

АГРОИНЖЕНЕРИЯ
4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК 631.372:629.033
<https://doi.org/10.28983/asj.y2025i8pp111-120>

**Испытания съемной гусеничной ходовой системы
сельскохозяйственного трактора класса 0,9**

**Отари Назирович Дидманидзе, Роман Сергеевич Федоткин, Виталий Алексеевич Крючков,
Никита Иванович Дегтярев, Даниил Максимович Дудин**
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия
e-mail: fedotkin@rgau-msha.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты функциональных испытаний съемной гусеничной ходовой системы заднего ведущего моста трактора Беларус-622 с возможностью регулирования площади контакта гусеницы с опорной поверхностью. Проанализирован отечественный и зарубежный (Дания, Швейцария, Швеция, Норвегия) опыт испытаний и эксплуатации ходовых систем для различной техники, включая технику, оснащенную съемными гусеничными ходовыми системами. Выявлено отсутствие общей методики испытаний и учета специфических факторов, в т.ч. перераспределения давления на почву вдоль опорной ветви гусеницы. Проведен расчет и сравнение показателя среднего давления движителей на почву для трактора базового колесного исполнения, оснащенного тяговыми гусеничными модулями (съемной гусеничной ходовой системой) для заднего и обоих ведущих мостов. Сравнительный анализ показал, что даже без увеличения площади контакта трактор со съемной гусеничной ходовой системой только на заднем мосту оказывает значительно меньшее воздействие на почву, чем тот же трактор с колесным движителем – 59,93 против 82,11 кПа. Испытания в условиях реальной эксплуатации проводили на опытном невспаханном поле со среднесуглинистым типом почвы в Рязанской области. Кинематическое несоответствие между передними и задними ведущими колесами привело к пробуксовке передних колес и потребовало отключения переднего моста. Для оценки тяговой способности трактора и ее возможного увеличения за счет установки съемной гусеничной ходовой системы проводили испытания по транспортированию сельскохозяйственных машин для тракторов более высокого тягового класса: полуприцепных опрыскивателей Caffini и навесной сеялки Деметра 2276-2019. При работе с сеялкой произошла потеря контакта передних колес с опорной поверхностью и их вывешивание с перемещением всей массы трактора и машины только на задние гусеничные модули. При этом выявлена высокая несущая способность гусеничных модулей и, в частности, стабилизатора тангенциальной устойчивости. Дефектовка выявила единичные признаки естественного износа поверхностей трения. Отказов функционирования не выявлено. Сформулированы направления дальнейших исследований съемных гусеничных ходовых систем в части совершенствования методик эксплуатационных испытаний, конструкторско-технологических параметров гусеничных модулей, в том числе за счет внедрения средств автоматизации и роботизации для создания адаптивных к различным почвенно-климатическим условиям ходовых систем.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, испытания, задний ведущий мост, ходовая система, тяговый гусеничный модуль, резиноармированная гусеница, эксплуатационные свойства

Для цитирования: Дидманидзе О. Н., Федоткин Р. С., Крючков В. А., Дегтярев Н. И., Дудин Д. М. Испытания съемной гусеничной ходовой системы сельскохозяйственного трактора класса 0,9 // Аграрный научный журнал. 2025. № 8. С. 111–120. <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i8pp111-120>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Testing of the removable caterpillar undercarriage system
of a class 0.9 agricultural tractor**

Otary N. Didmanidze, Roman S. Fedotkin, Vitaliy A. Kryuchkov, Nikita I. Degtyarev, Daniil M. Dudin
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
e-mail: fedotkin@rgau-msha.ru





Abstract. The paper presents the results of functional tests of the removable caterpillar undercarriage system of the rear drive axle of the Belarus-622 tractor with the ability to regulate the contact area of the caterpillar with the supporting surface. Domestic and foreign (Denmark, Switzerland, Sweden, Norway) experience in testing and operating undercarriage systems for various vehicles and machines is analyzed, including in relation to vehicles equipped with removable tracked undercarriage systems. The lack of a general test methodology and taking into account specific factors, including the redistribution of pressure on the soil along the support branch of the caterpillar, was revealed. A calculation and comparison of the average pressure of the movers on the soil was carried out for a tractor of a basic wheeled design equipped with a traction caterpillar units (removable caterpillar undercarriage system) for the rear and both drive axles. This showed that even without increasing the contact area, a tractor with removable tracked undercarriage system only on the rear axle has a significantly smaller impact on the soil than the wheeled tractor – 59.93 versus 82.11 kPa. Field tests were carried out on an experimental unplowed field with medium loamy soil in the Ryazan region. A kinematic mismatch between the front and rear drive wheels led to the front wheels slipping and required the front axle to be disengaged. To assess the traction capacity of the tractor and its possible increase as a result of the installation of a removable caterpillar undercarriage system, tests were carried out on the transportation of agricultural machines for tractors of a higher traction class: semi-trailer sprayers Caffini and an integral planter Demetra 2276-2019. When working with the seeder, the front wheels lost contact with the supporting surface and they became suspended, with the entire weight of the tractor and seeder only to the rear tracked units. Despite this, a high load-bearing capacity of the tracked modules and the tangential stabilizer, in particular, was revealed. The flaw detection revealed isolated signs of natural wear of the friction surfaces. No operational failures were identified. Directions for further research into removable caterpillar undercarriage systems are formulated in terms of improving operational test methods, design and engineering parameters of tracked units, including through the introduction of automation and robotics to create undercarriage systems adaptive to various soil and climatic conditions.

