

Повышение эффективности лесных дисковых культиваторов на нераскорчёванных вырубках путём использования рекуперативной навесной системы

В.И. Посметьев^a, М.А. Савинков^b, В.О. Никонов^c

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Россия

^a posmetyev@mail.ru, ^b savinkov99max03@mail.ru, ^c 8888nike8888@mail.ru.

^a <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, ^b <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>.

Статья поступила 02.04.2026, принята 28.04.2026

Эксплуатация лесных почвообрабатывающих агрегатов на нераскорчёванных вырубках сопряжена с высокими динамическими нагрузками и значительной энергоёмкостью из-за сложного рельефа и высокой плотности препятствий. Существующие навесные системы, обладающие конструктивной жёсткостью, не обеспечивают качественного копирования поверхности, что приводит к неполному заглублению рабочих органов, поломкам и необходимости использования балластных грузов. Целью исследования является разработка и оценка эффективности принципиально новой рекуперативной навесной системы, направленной на повышение мобильности, надёжности и топливной экономичности агрегатов. В работе представлена конструкция рекуперативной навесной системы, интегрирующей рекуперативные устройства трактора и орудия. Ключевым элементом является пневмогидравлический аккумулятор, аккумулирующий энергию, которая в традиционных системах рассеивается в момент опускания орудия, при преодолении препятствий и колебаниях. Методика исследования включала сравнительные лабораторно-стендовые и полевые испытания опытного агрегата с рекуперативной системой и серийного культиватора с традиционной навеской. Результаты испытаний подтвердили высокую эффективность разработки. Установлено, что рекуперативная система снижает пиковые динамические нагрузки на дисковые батареи на 25–3 % за счёт демпфирующего эффекта, а также аккумулирует значительный объём гидравлической энергии. Это позволило полностью отказаться от балластных грузов, снизив массу орудия. Дополнительным преимуществом является улучшение качества обработки почвы за счёт лучшего копирования рельефа и сокращения эксплуатационных затрат. Выводы работы указывают на комплексное решение проблем надёжности и энергоэффективности лесных почвообрабатывающих агрегатов в сложных условиях нераскорчёванных вырубок.

Ключевые слова: лесные почвообрабатывающие агрегаты; дисковые культиваторы; рекуперативная навесная система; рекуперация энергии; динамические нагрузки; нераскорчёванные вырубки; топливная экономичность.

Improving the efficiency of forest disc cultivators on unrooted clear-cuts through the use of a regenerative mounted system

V.I. Posmetyev^a, M.A. Savinkov^b, V.O. Nikonov^c

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

^a posmetyev@mail.ru, ^b savinkov99max03@mail.ru, ^c 8888nike8888@mail.ru.

^a <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, ^b <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>.

Received 02.04.2026, accepted 28.04.2026

Operating forest soil tillage aggregates on uncleared cuttings is associated with high dynamic loads and significant energy intensity due to the complex terrain and high obstacle density. Existing mounted systems, despite having structural rigidity, do not provide adequate surface contour following, which leads to insufficient penetration depth of the working elements, breakages, and the need to use ballast weights. The aim of the research is to develop and evaluate the effectiveness of a fundamentally new regenerative mounted system aimed at improving the mobility, reliability, and fuel efficiency of the aggregates. The paper presents the design of a regenerative mounted system that integrates the regenerative devices of the tractor and the implement. Its key element is a pneumohydraulic accumulator, which stores energy that is dissipated in traditional systems during implement lowering, obstacle overcoming, and oscillations. The research methodology includes comparative laboratory-stand and field tests of an experimental aggregate with the regenerative system and a serial cultivator with a traditional mounting. The test results confirm the high effectiveness of the developed system. It has been established that the regenerative system reduces peak dynamic loads on disc gangs by 25–35 % due to a damping effect and also accumulates a significant volume of hydraulic energy. This made it possible to completely eliminate ballast weights, thereby reducing the weight of the implement. Additional advantages include improved soil tillage quality due to better ground contour following and reduced operational costs. The conclusions of the work indicate a comprehensive solution to the problems of reliability and energy efficiency of forestry tillage units under the challenging conditions of unrooted clear-cuts.

Keywords: forest soil tillage aggregates; disc cultivators; regenerative mounted system; energy regeneration; dynamic loads; unrooted clear-cuts; fuel efficiency.

Введение и обзор литературы по теме исследования. Эксплуатация лесных почвообрабатывающих агрегатов на нераскорчёванных вырубках, характеризующихся сложным микрорельефом, высокой плотностью препятствий (300–1000 пней/га) и их неравномерным распределением, выявляет критические недостатки существующих навесных систем, агрегируемых с тракторами. Широко применяемые дисковые культиваторы, такие как КЛБ-1.7, навешиваются посредством стандартных устройств, конструктивная жёсткость которых не обеспечивает необходимой подвижности в поперечно-вертикальной плоскости, что препятствует качественному копированию неровной поверхности и приводит к неполному заглублению рабочих органов. Данная проблема усугубляется при столкновении с препятствиями: вследствие недостаточного демпфирования и значительной массы орудия возникают динамические перегрузки, вызывающие изгибающие моменты и поломки узлов культиватора и навески. Кроме того, необходимость использования массивных балластных грузов для преодоления сопротивления почвы в сочетании с многократностью уходов и отсутствием систем рекуперации энергии приводит к высокой энергоёмкости процессов, перерасходу топлива и значительным эксплуатационным затратам, что в условиях ограниченного финансирования и тяжёлых условий работы диктует острую необходимость разработки принципиально новых навесных систем, ориентированных на повышение мобильности, надёжности и топливной экономичности лесных агрегатов [1, 2].

Российские и зарубежные учёные активно работают над решением проблем навесных систем тракторов, что находит отражение в ряде ключевых исследований, сосредоточенных на нескольких перспективных направлениях.

В области повышения точности и интеллектуализации управления основное направление связано с развитием электрогидравлических систем. Исследования X. Sun и др. [3] показывают, что многопараметрическое регулирование (положение, усилие, буксование) и применение интеллектуальных алгоритмов, таких как нечёткий пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, повышают качество работы, стабильность нагрузки и энергоэффективность навесной системы. Более того, координатное управление скоростью движения трактора и глубиной обработки через навесную систему позволяет на 26,7–50 % повысить комплексный показатель «эффективность-экономичность» и снизить буксование до 12,7–14,3 % [4]. Для описания сложной, нелинейной и асимметричной динамики навесных систем X. Sun и др. [5] успешно применяют гибридные модели, сочетающие физические законы и машинное обучение, что повышает точность прогнозирования положения орудия на 57–87 %. Другие учёные, такие как P.S. Singha и др. [6], также вносят вклад, разрабатывая для навесных систем управления на основе датчиков тягового усилия на нижних тягах.

