

На правах рукописи

**Бугаев Александр Вячеславович**

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН  
ТЕРМОДИФФУЗИОННЫМ ХРОМИРОВАНИЕМ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Научный консультант: **Дидманидзе Отари Назирович**, доктор технических наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева

Официальные оппоненты: **Голубев Вячеслав Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологических и транспортных машин и комплексов ФГБОУ ВО Тверская ГСХА

**Юхин Иван Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО РГАТУ

**Бондарева Галина Ивановна**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по инвестициям и общим вопросам ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

Защита состоится 2 июля 2026 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Н. Н. Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации (и Федеральной научно-технической программе развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы отмечено, что одним из направлений государственной политики в сфере продовольственной безопасности является технологическая модернизация агропромышленного комплекса, в том числе внедрение новой техники и технологий. Программа предусматривает обновление сельского хозяйства отечественной сельскохозяйственной техникой, в том числе в рамках федерального проекта «Развитие отраслей и техническая модернизация агропромышленного комплекса». Однако работающий парк машин имеет большой износ, а зачастую морально устарел. Поэтому сохраняется рост эксплуатационных издержек, включая увеличение доли затрат на запасные части, особенно для импортной техники. Снизить такие затраты можно путем повышения надежности машин, в частности за счет совершенствования технологий изготовления и ремонта деталей почвообрабатывающей техники. Эти машины вошли в Перечень критической промышленной продукции в отрасли сельскохозяйственного машиностроения Российской Федерации. Основными потребительскими свойствами почвообрабатывающей техники, в том числе культиваторов являются надежность машин и качество обработки почвы. Основным рабочим органом культиваторов является стрелчатая лапа. При обработке почвы на рабочем органе возникают значительные нагрузки со стороны обрабатываемой среды. Действие данных нагрузок приводит к деформациям и изгибу конструкции. Анализ эксплуатационно-технологических показателей культиваторов, выполненный исследователями, показал, что в среднем наработка на отказ лап культиваторов составляет 7...18 га.

**Степень разработанности темы исследования.** Разработкой технологий восстановления и упрочнения режущих органов почвообрабатывающих машин начали заниматься давно. Упрочняющие методы обработки рабочих органов сельскохозяйственных машин, наряду с использованием специальных сталей, применялись в России и за рубежом с середины 1930-х годов. В России работы по наплавке рабочих органов были начаты в 1930-х годах. Наиболее широко в ремонтных условиях распространилась наплавка лемехов сплавом «Сормайт» с применением газового пламени. Большой вклад в развитие и совершенствование способов восстановления и повышения ресурса рабочих органов почвообрабатывающих орудий внесли Аулов В.Ф., Ерохин М.Н., Лялякин В.П., Михальченков А.М., Новиков В.С., Колмыков В.А., Коломейченко А.В., Титов В.Н., Сидоров С.А., Зайцев С.А., Шахов В.А., Юдников А.С. и др. В то же время, в трудах этих ученых неполно рассматриваются вопросы восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием технологии термодиффузионного хромирования. Вопросами исследования структуры, физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик покрытий, формируемых при термодиффузионном хромировании, занимались такие ученые, как Бугаев В.Н., Богачев Б.А., Казанцев С.П., Мазаев Ю.В., Сергеев В.З. и др. Однако, несмотря на большой объем выполненных

исследований по данной теме, остается ряд нерешенных задач, в том числе установлении влияния технических и технологических решений при восстановлении работоспособности рабочих органов на потребительские свойства почвообрабатывающих машин (качество обработки почвы), в том числе культиваторов.

**Научная гипотеза** заключается в том, что повышение работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин при восстановлении достигается применением термодиффузионного хромирования, позволяющего формировать на их режущей кромке покрытия с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами и обеспечивать требуемые потребительские свойства почвообрабатывающих машин, включая крошение почвы.

**Цель и задачи исследования.** Цель исследования – восстановление работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин термодиффузионным хромированием.

**Объект исследования** – технологический процесс восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием термодиффузионного хромирования.

**Предмет исследования** – установление зависимостей между параметрами восстановленных рабочих органов с их работоспособностью и потребительскими свойствами почвообрабатывающих машин.

**Научную новизну** работы составляют:

- зависимости влияния режимов термодиффузионного хромирования на толщину и физико-механические свойства покрытий;
- модель влияния основных факторов рыхления почвы на тяговое сопротивление культиватора;
- методика исследования напряженного состояния культиватора и прочностного расчета восстановленной лапы;
- зависимости влияния углов резания и заострения лапы на тяговое сопротивление культиватора и расход топлива МТА;
- зависимости влияния углов резания и заострения лапы на степень разрыхления почвы;

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается:

- в обосновании механизма формирования покрытий способом термодиффузионного хромирования;
- в определении оптимальных режимов получения покрытий термодиффузионным хромированием;
- в обобщении аналитических зависимостей для определения показателей работоспособности восстановленной лапы;
- в выявлении мест наиболее напряженного состояния конструкции культиватора и результатах прочностного расчета лапы;
- в установлении влияния угла резания и угла заострения лапы на тяговое сопротивление культиватора и расход топлива МТА;
- в установлении влияния углов резания и заострения лапы культиватора на степень разрыхления почвы;

- в оценке потребительских свойств культиваторов с восстановленными лапами;
- в разработке и внедрении технологического процесса восстановления работоспособности рабочих органов культиваторов с использованием термодиффузионного хромирования (патент РФ на изобретение № 2282677 и патент РФ на полезную модель № 236692).

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач были использованы фундаментальные положения теории почвообработки, методы математической статистики и планирования экспериментов. Использовались также результаты анализа физико-механических и технологических свойств почв и их влияния на характер изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин; теоретические исследования процесса абразивного изнашивания и разработка на этой основе рабочей гипотезы о факторах влияния на интенсивность изнашивания; экспериментальные исследования в лабораторных условиях износостойкости материалов в зависимости от конструктивных особенностей рабочих органов. Исследования по изучению свойств почвы проводились на грунтовом канале; обработка результатов эксперимента осуществлялась в среде Mathcad, Excel, Word, AutoCAD и других прикладных программ; напряженное состояние конструкции культиватора и прочностной расчет лапы были выполнены с использованием системы Inventor Pro и отечественного графического пакета «Компас».

**Положения диссертации, выносимые на защиту:**

- механизм формирования покрытий способом термодиффузионного хромирования;
- зависимости влияния режимов термодиффузионного хромирования на толщину и физико-механические свойства покрытий;
- оптимальные режимы получения покрытий термодиффузионным хромированием;
- результаты сравнительных испытаний на износостойкость стальных пластин после диффузионного хромирования;
- методика и результаты исследования напряженного состояния культиватора и прочностного расчета восстановленной лапы;
- зависимости влияния углов резания и заострения лапы на тяговое сопротивление культиватора и расход топлива МТА;
- зависимости влияния углов резания и заострения лапы на степень разрыхления почвы;
- результаты полевых испытаний восстановленных рабочих органов культиваторов;
- результаты оценки потребительских свойств культиваторов с восстановленными рабочими органами;
- технологический процесс восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием термодиффузионного хромирования.

### **Степень достоверности и апробация результатов исследования.**

Достоверность выполненных в диссертационной работе исследований основана на глубоком анализе выполненных ранее научно-исследовательских работ в данной области науки. Результаты теоретических и экспериментальных исследований имеют высокую сходимость. При проведении экспериментальных исследований использовались апробированный научно-методический аппарат и современное сертифицированное метрологическое оборудование. Все выборки являлись репрезентативными. Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, согласуются с результатами, опубликованными в независимых источниках по тематике исследования, и протоколами испытаний почвообрабатывающих машин и стрельчатых лап культиваторов на машиноиспытательных станциях Минсельхоза России. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных конференциях и семинарах:

- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2026);
- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2025);
- Международная научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса Российской Федерации» (Рязань, 2025);
- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2024);
- 75-я юбилейная Международная научно-практическая конференция «Научные приоритеты в АПК: вызовы современности» (Рязань, 2024);
- научно-практическая конференция преподавателей по итогам НИР за 2023 г. «Современные векторы развития науки» (Краснодар, 2024);
- Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К. А. Тимирязева (Москва, 2023);
- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2023);
- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2022);
- Международная научно-практическая конференция «Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения» (Санкт-Петербург – Пушкин, 2022);
- VIII Международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2021);
- Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвящённая 155-летию РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева (Москва, 2020);
- национальная научно-практическая конференция «Тенденции инженерно-технологического развития агропромышленного комплекса» (Рязань, 2019).