Keywords: agricultural tractor, tests, rear drive axle, undercarriage system, traction caterpillar unit, rubber reinforced track, operational properties

For citation: Didmanidze O. N., Fedotkin R. S., Kryuchkov V. A., Degtyarev N. I., Dudin D. M. Testing of the removable caterpillar undercarriage system of a class 0.9 agricultural tractor. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2025;(8):111–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i8pp111-120>.

Введение. Традиционные тяговые испытания самоходной сельхозтехники постепенно заменяются физическими, математическими и имитационными моделями, которые позволяют представить почву в виде элементарных частиц, обладающих размерами и физико-механическими свойствами. Задавая при этом параметры ходовых систем и рабочих органов, можно оценить напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, а также уровень напряжений в почве [12, 14, 20]. Моделирование позволяет даже на стадии проектирования машины оценить преимущества различных типов ходовых систем. Особенно интересны математические модели взаимодействия с почвой новых видов ходовых систем – съемных гусеничных ходовых систем (СГХС) или тяговых гусеничных модулей (ТГМ) для колесных тракторов [14].

СГХС – индивидуальные гусеничные модули. Они устанавливаются вместо каждого колеса трактора без внесения изменений в конструкцию машины [2, 4, 18]. Таким образом, по отношению с СГХС как к техническому решению, находящему пока еще ограниченное применение на современной технике, натурные испытания являются основным методом оценки реальных функциональных и эксплуатационных свойств, особенно для экспериментальных или опытных образцов. Это вызвано в первую очередь неполнотой математического описания поведения трактора, оснащенного СГХС, заключающегося в особенностях работы системы поддрессоривания, распределения нагрузки от навешиваемых и прицепных сельскохозяйственных машин по мостам и вдоль линии контакта опорной ветви гусеницы с почвой, а также неоднородности и неравномерности передачи крутящего момента от ведущего колеса гусенице. Эти факторы приводят к переуплотнению почвы.

Уплотняющее воздействие ходовых систем на почву (УВП) приводит к нарушению ее репродуктивных и агробиологических свойств, снижению урожайности [2, 10, 15, 19]. Тяговое сопротивление от машин и орудий динамично изменяется в процессе эксплуатации и перераспределяет нагрузки на СГХС. В результате изменяется касательная сила тяги и динамическая нагрузка трактора [6, 15, 19]. Увеличение площади опорной поверхности ходовых систем является единственной конструктивной мерой снижения УВП.



Исследованию эксплуатационных свойств гусеничных автомобилей, тракторов и комбайнов, в т.ч. с СГХС, посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей [5–7, 12–20]. Имеющийся опыт показывает, что не существует единообразной методики, позволяющей оценить все особенности работы конструкции в полевых условиях. Это позволяет исследователям более гибко подходить к разработке программ и методик испытаний в зависимости от конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

О преимуществах гусеничной сельскохозяйственной техники свидетельствуют испытания трактора Claas Challenger 2-65E (масса ок. 19 т) с резиноармированной гусеницей (РАГ) на бурых лесных слабоненасыщенных оподзоленных почвах. Проводили сравнение с колесным трактором массой ок. 10 т. Методика испытаний предусматривала движение трактора по горизонтальной поверхности поля и в борозде. В результате обнаружили выраженную зависимость УВП от тягового сопротивления плуга. Гусеничный трактор при недогруженной передней части показал значительное превышение УВП в задней части гусениц. После настройки плуга ситуация кардинально поменялась, что указывает на необходимость балансировки тяговой машины и орудия для минимизации УВП при вспашке [15].

Трактор класса 1,4 с ТГМ в условиях Амурской области превзошел колесный аналог по тягово-сцепным свойствам. Получена эмпирическая зависимость для расчета силы тяги трактора с полным приводом на СГХС [10].

Распространенным также является подход, связанный с экспериментальной оценкой эксплуатационных свойств трактора по показателям тяговой характеристики: удельному расходу топлива, тяговой мощности, буксования, скорости движения и тяговым КПД в зависимости от усилия на крюке. Одно из таких исследований трактора с СГХС позволило выявить повышение тяговой мощности и снижение мощности буксования примерно на 10,0–14,0 % в сравнении со стандартной колесной компоновкой. При этом производительность трактора с СГХС увеличилась на 22,0–26,0 % [11]. Буксование колесного трактора составило около 15,0, а колесно-гусеничного – всего 6,9 % при значении крюковой нагрузки 12,9 кН. Показатели переуплотнения почвы после проездов колесного трактора превышают значения для колесно-гусеничного трактора: по твердости почвы – на 6,0, по плотности – на 11,0 % [11].