В направлении повышения устойчивости и плавности хода трактора с навесным оборудованием ведутся

разработки систем активного демпфирования. С. Liu и др. [7] предложили стратегию виброгашения на основе обратной связи по давлению в гидроцилиндре навески, которая без дорогостоящего дышла позволила снизить колебания давления в её гидросистеме на 40 %, а угловую скорость продольной качки трактора – на 25 %. При этом исследование I. Petransky и др. [8] выявило конструктивные недостатки гидросистемы навески, такие как применение неоптимального распределителя, вызывающего скачки давления рабочей жидкости.

Исследования в области расширения функциональных возможностей навесных систем направлены на преодоление конструктивных ограничений стандартных навесок. Н. Yao и др. [9] разработали систему автоматического выравнивания поперечного крена навесного орудия, которая с высокой точностью (ошибка до 0,91) и быстродействием (менее 1,3 с) компенсирует перекосы. Более радикальное решение предлагает Y.M. Chukewad и др. [10], разработав навесную систему с независимыми гидроцилиндрами нижних тяг, которая активно поддерживает нулевой крен орудия и позволяет ему копировать рельеф, значительно снижая нагрузки на раму.

В основе этих и других разработок лежит совершенствование методологии измерения и моделирования навесных систем. Такие учёные, как J. Cedik и др. [11] и A.F. Kheiralla и др. [12], создают сложные динамометры для точного измерения усилий, действующих на навесную систему, в трёх направлениях. G.V.P. Kumar [13] использует кинематический анализ для оптимизации геометрии навесных систем, в то время как Н.-Н. Jeon и др. [14] применяют моделирование процессов динамики для прогнозирования их поведения под нагрузкой. Для оценки точности работы навески в условиях вибраций Е.-К. Kim и др. [15] предложили гибридную модель, которая косвенно оценивает координаты задней навески с высокой точностью.

Несмотря на значительный прогресс в области управления и контроля, обзор существующих исследований показывает, что ключевая проблема – нерациональное расходование энергии – решается лишь частично, за счёт повышения КПД управления, но не путём её сохранения. Ни одна из рассмотренных работ не затрагивает тему рекуперации энергии, которая рассеивается в виде тепла в гидравлической системе при опускании орудия, торможении инерционных масс и демпфировании колебаний.

С целью устранения выявленных недостатков стандартных навесных устройств, значительно снижающих качество обработки почвы и надёжность работы лесных дисковых культиваторов на нераскорчёванных вырубках, учёными ВГЛУ в результате многолетних исследований были разработаны и исследованы на эффективность применения рекуперативные и нерекуперативные навесные системы почвообрабатывающих агрегатов в сравнении с рекуперативными и нерекуперативными навесными устройствами тракторов. Здесь под рекуперативными и нерекуперативными навесными системами почвообрабатывающих агрегатов пони-

маются системы соединённых между собой с помощью автосцепок двух навесных устройств трактора и орудия. При этом возможны различные сочетания навесных устройств – рекуперативных и нерекуперативных навесных устройств трактора с рекуперативными и нерекуперативными навесными устройствами навесного орудия, представленные на рис. 1. Такое сочетание

навесных устройств позволяет комплектовать почвообрабатывающие агрегаты для нераскорчёванных вырубок с использованием недостаточно приспособленных для этой цели стандартных навесных устройств путём расширения их эксплуатационных возможностей [16–20].

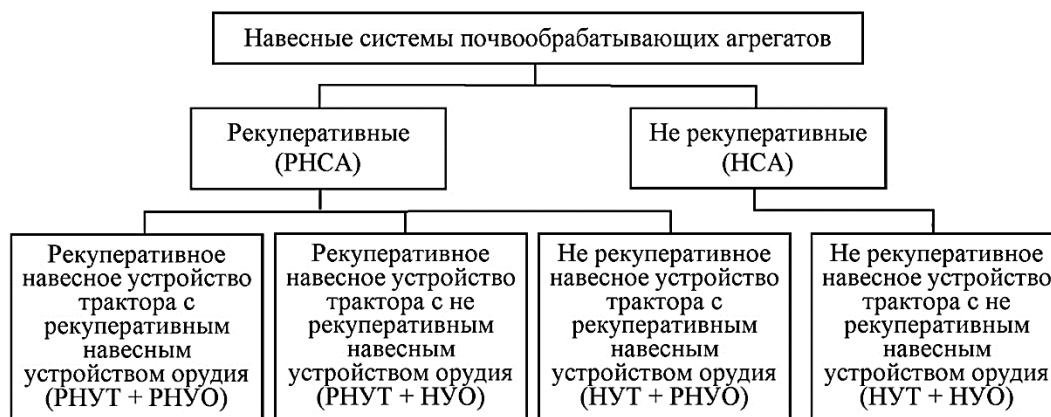


Рис. 1. Возможные сочетания навесных устройств рекуперативных и нерекуперативных навесных систем почвообрабатывающих агрегатов: РНСА и НСА – рекуперативные и нерекуперативные навесные системы; РНУТ и НУТ – рекуперативные и нерекуперативные навесные устройства трактора; РНУО и НУО – рекуперативные и нерекуперативные навесные устройства навесного орудия

