

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –  
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»  
(ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева)

На правах рукописи

**БАСОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ШНЕКОВ ЭКСТРУДЕРОВ  
ДИФФУЗИОННЫМ БОРИРОВАНИЕМ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫМ  
НАГРЕВОМ В ОБМАЗКАХ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование  
для агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание учёной  
степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Скороходов Дмитрий Михайлович

Москва – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	9
1.1. Актуальность исследования повышения долговечности шнековых рабочих органов экструдеров .....	9
1.2. Анализ условий работы шнековых рабочих органов экструдеров.....	14
1.3. Анализ параметров, исследуемых шнековых рабочих органов экструдеров.....	21
1.4. Анализ дефектов рабочих органов экструдера .....	27
1.5. Анализ методов и средств восстановления и упрочнения шнеков экструдеров .....	30
1.6. Требования к новой технологии восстановления и упрочнения шнековых рабочих органов кормовых экструдеров. Основные выводы по первой главе. Цели и задачи исследования .....	38
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ КОРМОВЫХ ЭКСТРУДЕРОВ .....	40
2.1. Формирование модели теоретических исследований и теоретические основы определяющих параметров физико-механических свойств шнековых рабочих органов .....	41
2.2. Термодинамическое и кинетическое исследование возможных реакций между компонентами борирующего состава и сталью при сверхвысокочастотном нагреве .....	44
2.3. Формирование модели технического процесса упрочнения шнековых рабочих органов .....	53
2.4. Моделирование влияния факторов на процесс упрочнения .....	57
2.5. Выводы по второй главе .....	59
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .	60
3.1. Методика экспериментального исследования .....	60
3.2. Разработка устройства для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.....	62
3.2.1. Требования к проектированию установки для упрочнения шнеков экструдеров и его принцип работы. ....	62
3.3. Методика лабораторных исследований.....	70
3.3.1. Исходные данные для лабораторных испытаний. ....	72
3.4. Методика исследования влияния наиболее значимых факторов.....	75
3.4.1. Методика исследования твёрдости экспериментальных образцов .....	75

3.4.2. Исследование износостойких покрытий в лабораторных условиях .....	76
3.4.3. Исследование коррозионной стойкости в лабораторных условиях .....	77
3.4.4. Методика металлографического исследования, определения микротвёрдости упрочнённого слоя и спектрального анализа .....	77
3.5. Методика производственных испытаний .....	78
<b>ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРОИЗВОДСТВУ .....</b>	<b>79</b>
4.1. Определение оптимального режима упрочнения .....	79
4.2. Металлографический и рентгеноспектральный анализы боридного покрытия .....	82
4.3. Определение микротвёрдости боридного покрытия .....	84
4.4. Износостойкость покрытий .....	85
4.5. Исследование коррозионной стойкости .....	86
4.6. Эксплуатационные испытания упрочнённого шнека экструдера .....	86
4.7. Разработка технологии для повышения долговечности шнеков экструдеров .....	87
4.8. Рекомендации по организации производственного внедрения технологического процесса упрочнения шнековых рабочих органов .....	91
4.9. Выводы по четвертой главе .....	92
<b>ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ. ....</b>	<b>94</b>
5.1.1. Капитальные вложения на выполнение проекта (приобретение оборудования и инструмента) .....	94
5.2. Определение прямых эксплуатационных затрат .....	96
5.3. Экономическая оценка проекта .....	100
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>103</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>104</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ .....</b>	<b>122</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В условиях современной геополитической обстановки одной из основных задач в сфере АПК России является развитие животноводства. Важнейшей составляющей для животноводства является производство кормов, а также совершенствование методов и технических средств их получения. За последние годы количество импортной техники в животноводческой отрасли значительно увеличилось и составляет около 95%, что требует безотлагательного совершенствования технологии ремонта данной техники, и в частности, разработки новых технологий упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Учитывая постоянно возрастающую потребность в количестве кормов, а также высокие требования к качеству корма, большое распространение получили комбикорма. Внедрение комбикорма в рацион коров повышает их удои на 10...20% при снижении затрат корма на 7 ... 15%, что в свою очередь снижает себестоимость продукции.

В приготовлении концентрированных кормов широко используются экструдеры. Наибольшая доля рынка экструдеров в мире представлена Китаем (18,6 %), Италией (17%), Германией (12%). Россия по производству экструдеров занимает 5 место (9%). Поставляемые запасные части, в том числе рабочие органы экструдеров, тоже являются импортными. Учитывая санкционные условия, в которых находится Российская Федерация, стоимость запасных частей в разы увеличилась, а их доставка осуществляется через параллельный импорт.

Главным рабочим органом экструдеров является шнек. Экструдеры классифицируются по принципу работы шнека, бывают экструдеры одношнековые, многошнековые. Шнеки в свою очередь делятся на однозаходные, многозаходные, с переменным диаметром, с переменным шагом, разной площадью сечения и др. Экструдеры и используемые в них шнековые рабочие органы подбираются исходя из технологических мощностей предприятия, объёмов производства и видов перерабатываемых компонентов. Высокие температурные

режимы работы шнеков экструдеров (до 180°C), высокое давление, возникающее в процессе прессования корма (до 5 МПа), повышенная влажность кормосмесей (до 30%), наличие источников абразива в виде твердых частиц зерна и других компонентов, а также наличие химически активных веществ и неправильная эксплуатация экструдеров приводят к интенсивному коррозионно-механическому износу шнеков.

Из-за отсутствия доступных способов восстановления и повышения долговечности шнековых рабочих органов экструдеров большинство животноводческих предприятий вынуждены закупать импортные запасные части несмотря на усложнённую их доставку, а на рынке все чаще появляются некачественные запасные части, установка которых в эксплуатацию приводит к их быстрому износу, что влечёт за собой экономические затраты на приобретение новых деталей, а также к простоям оборудования.

Существующие методы восстановления и упрочнения шнеков экструдеров недостаточно надёжны и эффективны, их сложно использовать в современном производстве. Поэтому разработка новых методов и средств упрочнения шнеков, повышающих их долговечность и работоспособность, является актуальной задачей.

**Степень разработанности.** Повышению надёжности сельскохозяйственных машин и их рабочих органов посвящены работы Черноиванова В.И., Дидманидзе О.Н., Ерохина М.Н., Лялякина В.П., Голубева И.Г., Новикова В.С., Казанцева С.П., Леонова О.А., Апатенко А.С., Виноградова В.В., Левшина А.Г., Аулова В.Ф., Кабдушевой А.С., Мартыновой Д.В., Попова В.П., Ханина В.П., Зинюхина Г.Б., Антимонова С.В., Сидоренко Г.А., Трифонова Г.И., Денисова В.А., Ишкова А.В. и других ученых.

Анализ современных способов повышения долговечности шнековых рабочих органов экструдеров показал, что с учетом их эксплуатации и износов, наиболее перспективным для упрочнения шнеков экструдеров, в том числе после восстановления их геометрической формы, является метод диффузионного борирования в обмазках сверхвысокочастотным нагревом. Из-за недостаточной

изученности данный метод требует проведения исследования по его внедрению в производственный процесс на запасных частях сложной формы поверхности.

**Цели исследования.** Разработка технологии упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

**Объект исследования.** Боридное покрытие на рабочей поверхности шнека экструдера, полученное путём сверхвысокочастотного нагрева.

**Предмет исследования.** Упрочнённый слой рабочей поверхности шнека экструдера, полученный путем сверхвысокочастотного нагрева в обмазках.

**Научная новизна.** Теоретически доказана возможность образования боридного покрытия в условиях кратковременного сверхвысокочастотного нагрева при сохранении исходных свойств основы деталей. Получена математическая модель процесса диффузионного борирования методом сверхвысокочастотного нагрева в обмазках и обоснованы параметры поступательного движения индукционного нагревателя с вращательным движением шнекового рабочего органа в процессе упрочнения его рабочей поверхности.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

- определены термодинамические условия получения боридного покрытия сверхвысокочастотным нагревом.
- разработана математическая модель процесса диффузионного борирования методом сверхвысокочастотного нагрева в обмазках
- разработана технология повышения долговечности шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках;
- разработана установка для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом СВЧ (патент РФ на изобретение RU 2820894);
- разработана программа, формирующая G-code генерации частоты вращения шнекового рабочего органа и возвратно-поступательного движения индукционного нагревателя (патент на ЭВМ №20224669388);
- упрочнение шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках сверхвысокочастотным нагревом позволяет увеличить ресурс шнеков экструдеров

в 1,5 раза.

**Методология и методы исследования.** Экспериментальные исследования проводились по известным методикам, на современном лабораторном оборудовании института механики и энергетики имени В.П. Горячкина. Боридные покрытия получены на разработанной установке для восстановления и упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом. Результаты испытаний обрабатывались с использованием вычислительных средств и программы «Microsoft Excel 2013».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- термодинамические условия получения боридного покрытия при температуре сверхвысокочастотного нагрева до 1150°C;
- физико-механические характеристики упрочняющего покрытия;
- результаты испытаний, упрочненных шнеков экструдеров;
- технико-экономическая оценка результатов исследований.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Материалы диссертации доложены, обсуждены и одобрены в рамках следующих мероприятий:

- Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова, г. Москва, 19-20 декабря 2023г.;
- 72-я Международная студенческая научно-практическая конференция, посвященная 145-летию со дня рождения А.Г. Дояренко, 2019г.;
- 4-я Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти академика А.А. Байкова, г. Курск, 2023г.;
- Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 2023г.;
- Патент на изобретение № 2820894 С1. Установка для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом токами высокой частоты. Заявл. 18.10.2023: опубл. 11.06.2024. Бюл. № 17. – 8 с.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

2024669388 «Программа формирования G-Code для управления установкой упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом ТВЧ». Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16 августа 2024 г. Бюл. № 8.

**Публикации результатов исследований.** Основные положения и научные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, из них 3 статьи, рекомендованных ВАК РФ, патент на изобретение № 2820894 и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669388.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 127 страницах машинописного текста, не включая приложения, и содержит 30 таблиц и 45 рисунков, 6 приложений. Список литературы включает 142 источника.



# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Актуальность исследования повышения долговечности шнековых рабочих органов экструдеров

Животноводство является важным сегментом экономики любой страны, обеспечивающим население всеми необходимыми продуктами питания [103]. Одним из важных составляющих высокой продуктивности сельскохозяйственных животных и получения высококачественных продуктов питания является полнорационное и сбалансированное кормление животных. Известно, что в структуре себестоимости продукции животноводства 50-70% всех затрат приходится на корма [110, 130].

Основным процессом сельскохозяйственного производства является переработка кормового продукта в животноводческую продукцию. Основной задачей данного процесса является организация рационального кормления животных, создание сбалансированного корма, отвечающего всем требованиям по содержанию питательных веществ и физико-механических свойств [111].

Из-за большого спроса на комбикорма, из-за высоких требований к качеству корма актуальным направлением для развития кормовой промышленности является механизация процесса его получения. Механизация позволяет расширить ассортимент кормов для различных видов животных. На рисунке 1.1 представлена схема технологического процесса производства кормов [6, 7].

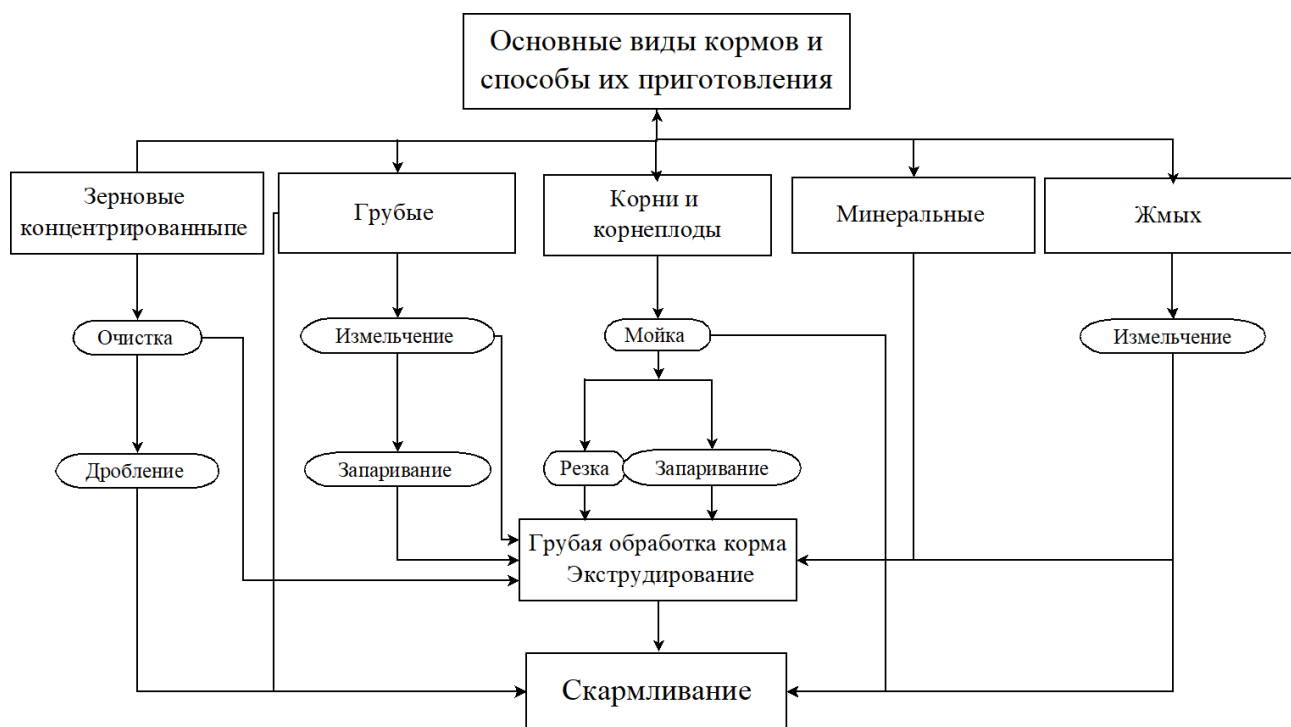


Рисунок 1.1 - Технологическая схема производства кормов

Распространённым и часто используемым видом обработки кормов является совмещение механической и тепловой обработки [5, 8].

Введение комбикормов в рацион коров повышает их удои на 10-20%, при этом снижаются затраты корма на образование молока на 7-15%, что в свою очередь значительно снижает себестоимость продукции. Белково-витаминно-минеральные добавки и премиксы в рационе свиней повышают продуктивность животных на 15-20% [110, 116].

Для приготовления комбикормов используются экструдеры. Они позволяют гибко настраивать процесс приготовления корма под разные виды животных и совмещают в себе сразу несколько технологических процессов: перемешивание, приготовление, термическая обработка и др., что в свою очередь позволяет получить высокопитательные продукты питания для животных.

В структуре машинно-тракторного парка животноводческих комплексов Российской Федерации 95% составляет импортная техника [37].

На долю России приходится 9% производства экструдеров для пищевой промышленности. Первое место по производству экструдеров занимает Китай – 18,6%, второе место - Италия – 17%, третье место Германия – 12% (рисунок 1.2) [90, 116].

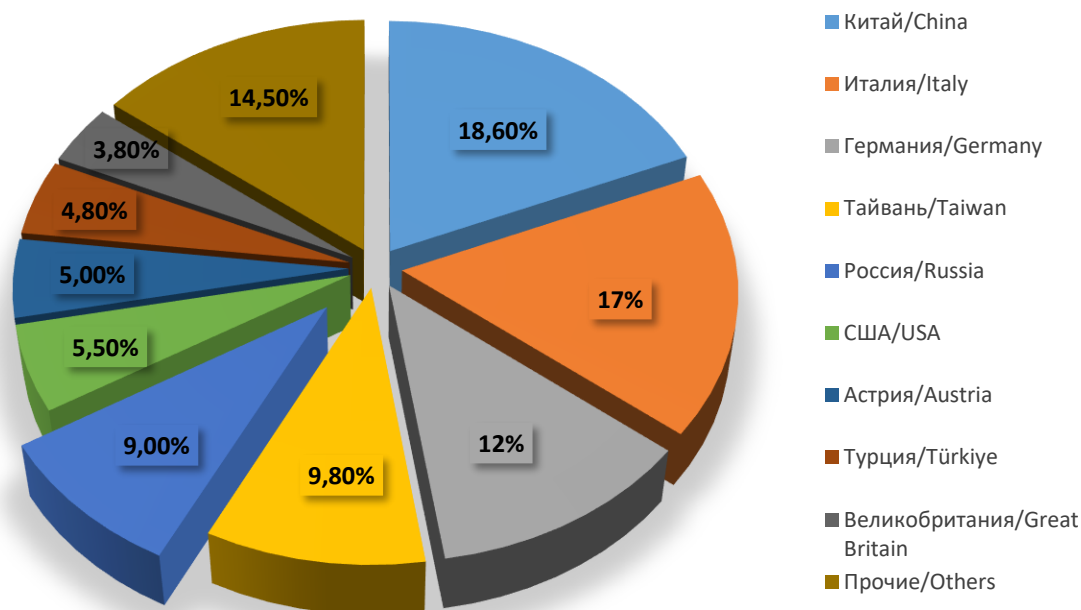


Рисунок 1.2 - Производство экструдеров для пищевой промышленности

Современные экструдеры позволяют, в зависимости от перерабатываемого материала, за короткий промежуток времени в 30-90с перерабатывать экструдат при температуре до 200°C, достигая давления до 4-5 МПа. Экструдирование на таких режимах позволяет перерабатывать экструдруемый материал без потери его свойств, за счёт малого времени обработки [45].

Экструдруемая смесь в момент обработки в экструдере: стерилизуется и обезжиривается, благодаря чему в комбикорм не попадают болезнетворные организмы; становится однородной и увеличивается в объёме за счёт измельчения и перемешивания сырья, благодаря чему упрощается процесс кормления животных; стабилизируется, благодаря однородному прогреву исключается пригорание экструдата и снижается эффективность антипитательных факторов и токсинов; формируется за счет матрицы и ножа-отсекателя на выходе из шнека.

Проведенный анализ литературных источников [13, 29] и выпускаемых экструдеров позволил составить их классификацию (рисунок 1.3).

Так по конструкции рабочих органов экструдеры подразделяются на: 1 - компрессионные; 2 – декомпрессионные; 3 – секционные (с различным числом лопастей в секциях);

Компрессионный шнек – это шнек, у которого межвитковое пространство или расстояние между витками уменьшается, начиная с конца зоны питания и заканчивая последним смесевым элементом.

Декомпрессионный шнек – это шнек с одинаковым шагом и высотой витка на всех зонах, как правило оканчивается смесевым элементом.

Секционные шнеки – сборная конструкция шнека экструдера. Витки шнеков каждой зоны экструдирования выполнены как отдельные элементы и представляют собой спирали (витки), устанавливаемые на центральном валу шнека. Преимуществом данных шнеков является возможность замены отдельных участков шнека при его значительном износе.

По характеру движения продукта экструдеры подразделяются на непрерывный и периодический процесс движения.

По физическим признакам шнековые экструдеры делят на следующие группы [118]: автогенные и политропные. Автогенные, как правило, изготавливаются с коротким шнеком, у них необходимая тепловая энергия образуется за счёт сил трения, а шнеки политропных экструдеров - со шнеком переменным шагом, что позволяет быстро выйти на рабочий режим и стабилизировать его работу [91].

Также экструдеры различаются по виду получаемого продукта: гранулы, хлопья и др. Способ экструдирования бывает влажный и сухой.

Экструдирование – энергоёмкий процесс, позволяющий решить большое количество задач, связанных с переработкой сельскохозяйственной продукции в высокопитательные комбинированные корма для животных.

Учитывая современную геополитическую обстановку, актуальной задачей в сфере АПК России является развитие животноводства. Проведённый анализ оборудования для производства пищевой промышленности показывает, что большинство (95%) экструдеров и их рабочих органов является импортным, это требует безотлагательного совершенствования технологии ремонта данного вида техники, в том числе разработки новых отечественных технологий, повышающих долговечность и увеличивающих ресурс работы их составляющих.

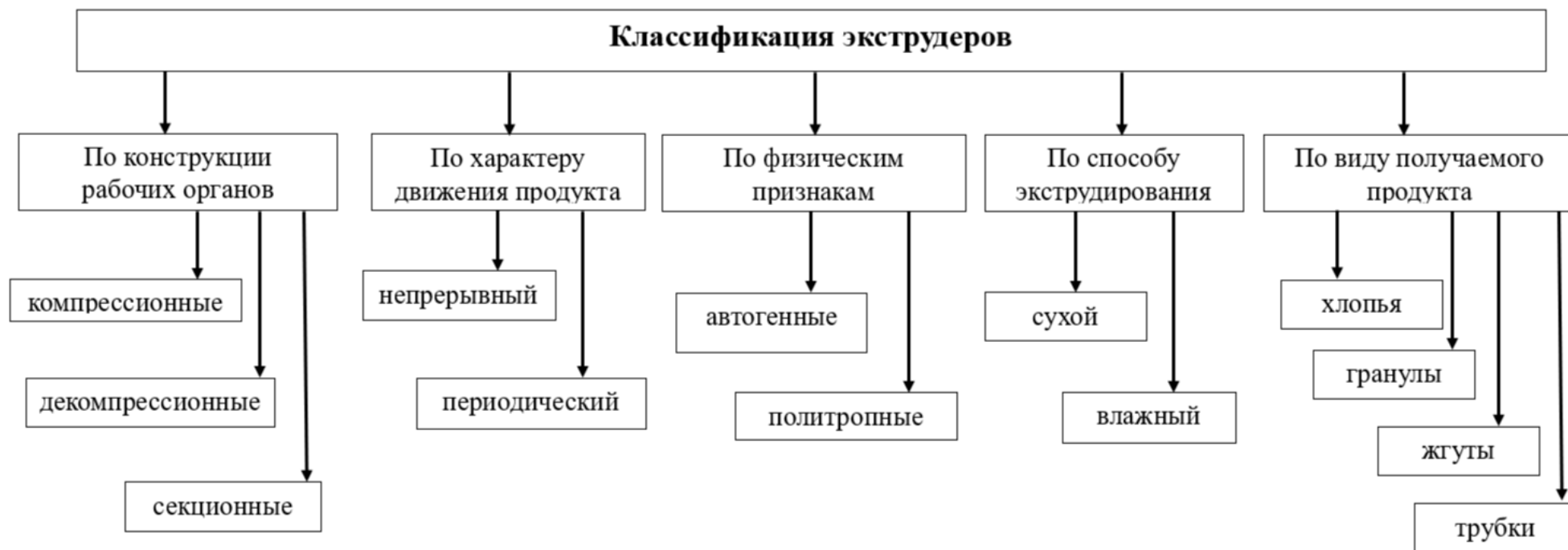


Рисунок 1.3 - Классификация экструдеров

## 1.2. Анализ условий работы шнековых рабочих органов экструдеров

В настоящее время экструдеры производят огромное количество продукции, к ней относятся кондитерские изделия, корма для сельскохозяйственных и домашних животных, птиц и рыб [56].