Испытания по оценке тягово-сцепных свойств тракторов на различных почвенных фонах при оснащении различными типами движителей: СГХС на одном и обоих мостах, сдвоенными колесами и колесами с водозаполненными шинами показали наибольшее тяговое усилие при наименьшем УВП для трактора с СГХС на обоих мостах [6, 12, 13]. Отметили недостаточную полноту исследований перераспределения массы по осям трактора для различных типов движителей и влияние восстановления рельефа и свойств почвы на движение машины.

В случае сравнительных испытаний свеклоуборочного комбайна в реальных условиях эксплуатации [14] на уборке с полной загрузкой в Норвегии провели оценку влияния на почвы с созданием свойственного рыхлого грунта. Датчики устанавливали на глубине 0,10 и 0,35 м для замеров давления и воздухопроницаемости почвы. При прочих равных условиях СГХС в отличие от шины может воспринять большие нагрузки с сохранением нормированного значения давления на почву. Однако исследователи отмечают, что метод испытаний недостаточен и должен быть усовершенствован, т.к. наблюдается неравномерность распределения напряжений в почве под катками и неверно интерпретируются данные по воздухопроницаемости под влиянием больших касательных напряжений под гусеницей.

Все исследователи отмечают снижение давления на почву при установке СГХС и необходимость учитывать смену характера воздействия на почву по сравнению с колесным движителем с динамического на квазистатический. Установка СГХС на заднем мосту уже позволяет снизить УВП до 2 раз [13, 15]. Один только этот факт указывает на необходимость создания и совершенствования конструкций СГХС с РАГ для тяговых и транспортных сельскохозяйственных машин: тракторов [11, 16, 17], комбайнов [4, 15] и автомобилей [5]. Рассмотренные работы показывают, что исследователи прибегают к различным методам оценки эффективности и функциональных свойств ходовых систем тракторов в реальных условиях эксплуатации, в частности, в отношении СГХС, чьи кинематические особенности значительно отличаются от традиционных гусеничных ходовых систем. Это справедливо и в отношении созданной конструкции СГХС для трактора класса 0,9 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Трактор Беларус-622 со съемной гусеничной ходовой системой ведущего моста

Figure 1 – Belarus-622 tractor with removable caterpillar drive axle system

провести испытания в условиях реальной эксплуатации – транспортирование посевной и оросительной техники на опытном поле.

Таким образом, для проверки функциональных свойств и работоспособности СГХС провели испытания трактора Беларус-622 на опытном поле Института семеноводства и агротехнологий (Рязанская область). Испытания проводили летом, в сухую погоду, при температуре окружающей среды 21 °С и относительной влажности 52–69 %. Почвенные условия: невспаханное поле со среднесуглинистым типом почвы (обработку не проводили не более одного сезона) и грунтовая дорога. Специальное измерение физических свойств почвы и грунтовой дороги не проводили.

Испытания предусматривали прямолинейное движение и маневрирование трактора без нагрузки и в агрегате с различными сельскохозяйственными машинами, предназначенными для тракторов мощностью от 80 л. с.: опрыскивателями Caffini Prestige 60 3300 (масса 6572 кг) и Caffini Trend Reverse Tower 2000 (масса 2740 кг), а также навесной сеялкой Деметра 2276-2019. По данным АНЦ «Донской», навесная сеялка Деметра при габаритных размерах 2,73×2,50×2,12 м, ширине захвата 0,15–1,65 м, глубине заделки семян до 9 см и массе 1200 кг (без бункера непрерывного высева) предназначена для тракторов класса 1,4.

Базовый колесный трактор с номинальным тяговым усилием 820 кг и максимальной разрешенной массой буксируемых прицепов до 6000 кг заведомо не соответствует требованиям агрегатирования с указанными машинами.

Помимо возможности движения под нагрузкой оценивали работоспособность механизма регулирования площади опорной поверхности в статических условиях.

Исходя из особенностей и условий применения, обслуживания и ремонта тракторов к конструкции СГХС предъявляются следующие требования: относительно легкая и прочная рамная конструкция; консольное расположение узла привода для упрощения монтажа и демонтажа СГХС на ступицу полуоси трактора; съемное ведущее колесо, не требующее специального инструмента для установки; наличие системы микроподдрессирования для гашения высокочастотных вибраций; наличие стабилизатора тангенциальной устойчивости для предотвращения переворота СГХС.

Консоль узла привода должна выдерживать полную массу трактора, приходящуюся на задний мост. СГХС должны свободно размещаться в подкрыльном пространстве колес.

Результаты исследований. Конечная конструкция испытуемых СГХС в своем составе содержит механизм натяжения, систему регулирования площади контакта гусеницы с опорной поверхностью, гусеничное зацепление, разработанное под особенности конструкции и принципа действия РАГ [18], ограничитель переворота – стабилизатор устойчивости с упругими элементами, упругую систему поддрессирования. Сборка и установка СГХС на тракторе показала функциональную пригодность всех вышеперечисленных элементов конструкции.