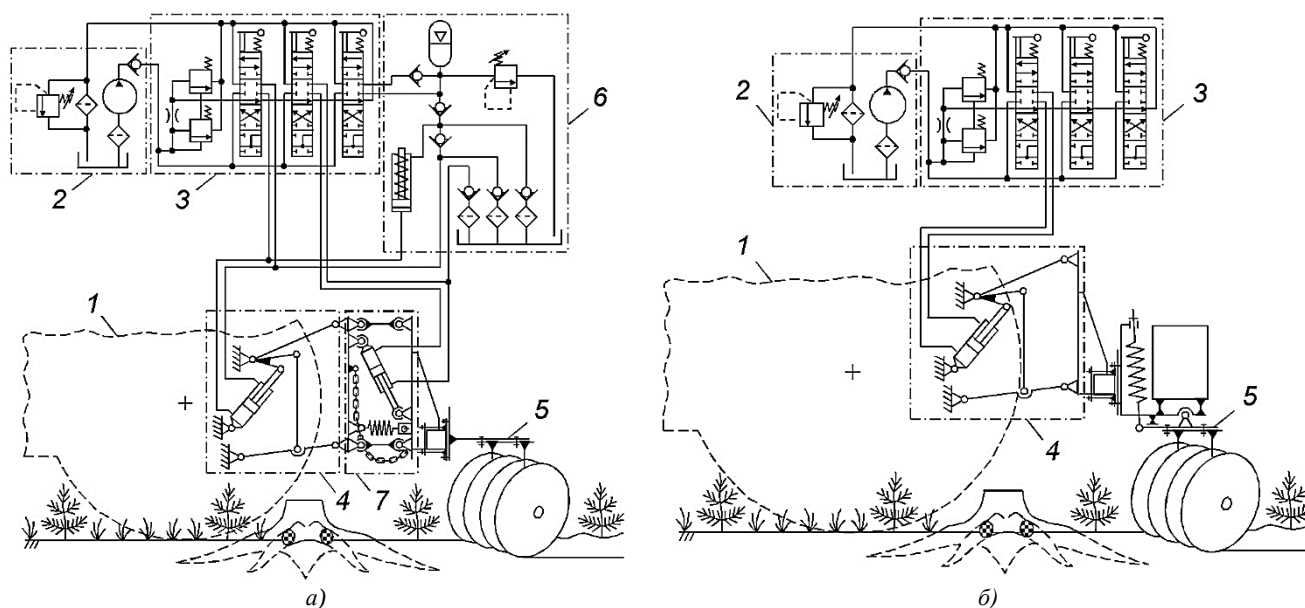


Рис. 2. Схемы навесной рекуперативной системы опытного – а и навесного устройства серийного – б культиваторов исследуемых почвообрабатывающих агрегатов: 1 – трактор; 2, 3 – гидронасосный узел и трёхсекционный гидрораспределитель трактора; 4 – навесное устройство трактора; 5 – дисковый культиватор; 6 – рекуперативное устройство; 7 – навесное устройство культиватора

Из представленных на рис. 1 возможных сочетаний навесных устройств была спроектирована, изготовлена и испытана в лабораторных и полевых условиях рекуперативная навесная система агрегата, включающая рекуперативные навесные устройства трактора и орудия. Система испытывалась при агрегатировании колёсного трактора Т-150 с опытным культиватором (рис. 2, а) в сравнении с традиционно используемым для ухода за лесными культурами на нераскорчёванных вырубках серийным культиватором КЛБ-1,7, навешен-

ным на трактор с помощью стандартного навесного устройства по схеме нерекуперативного навесного устройства трактора (рис. 2, б).

Рекуперативное устройство 6 опытного культиватора (рис. 2, а) включает в себя пневмогидравлический аккумулятор, мультипликатор давления, предохранительный и обратные клапаны. Принцип действия рекуперативного устройства основан на аккумулировании гидравлической энергии рабочей жидкости, генерируемой гидроцилиндрами навесных устройств трактора

и орудия при движении агрегата по неровностям на нераскорчёванной вырубке. Генерация энергии осуществляется за счёт преобразования потенциальной энергии положения массивных составных частей трактора и навесного культиватора, при их перемещениях из верхнего положения в нижнее, в кинетическую энергию движения рабочей жидкости.

Рекуперативное навесное устройство опытного культиватора имеет также несколько других положительных конструктивных и функциональных особенностей. Одной из них является обеспечение раме и орудью в целом поворотов в горизонтальной (рис. 3, а) и поперечно-вертикальной (рис. 3, б) плоскостях относительно трактора при движении агрегата по неровностям высотой H_{np} на нераскорчёванной вырубке на углы δ и φ , соответственно. С целью уменьшения смещения x дисковых батарей в боковом направлении и, соответственно от оси обрабатываемого ряда при движении агрегата по криволинейной траектории, между треугольной фермой 5 и рамой 2 культиватора установлены пружины 9 (рис. 3, а). К тому же для усиления эффекта самовозврата рамы с дисковыми батареями в исходное положение при поворотах, нижние тяги 6

навесного устройства культиватора, предусмотрительно закреплённые с помощью шаровых шарниров между треугольной фермой и рамой орудия, установлены под углом γ , вершина которого располагается сзади агрегата.

Существенным достоинством разработанной навесной системы является также её способность обеспечивать необходимую заглубляемость дисковых батарей культиватора без использования традиционно используемого для этой цели возимого в балластных ящиках дополнительного груза, составляющего в среднем половину массы навесного орудия (рис. 2, б). Этот эффект достигается за счёт изменения местоположения мгновенного центра вращения тяг 6 и 7 навесного устройства орудия с помощью его гидроцилиндра 8 (рис. 3, а). При этом если у серийного культиватора, в зависимости от изменяющихся условий работы (плотность и твёрдость почвы, степень засорённости сорной растительностью и др.) для регулирования глубины заглубления дисков, необходима остановка агрегата и соответствующее изменение массы балласта, то у опытного образца эта регулировка осуществляется трактористом с рабочего места без остановки агрегата с помощью гидроцилиндра 8.

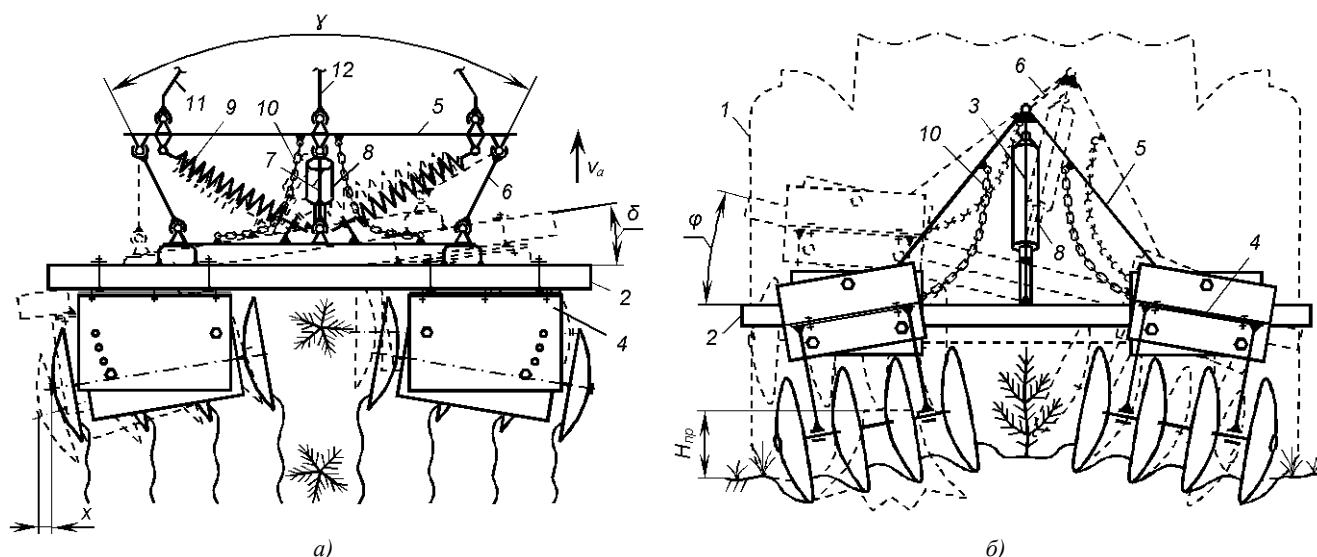


Рис. 3. Схемы видов сверху – а и сзади – б исследуемого опытного образца навесного дискового культиватора: v_a – направление движения агрегата; γ – угол сходимости нижних тяг навесного устройства культиватора; δ , φ – углы перекоса рамы культиватора в горизонтальной и поперечно-вертикальной плоскостях; x – величина смещения дисковых батарей при наезде их на препятствие; H_{np} – высота преодолеваемого препятствия; 1 – трактор; 2, 3 – рама и стойка культиватора; 4 – дисковая батарея; 5 – треугольная ферма навесного устройства трактора; 6, 7 – нижние и верхняя тяги навесного устройства орудия; 8 – гидроцилиндр навесного устройства орудия; 9 – пружина; 10 – цепь; 11, 12 – нижние и верхняя тяги навесного устройства трактора