С целью повышения функциональных свойств экструдированных продуктов в сам процесс добавляют и смешивают различные сырьевые продукты отличающиеся по своему составу и структуре.

Это, в первую очередь, традиционное крахмалосодержащее сырьё (зерно, крупы, мука), источники белка (бобовые культуры, жмыхи, шроты), сахар, ароматизаторы, эмульгаторы, картофелепродукты, сухое молоко, молочные консервы, сырные и творожные порошки, отруби, вторичное сырьё мясной, молочной, рыбной промышленности, биологически активные добавки и микроэлементы [17].

Структура кормов (рисунок 1.4) в процессе экструдирования выглядит следующим образом: зерновые компоненты составляют 60 до 90%, бобовые и злаковые травы от 20 до 30% (размером не более 10 мм), мясные компоненты от 5 до 10%; минералы от 1 до 2%, до 1 % аминокислот и добавка витаминов до 0,05 % от общей массы корма.

Для производства комбикорма не требуется предварительная сушка и досушивание продукта после обработки, так как в процессе экструзии продукт теряет до 50% влажности, а конечная влажность готового экструдата составляет - 9,8-15,1% [110, 25]. Это позволяет использовать зеленые корма в составе комбикормов.

На 1 кг приготовленного корма процессом экструдирования приходится (в пересчёте на сухое вещество) 10,42-10,46 МДж обменной энергии, 140-148 грамм сырого протеина, 40,0-41,0 грамм сырой клетчатки и 20-32 мг каротина [116].

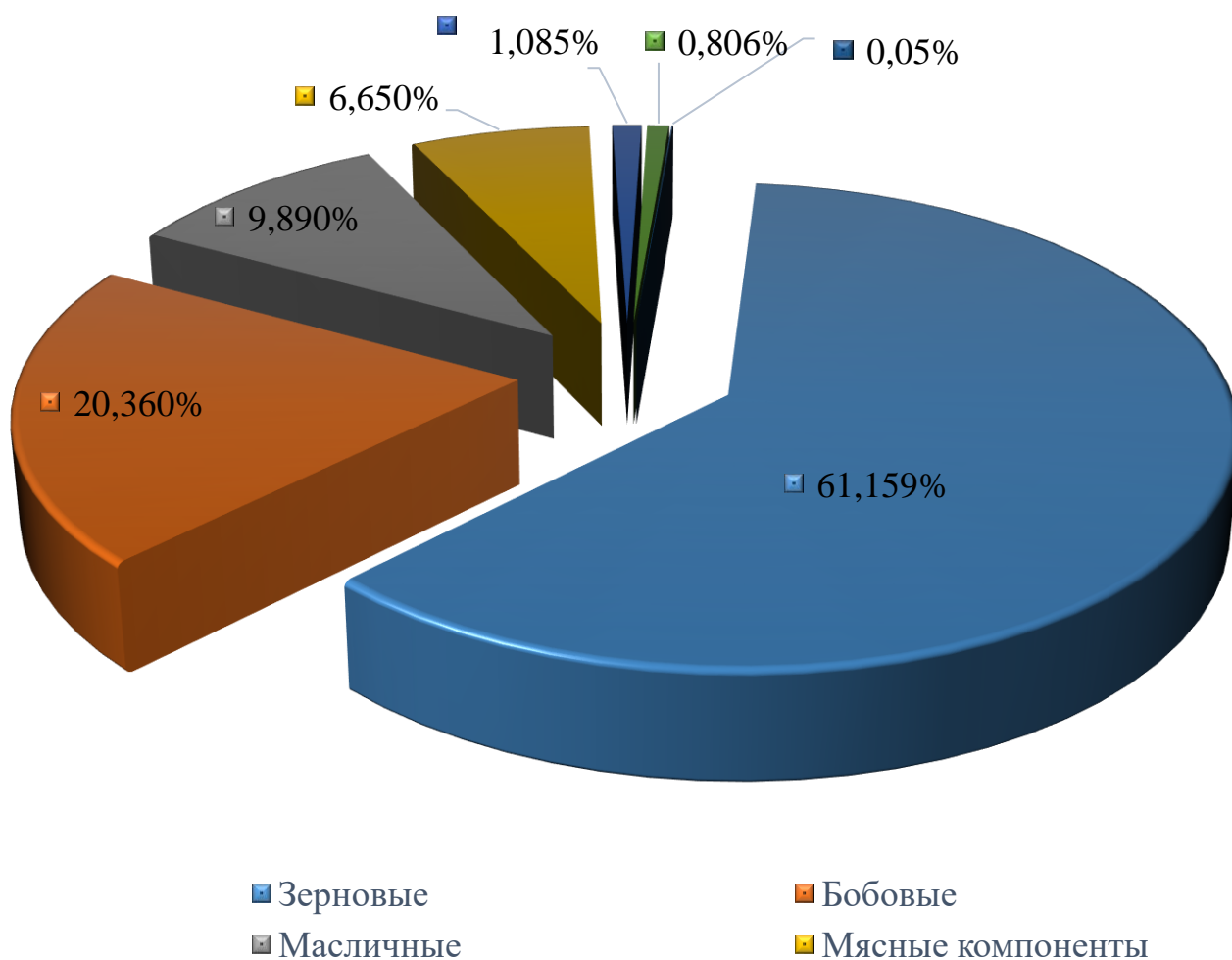


Рисунок 1.4 – Структура кормов

Анализируя структуру кормов, следует отметить, что зерновое сырьё в составе экструдата является его основным компонентом. Для дальнейших исследований был проведён анализ литературных источников [17, 69, 87, 88, 89, 90], и составлена классификация зернового сырья, применяемого для процесса экструдирования (рисунок 1.5).

Чтобы изучить, как зерновые компоненты экструдата влияют на износостойкость шнековых рабочих органов, необходимо провести анализ их механических и химических свойств.

Механические характеристики зернового сырья непостоянны и изменчивы. Они зависят от формы семян, упругости, поверхностного слоя, абсолютного и удельного веса и ряда других факторов. Особенностью изменения линейного размера зерна является повышение его влажности. Так при повышенной влажности

ширина зерновых семян достигает 11%, при этом толщина - 6,5%, а длина – 5,2%. Зерновая оболочка отличается своей прочностной характеристикой, а при взаимодействии с металлом в процессе экструдирования зерно выступает в качестве абразива, способного изнашивать шнек в процессе его работы.



Рисунок 1.5 - Классификация зернового сырья, применяемого при экструдировании

Механические характеристики зернового материала характеризуются модулем упругости и коэффициентом поперечной деформации, пределом прочности при различной влажности. При повышении влажности происходит снижение упругих свойств зерна, но при этом повышаются его пластические свойства (таблица 1.1).



Таблица 1.1 - Механические характеристики зернового материала

Культура	Влажность, %	Относительная деформация	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, МПа
Просо	12	0,16-0,14	4,30-4,56	20,2-23,5
	17	0,24-0,21	2,36-2,86	7,8-6,0
Ячмень	12	0,13-0,12	4,90-5,10	24,8-27,9
	17	0,18-0,17	3,40-3,89	12,7-16,0
Овес	12	0,24-0,20	3,60-3,80	14,3-18,6
	17	0,47-0,39	1,25-1,80	3,5-6,0

Ширина и толщина зёрен твёрдой пшеницы примерно одинакова (в среднем 2,71 и 2,72 мм). Длина зёрен твёрдой пшеницы больше, чем мягкой (в среднем 6,65 и 6,23 мм).

Твёрдость частиц отдельных видов корма представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Микротвёрдость частиц корма

Характеристика	Пшеница	Овёс	Ячмень	Кукуруза
Микротвёрдость, МПа	~54	~52	~50	~48

Твёрдость шелухи зерна составляет 40 - 70 МПа в зависимости от влажности, а микротвёрдость абразивных частиц пыли достигает 11 МПа.

Химический состав является первичным показателем питательности кормов. Он варьируется в зависимости от типа корма (растительный, животный, минеральный) и его назначения (для разных видов животных). Основные компоненты кормов включают:

1. Углеводы – это основной источник энергии. Включают крахмалы, сахара и клетчатку.

2. Белки необходимы для роста и восстановления тканей. Содержат аминокислоты, которые могут быть незаменимыми (не синтезируются в организме).

3. Жиры - это источник энергии и жирорастворимых витаминов. Обеспечивают более высокую калорийность по сравнению с углеводами и белками.

4. Витамины необходимы для нормального метаболизма, роста и развития. Разделяются на водорастворимые (например, витамины группы В, витамин С) и жирорастворимые (А, D, Е, К).

5. Минералы важны для многих физиологических процессов. Основные макроэлементы - кальций, фосфор, натрий, калий; микроэлементы - железо, цинк, медь и другие.

6. Вода необходима для всех биохимических процессов и поддержания жизнедеятельности организма.

7. Клетчатка способствует пищеварению и нормализует работу кишечника.

Химический состав пшеничных зёрен мягких сортов включает следующие элементы: белки (от 8% до 22%); углеводы (представлены крахмалом, сахарами, клетчаткой); жиры (порядка 2%); витамины (Н, Е, D, К, Р, В1, В2, В3, В6, В9 и каротин); минеральные вещества (калий, магний, кальций, хром, фосфор, железо, кремний, цинк, марганец, сера, кобальт, молибден, фтор, медь, селен, ванадий, йод) и ферменты.

Химический состав овса зависит от посевного зерна, условий окружающей среды (почва, климат) и технологии возделывания (удобрения, средства защиты растений). 100 г съедобной части цельного зерна содержит: 14,0 г воды; 10,1 г белка; 57,8 г углеводов; 36,1 г крахмала; 4,7 г жиров; 10,7 г клетчатки; 3,2 г золы.

Также в состав овса входят минеральные вещества, витамины и аминокислоты.

Для переработки комбикормов процессом экструдирования применяют метод горячей (варочной) экструзии. Сущность данного метода заключается в работе при высоких скоростях и давлениях, повышенных температурных режимах (100 °С) и влажности сырья от 10% до 20%. Главным преимуществом данного метода является готовый к употреблению продукт, не требующий дополнительной обработки [116].

Условия работы шнековых рабочих органов экструдеров достаточно тяжёлые, так как перерабатывается сырьё под высокими температурами (до 180 °С).

В работе [116] подробно представлено и исследовано влияние влажности и высоты фильеры на процесс экструдирования.

Технологический процесс экструдирования включает в себя зоны экструдирования (загрузка, нагрев, дозирование и охлаждение) и процессы, происходящие в каждой зоне (рисунок 1.6).

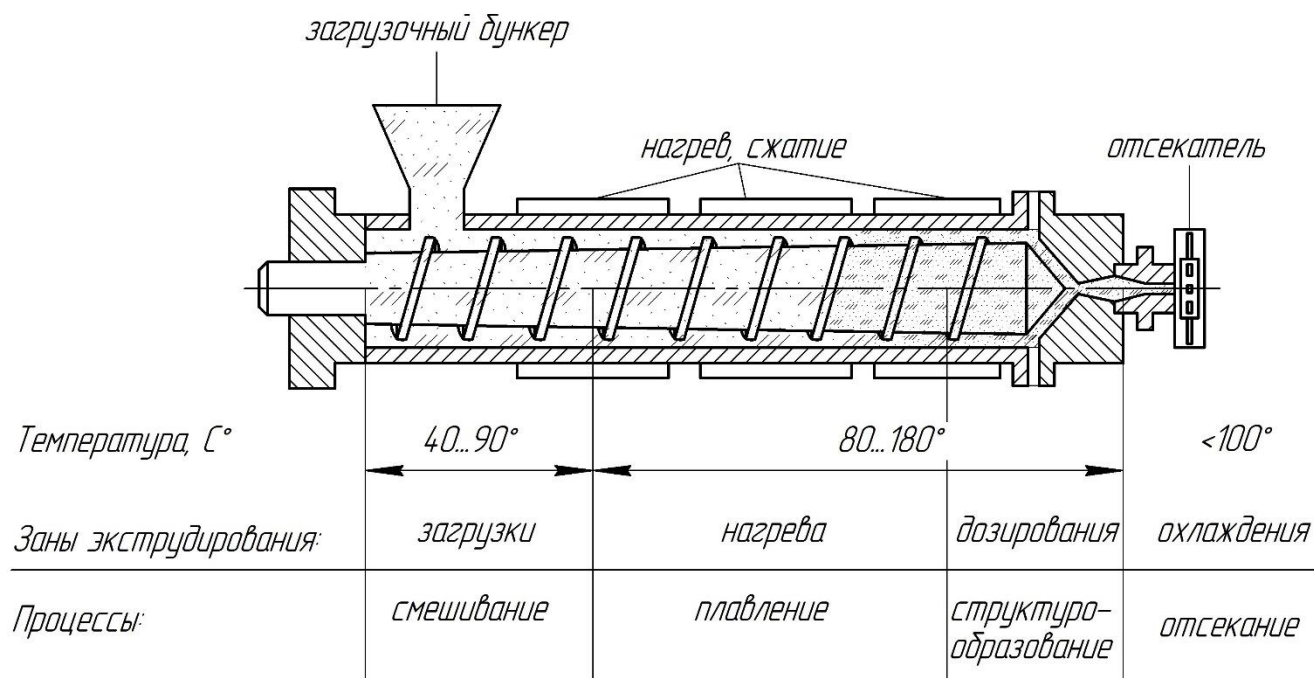


Рисунок 1.6 – Зоны и процессы экструдирования

Кормовое сырье поступает в загрузочный бункер и перемешивается шнековым рабочим органом, при этом температура в зоне смешивания составляет от 40 до 90  $^{\circ}\text{C}$ . Сырье транспортируется рабочей толкающей поверхностью шнека в зону плавления. Происходит нагрев перерабатываемого сырья до температуры 180  $^{\circ}\text{C}$ , при этом возрастает давление прессования сырья (3-5 МПа), в результате чего происходит структурообразование сырья (рисунок 1.7).

Следом идёт замедление химических реакций, снижение температуры перерабатываемого сырья и в зоне охлаждения происходит процесс отсекания готового продукта в виде жгута. Отсекание производят режущие элементы (ножи-отсекатели), которые закреплены рядом с матрицей.

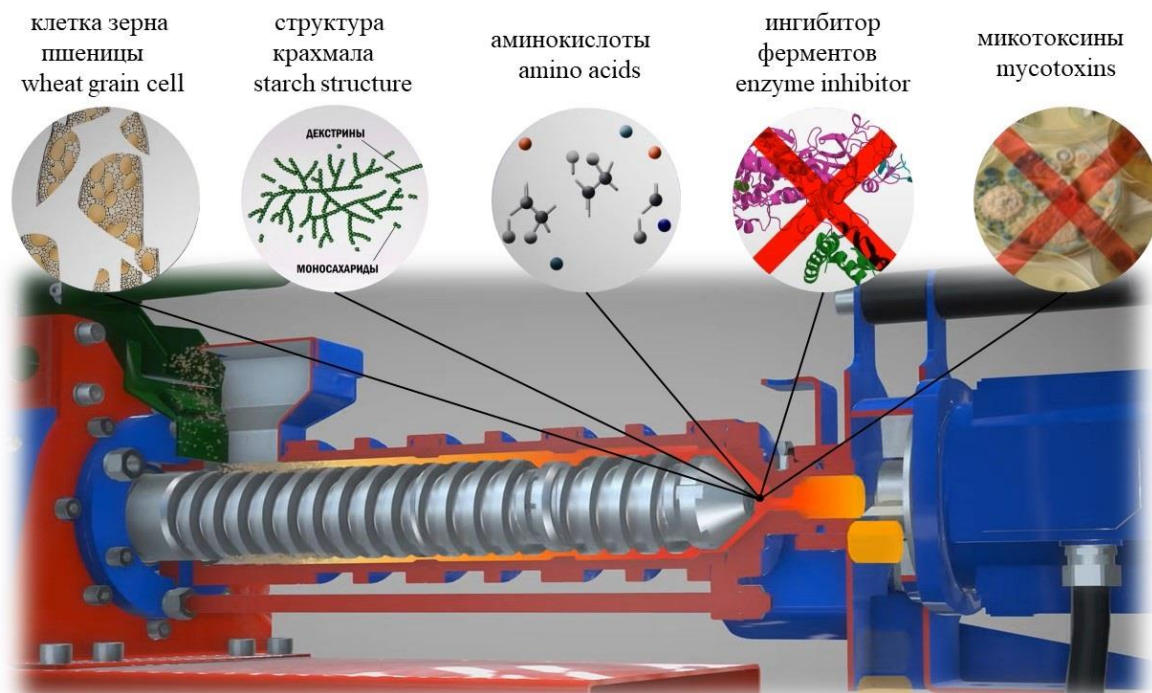


Рисунок 1.7 – Общий вид метода экструзии изменения в молекулярной структуре перерабатываемого сырья

Проведенный анализ технологического процесса экструдирования, режимов работы рабочих органов, механические свойства кормов и изменения на молекулярном уровне в структуре корма, позволяет выявить условия работы шнеков экструдеров:

- 1) высокая температура работы  $T$ , °С, - начальная от 40 °С, конечная до 180°С;
- 2) давление прессования корма,  $P$ , МПа – от 2,0 до 5,0;
- 3) повышенная влажность кормосмесей – 10...30%;
- 4) наличие источников абразива в виде твердых частиц зерна и других компонентов;
- 5) наличие химически активных веществ (соли, способствующие кислотно-щелочной реакции; аминокислоты; витамины (биокатализаторы)).

Такие условия эксплуатации рабочих органов экструдеров приводят к их коррозионно-механическому изнашиванию.

### 1.3. Анализ параметров, исследуемых шнековых рабочих органов экструдеров

Основными элементами конструкции кормовых экструдеров (рисунок 1.8)



являются: загрузочный бункер, смотровое окно бункера, система (шкаф) управления, электропривод, шнековый питатель, шпиндель, клапан системы увлажнения, термометр, винтовой рабочий орган (шнек), отсекатель (измельчитель), магнитоу-

Рисунок 1.8. - Устройство кормового вливатель.

Рабочими органами кормового экструдера являются следующие элементы: камера экструзии; винтовой шнек; отсекатель (измельчитель); матрица.

Эти рабочие органы взаимодействуют вместе, чтобы обеспечить правильный процесс экструзии и получить высококачественный кормовой продукт.

Винтовой шнек является основным рабочим органом кормовых экструдеров, он выполняет несколько функций:

- перекачивание и перемешивание кормовых ингредиентов. Винтовой шнек движется по продольной оси экструдера и перекачивает кормовые ингредиенты до места их термической обработки. Он также обеспечивает равномерное перемешивание ингредиентов, чтобы обеспечить однородность и сбалансированность кормового продукта.

- подача и компрессия. Винтовой шнек перемещает кормовые ингредиенты к месту сжатия и экструзии. В процессе перемещения кормовые ингредиенты подвергаются давлению и компрессии, что помогает размягчить и предобработать материал для последующей экструзии.

- экструзия. Винтовой шнек осуществляет подачу кормовых ингредиентов в зону экструзии, где происходит высокое давление и термическая обработка.

На рисунке 1.9 представлена схема шнека пресс-экструдера с его основными параметрами.

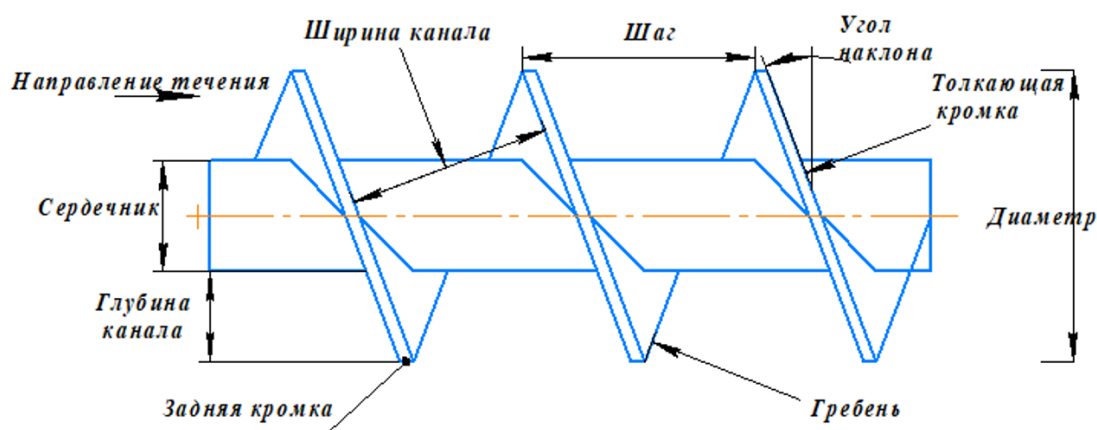


Рисунок 1.9 – Строение шнека экструдера

Важными параметрами, характеризующими работу шнека экструдера, являются: угол наклона винтовой линии; длина и наружный диаметр шнека; шаг витка; ширина и глубина канала; толкающая кромка винтовой поверхности шнека (рабочая его поверхность).

