более важно, оно вооружает практиков действенными стратегиями для достижения этой цели, предоставляя дорожную карту для успешного управления затратами. Метод нарративного обзора дает всесторонний обзор эволюции и современных тенденций в управлении затратами, позволяя практикам и исследователям повысить эффективность затрат в строительных проектах. Результаты исследования подчеркивают необходимость постоянного совершенствования стратегий управления затратами и мотивируют специалистов-практиков к этому, обеспечивая успешную реализацию проектов в рамках бюджетных ограничений.

В условиях постоянно растущей сложности строительных проектов внедрение эффективных стратегий управления затратами является необходимым условием успеха любого начинания [3]. В своей работе авторы рассматривают ключевые стратегии, которые инженеры-сметчики могут использовать для эффективного управления затратами в строительных проектах. Авторы анализируют роль современных технологий, например, BIM, в управлении затратами на всех этапах строительного проекта; подчеркивается важность раннего планирования бюджета для минимизации рисков перерасходов.

Авторы делают вывод, что управление затратами должно быть интегрировано с процессом проектирования, чтобы обеспечить максимальную эффективность. Использование цифровых технологий и раннее планирование позволяют значительно улучшить управление затратами, что становится стратегическим преимуществом.

Развитие концепций управления стоимостью в строительстве, практикуемых в Северной Америке, рассматривается в работе Дж. Келли, который признан одним из ведущих экспертов в этой области [4]. Он является соавтором книги «Value Management of Construction Projects», в которой рассматриваются концепции, методология и инструменты управления стоимостью строительных проектов.

Дж. Келли рассматривает управление затратами в строительстве как набор принципов и структурированную методологию для повышения эффективности принятия решений организацией и соотношения цены и качества.

Такого же мнения придерживаются Грэм Драммонд и Мейл Стивен, по мнению которых ключевые аспекты управления стоимостью включают планирование, оценку, бюджетирование, финансирование, управление и контроль затрат на протяжении всего жизненного цикла проекта [5]. Они определяют управление затратами инвестиционно-строительных проектов (ИСП) как структурированный и аналитический процесс,

направленный на достижение наилучшего возможного баланса между удовлетворением потребностей заинтересованных сторон и имеющимися ресурсами, который нацелен на улучшение и поддержание желаемого баланса желаний и потребностей с имеющимися ресурсами.

Управление затратами применяется стратегически в строительной отрасли для улучшения результатов проекта. Это предполагает определение основных функций строительного проекта с наименьшими затратами без ущерба для качества.

В источнике [4] рассматривается, как управление затратами может быть эффективно интегрировано на различных этапах строительного проекта, начиная с первоначального планирования и заканчивая проектированием и реализацией. Чем раньше управление затратами внедряется в жизненный цикл проекта, тем больше потенциал воздействия на повышение стоимости.

Одним из основных инструментов управления затратами является функциональный анализ, который помогает определить основные функции и цели проекта, обеспечивая основу для повышения стоимости. Фокусируясь на функциях и ценностях, а не на затратах, Value Management (VM) помогает заинтересованным сторонам принимать решения, которые в большей степени соответствуют долгосрочным целям проекта. С помощью VM проекты могут добиться значительной экономии средств за счет выявления и устранения ненужных расходов при одновременном повышении ценности и качества проекта.

Комплексная концепция планирования затрат на строительство – важнейший фактор экономического успеха строительных проектов. Она требует тщательной подготовки, точных методов оценки стоимости, постоянного мониторинга и гибкой адаптации к изменениям. Благодаря интеграции современных технологий и устойчивых практик планирование стоимости строительства может существенно улучшить финансовые показатели и положительно скажется на стоимости проекта.

В статье А. Al-Yami и M.O. Sanni-Anibire сделан вывод о существенной целесообразности использования для контроля затрат в строительстве технологии BIM, которая позволяет создавать детальные цифровые модели строительства, что улучшает прогнозирование бюджета [6]. Моделирование на ранних стадиях помогает выявить потенциальные проблемы, например, коллизии в проекте, которые могут привести к перерасходу средств. Это снижает риски срывов сроков и дополнительных затрат на исправление ошибок позже. В статье отмечается, что BIM в строительной отрасли Саудовской Аравии помогает выявлять коллизии в проектах до начала строительства. Например, в проектах, где был внедрен BIM, количество изменений в процессе строительства сократилось на 25-30%, что снизило издержки на корректировки.