### **Реализация результатов исследования.**

Разработанная технология восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением термодиффузионного хромирования внедрена в ОАО «Брянсксельмаш». Результаты диссертационной

работы используются в учебном процессе Института механики и энергетики имени В. П. Горячкина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева при подготовке бакалавров по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также для научных исследований аспирантов по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

**Личный вклад автора.** Диссертация написана самостоятельно, является обобщением результатов исследований, проведенных с 2002 года по настоящее время. Автору принадлежат: разработка концепции повышения работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием способа термодиффузионного хромирования; постановка цели и формулирование задач проводимых исследований; разработка программы и методик и исследований; проведение комплекса экспериментальных исследований; формулирование заключения и рекомендаций производству; написание статей и заявок на изобретения Российской Федерации.

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 29 научных работах, в том числе 14 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса, статье в издании, входящем в перечень Web of Science, и двух патентах Российской Федерации на изобретение и полезную модель.

Общий объем опубликованных работ составляет 71,9 п.л., из них автору принадлежит 37,1 п.л.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 193 источника, и приложений. Основное содержание работы изложено на 315 страницах, включая 102 рисунка и 35 таблиц. Работа также содержит 11 приложений на 44 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации и степень ее разработанности, сформулированы цель, объект и предмет исследования. Определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, сформулированы положения диссертации, выносимые на защиту, а также показаны степень достоверности и апробация результатов исследования, личный вклад автора и реализации результатов работы.

**В первой главе «Состояние проблемы, цель и задачи исследования»** выполнен анализ условий эксплуатации и конструктивных особенностей, материалов и технологий изготовления, причин потери работоспособности, характера изнашивания и величин износов рабочих органов, устанавливаемых на почвообрабатывающих орудиях. Основные дефекты лап культиваторов – затупление лезвийной части, износы носка и крыльев, наличие деформаций, изломы. Более 60 % стрелчатых лап теряют работоспособное состояние из-за предельного износа носка и ширины крыльев. Анализ технологий восстановления рабочих органов при ремонте почвообрабатывающей техники

показал, что в настоящее время для этих целей применяют наплавочные способы, нанесение газотермических покрытий, применение клеэполимерных композиционных материалов и др. Одной из распространенных технологий восстановления работоспособности рабочего органа является крепление компенсационных пластин к режущей части. Они позволяют снизить лобовое сопротивление движению лапы, увеличить долговечность детали путем неоднократного восстановления и использования компенсирующих пластин с такой же или с увеличенной износостойкостью. Крепление пластин к рабочему органу проводят приваркой, с помощью клея или резьбовым соединением. Наиболее эффективным методом повышения износостойкости деталей является диффузионная металлизация, в том числе хромирование. Однако сведения о восстановлении и упрочнении рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием таких технологий отсутствуют. При разработке технологий восстановления работоспособности рабочих органов остается ряд нерешенных задач, в том числе установление влияния технических и технологических решений на потребительские свойства почвообрабатывающих машин. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Теоретически обосновать возможность использования технологии термодиффузионного хромирования для восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин.
2. Установить влияние режимов термодиффузионного хромирования на толщину слоя и физико-механические свойства покрытий.
3. Провести сравнительные испытания на износостойкость стальных пластин после их термодиффузионного хромирования.
4. Разработать модель влияния основных факторов рыхления почвы на тяговое сопротивление культиватора.
4. Выявить места наиболее напряженного состояния конструкции культиватора и выполнить прочностной расчет лапы
5. Установить влияние углов резания и заострения лапы на тяговое сопротивление культиватора и расход топлива МТА.
6. Оценить степень разрыхления почвы восстановленной лапой культиватора.
7. Провести полевые испытания восстановленных стрелчатых лап культиватора.
8. Оценить потребительские свойства культиватора с восстановленными лапами.
9. Разработать технологию восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием термодиффузионного хромирования.
10. Определить экономическую эффективность разработанной технологии восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин.

**Во второй главе** «Теоретическое обоснование восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин

термодиффузионным хромированием» теоретически обоснована возможность восстановления работоспособности рабочих органов культиваторов термодиффузионным хромированием; дано теоретическое описание диффузионных процессов при хромировании; теоретически обосновано влияние основных факторов процесса рыхления грунта на тяговое усилие культиватора.; обоснованы физико-механические свойства покрытий и геометрические параметры компенсирующей пластины при восстановлении работоспособности рабочих органов культиваторов (коэффициент трения покрытия, толщина и износостойкость режущей кромки компенсирующей пластины), а также необходимость оценки напряженного состояния конструкции культиватора.

В результате в приповерхностном слое образуется карбидный слой толщиной  $h_1$  и происходит движение внешней границы слоя наружу на величину  $\delta_1$  (Рисунок 1), т.к. углерод обладает более высокой активностью, он, проходя через слой карбидов, способствует росту карбидного слоя с внешней стороны.

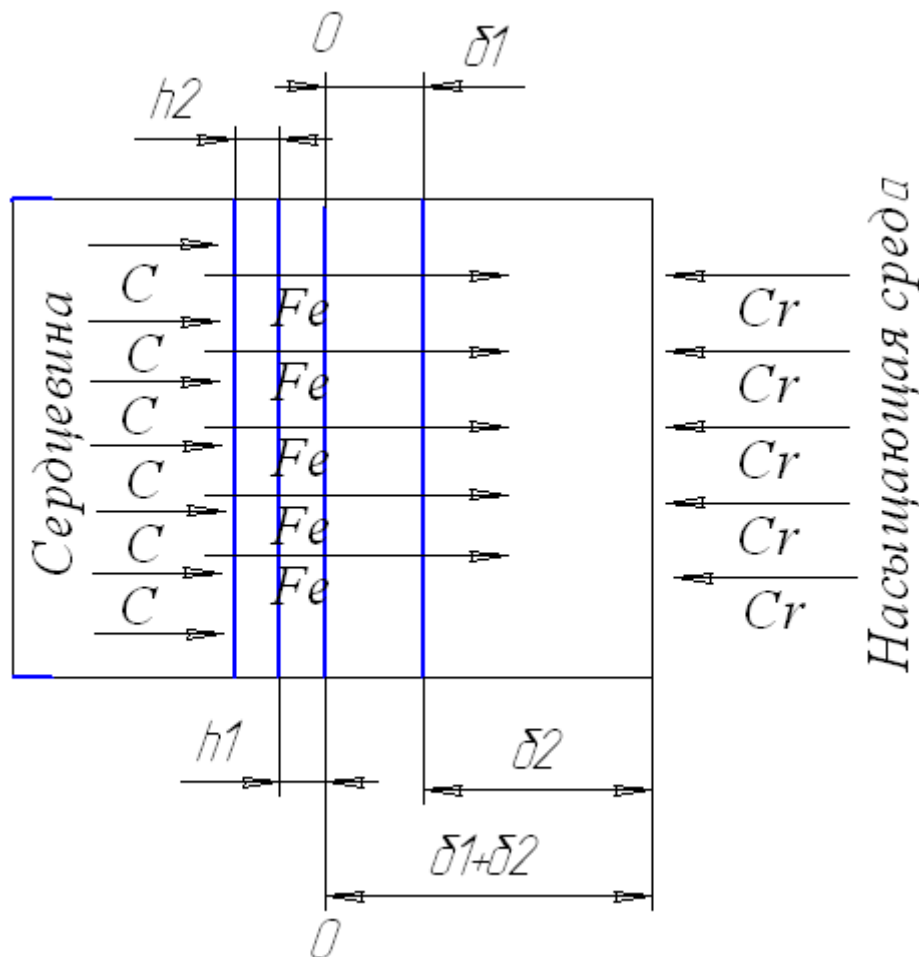


Рисунок 1 – Схема образования карбидного слоя:  $h_1$  – толщина карбидного слоя;  $h_2$  – толщина слоя на основе раствора хрома в железе;  $\delta_1$  – толщина карбидного слоя фазовых превращений;  $(\delta_1 + \delta_2)$  – толщина нарастающего карбидного слоя;  $\delta_3$  – слой адсорбированного хрома

В результате встречной диффузии углерода и осаждения хрома на поверхности образуется карбидный слой и происходит сдвиг его внешней границы на величину  $\delta_2$ .

Изменение линейных размеров изделия ( $\Delta$ ) определяется как сумма двух составляющих:

$$\Delta = 2(\delta_1 + \delta_2) \pm \delta_3,$$

где  $\delta_1$  – толщина карбидного слоя вследствие фазовых превращений в диффузионном слое;

$\delta_2$  – толщина карбидного слоя в результате встречной диффузии углерода и осаждения хрома на поверхности.