Диаметр шнеков экструдеров для переработки растительного сырья составляет от 20 до 200 мм. Обычно используют шнеки следующих диаметров: 20; 32; 45; 50; 52; 55; 60; 63; 90; 125; 160; 200 мм [97].

Длина шнека  $L$  характеризуется ее отношением к его диаметру  $D$  ( $L/D$ ). Это соотношение может изменяться в интервале от 8 до 40. Экструдеры с короткими шнеками имеют соотношение  $L/D=12...18$ , а с длинными шнеками –  $L/D > 30$ . Наиболее распространены экструдеры с отношением  $L/D = 20...25$ . Увеличение длины шнека  $L$  способствует образованию более гомогенного расплава материала, так как продолжительность воздействия на него шнека увеличивается [97].

Величина таких параметров шнека, как шаг винтовой нарезки  $t$  и ширина гребня витка  $e$  согласуются с его диаметром и, как правило, составляют  $t=D$ ,  $e=0,1D$  [82].



Для шнеков с переменной глубиной винтовой нарезки различают глубину в начале  $h_1$  и в конце  $h_2$  шнека. Их отношение обычно составляет от  $1/2$  до  $1/3$ .

При переработке растительного материала с повышенным содержанием влаги от 25% и более возникает необходимость её удаления (обеспечения процесса разряжения). В данных случаях после зоны плавления применяют геометрию профиля шнека, которая предусматривает участок с увеличивающимся по отношению к диаметру шагом [16, 31]. В модулях смешивающего типа для смешивания различных видов компонентов сырья предусматриваются специальные элементы: разминающие, месильные, гомогенизирующие. С помощью них можно изменять время пребывания перерабатываемого материала в шнековой камере, и эти элементы позволяют улучшить перемешивающий эффект. Когда месильные элементы отсутствуют, процесс смешивания протекает постепенно на всем протяжении движения обрабатываемой массы, но с меньшей интенсивностью [85, 102].

Общий вид наиболее распространённых шнеков кормовых экструдеров представлен на рисунке 1.10.

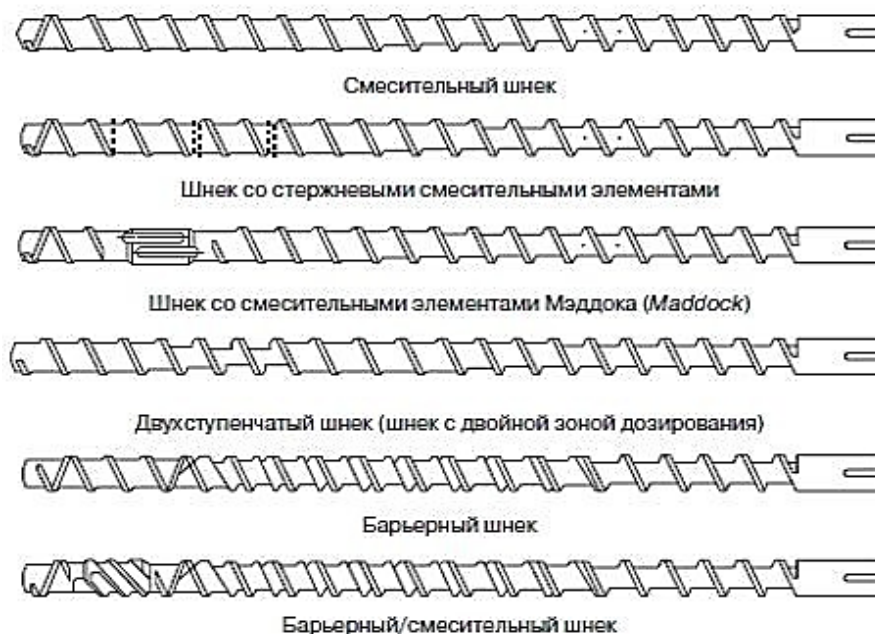


Рисунок 1.10 – Виды шнеков экструдеров

Шнековые пресс-экструдеры на сегодняшний день весьма разнообразны и отличаются друг от друга, как конструкцией в целом, так и конструктивными параметрами шнеков: длиной, разделением на зоны, числом заходов, шагом винтовой линии, глубиной и профилем нарезки, формой конца шнека, материалом, из которого изготавливается шнек [32].

Проведенный анализ конструктивных параметров шнековых рабочих органов, описанных в различных литературных источниках [28, 31, 32, 87, 88, 115, 121, 124]. позволил разработать классификацию шнеков кормовых экструдеров (рисунок 1.11).

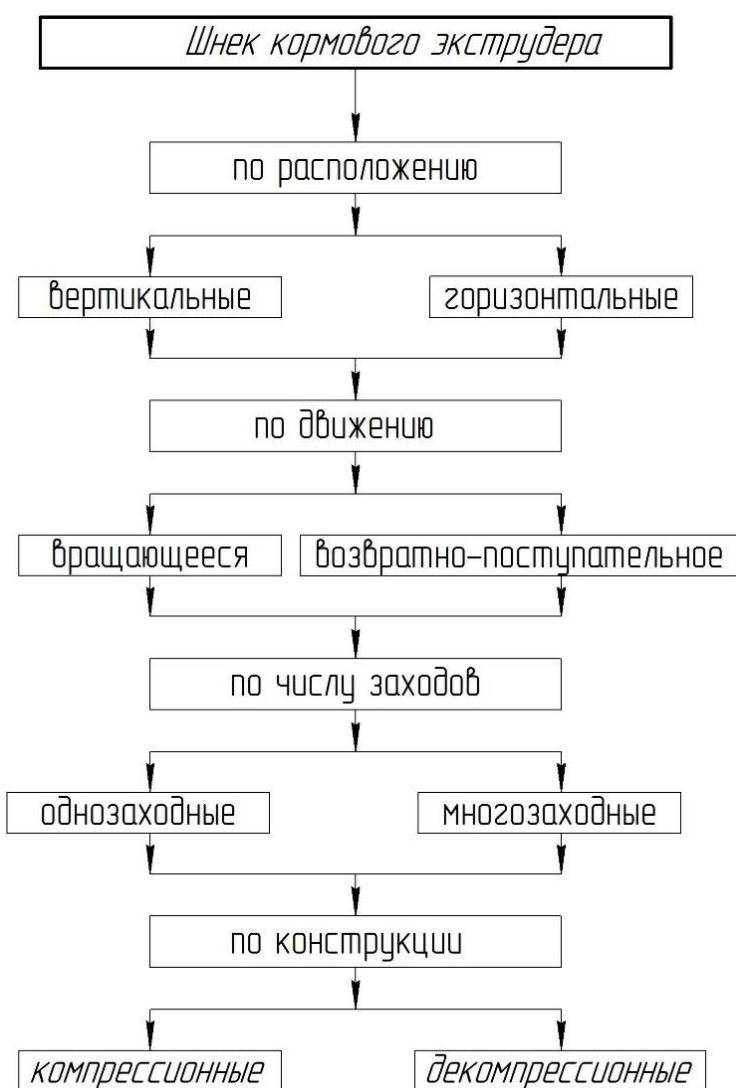


Рисунок 1.11 – Классификация шнека кормового экструдера



Шнек кормового экструдера подразделяется в первую очередь по функциональному режиму работы. Так существуют вертикальные и горизонтальные шнековые рабочие органы экструдеров. По движению подразделяются на вращающиеся и возвратно-поступательные. По числу заходов бывают однозаходные и многозаходные шнеки экструдеров. По конструктивным параметрам - компрессионные и декомпрессионные шнеки.

Однозаходные шнеки располагают в зоне загрузки корма, далее в зоне нагрева и дозирования число заходов шнека может меняться на двузаходные.

Однозаходные шнеки имеют постоянную глубину канала и характеризуются меньшим шагом нарезки. Такие шнеки еще отличаются более быстрым сжатием. Двухзаходный шнек - барьерный.

Декомпрессионный шнек – это шнек с одинаковым шагом и высотой витка на всех зонах, как правило оканчивается смесевым элементом.

Компрессионный шнек – это шнек, у которого межвитковое пространство или расстояние между витками уменьшается, начиная с конца зоны питания и заканчивая последним смесевым элементом.

По форме корпуса шнековые пресс-экструдеры бывают цилиндрические либо конические. Как правило, форма шнека должна повторять форму шнекового корпуса.

Как видно из проведенного анализа, конструктивные параметры шнековых рабочих органов различны.

Большинство шнековых рабочих органов экструдеров являются импортными. Был проведен анализ их физико-механических свойств (рисунок 1.12). Многие материалы, из которых изготавливают шнеки, имеют малую устойчивость к коррозионно-механическому изнашиванию. Для повышения долговечности шнековых рабочих органов применяют химико-термическую обработку. Такая обработка позволяет получить износостойкие покрытия рабочей поверхности шнека.

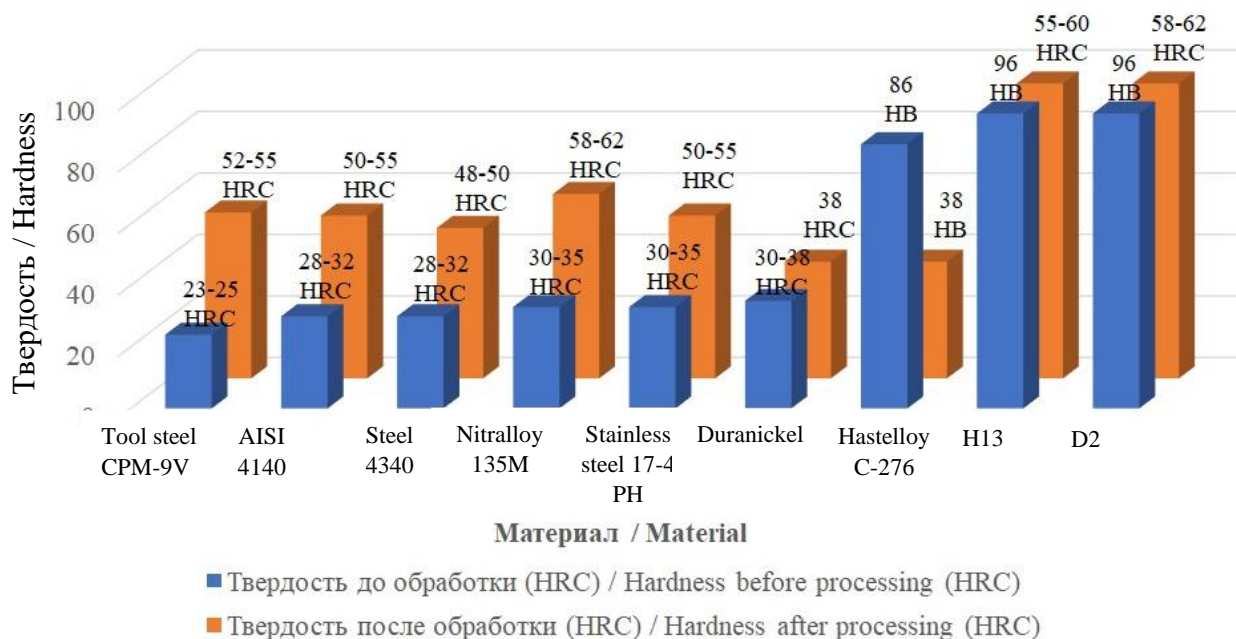


Рисунок 1.12 - Материалы и их твердость, применяемые для изготовления шнеков экструдеров

По данным рисунка 1.12 сталь марки Hastelloy C-276 до обработки имеет твердость 38 HB, после химико-термической обработки твердость повышается до 86 HB.

Исходя из современных санкционных условий, в которых находится Российская Федерация, оригинальные запасные шнековые рабочие органы стали значительно дороже по стоимости, а на рынок все чаще поступают некачественные шнеки, не соответствующие необходимым физико-механическим параметрам. В связи с этим остро стоит вопрос о повышении долговечности шнеков за счёт упрочнения их рабочей поверхности.

В дальнейших диссертационных исследованиях в качестве номенклатуры шнековых рабочих органов приняты следующие их параметры: вращающиеся, вертикальные шнековые рабочие органы с однозаходной винтовой линией, имеющие одинаковый шаг, но при этом разную толщину витка шнека. В качестве материалов, из которых изготавливают шнеки для исследований, приняты следующие марки сталей: сталь 65Г, 18Х12Н; сталь 45 и 12ХМФ.

#### 1.4. Анализ дефектов рабочих органов экструдера

Проведённый анализ частоты отказов экструдеров в сельскохозяйственных компаниях Москвы, Московской области, Нижегородской и Воронежской областей показывает, что наиболее распространённой причиной отказа экструдера является выход из работоспособного состояния шнека: 59% от общего числа отказов (рисунок 1.13)

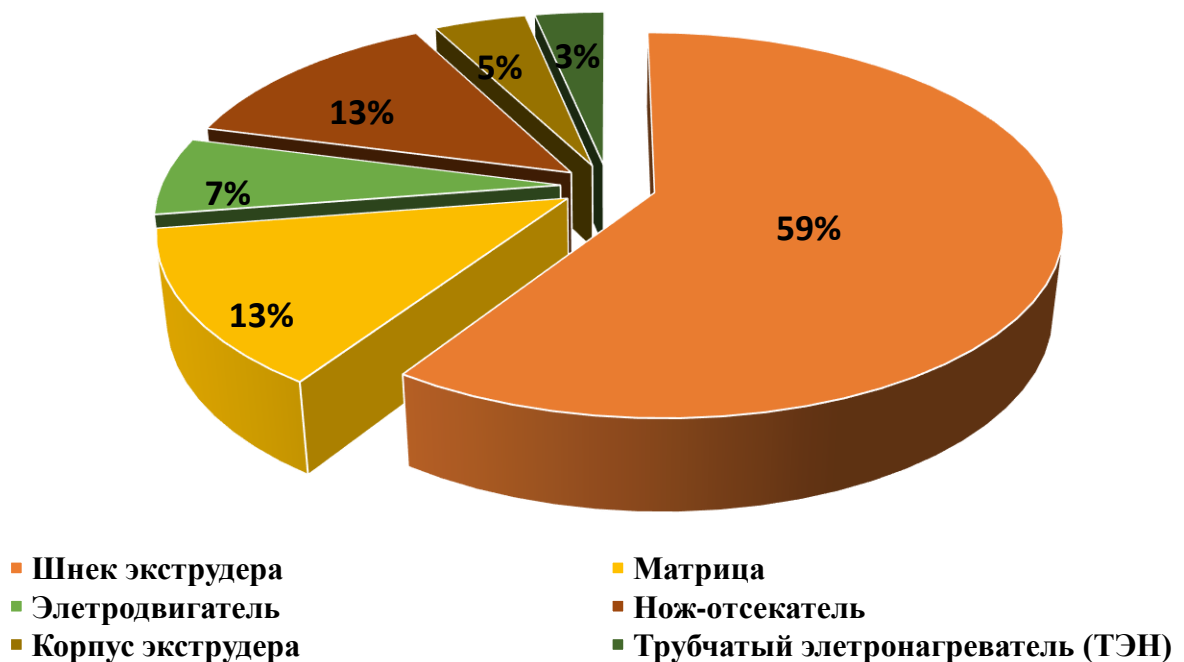


Рисунок 1.13 - Анализ частоты отказов экструдеров

Также причиной отказа является выход из работоспособного состояния матрицы (13%) и ножей-отсекателей (13%). Это говорит о том, что наиболее всего отказам подвержены рабочие органы экструдеров. Основываясь на этих данных, был проведен анализ причин износа шнеков экструдера (рисунок 1.14)

Износ шнека необходимо оценивать с учетом следующих причин [116, 104, 105, 106]: холодный запуск; неравномерный нагрев корпуса; неправильный монтаж шнека (центровка); неправильно подобранные перерабатываемые материалы; несоответствие геометрическим и физико-механическим параметрам; не соблюдение требований к техническому обслуживанию.

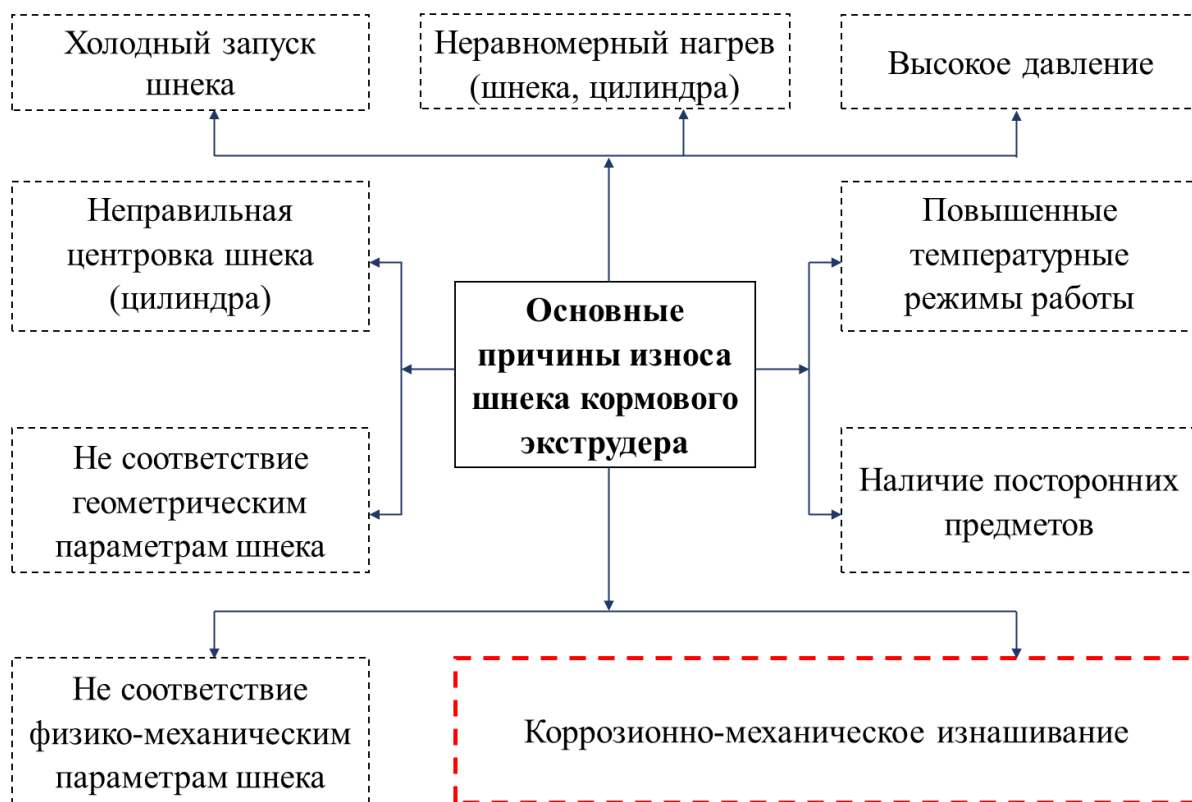


Рисунок 1.14 – Основные причины износа шнека кормового экструдера

Основной причиной отказа шнеков является коррозионно-механическое изнашивание (рисунок 1.15).

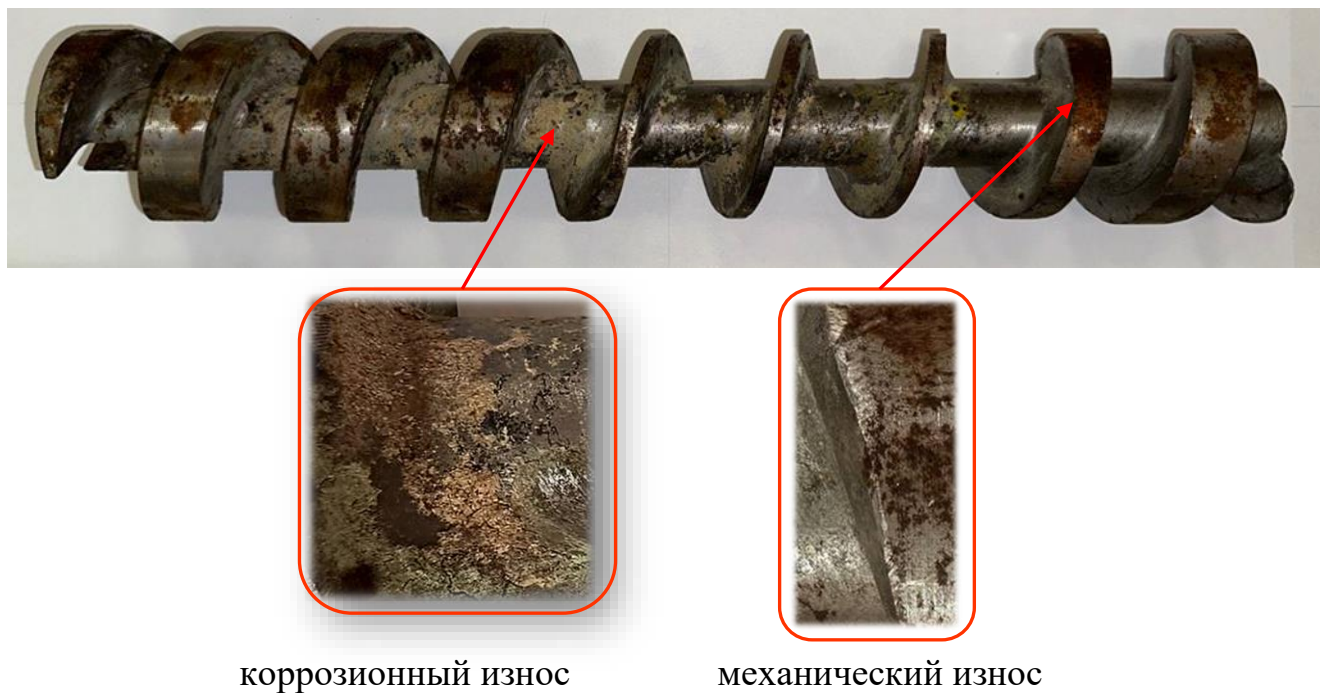


Рисунок 1.15 – Коррозионно-механический износ шнекового рабочего органа экструдера

Из проведенного анализа условий работы шнековых рабочих органов экструдеров, структуры перерабатываемого корма, в том числе анализа химических и механических свойств кормов, можно сделать вывод, что на износ шнековых рабочих органов в совокупности оказывают влияние следующие факторы: температура, давление, влажность, наличие твердых частиц (абразива), использование химически активных веществ. Все эти факторы приводят к коррозионно-механическому изнашиванию шнековых рабочих органов [48].