Расчетная оценка давления на почву трактора в исходной колесной компоновке, а также с СГХС, установленными на заднем и обоих мостах (рисунок 2), показала, что даже без увеличения площади контакта гусеницы с опорной поверхностью трактор с СГХС на заднем мосту обеспечивает давление на почву менее 80 кПа. Данное значение давления на почву по ГОСТ Р 58655-2019 является самым строгим нормативом при наибольшей влажности почвы в весенний период в слое 0–30 см и наимень-



шей влагоемкости свыше 0,9. Это обстоятельство свидетельствует о значительном тяговом потенциале машины, что обеспечивает возможность работы в любых почвенно-климатических условиях.

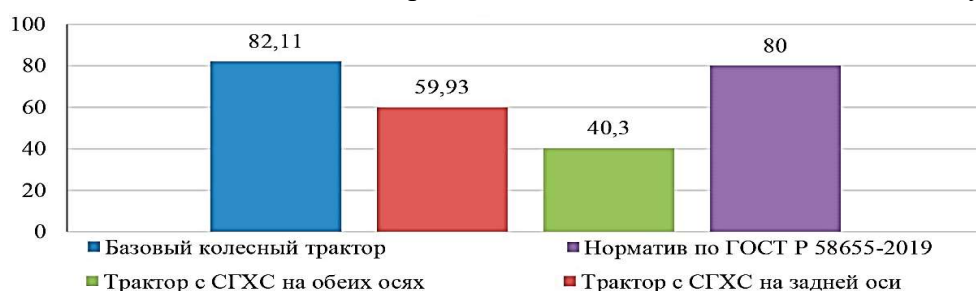


Рисунок 2 – Среднее давление на почву трактора класса 0,9 с различными типами движителей

Figure 2 – Average soil pressure of a 0.9 class tractor with various types of propellers

Основной проблемой установки СГХС вместо колесного движителя при сохранении передних колес остается характерное для тракторов с компоновкой 4К4а кинематическое несоответствие скоростей переднего и заднего мостов в пересчете на линейные [19]. По тем же причинам не допускается установка колес равного диаметра на тракторы с такой компоновкой.

В ходе испытаний кинематическое несоответствие привело к пробуксовке передних колес, а в некоторых случаях – к юзу СГХС, во избежание чего отключали привод переднего моста, т.е. кинематическое несоответствие скоростей мостов трактора несколько ограничивает применение СГХС в виде необходимости отключения переднего ведущего моста. Однако благодаря лучшей реализации сцепной массы трактора, приходящейся на задний мост, отчасти обеспечивается полнота загрузки двигателя.

За счет уменьшения радиуса звездочки относительно статического радиуса шины пропорционально уменьшается скорость движения внутри каждого диапазона. Это снижает значение максимальной скорости трактора. Возникает необходимость ручного подбора передачи при выполнении агротехнологических операций.

При движении трактора на рабочих скоростях отмечается высокочастотная вибрация и поперечное раскачивание трактора. Измерения параметров вибрации осуществляли при помощи виброизмерительного комплекса Zetlab, включающего модуль АЦП-ЦАП ZET 230 и аналоговые акселерометры ВС-201, дополнительно – по трехосевому датчику вибрации Zetlab ZET 7152-N-VER.1.

Вибрация и поперечное раскачивание трактора могло быть вызвано неточностями сборки в полевых условиях. Увеличение сопротивления движению трактора вследствие установки СГХС исключает возможность движения накатом и незначительно увеличивает радиус поворота.

При всех указанных особенностях трактор с СГХС выполнил транспортировку полуприцепных опрыскивателей и работы в агрегате с полунавесной сеялкой (рисунок 3).

При работе с сеялкой Деметра 2276-2019, предназначенной для тракторов тягового класса 1,4, произошла потеря контакта передних колес с опорной поверхностью. Это привело к их вывешиванию и переносу полной массы трактора на гусеничные модули (рисунок 3, г). Причина заключается в отсутствии балластирования трактора. Для СГХС на заднем мосту отмечали снижение тягового усилия при увеличении буксования, вызванное неблагоприятным распределением массы по мостам [6, 12, 13]. Поэтому для имитации наиболее тяжелых условий работы СГХС балластирование трактора намеренно не проводили. Маневрирование трактора при вывешенных передних колесах осуществляли подтормаживанием бортов.

Отсутствие балластов на передней части трактора увеличило влияние тягового сопротивления сеялки. Передний мост вывешен и отключен. Соответственно, все несущие и тяговые функции легли на СГХС. Зафиксировано, что трактор двигался прямолинейно в агрегате с сеялкой только на СГХС. При этом сеялка находилась в рабочем положении. Это обусловлено большей (на 70,6 %) площадью контактной поверхности СГХС по сравнению со штатными шинами задних колес (0,58 м² против 0,34 м²). При штатной колесной компоновке трактора на данном режиме работы также произошло бы вывешивание передних колес. Но трактор бы не преодолел тяговое сопротивление сеялки – произошла бы пробуксовка задних колес или заглохание двигателя.