Рабочий орган (лапа культиватора) в плане имеет стрелчатую форму, по краям которой расположены режущие кромки, образующие угол  $80^\circ$  в плане. В поперечном сечении верхние поверхности образуют угол  $\lambda = 150^\circ$  с вершиной на продольной оси лапы (Рисунок 2).

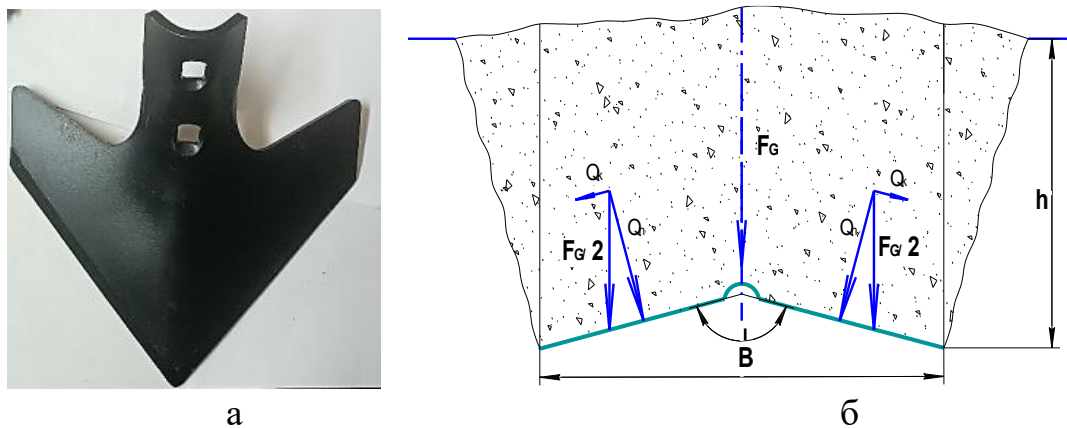


Рисунок 2 – Сечение лапы культиватора: а – общий вид; б – поперечное сечение лапы с зоной разрыхлённой почвы

Сопротивление рыхлению является важным показателем агрегата, влияющим на тягово-сцепные характеристики, экономичность, производительность, износ режущих кромок рабочего органа. Следует отметить, что большинство существующих методов расчёта тягового усилия культиваторов основано на эмпирических данных. Тяговое усилие рекомендуется определять зависимостью:

$$F_k = qb + \mu Q,$$

где  $q$  – удельное сопротивление почвы, кгс/м;

$b$  – ширина захвата, м;

$Q$  – вертикальная нагрузка на колёса культиватора;

$\mu$  – коэффициент перекатывания.

Удельное сопротивление почвы  $q$  определяется по опытным данным в зависимости от глубины рыхления.

При движении агрегата режущие кромки лапы, представляющие собой в плане клин, осуществляют отрыв определённого объёма почвы от массива. Пласт, отделяемый лапой, перемещаясь по ее наклонной верхней поверхности, установленной с определённым углом резания, поднимается пласт вверх и в обе

стороны от продольной оси лапы. Под силовым воздействием происходит разрушение почвы в зоне действия лапы. Анализируя процесс взаимодействия лапы культиватора с почвой, силу сопротивления рыхлению можно представить как сумму основных составляющих. В первую очередь следует определить силу резания при отделении некоторого объёма почвы от массива, которая зависит от параметров лапы и физико-механических свойств почвы. Сила тяжести отделяемого объёма почвы возникает при его подъёме. Величину силы тяжести  $F_G$  (Н) можно определить по формуле

$$F_G = V\rho g,$$

где  $V$  – объём поднимаемой почвы,  $\text{см}^3$ ;

$\rho$  – плотность почвы,  $\text{г/см}^3$ ;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Объём почвы  $V$  зависит от угла резания  $\alpha$ , глубины рыхления, размеров лапы. При расчёте объёма учитываются основная часть над поверхностью лапы  $V_1$  и объёмы в боковых зонах  $V_2$  в виде двух призм с углом при вершине  $= 15^\circ$ :

$$V_1 = A_{\text{л}}h, \quad V_2 = lh^2 \text{tg}15^\circ,$$

где  $A_{\text{л}}$  – площадь верхней поверхности лапы,  $\text{см}^2$ ;

$l$  – длина лапы,  $\text{см}$ .

Пласт почвы, перемещаясь по поверхности лапы, создаёт силу трения почвы по стальной поверхности. При подъёме почвы и перемешивании её слоёв в результате пространственного перемещения агрегатов в зоне рыхления возникает сила трения почвы по почве. На основании выполненных исследований предлагается метод расчёта силы сопротивления рыхлению  $F$  с учётом физических основ разрушения почвы как сумма отдельных силовых составляющих

$$F = F_p + F_{\text{Тр}} + F_G + F_{\text{Тр.гр}} + F_g,$$

где  $F_p$  – сила резания;

$F_{\text{Тр}}$  – сила трения почвы по стали;

$F_G$  – сила тяжести почвы;

$F_{\text{Тр.гр}}$  – сила внутреннего трения почвы;

$F_g$  – сила инерции.

Сила резания определяется как произведение удельного сопротивления резанию  $k_p$  и площади поперечного сечения режущего профиля  $A$ :

Сила тяжести, действующая вертикально, на поверхности лапы раскладывается на две составляющие, так как поверхность лапы с горизонталью образует угол резания  $\alpha$ . Составляющая перпендикулярная поверхности лапы (нормальная сила  $G_n$ ) определяется как  $G_n = F_G \cos \alpha$ . Сила, действующая вдоль лапы (касательная  $G_k$ ), –  $G_k = F_G \sin \alpha$  (Рисунок 3).

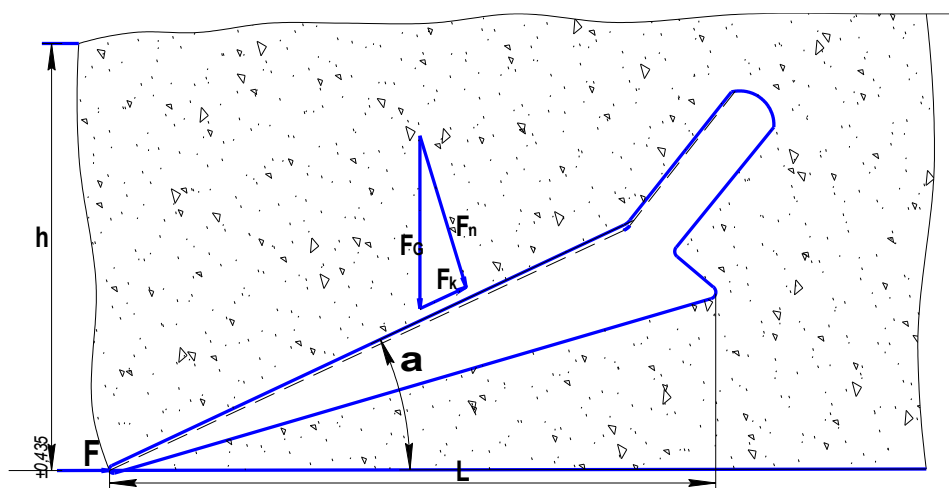


Рисунок 3 – Дополнительное сопротивление рыхлению, которое создаёт касательная сила  $G_k$

Нормальная сила  $G_n$  создаёт силу трения  $F_{тр} = G_n f$ , где  $f$  – коэффициент трения почвы по стали. Касательная сила  $G_k$  создаёт дополнительное сопротивление рыхлению. Таким образом, получена модель влияния основных факторов процесса рыхления грунта на тяговое усилие культиватора. Среди них следует выделить коэффициент трения почвы по стали и угол резания.

**В третьей главе** «Программа и методика экспериментальных исследований» разработаны общие и частные методики исследования влияния параметров термодиффузионного хромирования на толщину, микротвердость и износостойкость покрытий. Диффузионное насыщение образцов хромом проводилось в камерной вакуумной электропечи СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ (Рисунок 4).



Рисунок 4– Внешний вид вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ

Исследование микротвердости покрытий образцов проводилось при помощи прибора ПМТ-ЗМ. Испытания образцов на износостойкость проводили на установке абразивного изнашивания. Расчет напряженного состояния конструкции лапы культиватора выполнялся с использованием системы Inventor Pro и отечественного графического пакета «Компас». Исследования операций

резания грунта при движении лапы культиватора были проведены в специализированной лаборатории мелиоративных машин кафедры организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева. Для этого использовали грунтовый канал и специальные измерительные приборы. Грунт в канале, подготовленный к проведению опыта по испытанию экспериментальной лапы показан на Рисунке 5, а общий вид стойки с рабочим органом перед началом опыта на Рисунке 6.