Твердые частицы перерабатываемого сырья соприкасаются и в результате трения оказывают абразивный износ по рабочей поверхности витка шнека [49].

Растительная масса, состоящая из зёрен и растительных волокон, под большим давлением и температурой постепенно стирает поверхностный слой рабочей поверхности шнека, вызывая увеличения зазора между шнеком и цилиндром. Так для нового шнека, диаметром 60 мм, расчетный зазор - 0,06 мм, тогда как у изношенного рабочий зазор становится 0,4 мм.

Коррозионно-активную среду создают бобовые культуры, злаки и другие культуры. Химические реакции образуются при взаимодействии металла с влагой. Аммиак переходит в гидрат окиси аммония и вызывает щелочную реакцию [50].

Металлические поверхности взаимодействуют с электролитами в результате чего происходит разрушение тонких пленок, а повышенные концентрации и активности щелочи приводят к образованию коррозии на поверхностных участках шнека.

Коррозионно-механическое изнашивание рабочей поверхности шнеков чаще происходит в зоне дозирования (рисунок 1.6) из-за повышенной температуры, высокого давления и времени пребывания материала в этой зоне.

В виду распространённости использования шнековых пресс-экструдеров, а также по результатам анализа качества и дефектов их рабочих органов актуальной задачей является повышение долговечности шнековых рабочих органов за счет применения современных методов и средств упрочнения их рабочей поверхности.

Рассмотрим основные методы и средства восстановления и упрочнения шнековых рабочих органов.

## **1.5. Анализ методов и средств восстановления и упрочнения шнеков экструдеров**

Повышению надёжности сельскохозяйственных машин и их рабочих органов посвящены работы Черноиванова В.И. [127,126], Дидманидзе О.Н. [30], Ерохина М.Н. [38, 39, 40, 41, 42, 43,44], Лялякина В.П. [83,84], Голубева И.Г. [23, 24, 25, 26, 27, 28], Новикова В.С. [95, 96], Казанцева С.П. [57, 58, 59, 60, 62, 63,64,], Леонова О.А. [80,81], Апатенко А.С. [1], Виноградова В.В. [18], Левшина А.Г. [78,79], Аулова В.Ф. [2,3,4], Кабдушевой А.С. [55], Мартыновой Д.В. [88,115], Ханина В.П. [125], Антимонова С.В. [89], Денисова В.А. [29], Ишкова А.В.[54], Федоров С.К. [122,123,124], Дородова П.В. [33,51], Лебедева Л.Я. [77,76] и других ученых.

Для правильной постановки задачи исследования был проведен анализ научных работ и исследований. В виду широкой распространённости шнековых пресс-экструдеров стоит актуальный вопрос восстановления и упрочнения шнеков экструдеров.

Для повышения долговечности деталей сельскохозяйственных машин существует большое количество различных методов их восстановления и упрочнения [70, 71, 98, 77, 47]. Не все данные методы подходят к восстановлению и упрочнению шнековых рабочих органов, так как шнеки имеют сложную конструктивную форму. В связи с этим был проведен анализ наиболее подходящих и применяемых на сегодняшний день методов восстановления и упрочнения шнековых рабочих органов (рисунок 1.13).



Рисунок 1.16 – Методы восстановления и упрочнения шнеков экструдеров

Сравнительная характеристика применяемых методов восстановления и упрочнения шнеков экструдеров представлена в таблице 1.3.


Таблица 1.3

Сравнительная характеристика применяемых методов восстановления и упрочнения деталей машин в том числе шнековых рабочих органов экструдеров

Метод	Общий вид	Основные характеристики	Недостатки
<i>Плазменная закалка</i>		Локальный нагрев участка поверхности изделия с высокими скоростями нагрева и охлаждения; минимальные деформации упрочняемых изделий; высокая производительность, 2-9 м <sup>2</sup> /ч.; высокая твёрдость и износостойкость; твёрдость, получаемая при плазменной закалке: для чугунов – 50-60 HRC <sub>e</sub> ; для среднеуглеродистых сталей 52-60 HRC <sub>e</sub> ; для низкоуглеродистых сталей – 32-40 HRC <sub>e</sub> .	Частичный отпуск в местах наложения закаленных полос; зачистка упрочняемой поверхности от ржавчины, масла и т.д.; для получения высокой твёрдости упрочняемых изделий малой толщины необходимо принудительное охлаждение, дорогостоящее специализированное оборудование,
<i>Индукционная закалка</i>		Для индукционной закалки используется электрический ток, для достижения того же эффекта, что и обычный нагрев. Обычно используется на небольших шнеках и для обработки ограниченных участков шнека. Возможность изготовления индуктора копирующего форму закаляемого участка изделия. Толщина слоя до 0,51 мм. Твердость 50 – 55 HRC.	Неравномерный нагрев в случае отсутствия индуктора, повторяющего форму упрочняемой детали. Возможна деформация закаляемой детали из-за быстрого нагрева и охлаждения. Закаляемая сталь должна иметь определенный уровень содержания углерода (>0,40%).



Продолжение таблицы 1.3

<p><i>Азотирование</i></p>		<p>Высокая твёрдость (до HV 1300) без закалки. Незначительная деформация изделий. Повышенная износостойкость, коррозионная стойкость, теплостойкость насыщенного слоя (500-600°C), высокое сопротивление усталости к различным переменным нагрузкам.</p>	<p>Существенным недостатком является высокая стоимость, сложность и большая длительность процесса.</p>
<p><i>Индукционная наплавка</i></p>		<p>Возможность наплавлять детали сложной формы поверхности. Деформация изделия. Возможность автоматизации процесса. Простота и скорость выполнения наплавки. Использование в сочетании с другими способами поверхностной обработки.</p>	<p>Недостатки подобны индукционной закалке. Применение специальных химических элементов для получения повышенного упрочнённого слоя</p>
<p><i>Ручная, дуговая наплавка</i></p>		<p>Данный метод легко обучаемый, самый доступный и недорогой.</p>	<p>Высокая трудоёмкость процесса, наличие скрытых дефектов.</p>
<p><i>Плазменная наплавка</i></p>		<p>Применение на сложных поверхностях с высокой точностью.</p>	<p>Возможно образование трещин и дефектов. Требуется определенных навыков опыта. Опасность работы с плазменной дугой. Требуется специальное дорогостоящее оборудование.</p>

В производстве шнековых рабочих органов для увеличения их физико-механических параметров широко применяют термическую обработку (закалку).

Закалка шнеков экструдеров проводится на всю глубину шнека с использованием современных методов закалки.

Анализ глубины закалённого слоя и твердости от способа закалки представлен в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Способы и параметры закалки шнека экструдера

Способ закалки	Параметры	
	Глубина закалённого слоя, мм	Твёрдость, Hardness(RC)
Индукционная закалка	до 0,51	50-55
Плазменная закалка	до 0,51	50-55
Закалка методом азотирования	013 - 064	60-64

Для восстановления шнеков экструдеров чаще всего применяют ручную, дуговую наплавку. При этом методе возможна наплавка витков шнека по наружному диаметру (рисунок 1.13, а), наружному диаметру и рабочей толкающей стороне (рисунок 1.13, б), в том числе по всем сторонам (рисунок 1.13, в).

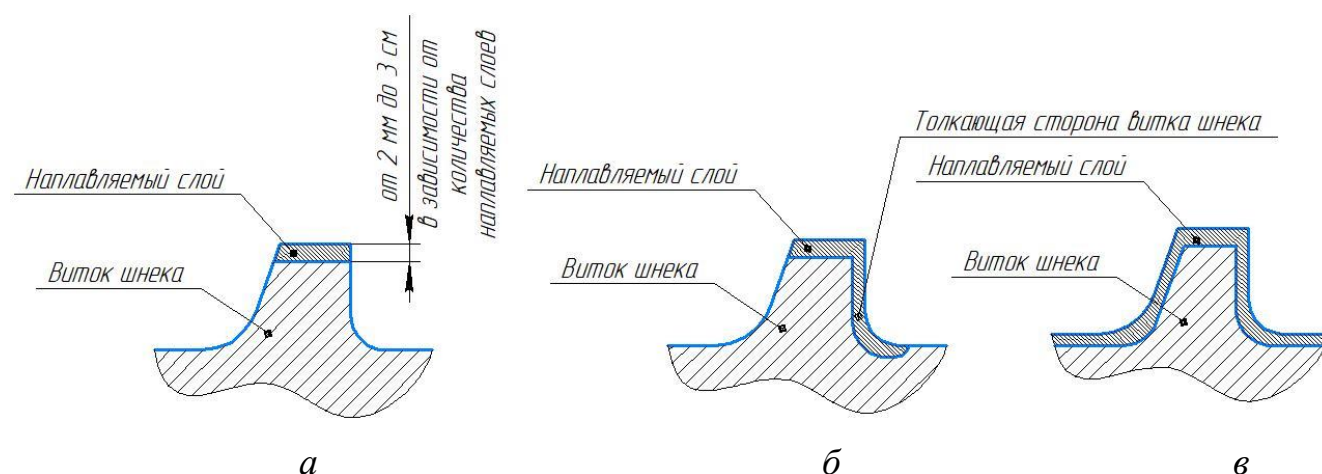


Рисунок 1.17 – Варианты наплавки витков шнековых рабочих органов

Технологический процесс наплавки может включать в себя следующие этапы (рисунок 1.18).

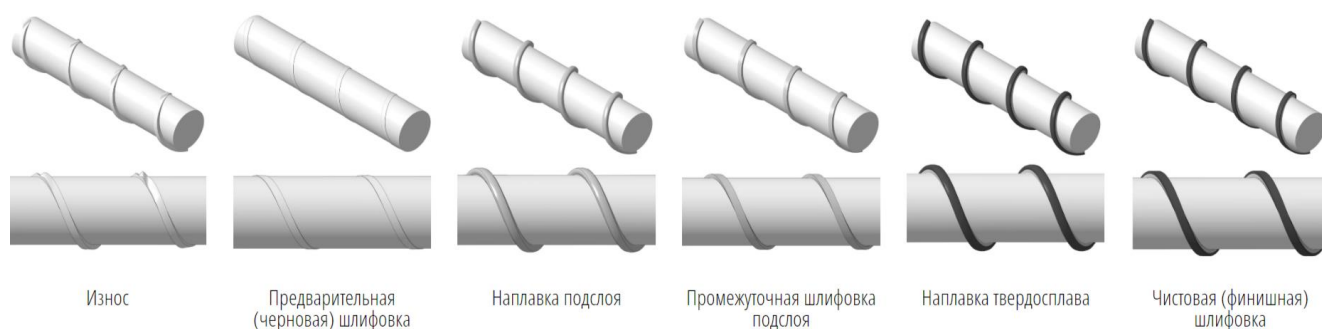


Рисунок 1.18 – Этапы наплавки витков шнековых рабочих органов

Ручная дуговая наплавка шнеков экструдеров является трудоёмким процессом, однако она позволяет восстанавливать шнек после его износа до необходимых размеров. При этом в процесс ручной дуговой наплавки входит дальнейший механический этап обработки восстановленного слоя.

Для индукционной закалки используется электрический ток, для достижения того же эффекта, что и обычный нагрев. Обычно используется на небольших шнеках и для обработки ограниченных участков шнека. Существенным недостатком является относительно слабая устойчивость к коррозии. При наплавке высоколегированными сплавами механическая обработка требует специальные инструменты, что удорожает процесс.

Зачастую возможна комбинация процесса восстановления и упрочнения восстановленного слоя путем индукционной наплавки с применением специальных паст.

Индукционная закалка осуществляется различными способами, такими как: токами высокой частоты и сверхвысокочастотным нагревом.

Сравнительная характеристика данных способов приведена в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Сравнительные данные различных способов индукционного нагрева

Способ индукционного нагрева	Применяемое оборудование	Технические характеристики	Достоинства	Недостатки
Токи высокой частоты (ТВЧ)	ВЧ-15А ВЧ-15АВ ВЧ-25А ВЧ-25АВ	Потребляемая мощность от 15 до 160 кВА. Диапазон	Обеспечивают быстрый нагрев заготовок изнутри (время	Возникновение водяных течей и заливание установок водой. Неправильная

Продолжение таблицы 1.5

	<p>ВЧ-40АВ ВЧ-60АВ ВЧ-80АВ ВЧ-100АВ ВЧ-120АВ ВЧ-160АВ</p>	<p>рабочих частот от 30 до 80 кГц. Напряжение 220-380 В. Максимальный ток одной фазы от 25 до 240 А. Необходима система охлаждения</p>	<p>от 30 секунд до 3 минут), с глубины 1–2 мм. Легко осваиваемый метод. Относительно недорогая стоимость оборудования</p>	<p>конструкция индукторов приводит к быстрому выходу диапазона рабочих частот. Замыкание витков индуктора. Возгорание установки вследствие засорения пылью и возникновения электрической дуги</p>
<p>Сверхвысоко-частотный нагрев</p>	<p>ВЧ-6АВ СВЧ-10А СВЧ-20АВ СВЧ-40АВ СВЧ-60АВ СВЧ-90АВ</p>	<p>Потребляемая мощность от 6 до 90 кВА. Диапазон рабочих частот от 50 до 120 кГц. Напряжение 220-380 В. Максимальный ток одной фазы от 15 до 140 А. Необходима система охлаждения</p>	<p>Быстро нагревают поверхность металлических заготовок на небольшую глубину (время от 15 секунд до 1 мин), используются для закалки на глубину около 1 мм. Легко осваиваемый метод. Использование нагрева деталей из любых металлов и сплавов. Низкая цена оборудования. Малые габариты установок. Отсутствие высокого напряжения, что обеспечивает безопасность рабочему персоналу</p>	<p>Недостатки аналогичны способу ТВЧ</p>

Сверхвысокочастотный нагрев изделий является одним из самым перспективным методом, позволяющим ликвидировать закаливание, из-за высокой скорости нагрева поверхности (глубина закаливания от 0,8 до 1 мм).

Химико-термическая обработка шнековых рабочих органов имеет широкое применение, она позволяет получать износостойкие покрытия путем нанесения порошков.

Проведенные ранее исследования на стали 09Г2С химико-термической обработкой позволили определить твердость и глубину их покрытия (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Химико-термическая обработка различными способами, их твердость и глубина слоя

Способ закалки	Твердость, Hardness(RC)	Глубина слоя, мм
Титанирование	от 75 до 85	0,000025
Никелирование	от 58 до 62	от 0,13 до 0,25
Хромирование	от 68 до 70	от 0,019 до 0,038

Метод борирования позволяет добиться результатов твердости 93-95 Hardness(RC) и глубины слоя 0,002. Борирование имеет высокую абразивную износостойкость и коррозионную стойкость, уменьшает трение. Недостатком метода борирования является хрупкость полученных покрытий.

Однако низкая производительность процессов ХТО (так для борирования необходимо в среднем 2...4 ч) сдерживает их широкое применение в ремонтном производстве [47].

Использование химико-термической обработки методом борирования в сочетании со сверхвысокоскоростным нагревом позволит за короткий период времени добиться необходимого результата. Для осуществления диффузионного борирования в обмазках применяются различные составы борировуемой смеси. Многие составы были исследованы в работах [51].

При совмещении процесса борирования с СВЧ-нагревом скорость обработки возрастает в несколько раз за счет высокой скорости нагрева. Комбинирование данного метода со специальными флюсами позволяет добиться улучшенной сцепляемости упрочнённого слоя с поверхностью стали. Применение диффузионного борирования в обмазках с СВЧ-нагревом более экономически целесообразно, чем процесс «классического» борирования, так как не требуется

создавать защитную среду, а позволяет использовать термическую обработку после обработки.

На основании анализа литературных источников были отобраны основные составы борсодержащих порошков, подходящих для упрочнения шнеков экструдеров, представленных в таблице 2.2.

Таблица 1.7 – Применяемые составы борлирующих смесей, использованных для проведения борирования с использованием СВЧ-нагрева.

Состав, №	Компонент	Масс, %	Компонент	Масс, %	Компонент	Масс, %
1	$B_4C$	89	Флюс «БУРА»	5	$NH_4Cl$	6
2	$B_4C$	90	$CaF_2$	5	Флюс «БУРА»	5
3	$B_4C$	92.5	$CaF_2$	5	Флюс «БУРА»	2.5
4	$B_4C$	84	Флюс «БУРА»	10	$NH_4Cl$	6

## 1.6. Требования к новой технологии восстановления и упрочнения шнековых рабочих органов кормовых экструдеров. Основные выводы по первой главе.

### Цели и задачи исследования

Проведённый анализ помог сформулировать основные требования к новой технологии восстановления и упрочнения шнековых рабочих органов кормовых экструдеров:

- получение упрочняющего покрытия с микротвёрдостью не менее 95 HRC;
- получение упрочнённого слоя толщиной не более 4-9 мкм;
- получение упрочнённого слоя, износостойкость которого больше в 1,5 - 3 раза износостойкости стали;
- нанесение покрытия на труднодоступные поверхности шнекового рабочего органа;
- уменьшение времени обработки;
- экономическая эффективность разрабатываемой технологии.

Проведенные аналитические исследования в первой главе диссертационного исследования показывают, что наиболее распространенным дефектом шнековых

рабочих органов является коррозионно-механическое изнашивание их рабочей поверхности вследствие определенных условий эксплуатации (рабочая температура - 40 до 180°C; рабочее давление прессования - 2,0-5,0 МПа; повышенная влажность кормосмесей – 10...30%; наличие источников абразива в виде твердых частиц зерна и других компонентов; наличие химически активных веществ (соли, способствующие кислотно-щелочной реакции; аминокислоты; витамины (биокатализаторы)). Для повышения долговечности шнековых рабочих органов целесообразно применять метод сверхвысокочастотного нагрева диффузионным борированием в обмазках, позволяющий за короткий период времени получить поверхностно-упрочненный слой.

Целью диссертационного исследования является разработка технологии упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ условий эксплуатации, основных причин выхода из строя шнековых рабочих органов и выбор перспективного метода их упрочнения.
2. Исследовать термодинамические условия получения боридного покрытия сверхвысокочастотным нагревом.
3. Обеспечить синхронизацию поступательного движения индуктора с вращательным движением шнека экструдера.
4. Разработать экспериментальную установку для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.
5. Установить оптимальные режимы сверхвысокочастотного нагрева диффузионного борирования в обмазках.
6. Исследовать физико-механические свойства полученных боридных покрытий.
7. Разработать технологию упрочнения шнековых рабочих органов экструдеров, повышающую их долговечность.
8. Дать оценку экономической эффективности применения разработанной технологии упрочнения шнеков экструдеров кормов.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ КОРМОВЫХ ЭКСТРУДЕРОВ

Для формирования теоретических исследований была разработана блок-схема теоретического исследования восстановления и упрочнения шнековых рабочих органов кормовых экструдеров (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Блок-схема теоретического исследования восстановления и упрочнения шнековых рабочих органов кормовых экструдеров



Для проведения теоретических исследований необходимо обосновать параметры шнековых рабочих органов, теоретически обосновать процесс диффузионного борирования сверхвысокочастотным нагревом в обмазках, выявить оптимальный состав шихты, определить оптимальную температуру сверхвысокочастотного нагрева при диффузионном борировании шнекового рабочего органа, определить время выдержки сверхвысокочастотного нагрева, определить оптимальную толщину покрытия шихты на упрочняемую поверхность шнекового рабочего органа, а также определить необходимое значение микротвёрдости и несущей способности боридного покрытия и теоретически исследовать износостойкость боридных покрытий.

С целью обоснования возможности использования технологии восстановления и упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках осуществляется моделирование процесса упрочнения.

## **2.1. Формирование модели теоретических исследований и теоретические основы определяющих параметров физико-механических свойств шнековых рабочих органов**

Анализируя основные причины отказов шнеков кормовых экструдеров за время их эксплуатации, приходим к выводу, что наиболее подвержены износу рабочие кромки шнека.

На рисунке 2.2 представлены элементы шнека экструдера, где  $d$  – диаметр сердечника, мм,  $S$  – ширина канала, мм,  $B$  – глубина канала, мм,  $B_{\text{изнош}}$  – глубина изношенного канала, мм.

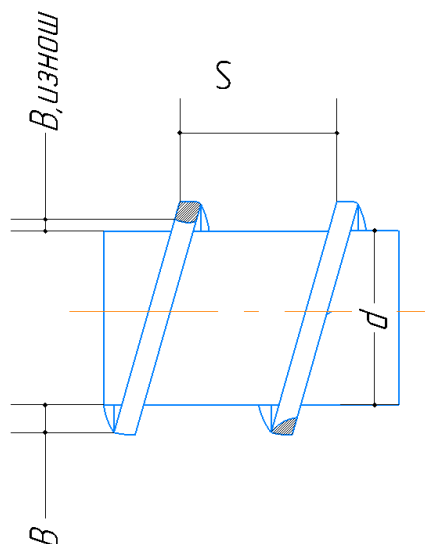


Рисунок 2.2 – Элементы шнека

В результате анализа статистических данных выявлено, что основной причиной неисправностей шнеков кормовых экструдеров является несоблюдение физико-механических параметров шнека и несоблюдение его геометрических размеров. Следовательно, при восстановлении и упрочнении шнека экструдера необходимо избегать основных причин несоответствия физико-механических свойств, выведенных на основе изучения нормативной документации, а именно: несоблюдение технологии приготовления, экономия на качестве материала, низкая точность измерений приборами при оценке качества после упрочнения.