Таким образом, доказано, что СГХС обладают повышенной несущей способностью, а также отмечается факт повышения тягово-сцепных свойств трактора, что переводит его в более высокий класс тяги по способности агрегатироваться с более широким спектром сельхозмашин и орудий, предназначенных для тракторов тягового класса 1,4.





а



б



в



г

Рисунок 3 – Работа трактора в агрегате с различными сельхозмашинами:
 а – полуприцепной опрыскиватель Caffini Prestige 60 3300; б – полуприцепной опрыскиватель
 Caffini Trend Reverse Tower 2000; в – навесная сеялка Деметра 2276-2019; г – вывешивание
 передних колес при работе в агрегате с сеялкой Деметра 2276-2019

Figure 3 – Tractor operation in conjunction with various agricultural machines:
 а – semi-trailer sprayer Caffini Prestige 60 3300; б – semi-trailer sprayer Caffini Trend
 Reverse Tower 2000; в – integral planter Demetra 2276-2019; г – hanging out the front
 wheels when working in conjunction with the planter Demetra 2276-2019





Потеря контакта передних колес с опорной поверхностью и вывешивание переднего моста трактора привело к резкому увеличению переворачивающего момента на задние гусеничные модули. При этом механизм ограничения поворота, разработанный для СГХС, показал высокую надежность. Фактически механизм позволил избежать непредсказуемого изменения углов крена и дифферента корпуса трактора и, соответственно, его опрокидывания. Ограничитель поворота не получил никаких видимых повреждений в процессе испытаний.

Дефектовка СГХС позволила выявить единичные признаки естественного износа поверхностей трения и лакокрасочного покрытия, вызванные торцевым биением ведущих колес (рисунок 4), а также незначительные изменения сходных параметров конструкции, выраженные в смещении соединительных пальцев тяг и рычагов, разрушении клеевых соединений и отслаивании резиновых демпферов ограничителя поворота, износ покрытия его ограничительной пластины, вызванные достижением ограничителем максимальных углов срабатывания.



Рисунок 4 – Характер износа зубьев ведущих колес: а – правого модуля СГХС; б – левого модуля СГХС

Figure 4 – The wear pattern of the teeth of the driving wheels: a – right module of the removable caterpillar undercarriage system; b – left module of the removable caterpillar undercarriage system

По характеру износа зубьев видно, что обеспечен поверхностный контакт зубьев с цевкой РАГ. Это свидетельствует о достоверности разработанной ранее методики проектирования ведущих колес для РАГ. Однако неточность изготовления и сборки составного венца привели к смещению зоны контакта на одной из звездочек к основанию зубьев. Также отмечали формирование фаски по торцам зубчатых венцов.

Отказов функционирования СГХС и ее элементов не выявлено. Отдельным этапом проверки функциональных свойств стало исследование работы механизма регулирования площади контакта гусеницы с опорной поверхностью, которое проводили в стационарных условиях без передвижения машины и создания предельного тягового усилия. Основной принцип, заложенный в механизм, заключается во взаимном изменении углов атаки переднего и заднего направляющих катков таким образом, чтобы часть высвобождаемой длины РАГ при увеличении угла атаки с одной стороны позволяла свести угол атаки с противоположной стороны к возможному минимуму. Это дает возможность снизить уровень УВП, повысить эффективность использования сцепной массы за счет лучшего распределения массы орудия, улучшить показатели устойчивости и проходимости. Уменьшение площади контакта гусеницы с опорной поверхностью снижает сопротивление при движении по дорогам с твердым покрытием.

На рисунке 5 показана кинематика механизма регулирования площади контакта РАГ с опорной поверхностью.

Исследование работы механизма позволило выявить общее несовершенство конструкции, а также недостаточную длину рабочей части талрепа, не позволившей установить максимальное крайнее положение. Что касается функциональности, то в режиме максимальной площади из-за больших формовочных радиусов РАГ возникают сложности с ее натяжением в верхнем положении механизма натяжения из-за малого плеча и силы воздействия. В данных обстоятельствах целесообразно в качестве механизма натяжения применять гидроцилиндр, а не винтовую пару. Талреп в качестве основного элемента регулировки площади контакта с опорной поверхностью может быть достаточным элементом при отсутствии необходимости повышения скорости его выдвигания/втягивания и достаточной длины регулирующего корпуса.