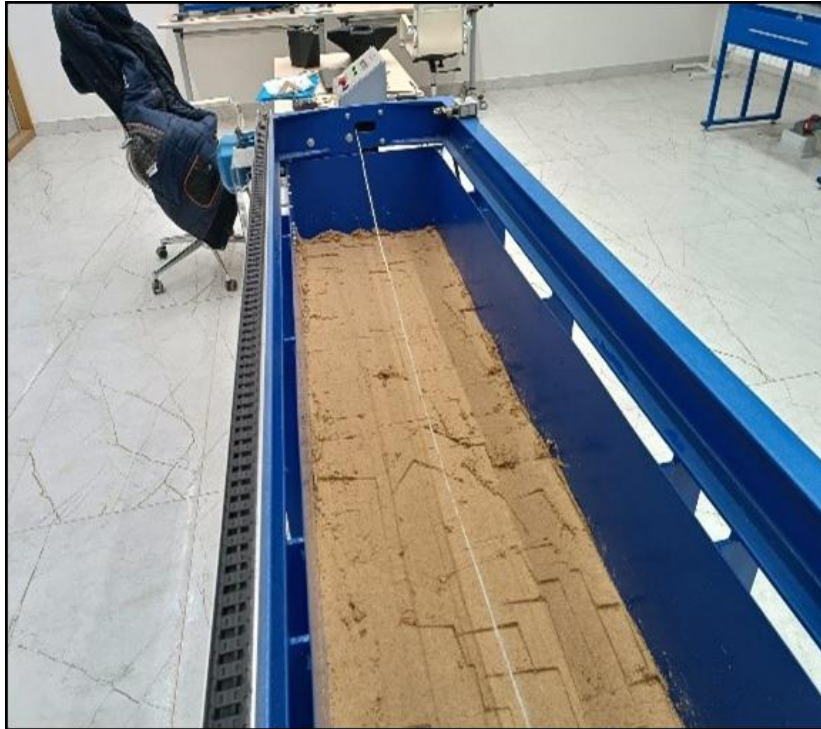


Рисунок 5 – Грунт в канале, подготовленный к проведению опыта по испытанию экспериментальной лапы



Рисунок 6 – Общий вид стойки с рабочим органом перед началом опыта

Для изучения влияния углов резания и заострения режущей кромки лапы при рыхлении на величину тягового усилия и характер структуры разрыхлённого грунта проведён трёхфакторный эксперимент. Для этого были сконструированы и изготовлены сменные компенсационные пластины на лапы культиватора с различными углами заострения режущих кромок.

Оценка степени разрыхления почвы восстановленной лапой проводилась методом фрактального анализа. Измерение фрактальной размерности проводилось клеточным методом с использованием программы анализа данных Gwyddion. Полевые испытания восстановленных стрельчатых лап проводили на полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Для этого использовался трактор МТЗ-1523 в сцепке с культиватором КСП-4. Для определения функциональных характеристик (потребительских свойств) культиватора с восстановленными лапами при обработке почвы определяли глубину обработки (взрыхленного слоя), крошение и гребнистость поверхности почвы и наработку на отказ.

В четвертой главе «Результаты исследований и их анализ» представлены результаты диссертационного исследования. Установлено, что при температуре 1100°C для углеродистых сталей 45 и У8А толщина диффузионного слоя составляет 0,015...0,019 мм, а для легированных 65Г, 30ХГСА, ХВГ – 0,025...0,030 мм. Повышение температуры до 1200°C приводит к росту толщины слоя на углеродистых сталях до 0,025...0,03 мм, для легированных сталей 0,028...0,039 мм. Для образца из стали ХВГ толщиной 0,8 и 10 мм она составляет соответственно 0,038 и 0,055 мм. Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов показана на рисунке 6.

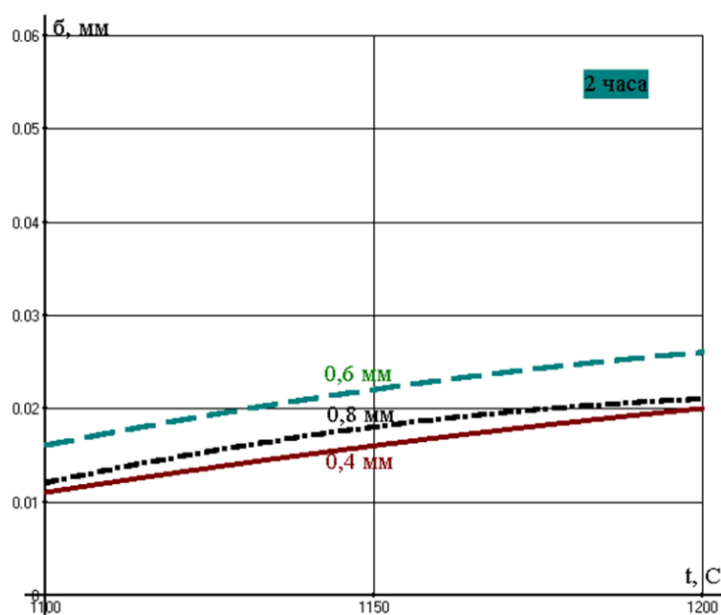


Рисунок 6 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь 45) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 2 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 - (5,5 \cdot 10^{-4})t - 0,0352;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00197t - 0,879;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (1 \cdot 10^{-6})t^2 - 0,00221t + 1,233.$$

Максимальная микротвердость получена на образцах из сталей 65Г, 30ХГСА, ХВГ при температуре 1200°C и продолжительности хромирования 6 ч. При толщине образца 10 мм из стали ХВГ микротвердость его поверхности составила 28000 МПа, а при толщине 0,6 мм только 18000 МПа. Пластины из сталей 45, У8А, 08кп имеют меньшую твердость, чем образцы из сталей 65 Г, 30ХГСА и ХВГ. Максимальное значение показателя твердости поверхности наблюдается на образцах толщиной 0,8 мм при температуре хромирования 1200°C в течение 6 ч. Зависимость микротвердости диффузионного слоя на стальной пластине от температуры и времени диффузионного хромирования показана на Рисунке 7.