На рис. 4 представлена принципиальная схема, иллюстрирующая характер взаимодействия рабочих органов культиватора с непреодолимым препятствием в виде неперерезаемого корня, что является ключевым для понимания эксплуатационных преимуществ разработанной рекуперативной навесной системы. Схема наглядно демонстрирует критически важные динамические параметры данного процесса: высоту подбрасывания культиватора H_n , величину образующегося огреха $S_{ог}$, а также длину пути заглубления S_z и бокового

смещения x_k рабочих органов после преодоления препятствия. Визуализация этих параметров является строго уместной, так как она количественно подтверждает основную проблему стандартных жёстких систем – значительное нарушение устойчивости хода орудия и качества обработки почвы при столкновении с препятствиями, что и призвана устранить новая конструкция, обеспечивающая плавное копирование рельефа и быстрое возвращение дисков в рабочее положение.

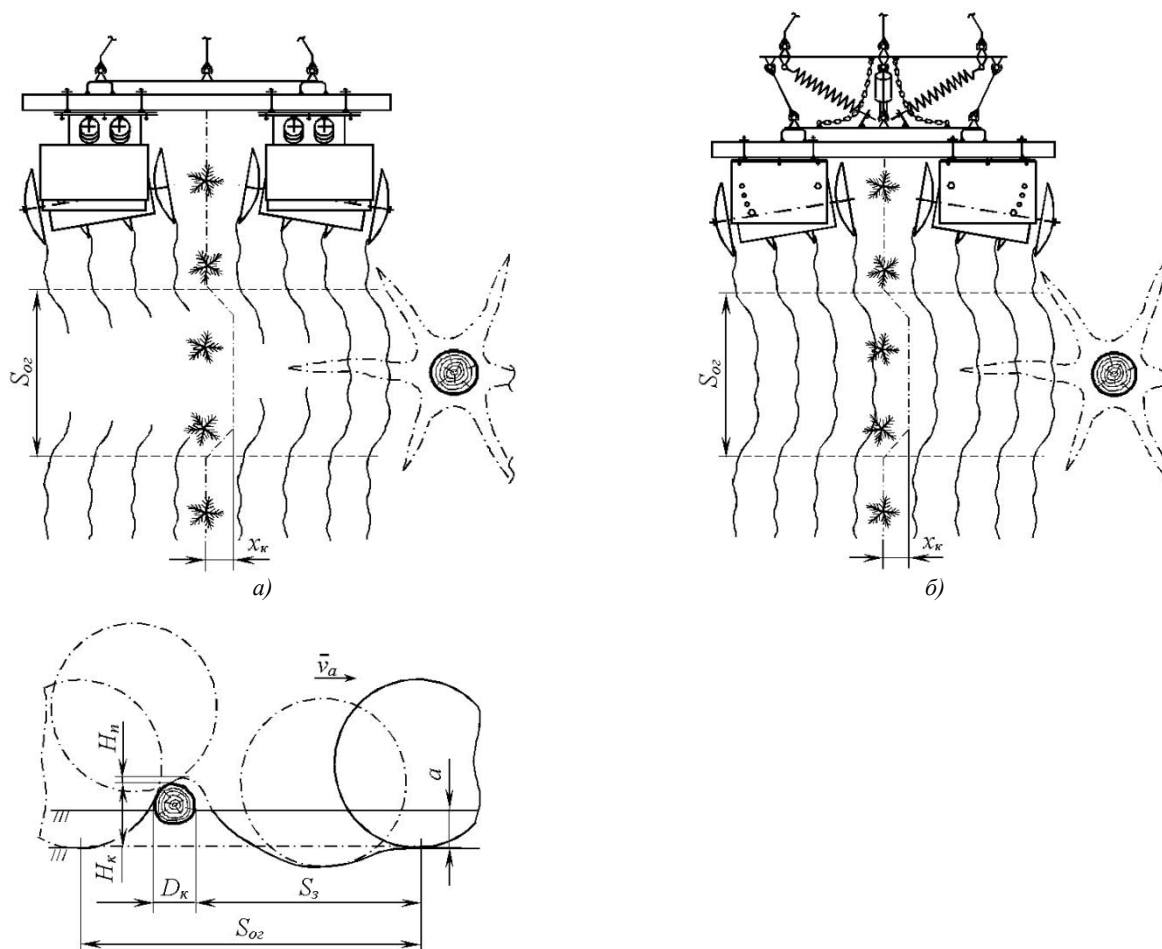


Рис. 4. Характер взаимодействия рабочих органов с неперерезаемым корнем и почвой: v_a – направление движения агрегата; D_k , H_k – диаметр и высота корня от дна борозды; H_n – высота подбрасывания культиватора; S_{oz} – величина огреха; S_3 , x_k – длина пути заглубления и боковое смещение рабочих органов относительно оси борозды; a – глубина обработки

Материалы и методы. Методика экспериментальных исследований была направлена на сравнительный анализ динамических нагрузок и энергетической эффективности дискового почвообрабатывающего орудия при преодолении препятствий с двумя типами навесных систем: традиционной (с баллаستировкой) и рекуперативной (облегченной, с системой рекуперации энергии). Исследования проводились в два этапа – лабораторно-стендовые и полевые эксперименты, что позволило совместить детальное изучение процессов в контролируемых условиях с их валидацией в реальной эксплуатационной среде (рис. 5).

Объектами сравнительного анализа выступили два агрегата: традиционный на базе серийного трактора Т-150 со стандартной навеской и дисковым культиватором массой 510 кг с дополнительным балластом 150 ± 5 кг (рис. 5, з), и опытный – на базе того же трактора, но оснащенный рекуперативной навесной системой с пневмогидроаккумулятором АРХ-10/320-01 и мультипликатором давления, а также облегченным культиватором массой 395 кг без балластных грузов (рис. 5, в).