Ряд других тематических исследований демонстрируют эффективность современных методов и инструментов прогнозирования бюджета в строительстве. Брайд и др. [7] обнаружили, что BIM значительно повышает точность сметы, сокращает перерасход средств и повышает эффективность проекта за счет лучшей визуализации, улучшения координации и раннего выявления потенциальных проблем с затратами. Использование BIM позволяет снизить перерасход бюджета на 10-15%.

Аналогичным образом параметрическая оценка в проекте жилищного строительства в США позволила спрогнозировать затраты на основе исторических данных и параметров проекта, что привело к точной оценке затрат и эффективному распределению ресурсов, избежав перерасхода бюджета [8, 9, 10]. В частности, в исследовании Jrade и Jalaei [8]

приводится пример жилищного строительного проекта в США, где параметрическая оценка затрат позволила спрогнозировать бюджет с точностью до 95 % , что привело к экономии около 5% общего бюджета проекта за счет эффективного распределения ресурсов.

Несмотря на прогресс в области бюджетного прогнозирования и инструментов проблемы сохраняются, особенно в части точности данных о затратах. Надежные данные имеют решающее значение для точных оценок, но их качество существенно различается по проектам, что приводит к потенциальным неточностям [11, 12]. В статье Adam и др. [11] анализируются причины перерасхода бюджета в крупных строительных проектах. Один из выводов заключается в том, что передача части функций сторонним подрядчикам (аутсорсинг) может снизить затраты на 10-12% за счет более эффективного использования ресурсов. Экономические колебания также влияют на прогнозирование бюджета, воздействуя на цены на материалы, стоимость рабочей силы и курсы валют. Руководители проектов должны следить за экономическими условиями и корректировать прогнозы для снижения рисков [13, 14].

Сложность строительных проектов затрудняет точную оценку стоимости, поскольку каждый проект имеет уникальные переменные и проблемы. Такой метод как параметрическая оценка, может помочь, но может потребовать корректировки по мере реализации проекта. Кроме того, внедрение передовых технологий, таких как BIM, хотя и полезно для прогнозирования бюджета, но барьером для внедрения BIM являются высокие начальные затраты, поскольку требуются инвестиции в лицензии на программное обеспечение, обучение сотрудников и обновление ИТ-инфраструктуры. Это может быть непосильным для малых и средних компаний [6].

Для оценки прогресса проекта и контроля затрат ряд авторов (J. Batselier, M. Vanhoucke, A. Ikechukwu, A. Lamptey-Puddicombe) предлагает использовать методологию EVM (Earned Value Management) путем интеграции методологии управляемой стоимости с экспоненциальным сглаживанием и прогнозированием по классу ссылок (reference class forecasting) [15, 16, 17]. Например, Batselier и Vanhoucke [15] утверждают, что успешное применение методологии EVM в строительных проектах в сочетании с экспоненциальным сглаживанием позволяет повысить точность прогнозирования окончательных затрат на 10-12%, что приводит к экономии 8-10% бюджета проекта.

Методология EVM позволяет сравнивать фактические затраты с запланированными, что помогает выявлять отклонения на ранних этапах. Также EVM предоставляет объективные данные для прогнозирования окончательных затрат проекта, позволяя менеджерам принимать корректирующие меры при необходимости.

Экспоненциальное сглаживание применяется для улучшения точности прогнозирования бюджета проекта. Этот метод учитывает исторические данные и динамику изменений в затратах, что особенно важно в строительстве, где часто происходят колебания цен на материалы и трудовые ресурсы. Использование экспоненциального сглаживания делает прогнозы более адаптивными к изменениям в условиях реализации проекта.

Прогнозирование по классу ссылок использует данные из предыдущих проектов того же типа для улучшения прогнозов текущего проекта. Это особенно полезно в строительной отрасли, где каждый проект уникален, но имеет общие черты с другими проектами. Метод помогает уменьшить влияние человеческого фактора на прогнозирование, основываясь на статистических данных.

Для строительных проектов этот подход может быть использован следующим образом: создание реалистичного бюджета с учетом данных из аналогичных проектов, постоянный мониторинг и корректировка прогнозов затрат; анализ эффективности управления затратами для улучшения будущих проектов.