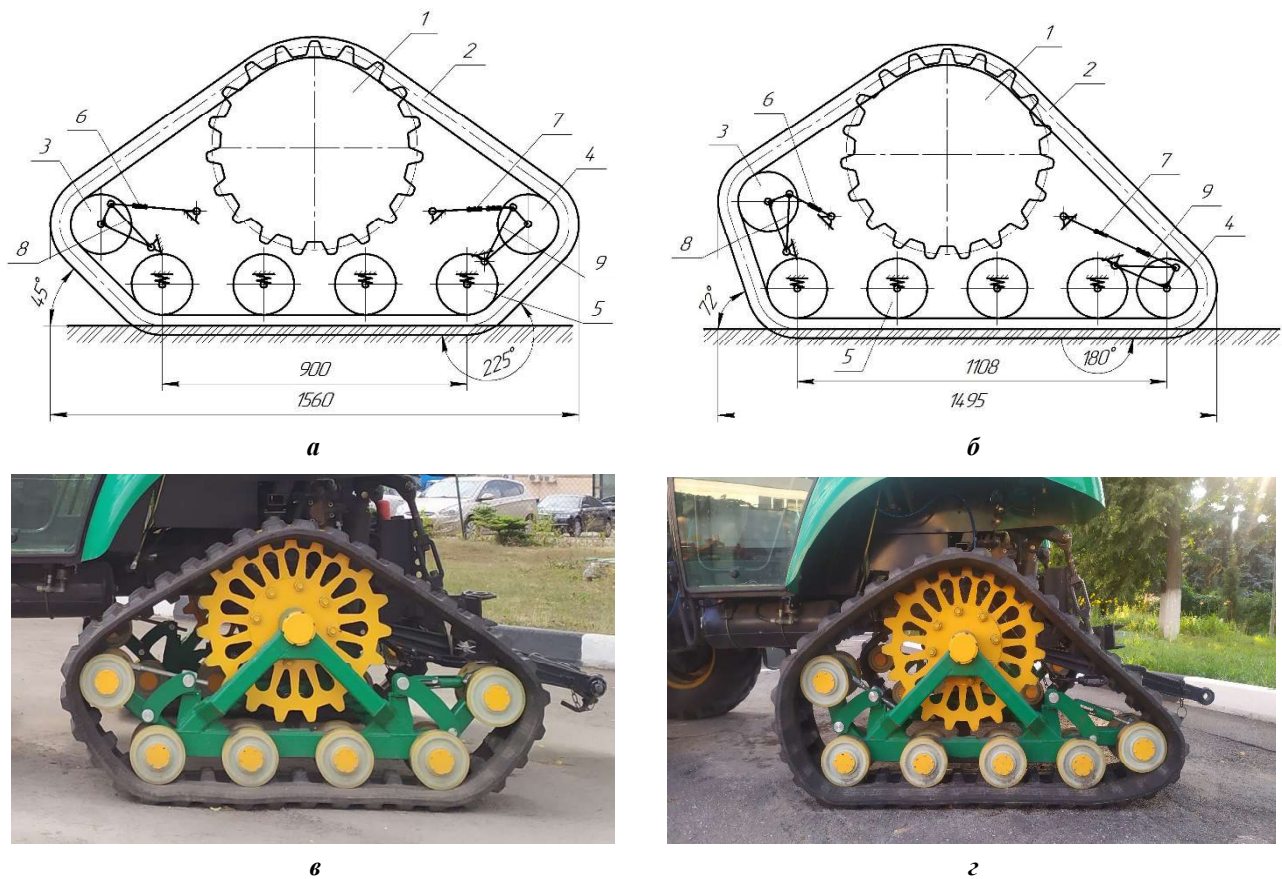


Рисунок 5 – Кинематика механизма регулирования площади контакта гусеницы с опорной поверхностью:
a, б – схематичное изображение работы механизма с размерами опорной ветви РАГ:
 1 – ведущее колесо; 2 – РАГ; 3, 4 – переднее и заднее направляющее колесо с внешней амортизацией;
 5 – опорное колесо с внешней амортизацией; 6, 8 – винт и кривошип механизма натяжения;
 7, 9 – талреп и кривошип механизма регулирования площади опорной поверхности;
в, г – изображение работы механизма регулирования площади контакта при проверке в стационарных условиях

Figure 5 – Kinematics of the mechanism for regulating the contact area of the caterpillar with the support surface:
a, b – layout view of the mechanism with the dimensions of the support branch of the rubber-reinforced track:
 1 – drive wheel; 2 – rubber-reinforced track; 3, 4 – front and rear guide wheels with external shock absorption;
 5 – support wheel with external shock absorption; 6, 8 – screw and crank of the tension mechanism;
 7, 9 – turnbuckle and crank of the support surface area control mechanism;
c, d – view of the operation of the contact area control mechanism during testing in stationary conditions

Полученные результаты позволили сформировать рекомендации для дальнейшей работы.

1. Установка на серийный трактор нового движителя предполагает проведение комплекса испытаний по оценке эксплуатационных свойств. Для этого необходимо доработать конструкцию СГХС с устранением выявленных отказов и повреждений, а также негативных особенностей.

2. Требуется совершенствование методики испытаний с учетом особенностей эксплуатации СГХС, выявленных как в текущих испытаниях, так и в описанных отечественных и зарубежных исследованиях, которые будут включать не только перераспределение сил между мостами, но и внутри опорной ветви гусеничного модуля, а также упругих эффектов податливости почвы, эффектов юза недогруженных мостов и касательных сдвигающих усилий в почве под опорной ветвью.

3. В конструктивном плане необходимо устранить буксование передних колес и юз задних СГХС, а также обеспечить скорости движения трактора на уровне штатного колесного исполнения.

4. Следует снизить вибронагруженность и обеспечить плавность хода трактора. Это можно сделать, повысив точность изготовления и сборки СГХС, а также обеспечив податливость упруго-демпфирующих элементов СГХС на уровне штатной пневматической шины.