Лабораторные эксперименты проводились на специализированном стенде, основу которого составляла рама с навесным механизмом трактора для установки орудия (рис. 5, а, б). Процесс взаимодействия с препят-

ствием моделировался с помощью протаскивающего устройства: гидроцилиндр перемещал тележку со сменными имитаторами препятствий (пень высотой 0,25 м и корень высотой 0,1 м) под опущенным орудием с контролируемой скоростью в диапазоне 0,5–1 м/с. Полевые испытания были организованы в условиях нераскорчеванной вырубki с естественными препятствиями (пни высотой 0,15–0,28 м), где варьировались скорость движения агрегата (0,9 и 1,2 м/с в рабочем режиме и 2,2 и 4,4 м/с в транспортном) и высота препятствий.

Исследовались два принципиальных режима работы навесных систем. Для традиционной системы гидроцилиндр навески фиксировался в нейтральном («жестком») положении. Для рекуперативной системы, в рабочем режиме, при работе орудия на глубине, гидроцилиндр орудия переводился в «плавающее» положение для рекуперации энергии удара о препятствие, в то время как гидроцилиндр трактора был заблокирован. В транспортном режиме, при поднятом орудии, ситуация была обратной: рекуперация энергии вертикальных колебаний на неровностях осуществлялась через «плавающий» гидроцилиндр трактора. Перед полевыми испытаниями рекуперативной системы пневмогидроаккумулятор предварительно заряжался от штатного насоса

трактора до давления 4 МПа, после чего насос отключался для автономной работы системы рекуперации.

Измерения динамических параметров осуществлялись унифицированным для обоих этапов комплексом высокоточных датчиков. Динамические усилия на рабочих органах и в элементах навески измерялись с помощью тензометрических датчиков (2ПКБ-20-200гв, 2ПКБ-60-300гв), установленных на стойке дисковой батареи и в шарнирах («тензопальцах»). Мониторинг гидравлической системы проводился датчиками давления Xuyang QDW90A (диапазон 0–30 МПа, точность 0,2–0,5 %), установленными в напорных и сливных магистралях, и датчиками объёмного расхода WatSeagor (точность ± 1 –10 %). Ключевой энергетический параметр – объём рекуперированной рабочей жидкости – определялся путём интегрирования сигнала с датчика расхода во времени. Положение элементов навесной системы в лабораторных условиях фиксировалось датчиком угла поворота.

Для обеспечения достоверности и статистической значимости результатов была реализована комплексная методика учёта погрешностей. Все датчики прошли трёхкратную процедуру тарировки с применением эталонных нагрузочных устройств и контрольно-измерительных приборов. Для минимизации погрешности тензометрических измерений от перекоса применялась специальная методика вклейки датчиков в предусмотренные пазы. Каждый эксперимент в рабочем режиме повторялся не менее трёх раз для каждой комбинации факторов, а для транспортного режима было выполнено 6 заездов. Первичные данные регистрировались в реальном времени с последующей статистической обработкой, включавшей расчёт среднего арифметического значения, стандартного отклонения σ и коэффициента вариации V . Инструментальные погрешности учитывались на основе паспортных данных применяемых датчиков.



а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Схемы проведения экспериментальных исследований: а, б – лабораторно-стендовые испытания традиционной и рекуперативной навесных систем; в, г – полевые испытания тракторных агрегатов, оснащённых рекуперативной и традиционной навесными системами

Результаты. Анализ результатов лабораторных экспериментов показал существенные различия в работе навесных систем. На графике динамики рекупериро-

емой энергии (рис. 6, а) было зафиксировано, что рекуперативная навесная система аккумулировала значительный объём рабочей жидкости (до 0,55 л) в пневмо-

гидроаккумуляторе в процессе преодоления препятствия, в то время как в традиционной системе этот показатель был незначительным. Небольшой всплеск может быть связан с перетеканием жидкости через клапаны под действием возросшего давления. Это объясняется тем, что при контакте орудия с препятствием в рекуперативной навесной системе кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию сжатой жидкости через гидроцилиндр, находящийся в «плавающем» режиме, тогда как в традиционной навесной системе эта энергия рассеивается. На графике (рис. 6, б) изменения усилий на дисковых батареях было установлено, что пиковая нагрузка при преодолении пня для рекуперативной навесной системы не превышала 8,5 кН, в то время как для традиционной навесной системы

достигала 12,5 кН, что свидетельствует о снижении динамических нагрузок на 32 %. Аналогичная тенденция наблюдалась и при преодолении корня: 4,2 кН против 6,5 кН (снижение на 35 %). Основными причинами снижения пиковых нагрузок являются демпфирующий эффект гидросистемы с пневмогидроаккумулятором, поглощающий ударный импульс, и меньшая масса орудия без балласта, что снижает инерционность. Снижение нагрузок позволяет не только повысить надёжность, но и отказаться от тяжёлых балластных грузов, которые традиционно используются для обеспечения заглубления рабочих органов. Это, в свою очередь, снижает общую массу агрегата, расход топлива и уплотняющее воздействие на почву.

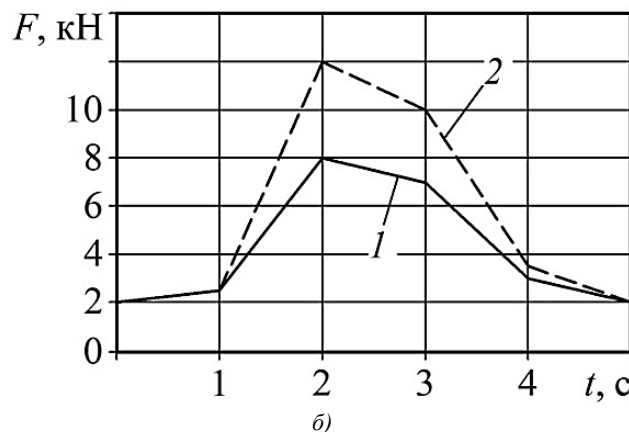
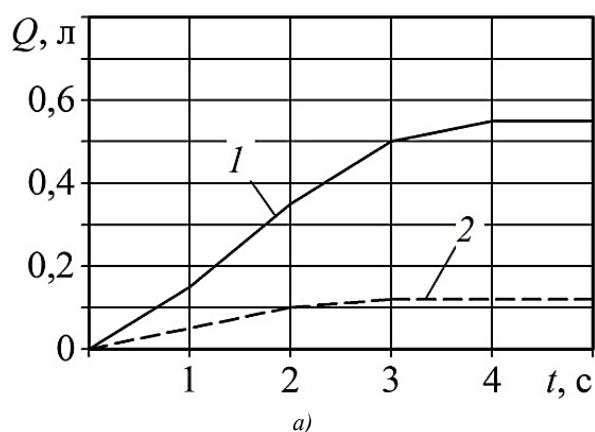


Рис. 6. Графики динамики рекупируемой энергии при преодолении препятствий – а и усилий на дисковых батареях при преодолении пня – б: 1 – рекуперативная навесная система; 2 – традиционная навесная система