Комбинируя EVM с другими методами, можно повысить точность прогнозирования затрат, что снижает риск перерасхода бюджета. Например, использование экспоненциального сглаживания позволяет учитывать динамику изменений в затратах, а прогнозирование по классу ссылок – применять лучшие практики из прошлых проектов.

В статье Ikechukwu, Fidelis и Kelvin исследуются причины и последствия превышения бюджета в реализации строительных проектов общественных зданий [16]. Авторы подчеркивают, что основными факторами, способствующими таким перерасходам, являются недостаточное планирование стоимости проекта, задержки в оплате, колебания цен на материалы, изменения курсов валют и несвоевременное поступление ресурсов. В процессе анализа выявлено, что слабые стороны в управлении проектом, такие как проблемы с документацией, дефицит финансовых ресурсов, а также неправильное управление контрактами, существенно влияют на конечную стоимость строительства.

Исследование показывает, что точность прогнозирования бюджета напрямую зависит от качества подготовительного этапа, где критически важным является учет всех возможных рисков и факторов, которые могут увеличить затраты.

Авторы указывают, что значительно улучшили управление затратами в строительстве такие технологические инновации, как программное обеспечение для управления затратами, мобильные приложения и современные инструменты анализа данных. Такое программное обеспечение, как Procore, Primavera P6 и Microsoft Project, автоматизирует отслеживание расходов, финансовую отчетность и управление бюджетом, сокращая ручную работу и время. Эти инструменты обеспечивают анализ данных в режиме реального времени для постоянного мониторинга затрат и своевременной корректировки. В этом с ними согласны Lamptey-Puddicombe и Emmanuel [17].

Следует особо отметить, что в условиях роста цен на ресурсы, изменения климата и необходимости повышения эффективности аграрного сектора оптимальное управление затратами может существенно влиять на конкурентоспособность инвестиционно-строительного проекта при организации строительства объектов сельскохозяйственного назначения: в частности, оптимизация управления затратами при строительстве теплиц позволяет снизить операционные расходы, что, в свою очередь позволит производителю предлагать продукцию по более конкурентоспособным ценам или увеличивать маржинальную прибыль при сохранении рыночной цены, что особенно важно в условиях жесткой конкуренции на аграрных рынках. Оптимизация затрат, как уже указывалось, включает в себя не только минимизацию расходов, но и рациональное распределение ресурсов на внедрение инновационных решений: систем автоматизации, энергосберегающих технологий, цифровых платформ мониторинга. Это напрямую влияет на рост урожайности, продуктивность животноводства и общую производительность факторов производства, что является ключевым элементом конкурентоспособности в современном агропромышленном комплексе (АПК).

Оптимальное управление затратами при строительстве объектов АПК может включать выбор экологически ориентированных решений (например, использование возобновляемых источников энергии, биогазовых установок, систем утилизации отходов),

что способствует формированию «зелёного» имиджа предприятия. Это повышает имидж предприятия, открывает доступ к программам государственной поддержки («зелёным» грантам и премиям), позволяет выходить на нишевые рынки (органическая продукция) и, соответственно, усиливает долгосрочную конкурентную позицию предприятий АПК.

Выводы исследования указывают на то, что для предотвращения превышения бюджета необходимо внедрять более совершенные методологии управления проектами, включая раннюю оценку рисков, тщательное планирование и контроль над исполнением контрактов. Улучшение данных аспектов позволит снизить частоту и масштабы перерасхода средств, обеспечивая тем самым более успешную доставку проектов в рамках установленных финансовых ограничений.

В работе также рассматривается роль коммуникации между участниками проекта: недостаток координации может привести к дополнительным издержкам из-за ошибок или необходимых переделок. При этом руководителям проектов и членам команды получать доступ к информации о проекте, отслеживать расходы и общаться с заинтересованными сторонами из любого места позволяют мобильные приложения, и это повышает гибкость и эффективность [18, 19]. Инструменты расширенной аналитики используют большие данные и машинное обучение для более глубокого понимания управления затратами, анализируя данные прошлых проектов для выявления закономерностей и тенденций, на основе которых составляются будущие сметы. Предиктивная аналитика позволяет прогнозировать потенциальный перерасход средств, что дает возможность принимать превентивные меры.