Наиболее перспективным вариантом оснащения трактора техническими средствами повышения тягово-сцепных свойств является установка СГХС на обе оси трактора [6, 12, 19, 20] с проведением мероприятий по снижению сопротивления повороту управляемых движителей.



Обеспечение синхронной работы механизмов натяжения и регулирования площади контакта с опорной поверхностью с соответствующим изменением геометрии модуля открывает возможность подстройки гусеничного обвода СГХС к любым почвенно-климатическим условиям. Также возможна реализация блокировки системы подрессоривания для определенных технологических операций. Данные предпосылки обосновывают необходимость создания адаптивной СГХС с автоматизированной и роботизированной системами управления в зависимости от конкретных условий и режимов работы.

Заключение. Изучили отечественный и зарубежный опыт экспериментальной проверки гусеничных ходовых систем и СГХС в различных условиях. Установили, что существующие методики, а также математические модели (при проведении испытаний в виртуальных средах) не учитывают многие факторы, возникающие в процессе реальной эксплуатации ходовых систем, такие как перераспределение нагрузки по мостам и внутри гусеничного обвода. Кроме того, существует специфика определения касательной силы тяги, что требует большего количества натуральных испытаний СГХС для выявления возможных факторов и корректировки методик с их учетом. Также установили, что не существует единой методики исследования ходовых систем в целом и СГХС в частности.

Провели функциональные испытания экспериментального образца СГХС, устанавливаемого вместо задних ведущих колес трактора класса 0,9. Результаты испытаний подтверждают надежность СГХС и ее элементов, ее пригодность для реальной эксплуатации. Установили, что использование СГХС хотя бы на заднем мосту снижает давление на почву до 59,93 кПа, что обеспечивает выполнение самого строгого норматива в 80 кПа. Эти значения гарантируют повышение тягово-цепных свойств, что подтверждается экспериментально на работах по перемещению опрыскивателей Caffini и сеялки Деметра 2276-2019.

Благодаря повышению тягово-цепных свойств и навесоспособности, трактор достиг переменного тягового класса 0,9-1,4 по сцеплению. Снижение давления на почву возможно до 60 кПа при установке СГХС на задний ведущий мост и до 40 кПа – при установке на оба моста. УВП, соответственно, в 1,38 и в 2,04 раза меньше по сравнению с базовой колесной компоновкой, что отвечает даже самым строгим требованиям нормативов.

Исследования также позволили выявить недостаток в виде пробуксовки передних колес из-за кинематического несоответствия передних колес и ведущих колес задних СГХС, что потребовало необходимости отключения привода переднего ведущего моста.

Основные направления дальнейших исследований: увеличение скорости движения трактора с СГХС до уровня колесного трактора за счет бортовых редукторов; разработка СГХС для переднего ведущего моста трактора с учетом кинематического несоответствия, присущего тракторам с колесной формулой 4К4а; совершенствование конструкции системы подрессоривания для снижения вибронужденности и повышение плавности хода трактора; создание и совершенствование методик испытаний тракторов с СГХС; создание адаптивных СГХС с автоматизированными и роботизированными системами управления механизмом регулирования площади контакта гусеницы с опорной поверхностью.

Практическая значимость применения разработанной СГХС состоит в увеличении урожайности сельхозпродукции в результате более равномерного распределения давления на опорную поверхность, снижения потерь на буксование и исключения срыва плодородного слоя почвы; повышении качества сельскохозяйственных работ благодаря эффективности использования сцепного веса и лучшему перераспределению массы сельскохозяйственного орудия по мостам; расширении функциональных качеств трактора при агрегатировании со шлейфом машин для трактора класса 1,4; возможности работы в любых почвенно-климатических условиях.

Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. Дидманидзе О. Н., Девянин С. Н., Парлюк Е. П. Трактор сельскохозяйственный: вчера, сегодня, завтра // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. Т. 21. № 1. С. 74–85. [Didmanidze O. N., Devyanin S. N., Parlyuk E. P. Past, present, future of agricultural tractors. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020;21(1):74–85. (in Russ.)].
2. Зернокормоуборочные комбайны (основы теории и конструкторско-технологические устройства) / А. М. Емельянов [и др.]. Благовещенск: ДальГАУ, 2013. 285 с. [Caterpillar soil grain combine harvesters (bases of theory and constructive-technological device) / A. M. Emelyanov, I. V. Bumbar, M. V. Kandelya, V. N. Ryabchenko, E. M. Shpilev. Blagoveshhensk, 2013. 285 p. (in Russ.)].



3. К вопросу создания отечественного гусеничного трактора для современного сельскохозяйственного производства / В. М. Шарипов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 2. С. 39–49. [Creating a domestic caterpillar tractor for modern agricultural production / V. M. Sharipov, A. Yu. Izmaylov, A. S. Dorokhov, R. S. Fedotkin, V. A. Kryuchkov, M. Yu. Esenovskiy-Lashkov, E. V. Ovchinnikov. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;(2): 39–49. (In Russ.)].