При упрочнении шнеков экструдеров определение физико-механических параметров позволяет подобрать наиболее оптимальный режим для упрочнения шнека. Физико-механические параметры помогут оптимизировать процесс восстановления и упрочнения шнека экструдера, тем самым сделав данный процесс эффективнее с практической и экономической точки зрения.

Определяющие параметры физико-механических свойств шнековых рабочих органов экструдеров представлены на рисунке 2.3. Основываясь на данной схеме, целевая функция соответствия физико-механическим свойствам будет иметь выражение:

$$Pf = f(P_h, P_{HV}, P_r, P_i, P_p, P_D, P_{\psi}) \rightarrow 1,$$

при  $Z_{\text{сум}} \rightarrow \text{optim},$  (2.1)

$$\Delta f \rightarrow \text{min}.$$

где  $P_h$  - соответствие химическому составу материала;  $P_{HV}$  - соответствие твердости поверхности;  $P_r$  - соответствие коррозионной стойкости;  $P_i$  - соответствие износостойкости;  $P_p$  - соответствие плотности,  $P_D$  - соответствие прочностным и деформационным свойствам;  $P_{\psi}$  - соответствие уровню ударной вязкости;  $Z_{\text{сум}}$  - суммарные затраты на изготовление шнековых рабочих органов, соответствующих физико-механическим параметрам;  $\Delta f$  - возникновение дефекта шнековых рабочих органов.



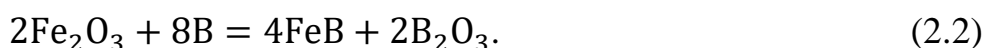
Рисунок 2.3 – Определяющие параметры физико-механических свойств шнековых рабочих органов экструдеров

Целевая функция соответствия физико-механическим свойствам позволяет получить все необходимые параметры при изготовлении шнекового рабочего органа экструдера эталонного образца. При этом суммарные затраты на изготовление шнековых рабочих органов, соответствующих параметрам эталонного шнека, стремятся к оптимальным параметрам. Возникновение дефектов шнековых рабочих органов минимальны.

## **2.2. Термодинамическое и кинетическое исследование возможных реакций между компонентами борировующего состава и сталью при сверхвысокочастотном нагреве**

Для получения покрытий, применимых для упрочнения шнеков экструдеров, актуальным методом является нагрев борлируемой стали и насыщающей среды с использованием сверхвысокочастотного нагрева (СВЧ). Данный метод позволяет совмещать процессы диффузионного борирования из жидкой и твердой среды и переводить их в химическое взаимодействие между железом (Fe) и бором (B) на поверхности сталей.

Исследованиям процесса диффузионного борирования посвящены работы Мишустина Н.М. и других ученых [92,75]. Главная идея заключается в том, что нагрев материала до высоких температур (500-900 °С) вызывает топомеханические реакции, способствующие образованию боридов железа (например, FeB и Fe<sub>2</sub>B). Эти бориды улучшают защитные свойства покрытия и обладают высокой износостойкостью. Суммарное уравнение реакции будет выглядеть следующим образом:



Нагрев на более высокие температуры (от 900°С и выше) способствует появлению на поверхности металла экзотермических эффектов, вызванных протеканием уже целевых реакций образования боридов FeB и Fe<sub>2</sub>B и кислородных соединений элементов, а образующийся на поверхности стали борид

FeV будет далее реагировать на металл основы, распространяясь в его глубину и образуя борид  $Fe_2B$  по обратимой реакции:



Основным нововведением выбранного способа упрочнения является совмещение диффузионного борирования в обмазках с СВЧ-нагревом. Способ СВЧ нагрева отличается от остальных, более традиционных, тем, что получаемое тепло идет напрямую в объём материала и не растрачивается на нагрев окружающего газа, тем самым делая данный метод нагрева крайне энерго-эффективным [46, 132, 134, 138, 140, 141].

Принципиальным отличием СВЧ-нагрева является процесс преобразования электромагнитной энергии в тепловую энергию. Данный процесс осуществляется путём электромагнитных свойств материала обработки, необходимой температуры работы и частоты работы самого СВЧ-нагревателя. Учитывая специфику работы, нагрев осуществляется на постоянной одной частоте и нет возможности учесть электродинамические свойства температурной зависимости, поэтому основное направление анализа идет на зависимость СВЧ-нагрева от самого материала.

Для описания процесса комбинирования диффузионного борирования в обмазках с СВЧ нагревом необходимы основные параметры опытной поверхности: электрическая проводимость, магнитная проницаемость и абсолютная диэлектрическая проницаемость. Комплексная диэлектрическая константа будет выражаться следующим уравнением:

$$\underline{\varepsilon}_{ges} = \varepsilon_0 \cdot [\varepsilon_r^| - j\varepsilon_r^{||}] = \varepsilon_0 \cdot \underline{\varepsilon}_r. \quad (2.4)$$

Постоянная проницаемость выражается:

$$\underline{\mu}_{ges} = \mu_0 \cdot [\mu_r^| - j\mu_r^{||}] = \mu_0 \cdot \underline{\mu}_r, \quad (2.5)$$

где,  $\varepsilon_r^|$ - диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_r^{||}$  - реактивная составляющая константы, состоящая из произведения коэффициента потерь ( $\tan \delta$ ) на диэлектрическую проницаемость ( $\varepsilon_r^|$ );  $\underline{\varepsilon}_{ges}$  - комплексная диэлектрическая константа;  $\underline{\mu}_{ges}$ - комплексная проницаемость;  $\varepsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$  = электрическая

постоянная;  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$  – магнитная постоянная;  $\varepsilon_r^{\perp}$  – диэлектрическая проницаемость;  $\mu_r^{\perp}$  – действительная часть магнитной проницаемости;  $\mu_r^{\parallel}$  – реактивная часть магнитной проницаемости;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\mu_0$  – реактивная диэлектрическая проницаемость.

Учитывая данные параметры в частном диапазоне получаем уравнения Гельмгольца:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \underline{\mu}_{ges} \cdot \underline{\varepsilon}_{ges} \cdot \vec{E}(\vec{r}), \quad (2.6)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \underline{\mu}_{ges} \cdot \underline{\varepsilon}_{ges} \cdot \vec{H}(\vec{r}). \quad (2.7)$$

Передаваемая энергия электромагнитных волн выражается уравнением Максвелла и приводит к теореме Пойнтинга в частном диапазоне:

$$P_{ein} = \frac{1}{2} \int_F^1 [\vec{E} \times \vec{H}^*] \cdot \vec{n}^0 dF = \frac{1}{2} \int_F^1 \vec{S} \cdot \vec{n}^0 dF. \quad (2.8)$$

Согласно данному уравнению делаем вывод, что проникаемая в огибающую поверхность F средняя энергия  $P_{ein}$ , следуя от модуля и фазы, зависит от амплитуды, распределения и соответствующей фазы электрического и магнитного поля. Преобразование поверхностного интеграла в уравнении 2.8 согласно теореме Гаусса в интеграл по объёму приводит к определению потери активной энергии в любом диэлектрике:

$$P_{ein} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \cdot \iiint_V^1 \varepsilon_r^{\perp} \cdot |\vec{E}|^2 dV. \quad (2.9)$$

Так как скоростью распространения СВЧ является скорость света в воздухе, то отсюда следует, что при включении СВЧ-источника преобразование энергии начинается сразу же, а при отключении - процесс нагрева сразу же прекращается.

Полученные уравнения подходят для нагрева однородного материала, тогда как при упрочнении шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмзках СВЧ-нагревом электромагнитное поле СВЧ-диапазона воздействует на материалы, имеющие различную диэлектрическую проницаемость. Возникающая при поглощении электромагнитной энергии СВЧ-диапазона объёмная мощность  $q_v$  определяется по формуле [36]:

$$q_v = \begin{cases} \frac{P_{ir}}{\delta F(1-\varepsilon)}, & 0 \leq x \leq \delta; \\ 0, & x > \delta, \end{cases} \quad (2.10)$$

где  $P_{ir}$  – поглощаемая материалом мощность излучения при отсутствии отражений;  $\delta$  – глубина проникания электромагнитного излучения в материал;  $F$  – площадь сечения СВЧ-индуктора;  $\varepsilon$  – пористость слоя материала.

Для выбора оптимального режима СВЧ-нагрева необходимо поддерживать температуру нагрева по слоям упрочняемой поверхности шнека для возможности протекания процесса диффузионного борирования. Для определения распределения температуры по слоям рассматриваемой системы «металл – борсодержащая шихта» (рисунок 2.4) требуется провести расчёт значений теплоёмкости и теплопроводности, исходя из этого математическая модель будет иметь вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + I_q \quad (2.11)$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость системы;  $\rho$  – средняя плотность системы;  $T$  – температура системы;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности системы;  $I_q = \frac{P}{V}$  – поглощение борсодержащей шихты;  $P$  – мощность СВЧ-излучения;  $V = \pi L(R_2^2 - R_1^2)$  – объём системы;  $L$  – длина обрабатываемого участка шнека;  $R_1$  – наружный радиус покрытия;  $R_2$  – внутренний радиус покрытия;  $R_3$  – внешний радиус шнека;  $T_c$  – температура системы;  $T_{\text{раб}}$  – температура обработки.

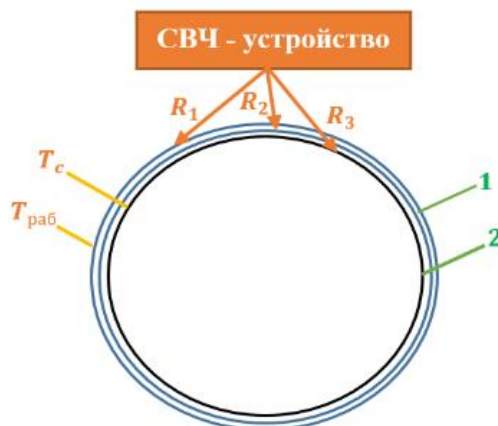


Рисунок 2.4 – система «металл – борсодержащая шихта»:

1 - борсодержащая шихта; 2 – шнек.

Средняя плотность рассматриваемой системы характеризуется через выражение:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{V}(\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2), \quad (2.12)$$

где  $m$  – общая масса системы;  $\rho_{1,2}$  – плотности покрытия металла и борсодержащей шихты;  $v_i = \pi L(R_{i+1}^2 - R_i^2)$  – объем  $i$ -го слоя;  $i = 1, 2$ .

При обработке СВЧ-излучением достигается минимальный градиент температуры по всему объёму системы, поэтому математическая модель примет вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = I_q - \alpha ST, \quad (2.13)$$

где  $\alpha$  – удельный коэффициент теплообмена с окружающей средой;  $S = 2\pi R_4 L$  – площадь поверхности системы (контакта с окружающей средой).

Соответственно, решение уравнения будет следующим:

$$T(t) = \frac{I_q}{\alpha S} \left( 1 - e^{-\frac{\alpha S}{c\rho} t} \right), \quad (2.14)$$

$$T(t) = T_{o.c} - T_c. \quad (2.15)$$

где  $T_{o.c}$  – температура окружающей среды;  $T_c$  – температура системы;  $t$  – время нагрева СВЧ-излучением.

Время нагрева системы до необходимой температуры представим по формуле:

$$t_H \approx 5 \frac{c\rho}{\alpha S}. \quad (2.16)$$

После нагрева системы рабочая температура будет определяться мощностью СВЧ-излучения:

$$T_{\text{раб}} = T_c + \frac{I_q}{\alpha S} = T_c + \frac{P}{\alpha SV}. \quad (2.17)$$

На основании данного выражения распределение температуры по слоям системы определяется так:



$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial}{\partial r} \right) T(r) = 0. \quad (2.18)$$

Соответственно приходит к уравнениям для определения температуры на всех слоях системы:

$$T(R_1 < r \leq R_2) = \frac{c_1}{\lambda_1} \ln r + c_2, \quad (2.19)$$

$$T(R_2 < r \leq R_3) = \frac{c_3}{\lambda_2} \ln r + c_3. \quad (2.20)$$

Так как в исследуемой системе 2 слоя, то граничные значения для системы будут иметь вид:

$$T(r = R_1) = T_c; T(r = R_3) = T_{\text{раб}}. \quad (2.21)$$

Тогда с учетом равенства температуры на границах слоев и равенства тепловых потоков в системе имеем:

$$c_2 + \frac{c_1}{\lambda_1} \ln R_1 = T_c. \quad (2.22)$$

$$c_2 + \frac{c_1}{\lambda_1} \ln R_2 = c_4 + \frac{c_3}{\lambda_2} \ln R_2. \quad (2.23)$$

$$c_4 + \frac{c_3}{\lambda_2} \ln R_3 = c_6 + \frac{c_5}{\lambda_3} \ln R_3 = T_{\text{раб}}. \quad (2.24)$$

Для решения уравнения константу интегрирования принимаем  $c_1 = c_3 = c_5$ :

$$c_1 = \frac{T_{\text{раб}} - T_c}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{R_3}{R_2}}, \quad (2.25)$$

$$c_2 = T_c - \frac{\ln R_1}{\lambda_1} c_1, \quad (2.26)$$

$$c_4 = T_{\text{раб}} - \frac{\ln R_3}{\lambda_2} c_1, \quad (2.27)$$

$$c_6 = T_{\text{раб}} - \frac{\ln R_3}{\lambda_3} c_1. \quad (2.28)$$

Отсюда следует, что характер изменения температуры в борсодержателе и на поверхности металла будет описываться следующими уравнениями:

$$T(R_1 < r \leq R_2) = T_c + \frac{c_1}{\lambda_1} \ln \frac{r}{R_1}, \quad (2.29)$$

$$T(R_2 < r \leq R_3) = T_{\text{раб}} + \frac{c_1}{\lambda_2} \ln \frac{r}{R_3}. \quad (2.30)$$

Разработанная математическая модель позволяет утверждать, что протекание процесса диффузионного борирования возможно с использованием СВЧ-нагрева. Кроме этого, СВЧ-нагрев позволяет рассчитывать значения рабочих параметров системы, что обеспечивает более гибкий подход к подбору борсодержащих шихт и режимов работы.

Использование СВЧ-нагрева позволяет за короткие промежутки времени (от 15 с до 60 с) нагревать поверхность стали до температуры 900-1000°C [14], а также улучшает равномерность покрытия и способствует фазовой и структурной гомогенизации за счет экзотермических реакций. А введение раскислителей во флюсы помогает защитить металл от окисления и убрать шлаки.

Таким образом, разрабатываемая методика позволяет создавать улучшенные боридные покрытия, которые значительно повышают долговечность и эффективность работы металлических компонентов в экструдерах, что актуально для промышленного применения.

На основании исследования источников [101, 129, 133, 135, 136] понятно, что реакция 2.2 является гетерогенной, то есть реакцией, протекающей на границе раздела фаз в неоднородной среде, а именно: между поверхностью стали и борлирующим агентом, - а результатом реакции является твердый продукт ( $FeB$ ,  $Fe_2B$ ). Отсюда следует, что реакция 2.2 может рассматриваться как топохимическая реакция (ТПХР).

При процессе диффузионного борирования ТПХР начинается с образования ядер кристаллизации твердого продукта реакции ( $FeB$ ,  $Fe_2B$ ) на поверхности стали. По мере ускорения реакции количество ядер кристаллизации увеличивается в размере и имеет форму сферы. После слияния ядер образуется сплошной реакционный фронт, после чего наступает замедление процесса из-за перекрывания ядер кристаллизации, которые постепенно исчезают. Анализируя данный процесс, можем сделать вывод, что скорость процесса диффузионного борирования определяется скоростью образования ядер их рекомбинации.

Соответственно, скорость ТПХР представляют через изменение степени превращения исходного вещества в единицу времени [114]:

$$w = \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2.31)$$

где  $m_0$  и  $m_t$  - начальная и текущая массы исходного вещества, или величины пропорционально с ними связанные,  $\alpha = (m_0 - m_t)/m_0$ .

Таким образом, механизм протекания топохимической реакции носит вероятностный характер, и кинетический расчет исходит из соображения того, что ядра кристаллизации образуются по экспоненциальному закону [34]:

$$N_t = N_0[1 - \exp(-kt)], \quad (2.32)$$

где  $N_0$  и  $N_t$  - число ядер в начальный и произвольный момент времени.

Для исследования процесса кинетики борирования [92] образцы стали были подвергнуты диффузионному борированию в обмазках в течение различных промежутков времени. За величину количества продукта реакции принимается толщина полученного боридного покрытия, а степень превращения рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{h_{max} - h_t}{h_{max}}, \quad (2.33)$$

где  $h_{max}$  и  $h_t$  - максимальная и текущая толщина боридного покрытия соответственно.

Критерием отнесения наблюдаемого процесса к ТПХР будет являться хорошая линейная корреляция экспериментальных точек линейной зависимости.

На рисунке 2.4 показана зависимость толщины боридных покрытий на стали, полученных при различных температурах при СВЧ-нагреве. Зависимость сигмообразная и имеет индукционный период продолжительностью  $\sim 30$  с.

На основании данных, полученных из источников, следует, что энергия активации топохимической реакции зависит от температуры. На основании кинетического расчета, представленного у Мишустина Н.М. [92,75], следует, что температурный интервал практической реализации диффузионного борирования с использованием СВЧ-нагрева находится от 1198 до 1448 К, а энергию активации реакции принимаем за постоянную.

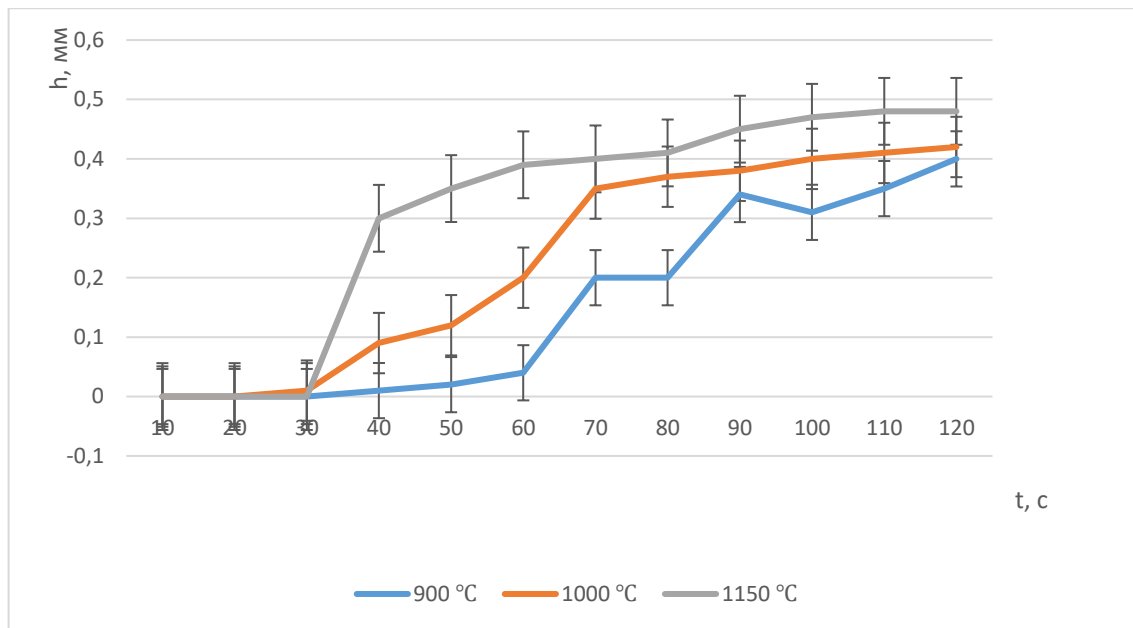


Рисунок 2.5 - Кинетические кривые диффузионного борирования стали в обмазках при температурах 900, 1000 и 1150 °C.

При описании зависимости используется уравнение, предложенное Аррениусом:

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{E_a}{RT^2}, \quad (2.34)$$

где  $k$  - константа скорости реакции,  $E_a$  - энергия активации,  $T$  - абсолютная температура процесса,  $R$  - универсальная газовая постоянная.

После подстановки в уравнение небольшого интервала температур от  $T_1 = 1198$  К до  $T_2 = 1448$  К и условия, что  $E_a$  топокхимической реакции не будет зависеть от температуры, получаем:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{d \ln k}{dT} = \ln k_{T_1} + \frac{E_a(T_2 - T_1)}{RT_1 T_2}. \quad (2.35)$$

Отсюда следует, что выражение аналитического определения энергии активации будет иметь следующий вид:

$$E_a = \frac{RT_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_{T_2}}{k_{T_1}}, \quad (2.36)$$

где  $k_{T_1}$  и  $k_{T_2}$  – константы скорости химической реакции при температурах  $T_1$  и  $T_2$ .

На основании данных, полученных из анализа линеаризованных кривых топохимической реакции, получили параметры кинетического уравнения для процесса диффузионного борирования в обмазках СВЧ-нагревом и рассчитали энергию активации ( $E_a$ ). Данные приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Кинетические параметры интегрального процесса борирования стали 09Г2С с использованием СВЧ-нагрева ( $n = 5$ ;  $P = 0,95$ )

T, К	lnk	n	$\sigma$ , при $m=\text{const}$			$E_a$ , кДж/моль
			1	2	3	
1198	-10,35±0,03	2,72±0,02	1,72	0,72	-	365,8±0,2
1298	-12,25±0,02	3,32±0,03	2,32	1,32	0,32	
1498	-15,05±0,03	4,15±0,03	3,15	2,15	1,15	

Основываясь на проведённых термодинамических и кинетических исследованиях, делаем вывод, что доказана возможность протекания топохимической реакции диффузионного борирования в обмазках СВЧ-нагревом.