Кроме того, авторы акцентируют внимание на необходимости создания эффективных механизмов управления рисками для минимизации непредвиденных расходов, связанных с внешними факторами, такими как экономическая нестабильность или изменение законодательной базы.

В статье S. Holloway «The Role of Supply Chain Management in Shaping Marketing Strategies for Emerging Markets» исследуется влияние управления цепочками поставок на снижение затрат в строительных проектах, подчеркивая значимость оптимизации процессов закупки, хранения материалов и логистики для достижения финансовой эффективности [20]. Автор демонстрирует, что тесное взаимодействие с поставщиками и партнерами позволяет не только сократить издержки на материалах и транспортировке на 15-20%, но и повысить надежность выполнения проектов.

В работе анализируется роль долгосрочных контрактов с поставщиками, которые способствуют стабильности цен и предсказуемости сроков поставок. Кроме того, внедрение цифровых платформ для координации действий всех участников цепочки поставок улучшает прозрачность процессов и сокращает административные издержки. Использование современных технологий, таких как BIM и системы автоматизированного управления запасами, позволяет более точно прогнозировать потребности в материалах и минимизировать риски перезакупок или дефицита ресурсов.

Автор делает вывод о том, что эффективное управление цепочками поставок становится ключевым фактором снижения затрат в строительстве, особенно в условиях высокой конкуренции и экономической неопределенности. Он акцентирует внимание на необходимости создания прочных партнерских отношений с поставщиками, что обеспечивает дополнительные преимущества, такие как гибкие условия поставок и доступ к инновационным материалам по сниженным ценам. Таким образом, статья подтверждает

важность интеграции управления цепочками поставок в общую стратегию снижения издержек строительных проектов.

Приведем пример расчета экономии за счет снижения издержек, предлагаемых в рассмотренных работах. Рассмотрим гипотетический строительный проект стоимостью 1 млрд рублей. Внедрение технологий и методик, описанных выше, позволит достичь следующих результатов:

Использование BIM: снижение затрат на корректировки проекта на 10%:

$10\% \times (12\% \text{ от } 1000 \text{ млн}) = 12 \text{ млн рублей}$, учитывая, что 12% бюджета – расходы по изменению проекта.

Экономия 5% бюджета за счет точного прогнозирования:

$5\% \times 1000 \text{ млн} = 50 \text{ млн рублей}$.

Методология EVM: экономия 8% бюджета за счет точного прогнозирования и контроля затрат:

$8\% \times 1000 \text{ млн} = 80 \text{ млн рублей}$.

Оптимизация цепочек поставок: снижение затрат на материалы и логистику на 15%:

$15\% \times (20\% \text{ от } 1000 \text{ млн}) = 30 \text{ млн рублей}$ (учитывая, что материалы составляют около 20% бюджета).

Аутсорсинг: снижение затрат на 10% за счет передачи функций сторонним подрядчикам:

$10\% \times (30\% \text{ от } 1000 \text{ млн}) = 30 \text{ млн рублей}$ (учитывая, что рабочая сила составляет около 30% бюджета).

Общая экономия:

$12 + 50 + 80 + 30 + 30 = 202 \text{ млн рублей}$.

Таким образом, внедрение современных технологий и методик позволит сэкономить 20,2% от общего бюджета инвестиционно-строительного проекта.

Выводы. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что управление затратами рассматривается не только как инструмент контроля бюджета, но и как стратегический рычаг для повышения конкурентоспособности инвестиционно-строительных проектов. Комплексный подход, включающий технологии, риск-менеджмент, взаимодействие со стейкхолдерами и адаптацию к региональным условиям, позволяет компаниям добиваться лучших результатов и успешно конкурировать на рынке.

Управление затратами оказывает значительное влияние на успешность реализации строительных проектов, так как оно включает в себя планирование, оценку, составление бюджета, контроль и отчетность о затратах, связанных с проектом. Это позволяет определить достоверную цену проекта и затраты на его реализацию, что является важнейшей задачей управления стоимостью инвестиционно-строительных проектов.

Существуют различные модели и методики управления стоимостью проекта, которые направлены на оптимизацию процесса планирования, контроля и управления затратами. Одна из наиболее распространенных моделей – методика управления стоимостью на основе жизненного цикла проекта, которая включает в себя определение и классификацию затрат, анализ и управление рисками, а также применение инструментов бюджетирования и контроля.