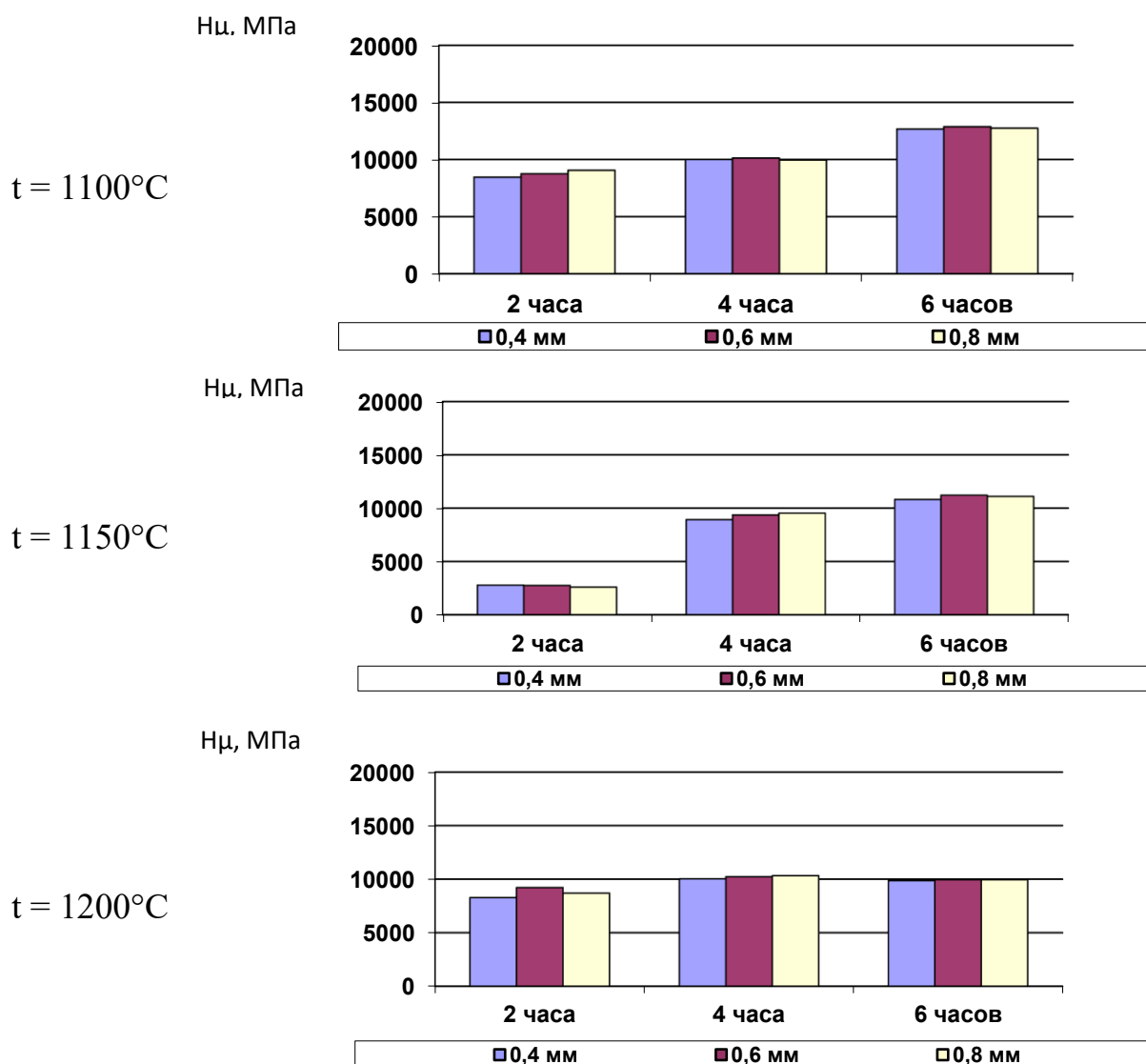


Рисунок 7 – Зависимость микротвердости диффузионного слоя на стальной пластине от температуры и времени термодиффузионного хромирования

Установлено, что износостойкость пластин из сталей У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 и 4 мм после термодиффузионного хромирования в 2,5...3 раза выше износостойкости образца закаленной стали 45. Наилучшие показатели износостойкости получены при испытаниях хромированных образцов, изготовленных из стали ХВГ. Износостойкость образцов после крепления к ним стальных пластин У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 мм, прошедших термодиффузионное хромирование, в 2...3 раза выше износостойкости образца из закаленной стали 45. Результаты испытаний образцов толщиной 4 мм на износостойкость представлены на Рисунке 8.

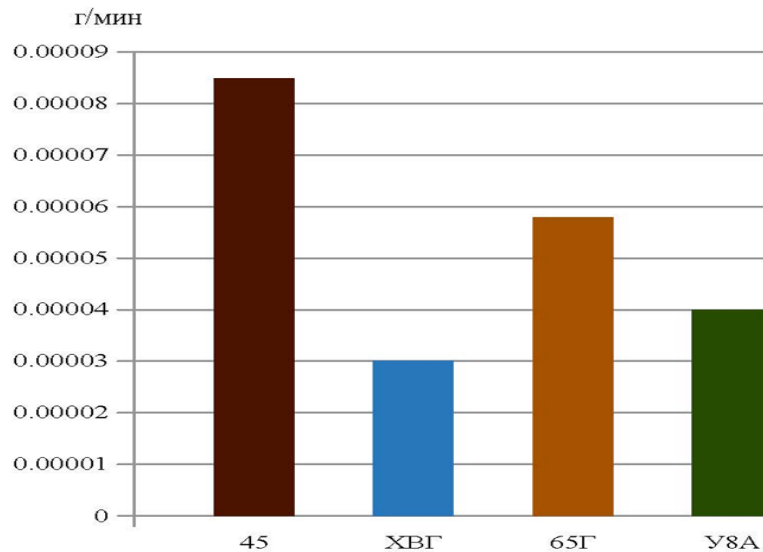


Рисунок 8 – Скорость изнашивания стальных пластин толщиной 4 мм после диффузионного хромирования, г/мин

Набольшие напряжения при работе культиватора наблюдаются на режущей кромке лапы и в местах ее крепления к раме. Установлено, что максимальное смещение в конструкции лапы культиватора, связанное с износом, приходится на ее переднюю кромку, а коэффициент запаса прочности для лапы культиватора должен быть не ниже 1,99 (Рисунок 9).

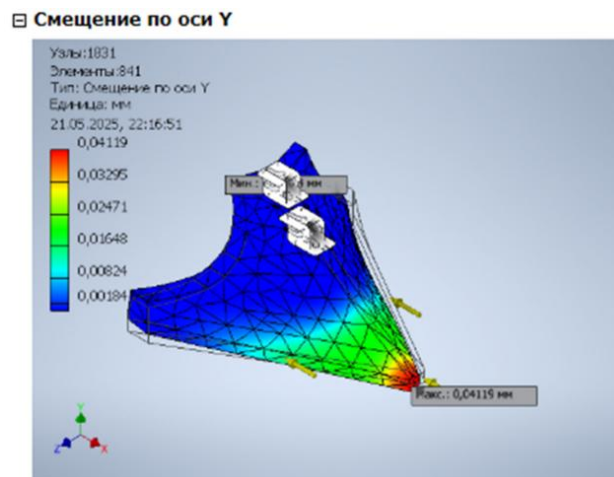
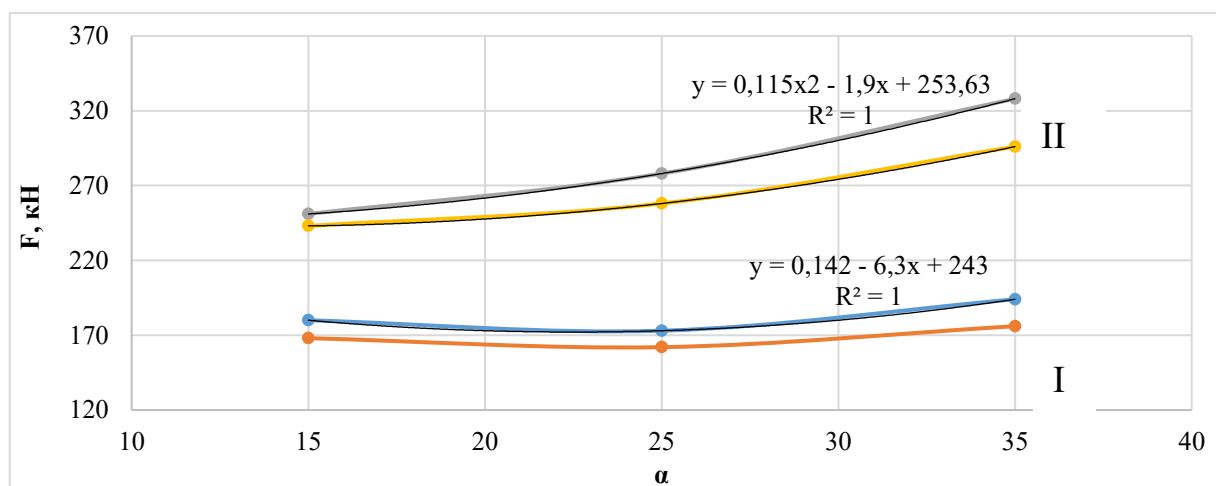
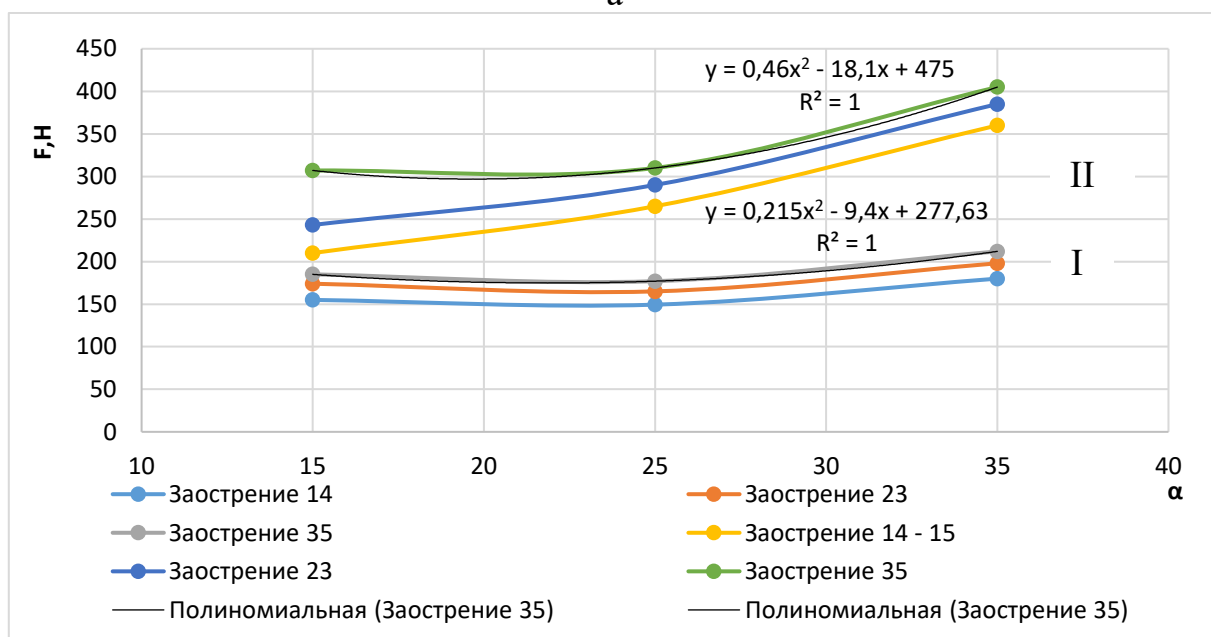