4. К вопросу создания экологически безопасных всесезонных автомобилей сельскохозяйственного назначения / З. А. Годжаев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 3. С. 48–52. [On the development of environmentally friendly all-season vehicles for agricultural purposes / Z. A. Godzhaev, A. Yu. Izmajlov, N. E. Evtushenkov, M. L. Kryukov. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;(3):48–52 (In Russ.)].

5. К обоснованию применения гусеничных машин в условиях дальнего востока / М. В. Канделя [и др.] // Дальневосточный аграрный вестник. 2018. № 2(46). С. 159–167. [Kandelya M. V., Lipkan A. V., Ryabchenko V. N., Samujlo V. V. The question of substantiating the use of tracked vehicles in the Far East. *Far Eastern Agrarian Herald*. 2018;2(46):159–167 (In Russ.)].

6. Канделя М. В., Канделя Н. М. Определение касательной силы тяги трактора класса 1,4 на полугусеничном ходу // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2021. № 1(42). С. 32–35. [Kandelya M. V., Kandelya N. M. Determination of tractive effort of class 1,4 tractor on half-track unit. *Vestnik Priamurskogo Gosudarstvennogo Universiteta im. Sholom-Alejkhema*. 2021;1(42):32–35. (In Russ.)].

7. Канделя М. В., Канделя Н. М. Полевые испытания колесного трактора класса 1,4 с различной компоновкой ходовой части // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2021. № 1(42). С. 36–40. [Kandelya M. V., Kandelya N. M. Field tests of class 1.4 wheel tractor with various devices. *Vestnik Priamurskogo Gosudarstvennogo Universiteta im. Sholom-Alejkhema*. 2021;1(42):36–40. (In Russ.)].

8. Крючков В. А. К вопросу оптимизации трансмиссии колесных тракторов для установки съемных гусеничных ходовых систем // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3(28). С. 364–374. [Kryuchkov V. A. To the question of wheeled tractor transmission optimization for removable track undercarriage system mounting. *Innovatsii v Sel'skom Khozyajstve*. 2018;3(28):364–374. (In Russ.)].

9. Методика проектирования ведущих колес цевочного зацепления с резиноармированными гусеницами тяговых и транспортных машин / Р. С. Федоткин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 3. С. 24–32. [Design method of pin engagement drive sprockets with rubber-reinforced tracks of traction and transportation vehicles / R. S. Fedotkin, V. A. Kryuchkov, V. D. Bejnenson, V. L. Parfenov. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017;(3):24–32. (In Russ.)].

10. Согласование тягово-сцепных качеств движителей сельскохозяйственных мобильных энергетических средств с допустимым максимальным давлением на почву / А. В. Лавров [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. № 14(3). С. 9–14. [Matching the traction qualities of agricultural mobile power vehicles with the permissible maximum pressure on the soil / A. V. Lavrov, V. G. Shevtsov, A. V. Rusanov, V. A. Kazakova. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):9–14. (In Russ.)].

11. Федоткин Р. С. Выбор движителя для тракторов и комбайнов // Сельский механизатор. 2019. № 4. С. 2–3. [Fedotkin R. S. The choice of propulsion for tractors and combines. *Selskiy Mechanizator*. 2019;(4):2–3. (In Russ.)].

12. Construction of modern wide, low-inflation pressure tires per se does not affect soil stress. [L. ten Damme, M. Stetler, F. Pinet, P. Vervaet, T. Keller, L. J. Munkholm, M. Lamandé. *Soil & Tillage Research*. 2020;(204):104708].

13. Dwyer M. J., Okello J. A., Scarlett A. J. A theoretical and experimental investigation of rubber tracks for agriculture. *Journal of Terramechanics*. 1993;30(4):285–298.

14. Keller T., Arvidsson J. A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles. *Soil & Tillage Research*. 2016;(155):116–123.

15. Keller T., Trautner A., Arvidsson J. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. *Soil & Tillage Research*. 2002;(68):39–47.

16. Lamande M., Greve M. H., Schjonning P. Risk assessment of soil compaction in Europe – Rubber tracks or wheels on machinery. *Catena*. 2018;(167):353–362.

17. Performance of an agricultural tractor fitted with rubber tracks / G. Molari, L. Bellentani, A. Guarnieri, M. Walker, E. Sedoni. *Biosystems Engineering*. 2012;111(1):57–63.

18. Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction / J. Arvidsson, H. Westlin, T. Keller, M. Gillberg. *Soil & Tillage Research*. 2011;(117):103–109.

19. Soil structure response to field traffic: Effects of traction and repeated wheeling / L. ten Damme, P. Schjonning, L. J. Munkholm, O. Green, S. K. Nielsen, M. Lamandé. *Soil & Tillage Research*. 2021;(213):105128.

20. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations / T. Keller, M. Berli., S. Ruiz, M. Lamandé, J. Arvidsson, P. Schjonning, A. P. S. Selvadurai. *Soil & Tillage Research*. 2014;(140):106–117.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024; одобрена после рецензирования 19.10.2024; принята к публикации 27.10.2024.
The article was submitted 18.09.2024; approved after reviewing 19.10.2024; accepted for publication 27.10.2024.