Ключевым моментом в процессе управления стоимостью наряду с формированием плановой стоимости является контроль затрат с целью обеспечения своевременного реагирования и снижения риска критического отклонения от сметы.

Снижение издержек является стратегическим преимуществом для инвестиционно-строительных проектов, так как оно:

- повышает экономическую эффективность;
- снижает риски и увеличивает устойчивость проекта;
- укрепляет доверие инвесторов и заказчиков;
- формирует положительную репутацию компании.

Использование инновационных технологий, риск-менеджмента и грамотного взаимодействия со стейкхолдерами позволяет компаниям успешно конкурировать на рынке и реализовывать сложные проекты.

Благодаря эффективному управлению затратами, строительные организации могут не только оптимизировать свои расходы с помощью таких методов как аутсорсинг, но и повысить общую эффективность своих операций. Планирование, калькуляция и учет затрат являются основой для определения себестоимости строительной продукции, работ и услуг, что критически важно для поддержания конкурентоспособности на рынке.

Контроль за расходами через различные этапы проекта обеспечивает соответствие фактических затрат запланированным, что помогает избежать перерасходов и финансовых проблем во время выполнения проекта. Управление затратами становится первостепенной задачей при принятии управленческих решений, поскольку оно напрямую влияет на конечную прибыльность проекта.

Таким образом, успешное завершение строительного проекта во многом зависит от того, насколько хорошо организовано управление затратами на всех его этапах – от подготовки и планирования до контроля и подведения итогов. Использование таких методов, как метод наибольшего и наименьшего значений для анализа изменений в расходах в периоды различной активности проекта, может помочь более точно прогнозировать будущие затраты и адаптироваться к изменениям в ходе реализации проекта.

За последние десять лет управление затратами в строительстве зданий значительно изменилось благодаря технологическим достижениям, экономическим давлениям и фокусу на устойчивости. BIM улучшил планирование, дизайн, строительство и управление, предоставляя точные оценки затрат и эффективный контроль затрат. Кроме того, программы управления затратами и мобильные приложения повысили эффективность за счет реального времени отслеживания затрат и автоматизированной отчетности. Экономические колебания и волатильность цен на материалы потребовали надежных стратегий управления рисками, подчеркивая необходимость планирования резервов для защиты от перерасхода бюджета. Практики устойчивого строительства также повлияли на управление затратами путем интеграции устойчивых материалов и затрат на жизненный цикл, делая проекты экономически эффективными и экологически ответственными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Braun V., Clarke V. Using thematic analysis in psychology // *Qualitative Research in Psychology*. 2006. Vol. 3(2). P. 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
2. Ajayi T.O., Daramola O.T., Adhuze O. Cost management evolution in building projects: a review of innovations and challenges // *Civil Engineering*. 2024. Vol. 9. P. 80-95. <https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2024.909009>
3. Cost Management Strategies for Construction Projects: A Review of Best Practices: a quantity surveyor's perspective. CTN PRESS. 2023.

[Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cevnnews.in/2023/09/cost-management-strategies-for-construction-projects-a-quantity-surveyors-perspective/> (дата обращения 15.02.2025)

4. Kelly J. Value management in design and construction. Ebook. 2003. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.overdrive.com/media/4050603/value-management-in-design-and-construction> (дата обращения 15.02.2025)

5. Graham D., Male S., Kelly J. Value Management of Construction Projects. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley. 2014. 568 p.

6. Al-Yami A., Sanni-Anibire M. O. BIM in the Saudi Arabian construction industry: State of the art, benefit and barriers // International Journal of Building Pathology and Adaptation. 2021. Vol. 39(1). P. 33-47. <https://doi.org/10.1108/ijbpa-08-2018-0065>

7. Bryde D., Broquetas M., Volm J. M. The project benefits of building information modelling (BIM) // International journal of project management. 2014. Vol. 31 (7). P. 971-980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>

8. Jrade A., Jalaei F. Integrating building information modelling with sustainability to design building projects at the conceptual stage // Building Simulation. 2013. Vol. 6. P. 429-444. <https://doi.org/10.1007/s12273-013-0120-0>

9. Sotelino E., Saieg P., Nascimento D., Caiado R. Interactions of building information modelling, lean and sustainability on the architectural, engineering and construction industry: A systematic review // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 174. P. 788-806. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.030>