Рисунок 9 – Максимальное смещение в конструкции лапы культиватора, связанное с износом, приходится на ее переднюю кромку

Наименьшие тяговые усилия 162...258 Н имеет лапа культиватора с углами резания 15 и 25° и заострения 14 и 23°. Уменьшение угла заострения снижает тяговое сопротивление на 5...10 %. Эксперименты со сменными накладками показали, что уменьшение угла заострения от 35 до 14° одновременно с увеличением угла резания от 15 до 35° снижает тяговое сопротивление на 5...18 %. Зависимость тягового сопротивления рыхления лапой культиватора от угла резания показана Рисунке 10.



а



б

Рисунок 10 – Зависимость тягового сопротивления рыхления лапой культиватора от угла резания: а – без заострения и б – с заострением

Наиболее интенсивный процесс разрыхления (наибольшие значения параметров, характеризующих процесс разрыхления) наблюдался у рабочего органа с углами резания 15...25° и заострения 14...23°. Большие затраты энергии были зафиксированы для культиваторов с углами резания 25...35°, заострения 23...35°. Наиболее равномерное рыхление массива почвы происходит при угле резания 25...30° и при угле заострения 17°. Зависимости дисперсии фрактальной

размерности (а) и фрактальной размерности (б) от угла резания культиватора показаны на Рисунке 11.

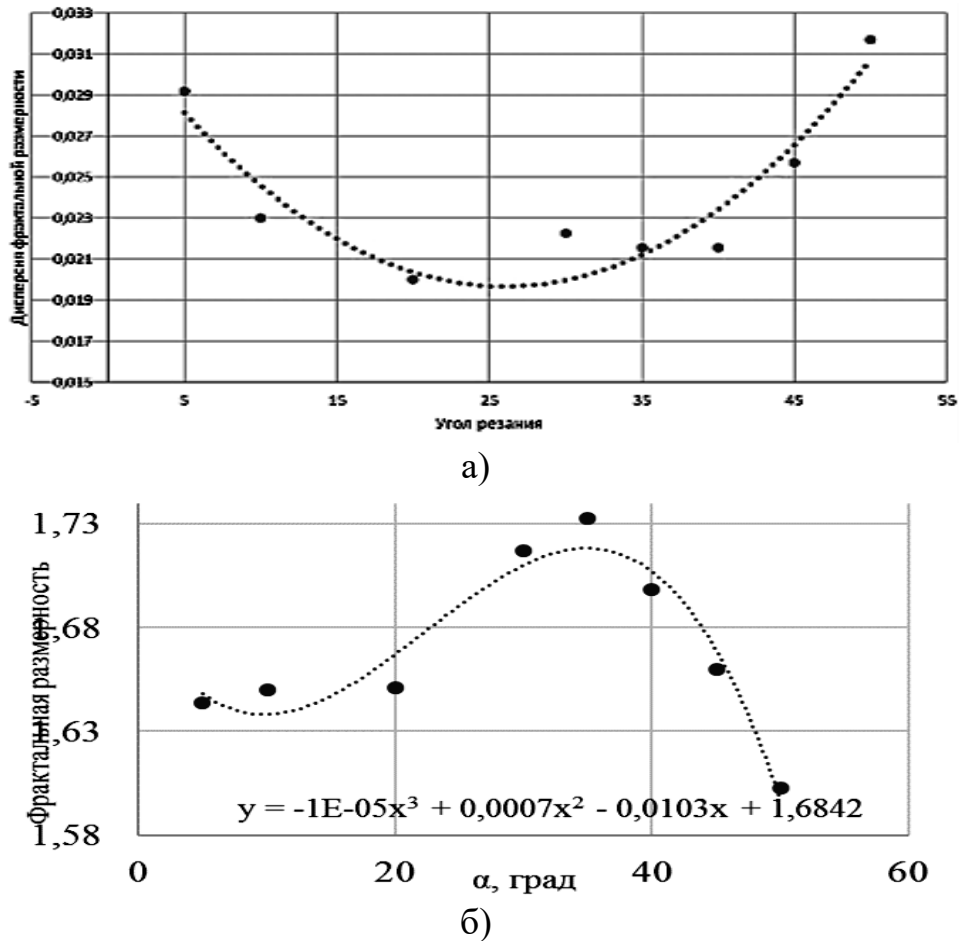


Рисунок 11 – Зависимости дисперсии фрактальной размерности (а) и фрактальной размерности (б) от угла резания культиватора

Результаты полевых испытаний на износостойкость показали, что ресурс восстановленных лап в 1,64 раза больше, чем у серийных стрелчатых лап. Износ восстановленной лапы при наработке на одну лапу 34,5 га составил 0,8 мм. Нарботка восстановленной лапы до наступления предельного состояния составила 72,0 га. Динамика износа серийных и восстановленных стрелчатых лап в зависимости от наработки показана на Рисунке 12.

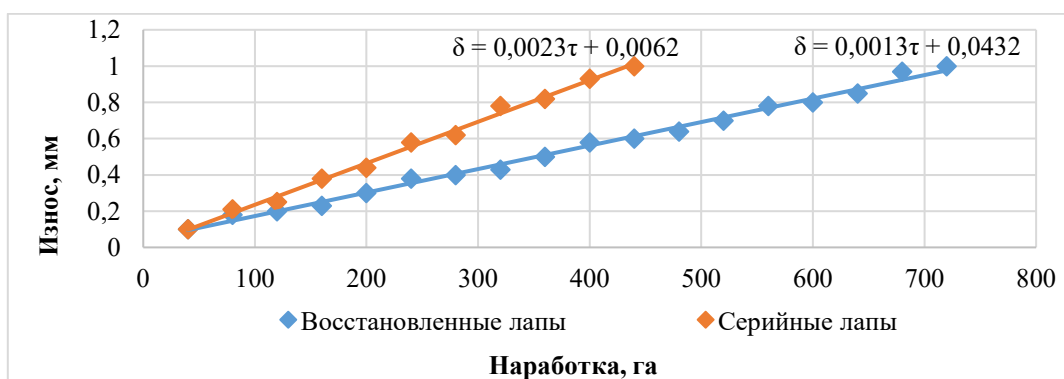


Рисунок 12 – Динамика износа серийных и восстановленных стрелчатых лап

Тяговое сопротивление и расход топлива агрегата культиватора при работе культиватора с восстановленными лапами ниже, чем с серийными. Наименьшее значение тягового сопротивления получены при скорости агрегата 7 км/ч и углами резания  $25^\circ$ , заострения  $17^\circ$ . Зависимость тягового сопротивления от скорости агрегата показана на Рисунке 13.

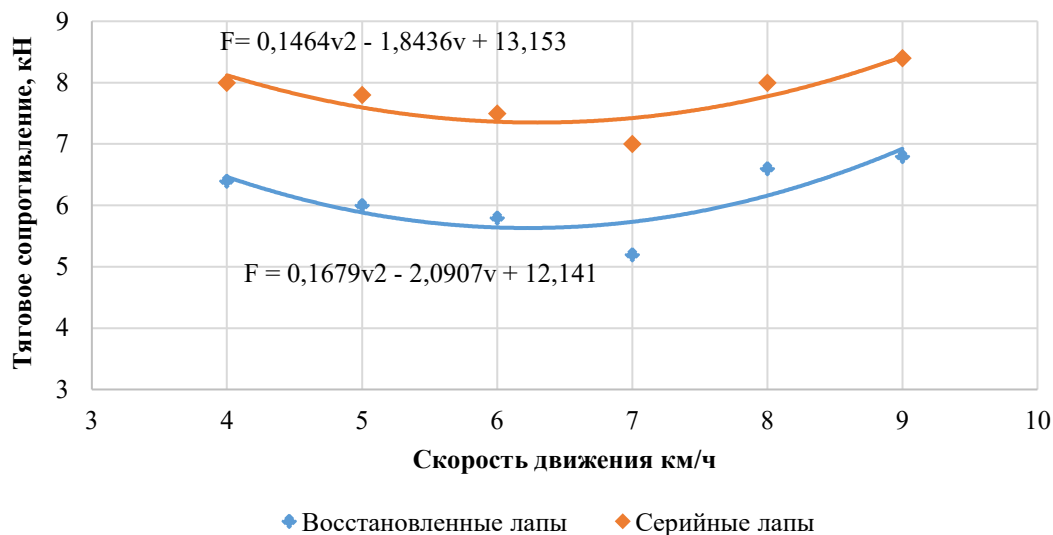


Рисунок 13 – Зависимость тягового сопротивления от скорости агрегата

Зависимость расхода топлива трактора от скорости движения агрегата показана на Рисунке 14.