Для оценки эффективности рекуперативной навесной системы в полевых условиях был проведён анализ накопления энергии и динамических нагрузок. Накопление рабочей жидкости в пневмогидравлическом аккумуляторе демонстрирует различные характеристики в зависимости от режима работы. При движении в транспортном положении (рис. 7, а) наблюдается плавный, почти линейный рост объёма на малой скорости (2,2 м/с), что свидетельствует о непрерывной рекуперации энергии от колебаний на мелких неровностях. При увеличении скорости в 2 раза (до 4,4 м/с) рост объёма становится более крутым и ступенчатым из-за возрастания амплитуды и частоты колебаний, что интенсифицирует процесс вытеснения жидкости через мультипликатор давления и приводит к увеличению скорости накопления энергии в 1,8–2,2 раза. В рабочем режиме, при преодолении препятствий (пней), энергия рекупируется преимущественно в момент контакта, что отображается на графике в виде отдельных скачков объёма (рис. 7, б). Увеличение высоты препятствия с 0,15 до 0,25 м приводит к более значительным и частым скачкам, так как для обхода более крупного препятствия требуется больший ход гидроцилиндра, вытесняющего больший

объём жидкости под высоким давлением. Это подтверждает способность системы аккумулировать энергию, которая в традиционных системах рассеивается в окружающую среду.

Анализ динамических нагрузок, зарегистрированных тензодатчиками на рабочее орудие, показывает ключевое преимущество рекуперативной навесной системы. При преодолении препятствия высотой 0,25 м традиционная система с балластом характеризуется резким пикообразным ростом усилия до 18 кН с последующими затухающими колебаниями (рис. 8, а). В рекуперативной системе пик усилия значительно ниже (12 кН) и имеет сглаженную форму. Демпфирующий эффект, обеспечиваемый пневмогидравлическим аккумулятором и мультипликатором, поглощает ударную нагрузку, обеспечивая быстрый возврат в исходное состояние без выраженных колебаний. Это объясняется тем, что гидропривод орудия в данной системе работает как упругодемпфирующий элемент, снижая пиковые нагрузки на 25–35 %. Аналогичный эффект снижения пиковых усилий наблюдается и при преодолении менее крупных, но более частых препятствий, таких как корни высотой 0,1 м (рис. 8, б).

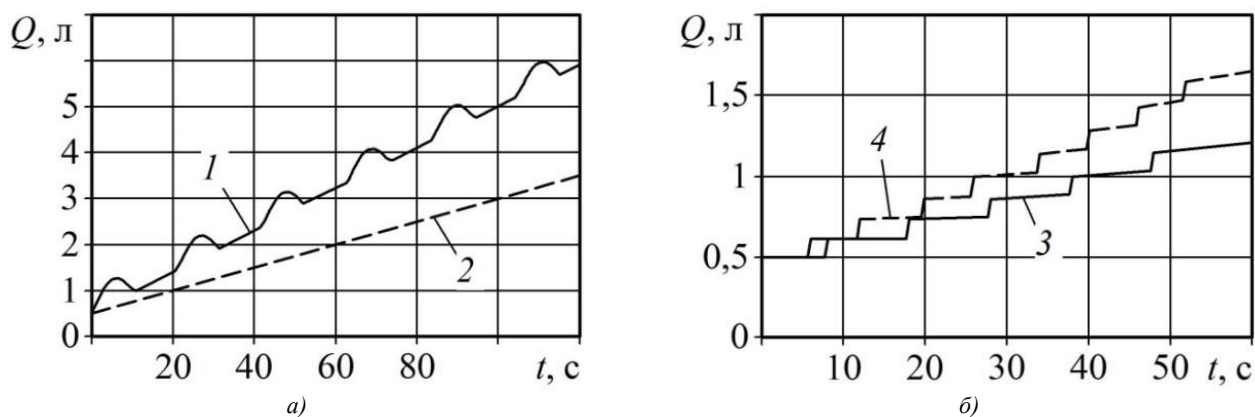


Рис. 7. Накопление рабочей жидкости в пневмогидравлическом аккумуляторе при движении агрегата в транспортном положении – *а* и при работе агрегата с преодолением препятствий (пней) – *б*: 1 – скорость тракторного агрегата 2,2 м/с; 2 – скорость тракторного агрегата 4,4 м/с; 3 – высота пня 0,15 м, скорость 0,9 м/с; 4 – высота пня 0,25 м, скорость 1,2 м/с

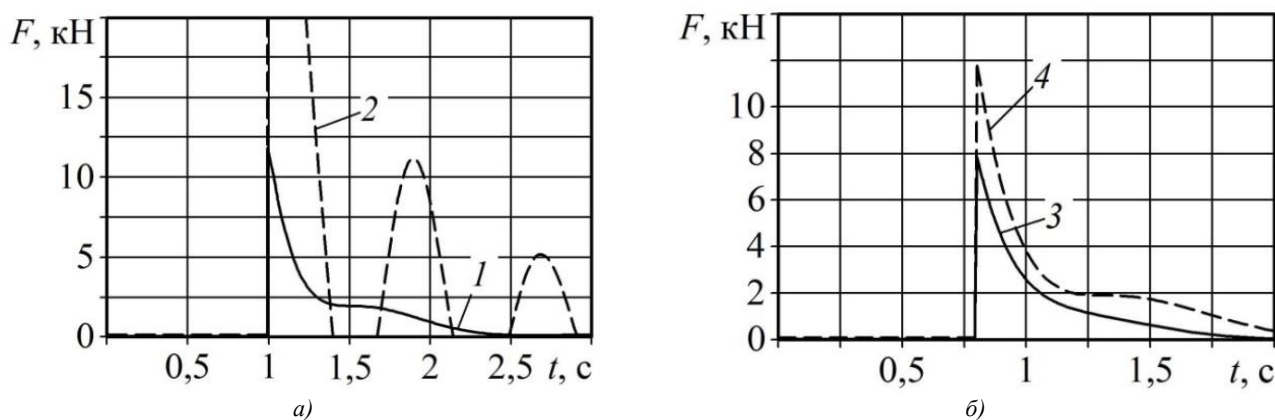


Рис. 8. Изменение усилия на дисковых батареях при преодолении препятствия (пень $h = 0,25$ м) – *а* и корня ($h = 0,1$ м) – *б*: 1, 3 – рекуперативная навесная система; 2, 4 – традиционная навесная система

Заключение. Существенное повышение энергоэффективности и экологичности агрегата достигается за счёт внедрения системы рекуперации энергии, которая аккумулирует кинетическую энергию, возникающую при опускании орудия, преодолении препятствий и колебаниях на неровностях, преобразуя её в потенциальную энергию сжатой жидкости в пневмогидроаккумуляторе. Полевые испытания подтвердили практическую работоспособность этого принципа, зафиксировав накопление значительного объёма рабочей жидкости, что позволяет снизить нагрузку на гидросистему трактора и приводит к прямому сокращению расхода топлива и уменьшению вредных выбросов.