10. Panteli C., Kylili A., Fokaides P. Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond. A critical review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 265, 121766. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121766>

11. Adam A., Josephson P., Lindahl G. Aggregation of factors causing cost overruns and time delays in large public construction projects: Trends and implications // Engineering, Construction and Architectural Management. 2017. Vol. 24. P. 393-406. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2015-0135>

12. Durdyev S. Review of construction journals on causes of project cost overruns // Engineering, Construction and Architectural Management. 2021. Vol. 28(4). P. 1241-1260. <https://doi.org/10.1108/ecam-02-2020-0137>

13. Love P., Ahiaga-Dagbui D., Irani Z. Cost overruns in transportation infrastructure projects: Sowing the seeds for a probabilistic theory of causation // Transportation Research. Part A – Policy and Practice. 2016. Vol. 92. P. 184-194. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2016.08.007>

14. Asiedu R. O., Adaku E. Cost overruns of public sector construction projects: a developing country perspective // International Journal of Managing Projects in Business. 2020. Vol. 13(1). P. 66-84. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-09-2018-0177>

15. Batselier J., Vanhoucke M. Improving project forecast accuracy by integrating earned value management with exponential smoothing and reference class forecasting // International Journal of Project Management. 2017. Vol. 35. P. 28-43. <https://doi.org/10.1016/J.IJROMAN.2016.10.003>

16. Ikechukwu A., Fidelis I., Kelvin O. Causes and effects of cost overruns in public building construction projects delivery, in Imo State, Nigeria // IOSR Journal of Business and Management. 2017. Vol. 19. P. 13-20. <https://doi.org/10.9790/487X-1907021320>

17. Lamptey-puddicombe A., Emmanuel A. Evaluation of risk of fluctuation claim on cost of construction projects in the South-South Zone of Nigeria // *Civil Engineering and Architecture*. 2018. Vol. 6. P. 252-256. <https://doi.org/10.13189/CEA.2018.060504>
18. Netto J. T., de Oliveira N. L. F., Freitas A. P. A., dos Santos J. A. N. Critical factors and benefits in the use of earned value management in construction // *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. 2020. Vol. 17(1). P. 1-10. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2020.007>
19. Aramali V., Gibson Jr G. E., El Asmar M., Cho N. Earned value management system state of practice: Identifying critical sub-processes, challenges, and environment factors of a high-performing EVMS // *Journal of Management in Engineering*. 2021. Vol. 37(4), 04021031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000925](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000925)
20. Holloway S. The role of supply chain management in shaping marketing strategies for emerging markets. Preprint. // *Business, Economics and Management*. 2024. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1428.v1>

REFERENCES

1. Braun V., Clarke V. Using thematic analysis in psychology. *Qualitative research in psychology*. 2006; 3(2): 77-101. (In Eng.) <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
2. Ajayi T.O., Daramola O.T., Adhuze O. Cost management evolution in building projects: a review of innovations and challenges. *Civil Engineering*. 2024;9:80-95. (In Eng.) <https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2024.909009>
3. Cost Management Strategies for Construction Projects: A Review of Best Practices: a quantity surveyors perspective. CTN PRESS. 2023. [online] (In Eng.) URL: <https://cevnews.in/2023/09/cost-management-strategies-for-construction-projects-a-quantity-surveyors-perspective/> (accessed 15.02.2025)
4. Kelly J. Value Management in Design and Construction. Ebook. 2003. [online] (In Eng.) URL: <https://www.overdrive.com/media/4050603/value-management-in-design-and-construction> (accessed 15.02.2025)
5. Graham D., Male S., Kelly J. Value Management of Construction Projects. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley. 2014. 568 p. (In Eng.)
6. Al-Yami A., Sanni-Anibire M. O. BIM in the Saudi Arabian construction industry: State of the art, benefit and barriers. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2021;39(1): 33-47. (In Eng.) <https://doi.org/10.1108/ijbpa-08-2018-0065>
7. Bryde D., Broquetas M., Volm J. M. The project benefits of building information modelling (BIM). *International Journal of Project Management*. 2014;31(7):971-980. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
8. Jrade A., Jalaee F. Integrating building information modelling with sustainability to design building projects at the conceptual stage. *Building Simulation*. 2013; 6:429-444. (In Eng.) <https://doi.org/10.1007/s12273-013-0120-0>
9. Sotelino E., Saieg P., Nascimento D., Caiado R. Interactions of building information modelling, lean and sustainability on the architectural, engineering and construction industry: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*. 2018;174: 788-806. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.030>