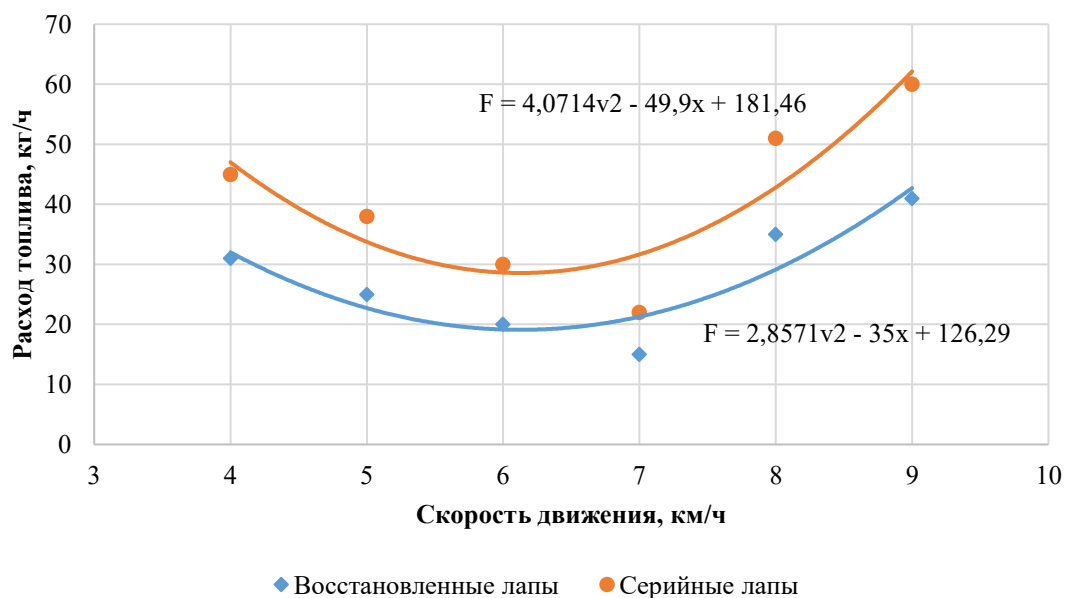


Рисунок 14 – Зависимость расхода топлива трактора от скорости движения

В результате исследований установлено, что при обработке почвы культиватором с восстановленными лапами отклонение глубины соответствовало нормам (не более 1 см), а размеры гребней и глыб не превышали установленных значений. Функциональные характеристики (потребительские

свойства) культиватора с восстановленными лапами соответствуют установленным критериям.

В пятой главе «**Производственные рекомендации и их экономическая эффективность**» предложена примерная номенклатура стрелчатых лап культиваторов для восстановления креплением хромированных пластин. Разработан технологический процесс восстановления работоспособности стрелчатых лап культиваторов, который включает в себя нарезку стальной пластины, сверление отверстий, заточку лезвия, шлифование плоскости и углов заострения, очистку поверхности, термодиффузионное хромирование, контроль качества. Разработанная технология восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением диффузионного хромирования внедрена в ОАО «Брянксельмаш». Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Института механики и энергетики имени В. П. Горячкина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева при подготовке бакалавров по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также для научных исследований аспирантов по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Ожидаемый расчетный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии составит 5,28 млн руб. при программе восстановления 3200 стрелчатых лап культиваторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована возможность восстановления работоспособности рабочих органов культиваторов термодиффузионным хромированием. Описан механизм диффузионных процессов при хромировании. Теоретически обоснованы влияние основных факторов процесса рыхления грунта на тяговое усилие культиватора, а также необходимость оценки напряженного состояния конструкции культиватора.

2. Установлено, что при температуре 1100°C для углеродистых сталей 45 и У8А толщина диффузионного слоя составляет 0,015...0,019 мм, а для легированных 65Г, 30ХГСА, ХВГ – 0,025...0,030 мм. Повышение температуры до 1200°C приводит к росту толщины слоя на углеродистых сталях до 0,025...0,03 мм, для легированных – до 0,028...0,039 мм. Для образца из стали ХВГ толщиной 0,8 и 10 мм она составляет соответственно 0,038 и 0,055 мм.

3. Максимальная микротвердость получена на образцах из сталей 65Г, 30ХГСА, ХВГ при температуре 1200°C и продолжительности хромирования 6 ч. При толщине образца из стали ХВГ 10 мм микротвердость его поверхности составила 28000 МПа, а при 0,6 мм – только 18000 МПа. Хромированные пластины из сталей 45, У8А, 08кп имеют меньшую твердость, чем образцы из сталей 65Г, 30ХГСА и ХВГ.

4. Установлено, что износостойкость пластин из сталей У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 и 4 мм после термодиффузионного хромирования в 2,5...3 раза выше износостойкости образца закаленной стали 45. Наилучшие показатели износостойкости получены при испытаниях хромированных пластин из стали

ХГВ. Износостойкость образцов после крепления к ним хромированных пластин из стали У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 мм в 2...3 раза выше износостойкости образца из закаленной стали 45.

5. Наибольшие напряжения при работе культиватора наблюдаются на режущей кромке лапы и в местах ее крепления к раме. Установлено, что коэффициент запаса прочности для лапы культиватора должен быть не ниже 1,99.

6. Наименьшие тяговые усилия 162...258 Н имеет лапа культиватора с углами резания 15 и 25° и заострения 14 и 23°. Уменьшение угла заострения снижает тяговое сопротивление на 5...10 %. Эксперименты со сменными пластинами показали, что уменьшение угла заострения от 35 до 14° одновременно с увеличением угла резания от 15 до 35° снижает тяговое сопротивление на 5...18 %.

7. Наиболее интенсивный процесс разрыхления наблюдался у рабочего органа с углами резания 15...25° и заострения 14...23°. Наиболее равномерное рыхление массива почвы происходит при угле резания 25...30° и при угле заострения 17°.

8. Результаты полевых испытаний на износостойкость показали, что ресурс восстановленных стрельчатых лап в 1,64 раза больше, чем у серийных. Износ восстановленной лапы при наработке на одну лапу 34,5 га составил 0,8 мм, наработка восстановленной лапы до наступления предельного состояния – 72,0 га.

9. Тяговое сопротивление и расход топлива при работе культиватора с восстановленными лапами ниже, чем с серийными в среднем в 1,5 раза. Наименьшее значение тягового сопротивления получены при скорости агрегата 7 км/ч, углами резания 25° и заострения – 17°.

10. Установлено, что при обработке почвы культиватором с восстановленными лапами отклонение глубины соответствовало нормам (не более 1 см), а размеры гребней и глыб не превышали установленных значений. Функциональные потребительские свойства культиватора с восстановленными лапами соответствуют критериям постановления Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования».

11. Предложена примерная номенклатура стрельчатых лап культиваторов для восстановления работоспособности креплением хромированных пластин. Разработан технологический процесс восстановления, который включает в себя в том числе нарезку стальной полосы, сверление отверстий, заточку лезвия, шлифование плоскости и углов заострения, очистку поверхности, термодиффузионное хромирование, контроль качества. Разработанная технология восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением диффузионного хромирования внедрена в ОАО «Брянксельмаш».

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Института механики и энергетики имени В. П. Горячкина РГАУ – МСХА имени

К. А. Тимирязева при подготовке бакалавров по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также для научных исследований аспирантов по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

12. Ожидаемый расчетный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии составит 5,28 млн руб. при программе восстановления 3200 стрельчатых лап культиваторов.