### 2.3. Формирование модели технического процесса упрочнения шнековых рабочих органов

Для осуществления изучения процесса восстановления и упрочнения шнеков экструдеров была разработана принципиальная схема установки для восстановления и упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках (рисунок 2.9). Данная установка позволяет получить на рабочей поверхности шнека экструдера износостойкий слой, что повышает ресурс работы шнека и его ремонтпригодность.

Установка состоит из станины установки 1, размещенной на опоре 2 перемещающего устройства 3. К торцам станины установки 1 присоединяются стенки с подшипниковыми узлами 4. При этом используются шариковые радиальные подшипники, обеспечивающие свободное вращение главного винта 5 [74].

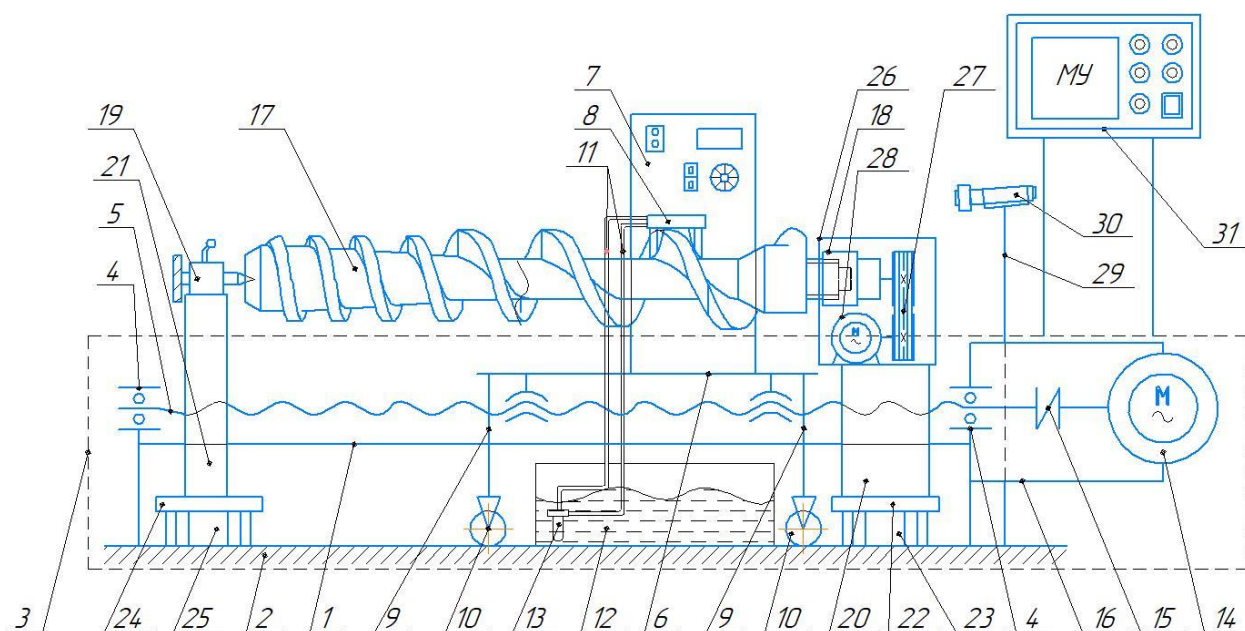


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема устройства для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках:

- 1 – станина; 2 – опора; 3 – перемещающее устройство; 4 – подшипниковый узел; 5 – главный винт; 6 – стол; 7 – преобразователь частоты; 8 – индуктор; 9 – рама; 10 – неповоротные усиленные колёса с подшипниками; 11 – трубопроводы; 12 – ёмкость с охлаждающей жидкостью; 13 – погружной насос; 14 – шаговый электродвигатель; 15 – соединительная муфта; 16 – подрамник; 17 – шнек; 18 – четырёхкулачковая поворотная ось; 19 – задняя бабка; 20 – станина передней поворотной оси; 21 – станина задней бабки; 22 – передняя каретка; 23 – направляющая передней каретки; 24 – задняя каретка; 25 – направляющая задней каретки; 26 – корпус передней поворотной оси; 27 – ременная передача; 28 – электродвигатель передней поворотной оси; 29 – модуль управления; 30 – крепёжные стойки

Главный винт 5 по принципу шарико-винтовой пары приводит в движение стол 6 с закреплённым на нём преобразователем частоты 7 с подключенным напрямую индуктором 8. К столу 6 при помощи крепёжной рамы 9 равномерно закреплены четыре неповоротные усиленные колеса с подшипниками 10, перемещающиеся по опоре 2, что позволяет обеспечить жесткость и плавности перемещения стола 6. Охлаждение индуктора 8 осуществляется благодаря циркуляции охлаждающей жидкости по трубопроводам 11, подключённым к индукционному нагревателю 8, идущими к ёмкости с охлаждающей жидкостью 12.

Циркуляцию воды осуществляет погружной насос 13, установленный в резервуаре охлаждающей жидкости 12.

Главный винт 5 приводится во вращение от шагового электродвигателя 14 через соединительную муфту 15. Шаговый электродвигатель 14 закреплён на подрамнике 16, соединённом со станиной установки 1.

К индуктору 8 подводят упрочняемую деталь типа шнек 17, которая закрепляется при помощи четырёхкулачковой поворотной оси 18 и задней бабки 19 установленных на станине передней поворотной оси 20 и станине задней бабки 21 соответственно. Станина передней поворотной оси 20 размещена на передней каретке 22 и перемещается по направляющей передней каретки 23, которая неподвижно закреплена на опоре 2. Станина задней бабки 19 размещена на задней каретке 24 и перемещается по направляющей задней каретки 25, которая неподвижно закреплена на опоре 2.

Четырёхкулачковая поворотная ось 18 закреплена в корпусе передней поворотной оси 26 и подключена с помощью ременной передачи 27 с электродвигателем передней поворотной оси 28, что приводит во вращательное движение упрочняемую деталь типа шнек 17 с необходимой частотой вращения.

На опоре 2 неподвижно закреплена стойка пирометра 29, с размещенным на нём пирометром 30, позволяющим в реальном времени контролировать температуру нагрева шнека 17.

Управление включением и выключением шаговым электродвигателем 14, электродвигателем поворотной оси 28, погружным насосом 13, преобразователем частоты 7, пирометром 29 осуществляется с модуля управления 31.

Установка позволит автоматизировать и оптимизировать процесс диффузионного борирования сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

На правильную работу установки влияет совмещение поступательного движения стола с индуктором и вращательного движения шнека. Для того чтобы определить это совмещение, необходимо определить параметры как вращающегося движения шнека, так и поступательного движения индуктора [119].

Вращающееся движение шнека:

угол поворота шнека по времени можно описать, как:

$$\theta(t) = \omega t. \quad (2.37)$$

линейная скорость поверхности шнека (где радиус шнека считается):

$$v_{\text{шнек}} = r \cdot \omega, \quad (2.38)$$

где  $\omega$  — угловая скорость шнека (рад/с),  $r$  — радиус шнека (м),  $t$  — время (с).

Поступательное движение индуктора:

положение индуктора во времени может быть описано, как:

$$d(t) = v_{\text{индуктор}} \cdot t, \quad (2.39)$$

где  $v_{\text{индуктор}}$  — скорость поступательного движения индуктора (м/с),  $d$  — расстояние, на которое индукция перемещается по оси (м).

Для наложения поступательного и вращающегося движения необходимо установить взаимосвязь между  $d(t)$  и  $\theta(t)$ . Шнек экструдеров вращается, и, чтобы индукция корректно проходила по всем участкам шнека, её движение нужно согласовать с углом поворота шнека.

Допустим, длина шнека составляет  $L$ , а его окружность можно найти по формуле:

$$C = 2\pi r. \quad (2.40)$$

Тогда количество полных оборотов шнека за время  $t$  будет равно:

$$N(t) = \frac{\theta(t)}{2\pi} = \frac{\omega t}{2\pi}. \quad (2.41)$$

Линейное расстояние, которое проходит шнек за это время, составит:

$$S_{\text{шнек}}(t) = N(t) \cdot C = \frac{\omega t}{2\pi} \cdot 2\pi r = \omega r t. \quad (2.42)$$

В этом уравнении  $S_{\text{шнек}}(t)$  представляет собой расстояние, которое шнек проходит по своей оси за время  $t$ . Теперь связываем это с поступательным движением индуктора.

Чтобы индуктор корректно взаимодействовал с вращающимся шнеком, нужно чтобы линейное движение индуктора соответствовало расстояниям, пройденным шнеком, при этом можно установить, что:

$$v_{\text{индуктор}} = \omega r. \quad (2.43)$$



Таким образом, если индукционное устройство движется с постоянной скоростью  $v_{\text{индуктор}}$ , это означает, что индукция должна совпадать со скоростью вращения шнека с учётом радиуса.

Ниже описаны факторы, влияющие на процесс восстановления и упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

#### **2.4. Моделирование влияния факторов на процесс упрочнения**

На процесс упрочнения шнеков экструдеров с применением установки для восстановления и упрочнения влияет множество различных факторов, которые влияют на правильную работу. Для определения этих факторов необходимо понимать степень их влияния и, опираясь на них, разработать рекомендации для упрочнения и восстановления шнеков экструдеров различных типов. [65,66].

Для наглядности факторы влияния на процесс упрочнения были сгруппированы. Все факторы, влияющие на результаты восстановления и упрочнения шнеков экструдеров, можно разделить на группы: параметры установки, свойства упрочняемого шнека, технологические и прочие факторы. На рисунке 2.7 представлены основные факторы в виде причинно-следственной диаграммы Исикавы. [109,120].

Анализ научных работ и результатов теоретических исследований позволил определить главные факторы, влияющие на результат упрочнения, но они недостаточно исследованы. Такие факторы, как: температура обработки, толщина упрочняемого покрытия, расстояние между обрабатываемой поверхностью и шнеком, геометрические параметры шнека имеют ключевое влияние на процесс восстановления и упрочнения, поэтому изучение и решение этих факторов является актуальной задачей.

Таким образом, полученные ранее данные зависимости результата упрочнения от факторов, обусловленных параметрами упрочняющей установки и свойствами упрочняемого шнека, позволяют оценить и получить оптимальные значения параметров, влияющих на успешное восстановление и упрочнение шнеков экструдеров.

## Диаграмма Исикавы



Рисунок 2.7 – Факторы, влияющие на упрочнения шнека экструдера диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках

## 2.5. Выводы по второй главе

1. Разработана целевая функция соответствия физико-механическим свойствам эталонного образца шнека экструдера в процессе его изготовления.
2. Разработана математическая модель процесса диффузионного борирования методом сверхвысокочастотного нагрева в обмазках. СВЧ-нагрев позволяет рассчитывать значения рабочих параметров системы, что обеспечивает более гибкий подход к подбору борсодержащих шихт и режимов работы.
3. Обосновано возвратно-поступательного движение индукционного нагревателя с вращающимся движением шнекового рабочего органа в процессе упрочнения его рабочей поверхности.
4. Разработана принципиальная схема установки для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках СВЧ-нагревом.
5. Проанализированы и сформулированы основные факторы, влияющие на работу проектируемой установки.

## **ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

### **3.1. Методика экспериментального исследования**

Экспериментальное исследование технологии повышения долговечности шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках представляется как совокупность научных и технических мероприятий, направленных на подтверждение теоретических обоснований.

Алгоритм экспериментальных исследований процесса упрочнения шнеков экструдеров основывается на мероприятиях, которые приведены на рисунке 3.1.

Основываясь на проведенном исследовании методов и средств упрочнения шнеков экструдеров, можно сделать вывод о необходимости разработки и внедрения новых автоматических средств повышения долговечности шнеков экструдеров. Совмещение в одной технологии автоматически перемещающегося преобразователя напряжения с индуктором относительно вращающегося шнека и согласование их движений требуют детального исследования в лабораторных условиях и в условиях технического сервиса.

Отсюда следует, что экспериментальным объектом исследования является процесс упрочнения шнеков экструдеров с применением средств механизации



Предметом лабораторных и производственных исследований является шнек экструдера.

В лабораторных условиях испытания проводились с целью определения уровня влияния факторов на качество упрочненного слоя шнека экструдера. На кормопроизводственном предприятии исследования проводились с целью выявления условий работы установки для восстановления и упрочнения шнеков экструдеров и определения оптимальных режимов работы.

На основании поставленных задач в диссертационной работе была составлена программа исследований.

## **3.2. Разработка устройства для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках**

### **3.2.1. Требования к проектированию установки для упрочнения шнеков экструдеров и его принцип работы**

На основании патентного анализа, опираясь на опыт разработки [10,67] бесконтактной измерительной системы [72], а также на основании принципиальной схемы (рисунок 2.6) с помощью программы КОМПАС 3D была спроектирована 3D модель установки для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках СВЧ-нагревом. 3D модель представлена на рисунке 3.2.

Разрабатываемая установка для упрочнения шнеков экструдеров по сравнению с бесконтактной измерительной системой позволяет применять метод диффузионного борирования СВЧ-нагревом в обмазках на шнеки экструдеров, тем самым повышая его надёжность, увеличивая ресурс [35].

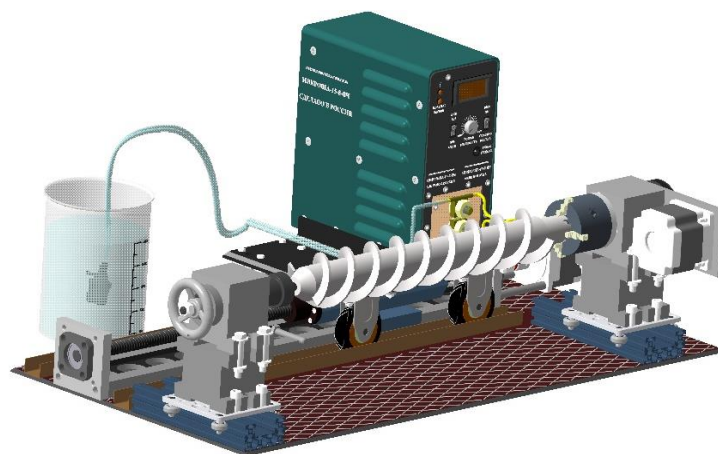


Рисунок 3.2 – Трёхмерная модель устройства для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обматках сверхвысокочастотным нагревом

Для монтажа проектируемой установки приняты следующие требования к конструкции (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Требования к проектированию установки для упрочнения шнеков экструдеров

№ п/п	Наименование	Единица измерений	Значение/Примечание
	1	2	3
Параметры устройства			
1	Механизм передвижения стола устройства	-	шарико-винтовая передача(ШВП)
2	Механизм вращения закреплённого шнека	-	поворотная ось (четвёртая) для фрезерно-гравировального станка с ЧПУ, на базе ременного редуктора с передаточным отношением 3:1
3	Габаритные размеры	мм	1300x1100x600
4	Масса	кг	150 кг
Параметры преобразователя напряжения			
5	Напряжение и частота электросети	В/Гц	230/50
6	Максимальный потребляемый ток	А	20
7	Напряжение на индукторе с рабочей частотой	В	25-40
8	Ток индуктора с рабочей частотой	А	500
9	Масса аппарата	кг	7,2
10	Габаритные размеры. (длина, ширина, высота)	мм	620x300x530
Параметры поворотной оси			
11	Токарный патрон	-	К12-100 (4200r/min)
12	Количество кулачков	шт	4
13	Габаритные размеры	мм	210x210x115
14	Масса	кг	9,5 кг

Для осуществления процесса сверхвысокочастотного нагрева был выбран Индукционный кузнечный нагреватель МИКРОША-15-8-ВЧ (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 - Индукционный кузнечный нагреватель МИКРОША-15-8-ВЧ

Технические характеристики индукционного кузнечного нагревателя МИКРОША-15-8-ВЧ перечислены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики Индукционного кузнечного нагревателя МИКРОША-15-8-ВЧ

№ п/п	Параметр	Значение
1	Напряжение и частота электросети, В/Гц	230/50
2	Диапазон изменения напряжения электросети, В	170-260
3	Максимальная потребляемая мощность, кВА	8,0
4	Максимальный потребляемый ток, А	20
5	Диапазон рабочих частот, кГц	20-60
6	Напряжение на индукторе с рабочей частотой, В	25-40
7	Ток индуктора с рабочей частотой, А	500
8	Оптимальная индуктивность индуктора, мкГн	0,3 – 0,7
9	Процент нагрузки, ПН%	80%
10	Масса аппарата, нетто, кг	7,2
11	Масса брутто, в комплекте, кг	9,0
12	Габаритные размеры (длина, ширина, высота), мм	315x145x265
13	Охлаждение аппарата	Воздушное
14	Охлаждение индуктора	Водяное
15	Расход охлаждающей жидкости, не менее	0,3 м3/час
16	Давление воды, МПа	0,2-0,6
17	Тип охлаждающей жидкости	Вода
18	Температура эксплуатации, град. С	-10 +40



Для наилучшего нагрева и повторения геометрической формы шнека экструдера был использован индуктор типа «ковш», представленный на рисунке 3.4. Индуктор изготовлен из медной трубки диаметром  $\Phi 4$  мм, на которую одет шнур-чулок кремнезёмный ШК-4 для изоляции витков, выводы индуктора изготовлены из трубки  $\Phi 6$  мм.



Рисунок 3.4 – Индуктор типа «ковш»

Для охлаждения индуктора использована система охлаждения, состоящая из погружного насоса мощностью 22 Вт, напряжением 24 вольта, с блоком питания 24В/1А и двумя трубками. Насос опускается в любую подходящую по объёму ёмкость: ведро, канистру, бочку и т.п. Трубка подачи воды подсоединяется к одному концу трубки индуктора, обратная трубка - к другому концу и сливается назад в бочку (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5- Система охлаждения индуктора

Для закрепления упрочняемого шнека экструдера была использована поворотная ось (четвёртая) 5М-3-100В для фрезерно-гравировального станка с ЧПУ на базе ременного редуктора с передаточным отношением 3:1 (рисунок 3.6).

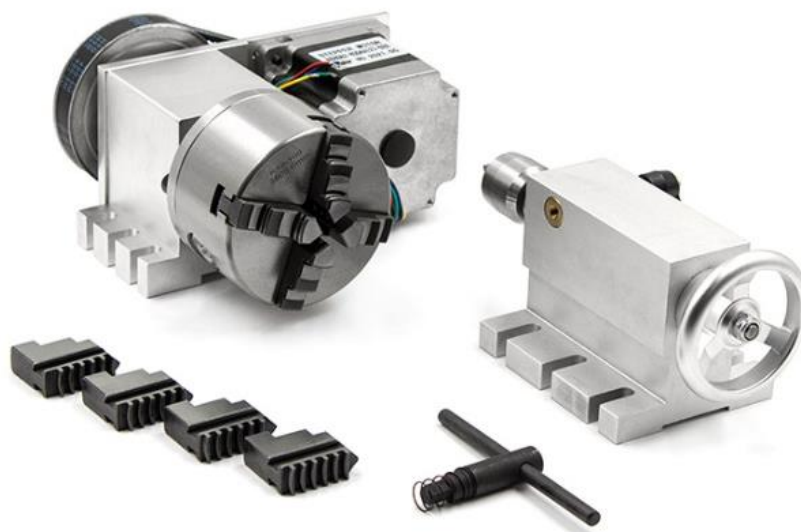


Рисунок 3.6 – Поворотная ось 5М-3-100В четырехкулачковая на ременном редукторе

Технические характеристики поворотной оси 5М-3-100В приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Основные технические характеристики поворотной оси 5М-3-100В.

№ п/п	Параметр	Значение
1	Токарный патрон	K12-100 (4200r/min)
2	Количество кулачков	4
3	Тип редуктора	Ременной
4	Передаточное отношение редуктора	3:1
5	Люфт	не более 0,30
6	Двигатель	86HS82-4504
7	Ток	4,5А
8	Высота центра	65мм
9	Габаритные размеры	210x210x115 мм
10	Вес	9,5 кг

Для управления шаговыми электродвигателями использовался драйвер DM556 (рисунок 3.7), который применяется для управления такими устройствами, как: координатные машины, модули линейного перемещения, технологические

машины, фрезерные, плазменные, лазерные, токарные станки с ЧПУ, конвейеры, покрасочные станки, автоматизированные системы перемещения, любая другая система, требующая точного и относительно быстрого перемещения, фрезерный станок с ЧПУ, комплектующие к станку с ЧПУ.



Рисунок 3.7 – Драйвер DM556

Основные технические параметры драйвера DM556 представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Основные технические характеристики драйвера DM556

№ п/п	Параметр	Значение
1	Минимальный ток	2.1 А
2	Максимальный ток	5,6 А
3	Напряжение питания минимальное	24 В
4	Напряжение питания максимальное	50 В
5	Максимальная частота импульсов	200 кГц

После определения технических требований к конструкции, определения принципиальной схемы и проектирования 3D модели устройства было сконструировано устройство для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом и получен патент на изобретение № 2820894 [5] (приложение А), представленное на рисунке 3.8.