Значительное повышение надёжности и долговечности всего почвообрабатывающего агрегата обеспечено за счёт резкого снижения динамических нагрузок на рабочие органы и узлы навески, что доказано результатами сравнительных испытаний. Рекуперативная система выступает в роли активного демпфера, устойчиво снижая пиковые нагрузки на 25–35 %, сглаживая ударные импульсы и устраняя разрушительные затухающие колебания после преодоления препятствий, что минимизирует циклические напряжения и изгибающие моменты в раме и узлах культиватора, напрямую увеличивая их межремонтный ресурс.

Улучшение качества обработки почвы и агротехнических показателей является прямым следствием способности рекуперативной системы качественно копировать сложный микрорельеф и обеспечивать быстрое возвращение рабочих органов в рабочее положение после наезда на препятствие. За счёт обеспеченной подвижности в двух плоскостях и демпфирующего эффекта существенно сокращаются величина огибающей и путь заглубления дисковых батарей, что гарантирует более равномерную и качественную обработку почвы, что критически важно для последующего приживания лесных культур.

Снижение металлоёмкости и эксплуатационных затрат достигнуто за счёт отказа от применения массивных балластных грузов, необходимость в которых устранена специальной кинематикой навесного устройства, позволяющей гидравлически регулировать величину заглубления рабочих органов. Это приводит к многокомпонентному экономическому эффекту: снижается общая масса агрегата, уменьшается сопротивление почвы и нагрузки на орудие, минимизируется уплотняющее воздействие на почву, а также экономятся время и трудозатраты на проведение трудоёмкой операции балластировки.

Литература

1. Зеликов В.А. Повышение эффективности почвообрабатывающих агрегатов при лесовосстановлении на вырубках : дис. ... д-ра техн. наук : 05.21.01 / Владимир Анатольевич Зеликов ; Место защиты : Воронеж. гос. лесотехн. акад. Воронеж, 2018. 348 с.
2. Латышева М.А. Обоснование параметров приспособления к навесным устройствам тракторов при агрегатировании их с лесными дисковыми орудиями : дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / Маргарита Александровна Латышева ; Место защиты : Воронеж. гос. лесотехн. акад. Воронеж, 2015. 215 с.
3. Sun X., Lu Z., Song Y., Cheng Z., Jiang C., Qian J., Lu Y. Development status and research progress of a tractor electro-hydraulic hitch system. *Agriculture* 2022, 12, 1547. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101547>
4. Sun X., Song Y., Lu Z., Deng X. Research on a coordinated control method of tractor electro-hydraulic hitch tillage depth and travel speed based on optimal overall efficiency and economic performance. *Agriculture* 2025, 15(21), 2232. <https://doi.org/10.3390/agriculture15212232>
5. Sun X., Pan S., Song Y., Jiang C., Lu Z. A distributed parameter identification method for tractor electro-hydraulic hitch systems based on dual-mode grey-box modelling. *Processes* 2025, 13, 3608. <https://doi.org/10.3390/pr13113608>
6. Singha P.S., Kumar A., Sarkar S., Baishya S., Kumar, P. Development of electro-hydraulic hitch control system through lower link draft sensing of a tractor. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2022, 81, 384–392.
7. Liu C., Gu J., Du X., Yang L., Du Y., Mao E. A vibration reduction control method for tractor rear hydraulic hitch based on pressure feedback. *Agriculture* 2023, 13, 1546. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081546>
8. Petrinsky I., Drabant S., Dudak J., Zikla A., Grman I., Jablonicky J. Pressure in the hydraulic system of three point hitch of tractor equipped with electrical and mechanical control // *Research in Agricultural Engineering*. 2003. Vol. 49, № 2. P. 37–43.
9. Yao H., Zhang E., Liu Y., Du J., Yin X. Design and experiment of an automatic leveling system for tractor-mounted implements. *Sensors* 2025, 25, 3707. <https://doi.org/10.3390/s25123707>
10. Chukewad Y.M., Chadha S., Jagdale K. S., Elkunchwar N., Rosa U. A., Omohundro Z. Tractor three-point hitch control for an independent lower arms system. *AgriEngineering* 2024, 6, 1725–1746. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020100>
11. Cedik J., Prazan R., Slegier V., Havlicek M., Lopot F., Ryban-sky M., Pexa M. Three-point hitch dynamometer for measuring tractor-implement forces. *Applied Engineering in Agriculture*, 2024, 40(3), 303–310. <https://doi.org/10.13031/aea.15731>
12. Kheiralla A.F., Yahya A., Zohadie M., Ishak W. Design and development of a three-point auto hitch dynamometer for an agricultural tractor. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*. 2003; 20(3 & 4). 271–288.
13. Kumar G.V.P. Geometric performance parameters of three-point hitch linkage system of a 2WD Indian tractor. *Research in Agricultural Engineering*, Vol. 61, 2015 (1), 47–53. <https://doi.org/10.17221/79/2012-RAE>
14. Jeon H.-H., Jung Y.-J., Siddique M.A. A., Nam K.-C., Kim T.-B., Choi C.-H., Kim Y.-J. Development and validation of simulation model for three point-hitch during agricultural operation. 2019 ASABE Annual International Meeting. <https://doi.org/10.13031/aim.201901032>
15. Kim E.-K., Han T.-H., Lee J.-H., Han C.-W., Lim R.-G. Tracking accuracy evaluation of autonomous agricultural tractors via rear three-point hitch estimation using a hybrid model of EKF transformer. *Agriculture* 2025, 15, 1475. <https://doi.org/10.3390/agriculture15141475>
16. Посметьев В.И. Методика расчёта и результаты оптимизации конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора при агрегатировании с лесными почвообрабатывающими орудиями / В.И. Посметьев, М.А. Савинков, В.В. Посметьев [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2025. № 4(406). С. 130–142. DOI 10.37482/0536-1036-2025-4-130-142
17. Посметьев В.И. Результаты имитационного моделирования рекуперации энергии навесным механизмом трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями / В.И. Посметьев, В.В. Посметьев, М.А. Савинков [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2025. Т. 15, № 1(57). С. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/7>
18. Патент № 2830434 С1 РФ, МПК А01В 63/10, А01В 63/32. Навесная система трактора : № 2023136342 : заявл. 30.12.2023 : опубл. 19.11.2024 / В.И. Посметьев, М.А. Савинков, В.О. Никонов [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова.
19. Савинков М.А. Стенд для испытания и исследования агрегатов и узлов транспортных и почвообрабатывающих машин и орудий / М.А. Савинков, В.И. Посметьев, В.О. Никонов // *Перспективы развития, инновации и информационные технологии на транспорте* : Мат-лы Междунар. молодежной науч.-практ. конф., Воронеж, 17–18 октября 2024 г. Воронеж : ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 185–188. DOI 10.58168/ДПИПТ2024_185-188
20. Савинков М.А. Анализ перспективных устройств для аккумулирования энергии рабочей жидкости в гидродрайвах транспортно-технологических машин / М.А. Савинков, В.И. Посметьев, В.О. Никонов, И.О. Храпов // *Адаптация лесного хозяйства к изменению климата : природоориентированные решения и цифровизация*. Forestry – 2024 : Мат-лы Междунар. лесного форума, Воронеж, 31 октября – 01 2024 г. Воронеж : ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 107–113. DOI 10.58168/FFYS2024_107-113