10. Panteli C., Kylili A., Fokaides P. Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 265, 121766. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121766>
11. Adam A., Josephson P., Lindahl G. Aggregation of factors causing cost overruns and time delays in large public construction projects: Trends and implications. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 201; 24: 393-406. (In Eng.) <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2015-0135>
12. Durdyev S. Review of construction journals on causes of project cost overruns. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021;28(4):1241-1260. (In Eng.) <https://doi.org/10.1108/ecam-02-2020-0137>
13. Love P., Ahiaga-Dagbui D., Irani Z. Cost overruns in transportation infrastructure projects: Sowing the seeds for a probabilistic theory of causation. *Transportation Research Part A – Policy and Practice*. 2016;92:184-194. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2016.08.007>
14. Asiedu R. O., Adaku E. Cost overruns of public sector construction projects: a developing country perspective. *International Journal of Managing Projects in Business*. 2020; 13(1): 66-84. (In Eng.) <https://doi.org/10.1108/IJMPB-09-2018-0177>
15. Batselier J., Vanhoucke M. Improving project forecast accuracy by integrating earned value management with exponential smoothing and reference class forecasting. *International Journal of Project Management*. 2017;35:28-43. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2016.10.003>
16. Ikechukwu A., Fidelis I., Kelvin O. Causes and effects of cost overruns in public building construction projects delivery, in Imo State, Nigeria. *IOSR Journal of Business and Management*. 2017;19:13-20. (In Eng.) <https://doi.org/10.9790/487X-1907021320>
17. Lamptey-puddicombe A., Emmanuel A. Evaluation of risk of fluctuation claim on cost of construction projects in the South-South Zone of Nigeria. *Civil Engineering and Architecture*. 2018;6: 252-256. (In Eng.) <https://doi.org/10.13189/CEA.2018.060504>
18. Netto J. T., de Oliveira N. L. F., Freitas A. P. A., dos Santos J. A. N. Critical factors and benefits in the use of earned value management in construction. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. 2020;17(1): 1-10. (In Eng.) <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2020.007>
19. Aramali V., Gibson Jr G. E., El Asmar M., Cho N. Earned value management system state of practice: Identifying critical sub-processes, challenges, and environment factors of a high-performing EVMS. *Journal of Management in Engineering*. 2021; 37(4), 04021031. (In Eng.) [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000925](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000925)
20. Holloway S. The role of supply chain management in shaping marketing strategies for emerging markets. Preprint. *Business, Economics and Management*. 2024. (In Eng.) <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1428.v1>

Об авторах:	About the authors:
Римма Альбертовна Гадельшина Магистрант по направлению подготовки: «Организация и управление инвестиционно- строительными проектами», Санкт- Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт- Петербург, Россия gadelshina.rimma99@gmail.com https://orcid.org/0009-0002-7848-4263	Rimma A. Gadelshina Master's Student in the Program: «Organization and Management of Investment and Construction Projects», Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint- Petersburg, Russia gadelshina.rimma99@gmail.com https://orcid.org/0009-0002-7848-4263

Ольга Валентиновна Маковецкая-Абрамова канд. техн. наук, доцент, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия mak-abramova.olga@yandex.ru https://orcid.org/0000-0003-0672-6980	Olga V. Makovetskaya-Abramova Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Civil Engineering and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia mak-abramova.olga@yandex.ru https://orcid.org/0000-0003-0672-6980
Заявленный вклад авторов Р.А. Гадельшина – создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация. О.В. Маковецкая-Абрамова – методология, руководство исследованием и концептуализация	Authors' contribution R.A. Gadelshina – creation of a draft and the final version of the manuscript, revision of the manuscript and its editing, visualization. O.V. Makovetskaya-Abramova – methodology, research management, conceptualization
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interests The authors declare no conflict of interests
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	All authors have read and agreed to the published version of the manuscript
Статья поступила в редакцию: 26.05.2025	Received: 26.05.2025
Одобрена после рецензирования: 21.08.2025	Approved after reviewing: 21.08.2025
Принята к публикации: 11.09.2025	Accepted for publication: 11.09.2025