Установка работает по следующему алгоритму [119]: подготовленная к обработке (с нанесённой шихтой) упрочняемая деталь типа шнек, закрепляется с помощью четырёхкулачковой поворотной оси и задней бабки, которые размещены на станине передней поворотной оси и станине задней бабки соответственно. Происходит перемещение упрочняемой детали типа шнек к индуктору по

направляющей передней каретки и направляющей задней каретки. От модуля управления подается питание на электронные компоненты устройства: преобразователь частоты, электродвигатель передней поворотной оси, шаговый электродвигатель и погружной насос. Происходит запуск преобразователя частоты и погружного насоса. Погружной насос циркулирует охлаждающую жидкость по трубопроводам из ёмкости с охлаждающей жидкостью через индуктор. После нагрева индуктора до температуры, рекомендованной технической документацией, происходит запуск шагового электродвигателя, приводящего в движение главный винт, который перемещает стол. Плавность перемещения стола обеспечивается за счёт прикрепленных к нему при помощи крепёжной рамы четырех неповоротных усиленных колес с подшипниками, которые перемещаются по опоре. Одновременно с запуском шагового электродвигателя запускается электродвигатель передней поворотной оси, который с помощью ременной передачи приводит во вращательное движение четырёхосную поворотную ось. Упрочняемая деталь типа шнек начинает вращение. Происходит сверхвысокочастотный нагрев рабочей поверхности упрочняемой детали типа шнек, которая подведена к индуктору. Упрочнение детали типа шнек завершается после обработки всей её рабочей поверхности, это происходит, когда стол перемещает преобразователь частоты в крайнее левое положение установки.

Принцип действия установки основан на получении поверхностного упрочнённого слоя на рабочей поверхности шнека экструдера за счёт использования диффузионного борирования в обмазках с применением сверхвысокочастотного нагрева.

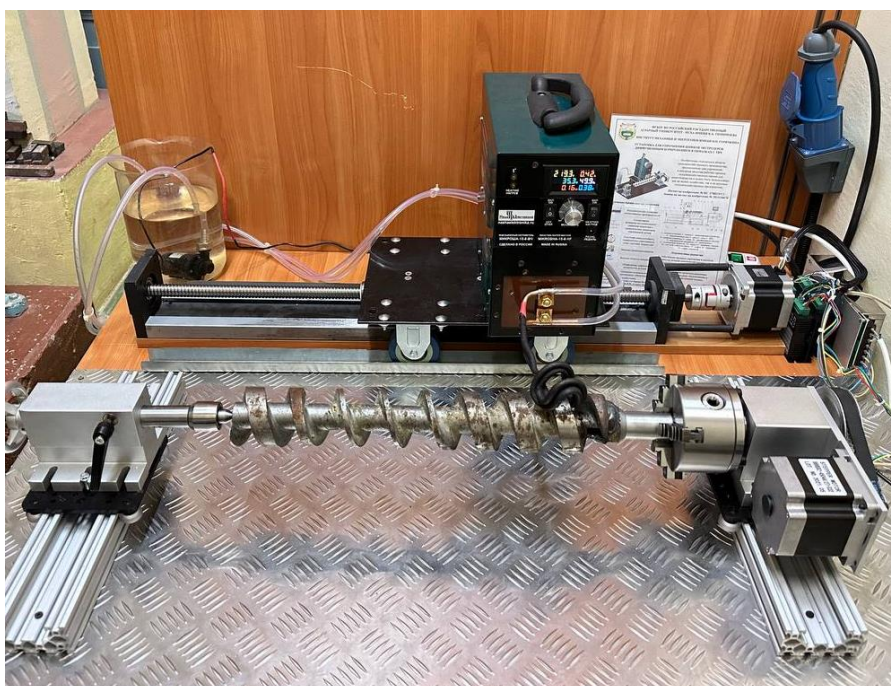


Рисунок 3.8 – Устройство для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках

Управление работой установки осуществляется с помощью компьютерной программы «Automated control system for strengthening screws», вид интерфейса которой представлен на рисунке 3.9. [100]

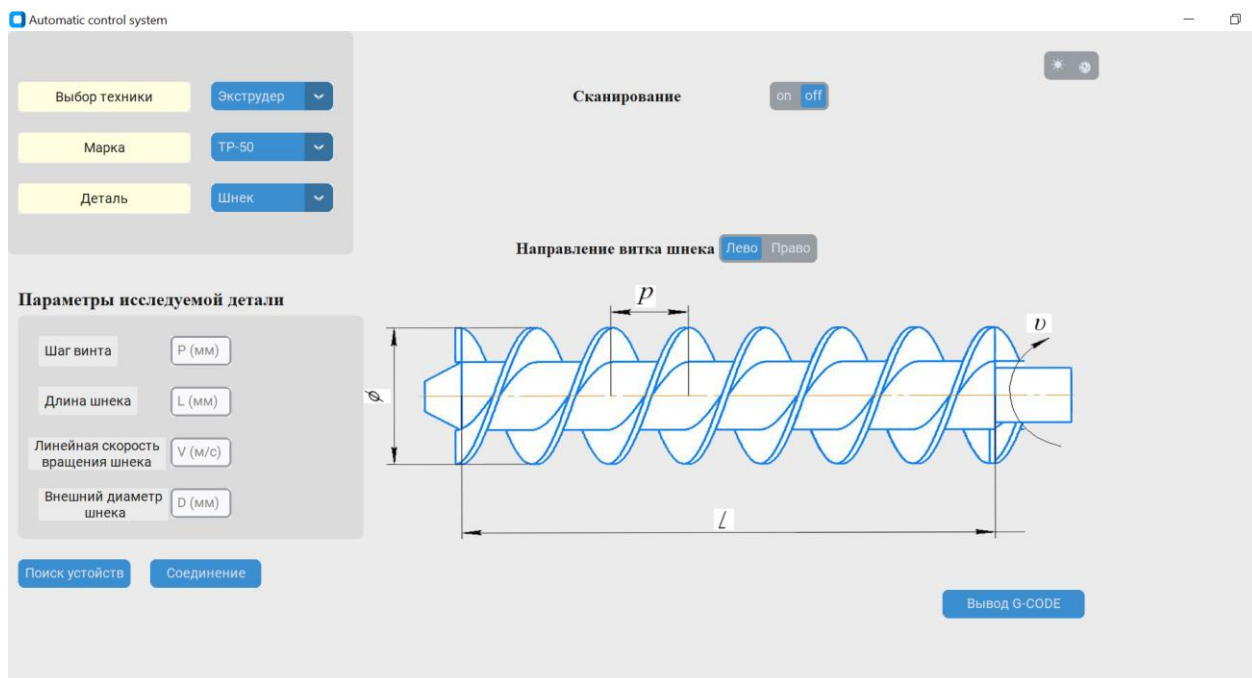


Рисунок 3.9 – Интерфейс программы «Automated control system for strengthening screws»



### 3.3. Методика лабораторных исследований

Для исследования износостойких боридных покрытий, полученных с использованием СВЧ-нагрева, были подготовлены образцы из конструкционных сталей 12Х18Н, 12ХМФ, 45, 65Г (рисунок 3.10).

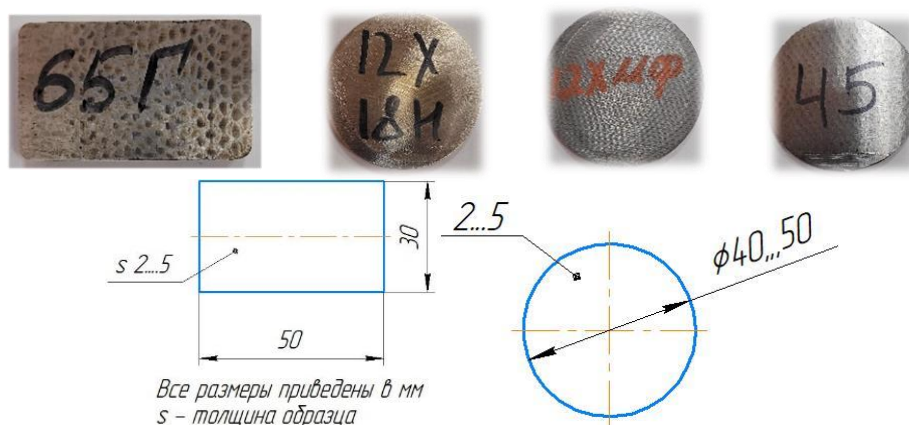


Рисунок 3.10 – Материалы и габариты, используемые в исследовании (экспериментальные образцы)

Химический состав экспериментальных образцов приведён в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Химический состав, %								Механические свойства	
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	$\sigma_b$ , МПа	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
12Х18Н	0,12	до 0,8	до 2	9-11	до 0,02	до 0,04	17-19	до 0,3	440	79
12ХМФ	0,08-0,15	0,17-0,37	0,4-0,7	до 0,3	до 0,025	до 0,03	0,9-1,2	до 0,2	680	43
45	0,42-0,5	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25	0,04	0,035	0,25	0,25	345	59
65Г	0,62-0,7	0,17-0,37	0,5-0,8	до 0,25	до 0,035	до 0,035	до 0,025	до 0,025	690	78

Шихта для приготовления обмазки для диффузионного борирования СВЧ-нагревом готовилась с применением реактивов класса «ХЧ», «ЧДА», «Ч». Размер фракции химических реактивов не превышал 0.315 мм (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Применяемые реактивы

Наименование/марка	ГОСТ или ТУ
Бор карбид	ГОСТ 5744-85
Бор аморфный	ТУ 2112-001-49534204-2003
Хлорид аммония	ГОСТ 3773-72
Калий железосинеродистый	ГОСТ 4206-75
Бура техническая	ГОСТ 8429-77

Поверхность образцов подготавливалась путём шлифования поверхностного слоя на специализированном станке.

Борирующая шихта наносилась на поверхность экспериментальных образцов. Закрепление осуществлялось с помощью жидкого стекла. После чего образцы сушились строительным феном (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 - Экспериментальные образцы с нанесённой шихтой до и после сушки.

После проведения процесса борирования и извлечения образцов из установки для упрочнения шнеков экструдеров поверхность образцов была очищена от окалины и шлаков. Качество поверхности контролировали визуально. Толщину диффузионного слоя измеряли на поперечных и косых микрошлифах.

Настройки индукционного кузнечного нагревателя МИКРОША-15-8-ВЧ позволяют выставить три режима нагрева - это «мягкий», «средний» и «форсированный», (таблица 3.7). Контроль температуры нагрева осуществляли с помощью пирометра. Время нагрева контролировалось с помощью секундомера.

Таблица 3.7 – Режимы настройки СВЧ-генератора

Наименование режима	Показатели щитовых приборов			
	Анодный ток, $I_a$ , А	Сеточный ток, $I_a$ , А	Анодное напряжение, кВ	Напряжение на нагрузочном контуре
«мягкий»	4,7-4,5	0,65-0,75	6,5	0,43
«средний»	5,4-4,75	0,8-0,75	7,0-7,5	0,47
«форсированный»	6,5-5,8	0,9-0,7	8,6-9,0	0,6

Для нагрева экспериментальных образцов был использован петлевой водоохлаждаемый медный индуктор типа «ковш». Геометрия индуктора повторяла геометрию экспериментальных образцов, что позволило нагревать с последующей стабилизацией до необходимой температуры 850-1250°С за короткий промежуток времени 20-40 с. После обработки в течение 2,5 мин образцы остывали на воздухе при комнатной температуре.

После упрочнения и очистки экспериментальные образцы шлифовались на плоскошлифовальном станке с глубиной резания за проход до 0,01 мм.

### 3.3.1. Исходные данные для лабораторных испытаний

Расчёт и определение показателей лабораторных испытаний выполнялись по трёхкратной повторности опытов [78]. Отбор происходил по времени и порядку проведения. Для исключения влияния ошибок, вызванных внешними условиями, ранжирование проводилось при помощи таблицы случайных чисел. Результаты вносились в таблицу (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Таблица случайных чисел

№ опыта	Среднее значение параметров по трём опытам	
	относительная износостойкость боридных покрытий, $\varepsilon$	толщина боридного покрытия, $h$ , мкм

Область и интервал планирования факторов приведены в таблице 3.9.



Оптимизирующим основным параметром является относительная износостойкость и толщина боридного покрытия. Ограничением является толщина получаемого покрытия.

Основными факторами является температура нагрева  $T$ , °С, время процесса борирования  $t$ , с и скорость нагрева  $V$ , °С/с.

За эталонный образец выбрана сталь 65Г.

Таблица 3.9 – Область и интервал варьирования факторов

Наименование	Кодовое обозначение	Значение факторов в натуральном масштабе		
		$T$ , °С	$t$ , с	$V$ , °С/с
Температура нагрева	$x_1$	-	-	-
Время процесса упрочнения	$x_2$	-	-	-
Скорость нагрева	$x_3$	-	-	-
Основной уровень	0	1050	45	33,5
Интервал варьирования	$\Delta_i$	100	30	7
Верхний уровень	+1	1100	60	37
Нижний уровень	-1	900	30	30

Модель, которую можно построить по результатам полного факторного эксперимента  $2^3$ , содержит 8 членов и имеет вид [7]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (3.1)$$

На основании модели (3.1) и полученных средних значений результатов опытов выведена матрица планирования (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – матрица планирования полного факторного эксперимента

№ п/п	Значение факторов в натуральном масштабе			Кодированное значение факторов			Относительная износостойкость $\varepsilon$
	$T$ , °С	$t$ , с	$V$ , °С/с	$x_1$	$x_2$	$x_3$	

На основании матрицы планирования определена оценка дисперсии опытов, при условии, что опыты проводились при равномерном дублировании [113]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1} \sum_{g=1} (y_{ug} - y_u)^2}{n \cdot (N-1)}, \quad (3.2)$$

где  $y_{ug}$  – результат  $g$ -ой повторности  $u$ -го опыта;  $y_u$  – среднее арифметическое значение всех  $n$  повторностей  $u$ -го опыта;  $N$  – количество опытов.

Для проверки однородности дисперсии каждого ряда опытов принимаем, что все опыты дублировались равномерно. Отсюда следует, что критерий Кохрена будет определяться по формуле:

$$G^{\text{расч}} = \frac{S_{yu\_max}^2}{\sum_{u=1}^N S_{yu}^2}, \quad (3.3)$$

Полученное значение  $G^{\text{расч}}$  сравнивалось с табличным, выбранным в зависимости от уровня значимости  $\alpha$ , числа опытов  $N$ , числа степеней свободы:

$$f = n - 1 \quad (3.4)$$

При выполнении условия  $G^{\text{расч}} < G^{\text{табл}}$  ряд дисперсий считался однородным.

Результаты расчёта дисперсий и их однородности заносятся в таблицу 3.11.

Таблица 3.11 - Результаты проверки однородности дисперсий в параллельных опытах для параметра относительной износостойкости

№ опыта	$Y_{1u}$	$Y_{2u}$	$Y_{3u}$	$Y_u$	$S_{yu}^2$	$G^{\text{расч}}$
					$\sum_{u=1}^N S_{yu}^2$	$S_{yu}^2$
					$S_{yu\_max}^2$	

При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $f = n - 1 = 2 - 1 = 1$  табличное значение  $G$ -критерия  $G^{\text{табл}} = 0,68$ . Поскольку условие  $G^{\text{расч}} < G^{\text{табл}}$  выполняется, то ряд дисперсий опытов однороден.

Выявление трудоёмкости контроля с помощью установки для упрочнения шнеков экструдеров с учетом организационного времени осуществляется с помощью хронометража (таблица 3.12)

Таблица 3.12 – Трудоёмкости контроля с учётом времени на организацию процесса контроля

Изменяемый параметр	Необходимое время для подготовки упрочняющего оборудования для начала работы, мин	Время на измерение, мин	Трудоёмкость измерений, чел.-ч.

### 3.4. Методика исследования влияния наиболее значимых факторов

#### 3.4.1. Методика исследования твёрдости экспериментальных образцов

Определение твёрдости экспериментальных образцов проводилось на твердомере Виккерса Метолаб 421. Метод измерения заключается в вдавливании алмазного индентора пирамидальной формы с усилием на поверхность экспериментального образца. Угол индентора составляет  $136^\circ$ . Нагрузка  $P = 98 \text{ Н}$  на протяжении 15 с. Исследования проводились в трёхкратной повторности при измерении твёрдости на обработанной поверхности экспериментальных образцов в областях – правый, левый края и середина поверхности упрочнённого слоя (рис. 3.12).

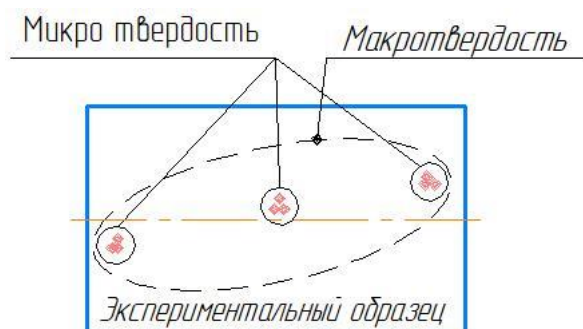


Рисунок 3.12 – Методика измерения твердости экспериментальных образцов

Результаты измерений заносились в специальные табличные формы по определению твёрдости покрытий (табл. 3.13) и обрабатывались инвертированным металлографическим микроскопом.

Таблица 3.13 – Табличные формы занесения результатов измерений твёрдости исследуемых образцов до упрочнения

Материал	Номер повторности исследования	Поверхность измерения			Δ, Среднее значение микротвёрдости		
		правый край образца	середина образца	левый край образца			
65Г	1						
	2						
	3						
Среднее значение макротвёрдости							
....	1						
	2						
	3						
.....	1						
	2						
	3						

### 3.4.2. Исследование износостойких покрытий в лабораторных условиях

Износостойкость образцов исследовали на машине трения СМЦ-2 в условиях граничной смазки согласно ГОСТу 23.203-79.

В качестве эталона была использована сталь 65Г, имеющая твёрдость 56-58 HRC. Измерения линейных размеров образцов проводились при помощи индикаторного анализа, настройка микрометра осуществлялась по концевым мерам длины 2-го класса. Результаты исследований износостойкости заносились в протоколы измерений (табл. 3.14).

Таблица 3.14 – Протокол измерений износостойкости полученных покрытий.

Марка исследуемого образца	65Г			...			$n_i$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
№ испытаний									
Масса до испытаний, г.									
Масса после испытаний, г.									
Износ, г.									
Средний износ, г.									
Интенсивность износа, г/м									
Относительная износостойкость (сталь 65Г)									
Время проведения испытаний, мин.									

### 3.4.3. Исследование коррозионной стойкости в лабораторных условиях

Для определения коррозионной стойкости образцы испытывали в 10%-ных растворах концентрированных кислот ( $HNO_3$ ,  $H_2SO_4$ ) и щелочи ( $NaOH$ ).

Результаты исследований заносились в протоколы испытаний на коррозионную стойкость полученных покрытий (табл. 3.15).

Таблица 3.15 – Протокол испытаний на коррозионную стойкость полученных покрытий.

Марка исследуемого образца	Скорость коррозии ( $г/м^2 \cdot ч$ )	Коррозионная стойкость
65Г		
....		
....		

### 3.4.4. Методика металлографического исследования, определения микротвёрдости упрочнённого слоя и спектрального анализа

Для получения микрошлифов экспериментальные образцы сначала подготавливались на плоскополировальном станке марки Р-2 по ГОСТ 2912-79 марки ОХА-1. На данном станке используются абразивные шкурки на основе карбида кремния марки PS11A с зернистостью Р 500, Р 800 и Р 1200 [53].

После полировки экспериментальные образцы травились в 6% растворе азотной кислоты, в этиловом спирте для определения границ зёрен [12]. После этого по методу случайных секущих с помощью оптического микроскопа были измерены размеры, плотность и объёмные доли зёрен.

Формула для расчета размера зёрен по методу случайных секущих:

$$\bar{D} = 0.5 \cdot \pi \cdot \bar{d}, \quad (3.5)$$

где  $\bar{d}$  – средний размер зерна, определенный по микрошлифу.

$$\bar{d} = N \cdot \sum_{i=1}^N d_i, \quad (3.6)$$

где N – число измерений,  $d_i$  – текущий размер зерна на микрошлифе.

Полученные результаты заносились в протокол результатов измерений (таблица 3.16).

Таблица 3.16 – Протокол результатов измерений микротвердости упрочнённого слоя методом сверхвысокочастотного нагрева

№ п/п	Материал	Структура	$d_1$ , мкм	$d_2$ , мкм	$d_1 - d_2$ , мкм	$0,31(d_1 - d_2)$ , мкм	Ср. зн. микротв., $H_{ср}$	Ср. квадратич. откл., $\Delta_{ск}$	Коэф. вариации, $K_H$
1	65Г	Перлит							
		Феррит							
$n_i$	...	Перлит							
		Феррит							

Для каждого отпечатка определялась разность измерений диаметров  $d_1$  и  $d_2$ , мкм, а затем величина  $0,31(d_1 - d_2)$  с учетом коэффициента увеличения микроскопа. Определялось среднее значение микротвёрдости  $H_{ср}$ , средне квадратичное отклонение и коэффициент вариации согласно стандартным методикам расчёта. Спектральный анализ проводился с целью выявления карбидов бора [108].

### 3.5. Методика производственных испытаний

Методика производственных испытаний включает в себя определение интенсивности износа упрочнённого шнека лабораторным устройством и эталонного образца (нового шнека) [107]. Полученные результаты производственных исследований заносились в специальные табличные формы (таблица 3.17).

В качестве контролируемых параметров приняты параметры рабочих поверхностей шнеков экструдеров:

- наружный диаметр, мм.
- толщина витка шнека, мм.

Измерение проводилось специальным измерительным инструментом – электронным штангенциркулем с точностью измерений до 0,01 мм марки Зубр Эксперт 34463-20 ШЦ-I-200-0,01 200 мм.