### **Рекомендации производству**

Полученные в диссертационной работе результаты рекомендуются к использованию на сервисных и промышленных предприятиях при реализации технологических процессов восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин. Рекомендовано создавать участки по термодиффузионному хромированию деталей, а также организовать изготовление упрочненных сменных пластин (ремкомплектов) для ремонта почвообрабатывающих машин.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

В дальнейшем необходимо расширить номенклатуру восстанавливаемых и упрочняемых рабочих органов почвообрабатывающих машин, в том числе посевных комплексов и сеялок. Следует продолжить исследования направленные на снижение энергоемкости и продолжительности процесса термодиффузионного хромирования, а также повышение его производительности и безопасности.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки РФ**

1. Особенности ремонта зерноуборочных комбайнов на отдельных сервисных предприятиях инженерной службы АПК Краснодарского края / Ю. В. Катаев, В. С. Герасимов, И. А. Тишанинов, В. А. Казакова, М. О. Соболев, А. В. Бугаев // Технический сервис машин. – 2023. – Т. 61. – № 3 (152). – С. 25-31.

2. Оценка состояния ЦПГ двигателя по давлению газов в камере / О. Н. Дидманидзе, А. И. Сучков, С. Н. Девянин [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 113-120. – DOI 10.36508/RSATU.2023.63.14.015.

3. Температурные показатели охлаждающих жидкостей для аккумуляторов электротракторов и электромобилей / О. Н. Дидманидзе, Е. П. Парлюк, А. И. Сучков [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 55-61. – DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-4-55-61.

4. Карелина, М. Ю. Комплексный подход к повышению эффективности сельскохозяйственной техники в условиях реализации задачи достижения технологического суверенитета Российской Федерации / М. Ю. Карелина, О. Н.

Дидманидзе, А. В. Бугаев // Известия Международной академии аграрного образования. – 2023. – № 67. – С. 55-60.

5. Экспериментальные исследования расхода картерных газов двигателя Д-243 с разной степенью износа цилиндропоршневой группы / О. Н. Дидманидзе, А. И. Сучков, С. Н. Девянин [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 11(317). – С. 36-39. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-11-36-39.

6. Дидманидзе, О. Н. Исследования износа лапы культиватора при взаимодействии с почвогрунтовой средой в системе INVENTOR PRO / О. Н. Дидманидзе, А. В. Бугаев, Х. А. Абдулмажидов // Международный технический журнал. – 2025. – № 5 (99). – С. 58-65.

7. Дидманидзе, О. Н. Применение метода конечных элементов при исследовании прочности лапы культиватора / О. Н. Дидманидзе, А. В. Бугаев, Х. А. Абдулмажидов // Международный технический журнал. – 2025. – № 1 (95). – С. 37-47.

8. Дидманидзе, О. Н. Физические основы рыхления почвы лапой культиватора / О. Н. Дидманидзе, А. В. Бугаев, А. А. Макаров // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 12 (342). – С. 16-18.

9. Бугаев, А. В. Влияние параметров универсальной стрелчатой лапы культиватора на рабочий процесс / А. В. Бугаев, В. В. Балабанов, А. А. Макаров // Техника и оборудование для села. – 2026. – № 1. – С. 15-19.

10. Дидманидзе, О. Н. Разработка конструкции, прочностные расчеты и оптимизация формы лапы культиватора в системе INVENTOR PRO / О. Н. Дидманидзе, Х. А. Абдулмажидов, А. В. Бугаев // Вестник Рязанского ГАТУ имени П. А. Костычева. – 2025. – Т. 17. – № 4. – С. 117-124.

11. Разработка конструкции культиватора и анализ его напряженного состояния в системе Inventor Pro / А. В. Бугаев, О. Н. Дидманидзе, Х. А. Абдулмажидов, Е. П. Парлюк, Д. Н. Бышов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2026. – № 1(85). – С. 55-59.

12. Бугаев, А. В. Анализ дефектов стрелчатых лап культиваторов и способы повышения их износостойкости / А. В. Бугаев // Техника и оборудование для села. – 2026. – № 3. – С. 22-24. – DOI 10.33267/2072-9642-2026-3-22-24.

13. Определение технико-эксплуатационных и тяговых характеристик лапового культиватора / О. Н. Дидманидзе, Х. А. Абдулмажидов, А. В. Бугаев, Е. П. Парлюк // Международный технический журнал. – 2026. – № 1 (101). – С. 56-65.

14. Эксплуатационные расчеты мелиоративного каналочистителя с ковшом на жестких направляющих / О. Н. Дидманидзе, Х. А. Абдулмажидов, А. В. Бугаев, Е. П. Парлюк, Д. Н. Бышов // Вестник РГАТУ. – 2026. – Т. 18. – № 1. – С. 112-121.

#### **Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в МБД**

1. Technologies for hardening flat knives by HFC boriding / V. P. Lyalyakin, V. F. Aulov, Yu. N. Rozhkov, A. V. Bugaev // Russian Metallurgy (Metally). – 2023. – № 13. – С. 2183-2186.

2. Дидманидзе, О. Н. Анализ факторов, влияющих на износ лапы культиватора / О. Н. Дидманидзе, А. В. Бугаев, А. А. Макаров // Российская сельскохозяйственная наука. – 2025. – № 6. – С. 60-65.

### **Монография**

1. Современная агроинженерия / В. И. Трухачев, О. Н. Дидманидзе, М. Н. Ерохин [и др.]. – М. : ООО «Мегаполис», 2022. – 413 с. – ISBN 978-5-6049928-2-1.

### **Патенты РФ на изобретение и полезную модель**

1. Патент № 2282677 С1 Российская Федерация, МПК С23С 10/12. Способ упрочнения деталей : № 2005102999/02 : заявл. 08.02.2005 : опубл. 27.08.2006 / Б. А. Богачев, А. В. Бугаев.

2. Патент на полезную модель № 236692 U1 Российская Федерация, МПК А01В 35/20. Лапа культиватора : заявл. 23.05.2025 : опубл. 18.08.2025 / С. К. Тойгамбаев, О. Н. Дидманидзе, А. В. Бугаев, Е. П. Парлюк ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

### **Учебные пособия**

1. Практикум по ремонту машин / Е. А. Пучин, В. С. Новиков, Н. А. Очковский [и др.]. – М : Издательство КолосС, 2009. – 327 с. – ISBN 978-5-9532-0539-9.

2. Методика оценки технического состояния ЦПГ автотракторных двигателей / О. Н. Дидманидзе, С. Н. Девянин, А. И. Сучков [и др.]. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2023. – 83 с.

3. Бугаев, А. В. Методы обеспечения работоспособного технического состояния транспортных и транспортно-технологических машин / А. В. Бугаев. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2023. – 124 с. – ISBN 978-5-00227-058-3.

### **Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях**

1. Парлюк, Е. П. Особенности блочно-модульной охлаждающей системы тягово-транспортных средств / Е. П. Парлюк, О. Н. Дидманидзе, А. В. Бугаев // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 25-26 января 2022 года. Часть 1. – М. : Общество с ограниченной ответственностью «Сам Полиграфист», 2022. – С. 47-56.

2. Варнаков, Д. В. Применение распределенных сетей в задачах прогнозирования и управления / Д. В. Варнаков, А. В. Бугаев, В. В. Варнаков // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 25-26 января 2022 года. Часть 1. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2022. – С. 57-65.

3. Направления развития электрического трактора для АПК / Д. Г. Асадов, Н. Н. Пуляев, А. В. Бугаев, Н. Е. Ртищева // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25-26 января 2023 года. Том 2. – М. : ООО «Сам полиграфист», 2023. – С. 37-43.

4. Варнаков, Д. В. Разработка метода оценки эффективности функционирования сложных технических систем / Д. В. Варнаков, А. Н. Юденичев, А. В. Бугаев // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 25-26 января 2023 года. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2023. – С. 98-104.

5. Варнаков, Д. В. Разработка методов контроля параметров и расширение компонентной базы при реализации цифровых технологий / Д. В. Варнаков, А. В. Бугаев, А. Н. Юденичев // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 25-26 января 2023 года. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2023. – С. 78-84.

6. Дорохов, А. С. Энергосберегающая технология уборки корнеплодов и картофеля в условиях повышенной влажности почвы / А. С. Дорохов, А. В. Сибирев, А. В. Бугаев // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 25-26 января 2023 года. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2023. – С. 72-77.

7. Технологии упрочнения плоских ножей ТВЧ-борированием / В. П. Лялякин, В. Ф. Аулов, Ю. Н. Рожков, А. В. Бугаев // Технология металлов. – 2023. – № 6. – С. 31-36. – DOI 10.31044/1684-2499-2023-0-6-31-36.