References

1. Zelikov V.A. Povyshenie effektivnosti pochvobrabatyvayushchikh agregatov pri lesovosstanovlenii na vyrubkakh [Improving the Efficiency of Soil-Cultivating Aggregates for Reforestation on Clear-Cuts]. Dr. Sci. Dissertation, Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia, 2018, 348 p.
2. Latysheva M.A. Justification of the parameters of adaptation to tractor attachments when aggregating them with forest disk implements: dis. ... Cand. of Technical Sciences: 05.21.01 / Margarita Aleksandrovna Latysheva; Place of protection: Voronezh. state forestry academy. Voronezh, 2015. 215 p.
3. Sun X., Lu Z., Song Y., Cheng Z., Jiang C., Qian J., Lu Y. Development Status and Research Progress of a Tractor Electro-Hydraulic Hitch System. *Agriculture* 2022, 12, 1547. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101547>
4. Sun X., Song Y., Lu Z., Deng X. Research on a Coordinated Control Method of Tractor Electro-Hydraulic Hitch Tillage Depth and Travel Speed Based on Optimal Overall Efficiency and Economic Performance. *Agriculture* 2025, 15(21), 2232. <https://doi.org/10.3390/agriculture15212232>
5. Sun X., Pan S., Song Y., Jiang C., Lu Z. A Distributed Parameter Identification Method for Tractor Electro-Hydraulic Hitch Systems Based on Dual-Mode Grey-Box Modelling. *Processes* 2025, 13, 3608. <https://doi.org/10.3390/pr13113608>
6. Singha P.S., Kumar A., Sarkar S., Baishya S., Kumar P. Development of Electro-Hydraulic Hitch Control System Through Lower Link Draft Sensing of a Tractor. *Journal of Scientific & Industrial Research* 2022, 81, 384–392.

7. Liu C., Gu J., Du X., Yang L., Du Y., Mao E. A Vibration Reduction Control Method for Tractor Rear Hydraulic Hitch Based on Pressure Feedback. *Agriculture* 2023, 13, 1546. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081546>
8. Petransky I., Drabant S., Dudak J., Zikla A., Grman I., Jablonicky J. Pressure in the Hydraulic System of Three Point Hitch of Tractor Equipped with Electrical and Mechanical Control. *Research in Agricultural Engineering* 2003, 49(2), 37–43.
9. Yao H., Zhang E., Liu Y., Du J., Yin X. Design and Experiment of an Automatic Leveling System for Tractor-Mounted Implements. *Sensors* 2025, 25, 3707. <https://doi.org/10.3390/s25123707>
10. Chukewad Y.M., Chadha S., Jagdale K.S., Elkunchwar N., Rosa U.A., Omohundro Z. Tractor Three-Point Hitch Control for an Independent Lower Arms System. *AgriEngineering* 2024, 6, 1725–1746. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020100>
11. Cedik J., Prazan R., Sleger V., Havlicek M., Lopot F., Ryban-sky M., Pexa M. Three-Point Hitch Dynamometer for Meas-uring Tractor-Implement Forces. *Applied Engineering in Ag-riculture* 2024, 40(3), 303–310. <https://doi.org/10.13031/aea.15731>
12. Kheiralla A. F., Yahya A., Zohadie M., Ishak W. Design and Development of a Three-Point Auto Hitch Dynamometer for an Agricultural Tractor. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development* 2003, 20(3&4), 271–288.
13. Kumar G.V.P. Geometric Performance Parameters of Three-Point Hitch Linkage System of a 2WD Indian Tractor. *Research in Agricultural Engineering* 2015, 61(1), 47–53. <https://doi.org/10.17221/79/2012-RAE>
14. Jeon H.-H., Jung Y.-J., Siddique M.A. A., Nam K.-C., Kim T.-B., Choi C.-H., Kim Y.-J. Development and Validation of Simu-lation Model for Three Point-Hitch During Agricultural Oper-ation. 2019 ASABE Annual International Meeting. <https://doi.org/10.13031/aim.201901032>
15. Kim E.-K., Han T.-H., Lee J.-H., Han C.-W., Lim R.-G. Tracking Accuracy Evaluation of Autonomous Agricultural Tractors via Rear Three-Point Hitch Estimation Using a Hy-brid Model of EKF Transformer. *Agriculture* 2025, 15, 1475. <https://doi.org/10.3390/agriculture15141475>
16. Posmetev V.I., Savinkov M.A., Posmetev V.V. et al. Calcula-tion Methodology and Results of Optimization of Design Pa-rameters of a Recuperative Tractor Hitch System for Aggre-gation with Forest Soil-Cultivating Implements. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal*, 2025, No. 4(406), pp. 130–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-130-142>
17. Posmetev V.I., Posmetev V.V., Savinkov M.A. et al. Results of Simulation Modeling of Energy Recovery by a Tractor Hitch Mechanism with an Adapter for Aggregating It with Forest Disc Implements. *Forestry Engineering Journal*, 2025, Vol. 15, No. 1(57), pp. 104–122. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/7>
18. Patent RU No. 2830434 C1, MPK A01B 63/10, A01B 63/32. Tractor Hitch System: No. 2023136342; declared 30.12.2023; published 19.11.2024. Posmetev V.I., Savinkov M.A., Ni-konov V.O. et al. ; Appli-cant : Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov.
19. Savinkov, M.A. A Test Rig for Researching Assemblies and Units of Transport and Tillage Machines and Implements / M.A. Savinkov, V.I. Posmetyev, V.O. Nikonov // Develop-ment Prospects, Innovations, and Information Technologies in Transport: Proceedings of the International Youth Scien-tific and Practical Conf., Voronezh, October 17–18, 2024. Voronezh: VSTU named after G.F. Morozov, 2024. pp. 185–188. DOI 10.58168/DPIITT2024_185-188
20. Savinkov M.A. Analysis of promising devices for accumulat-ing the energy of the working fluid in hydraulic drives of transport and technological machines / M.A. Savinkov, V.I. Posmetyev, V.O. Nikonov, I.O. Khrapov // Adaptation of forestry to climate change: nature-oriented solutions and digi-talization. *Forestry – 2024: Proceedings of the International Forestry Forum, Voronezh*, 31 October – 01 2024. Voronezh: VSTU named after G.F. Morozov, 2024. pp. 107–113. DOI 10.58168/FFYS2024_107-113