Таблица 3.17 - Результаты производственных исследований

Контролируемые детали	Наружный диаметр, мм						$\Delta_{\text{ср}}$	Толщина витка шнека, мм						$\Delta_{\text{ср}}$
	Количество дней							Количество дней						
	15	30	45	60	75	90		15	30	45	60	75	90	
Новый шнек														
Упрочнённый шнек														

Замеры проводились каждые 2 месяца на протяжении периода 1 года испытаний. Исследования продолжаются и в настоящее время.

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРОИЗВОДСТВУ

### 4.1. Определение оптимального режима упрочнения

К основным технологическим факторам, влияющим на толщину боридных слоев, относятся температура нагрева, время нагрева и состав борсодержащей шихты. Предварительно, на основании анализа научной литературы, нами был выбран состав шихты для проведения экспериментальных исследований (глава 1, таблица 1.7). Для определения оптимального режима работы диффузионного борирования в обмазках сверхвысокочастотным нагревом был проведен анализ научной литературы и выбран оптимальный режим для исследований. Установлено, что при нагреве шихты до температуры выше 1050 °С на всех образцах отмечается повышенная склонность к трещинообразованию. Кроме того, перегрев стали приводит к её отпуску, после чего требуется закалка. Поэтому для проведения борирования приняли диапазон температуры нагрева образцов в пределах от 900 до 1050 °С.

Установлено, что зависимость толщины боридного слоя от температуры насыщения подчиняется экспоненциальному закону (рис. 4.1). Для формирования боридного слоя толщиной 250 мкм в течение 125 секунд температура нагрева должна составлять 1050 °С.

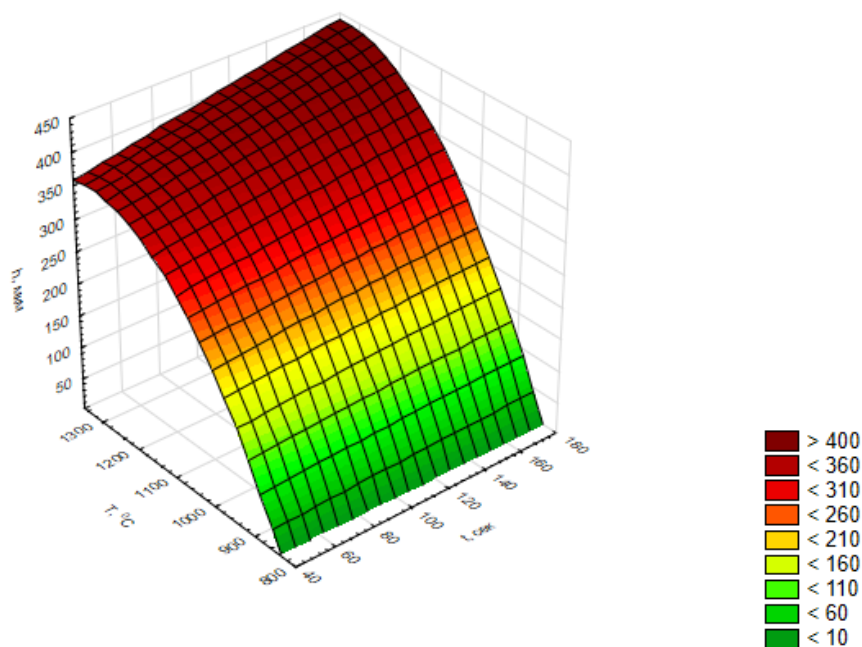


Рисунок 4.1 – Зависимость толщины боридного покрытия от времени выдержки и температуры сверхвысокочастотного нагрева

В результате обработки данных получена математическая модель процесса диффузионного борирования сверхвысокочастотным нагревом. Функция отклика зависимости толщины боридного покрытия от времени выдержки и температуры сверхвысокочастотного нагрева будет иметь вид:

$$h = -2488,1003 - 0,7005t + 4,3907T - 0,0004t^2 + 0,001tT - 0,0017T^2 \quad (4.1)$$

Для того чтобы процесс высокочастотного борирования обеспечивал получение диффузионного слоя толщиной 250 мкм в течение 125 секунд, необходимо согласовать скорости вращательного движения шнека и поступательного движения индуктора. На рисунке 4.2 показано влияние времени процесса и температуры нагрева на угловую скорость вращения шнека экструдера. Поступательная скорость индуктора индивидуальна для конкретной конструкции



шнека. В данном случае для шнека с наружным диаметром 60 мм, шагом 50 мм, длиной 450 мм, согласно методике, разработанной во 2 главе, поступательная скорость движения индуктора должна составлять 0,2 м/мин.

Таким образом, при заданной скорости поступательного движения индуктора угловая скорость вращательного движения шнека должна составлять  $\omega = 0,8 \text{ с}^{-1}$ .

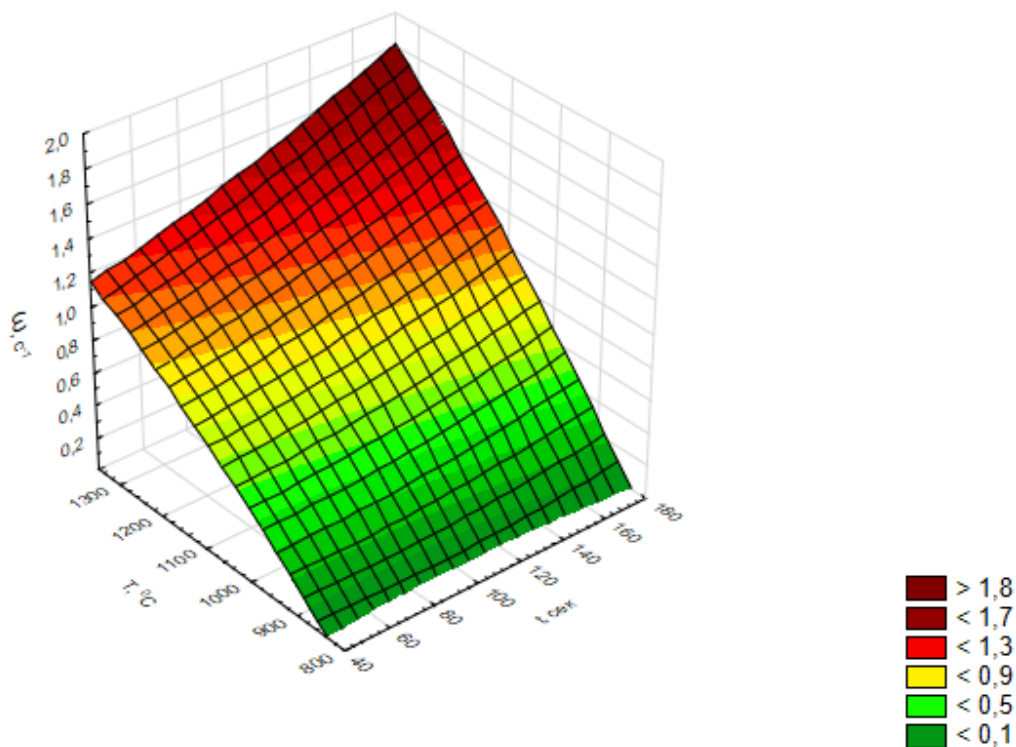


Рисунок 4.2 – Определение необходимой угловой скорости вращения шнека для образования боридного покрытия. ( $v_{\text{индуктора}} = 0,2 \text{ м/мин}$ )

Таким образом, нами установлен оптимальный режим сверхвысокочастотного борирования в обмазках: состав шихты:  $B_4C$  – 89%, флюс «БУРА» - 5%,  $NH_4Cl$  – 6 %, время нагрева 125 с., температура нагрева  $1050^\circ\text{C}$ , скорость движения индуктора 0,2 м/мин, угловая скорость вращения шнека  $0,8 \text{ с}^{-1}$ . Полученный режим обеспечивает получение толщины боридного слоя 250 мкм.

## 4.2. Металлографический и рентгеноспектральный анализы боридного покрытия

Исследования показали, что боридные слои на поверхности образцов имеют «зубчатое строение». Упрочнённый слой состоит из фазы бора и матрицы стали. Микроструктура покрытия окрашена: фаза FeB имеет коричневый цвет, фаза Fe<sub>2</sub>B имеет жёлтый цвет и включения B имеют белый цвет.

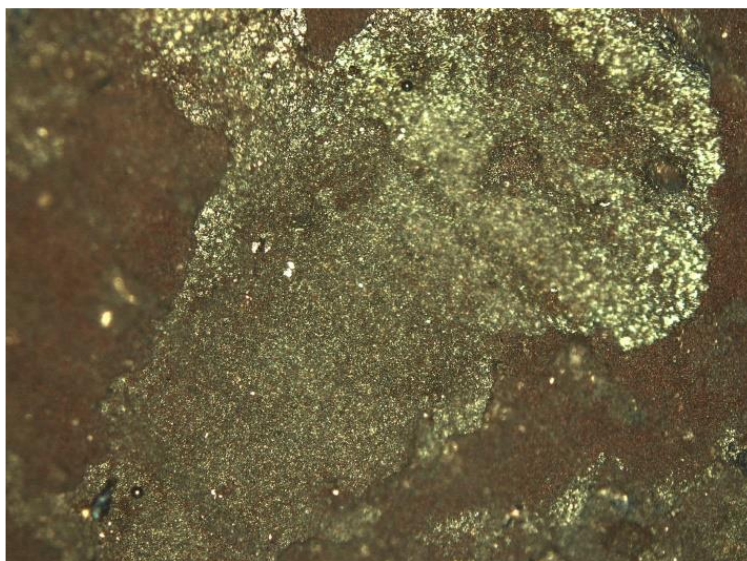


Рисунок 4.3 – Микроструктура боридного слоя на стали 65Г (x100)

Рентгеноспектральный анализ подтвердил образование однофазных боридных слоёв (Fe<sub>2</sub>B) при температуре 1050 °С (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Результаты послойного рентгеноспектрального анализа боридного покрытия

№	Глубина слоя, мкм	Состав полученного борсодержащего покрытия			
		65Г	45	12X18Н	12ХМФ
1	50	B	B	B	B
2	100	B	FeB	B	B
3	150	B	FeB	B	B
4	200	Fe <sub>2</sub> B	Fe <sub>2</sub> B	Fe <sub>2</sub> B	Fe <sub>2</sub> B

Масс-спектральный анализ боридного покрытия, полученного на указанных режимах, представлен на рисунке 4.4.

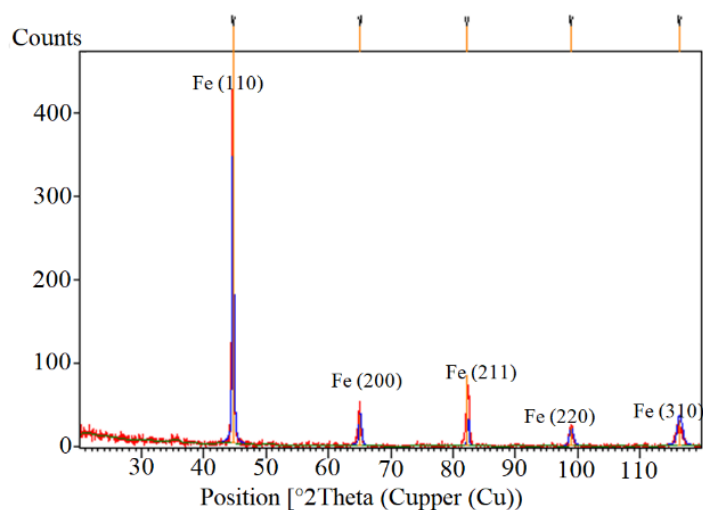


Рисунок 4.4 – Структурно-фазовое состояние боридных покрытий опытных образцов

Таким образом, рентгеноспектральный и масс-спектральный анализ покрытий подтверждает образование боридов железа по данной технологии.

Величина твердости стали, как основы в схеме «деталь-покрытие», до и после диффузионного борирования показана на рисунке 4.5.

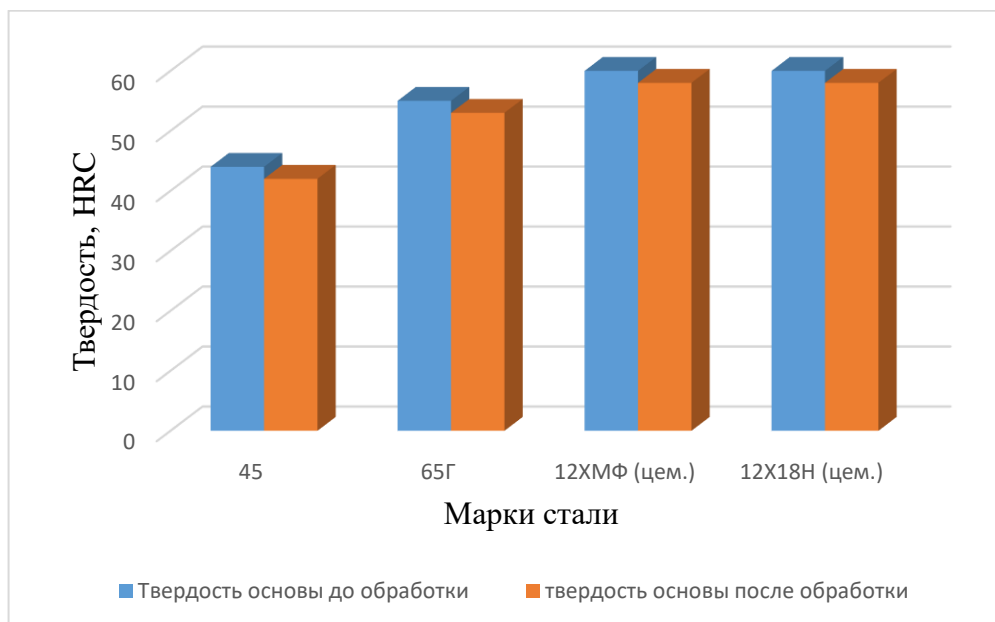


Рисунок 4.5 – Твёрдость стали до и после диффузионного борирования

Из рисунка 4.5 видно, что исходная твёрдость сталей 65Г, 45, 12ХМФ, 12Х18Н до сверхвысокочастотного нагрева и после остается неизменной, что будет обеспечивать несущую способность покрытия в условиях эксплуатации. Стабильный уровень твёрдости объясняется кратковременным температурным воздействием, в течение которого не происходил их отпуск.

Таким образом, при сверхвысокочастотном нагреве в течение 125 с сохраняется исходная твёрдость стали.

Это позволяет оставлять технологию завода-изготовителя шнеков экструдеров без изменений. Борирование выполняется как финишная операция.

Таким образом, доказана возможность образования боридного покрытия в условиях кратковременного сверхвысокочастотного нагрева при сохранении исходных свойств основы деталей. Это согласуется с теоретическими предпосылками, изложенными в главе 2.

### **4.3. Определение микротвёрдости боридного покрытия**

Результаты измерения микротвёрдости на сталях 65Г, 45, 12ХМФ, 12Х18Н показывают, что её уровень повышается при наличии легирующих элементов (рис. 4.6). Это объясняется образованием не только боридов железа, но и боридов хрома, молибдена и никеля.

Содержание углерода в стали влияет только на скорость образования диффузионного слоя и не влияет на уровень микротвёрдости боридного слоя. Это согласуется с результатами работы [61].

Борирование наплавленного слоя на указанном режиме (раздел 4.1), позволяет получить покрытие твердостью 14800 МПа (рис. 4.6).

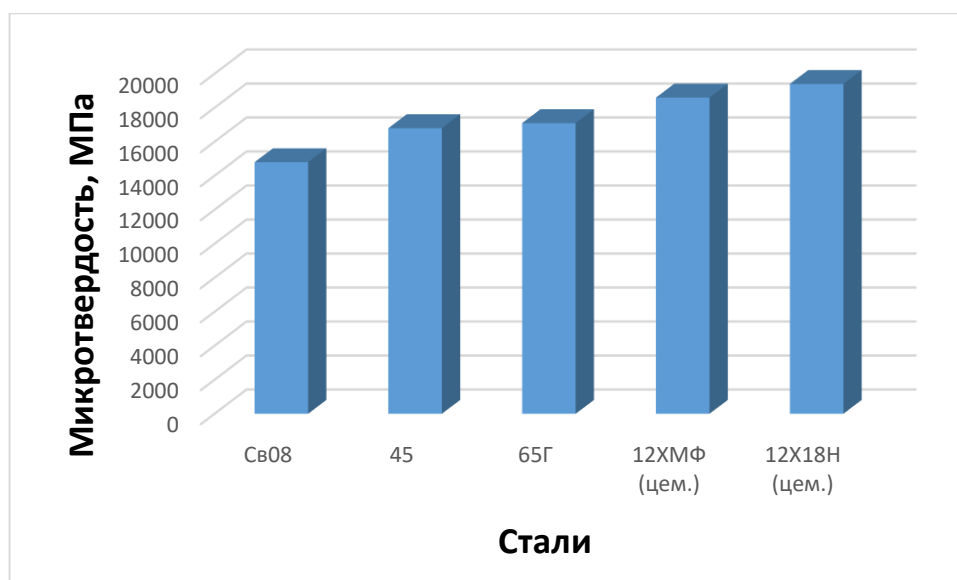


Рисунок 4.6 – Измерение микротвёрдости боридных покрытий на исследуемых образцах

#### 4.4. Износостойкость покрытий

Изнашивание образцов из исследуемых материалов в лабораторных условиях моделирует процесс изнашивания шнековых рабочих органов в процессе их эксплуатации.

На рисунке 4.6 представлена износостойкость исследуемых образцов.

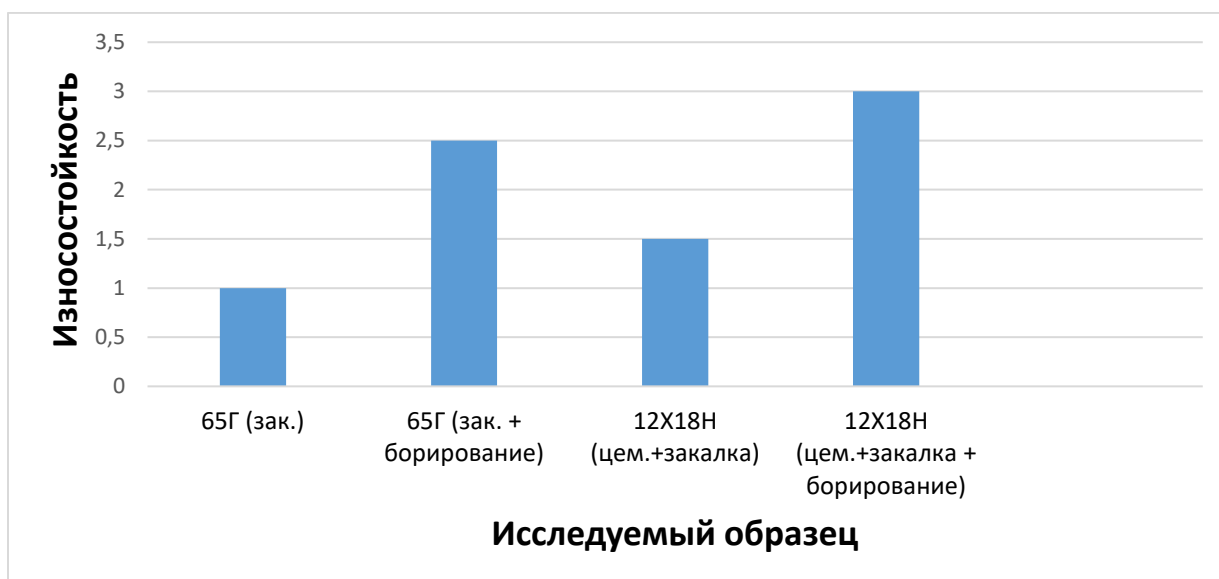


Рисунок 4.7- Сравнительный анализ относительной износостойкости исследуемых образцов

Испытания на машине трения опытных образцов из сталей 65Г и 12Х18Н (цементация), подвергнутых борированию, показали увеличение износостойкости в 2...2,5 раза в сравнении с серийными.

#### **4.5. Исследование коррозионной стойкости**

Сравнительные испытания коррозионной стойкости образцов были проведены на сталях 65Г, 45. На сталь 45 было нанесено упрочнённое покрытие диффузионным борированием в обмазках сверхвысокочастотным нагревом при температуре 1050 °С при времени выдержки 125 с. Испытания проводили в 10 % растворах  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaOH}$  в течение 100 ч.

Полученный боридный слой по отношению к сталям является катодным. Электродные потенциалы основного металла и боридных покрытий близки. Поэтому даже после нарушения сплошности упрочнённого слоя резкого увеличения скорости коррозии образцов не наблюдается.

Таким образом, диффузионное борирование приводит к повышению коррозионной стойкости образцов в различных средах в 1,7...2 раза, что позволяет рекомендовать боридные покрытия для восстановления и упрочнения деталей оборудования в процессах механизации животноводства.

#### **4.6. Эксплуатационные испытания упрочнённого шнека экструдера**

Производственные испытания шнеков экструдеров, обработанных по технологии упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках, проводились с целью отработки технологии в условиях реальной эксплуатации шнеков.

Исследования проводились на базе предприятия СПК «Путь к Новой Жизни». На базе предприятия используется 6 экструдеров ES-110.

За наблюдаемый период с момента начала проведения испытаний с февраля 2024 года по сентябрь 2024 года отказов не наблюдалось. Шнеки в составе кормовых экструдеров эксплуатировались в постоянном режиме для производства комбикорма для КРС. Эксплуатационные испытания продолжаются.

Промежуточные результаты проводимых эксплуатационных испытаний свидетельствуют о высокой надёжности шнеков экструдеров технологией упрочнения диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

#### **4.7. Разработка технологии для повышения долговечности шнеков экструдеров**

Проведенные исследования позволили разработать технологию упрочнения шнековых рабочих органов (рис. 4.7).

Технологический процесс включает в себя следующие этапы:

005. Входной контроль. Перед упрочнением выполняется операция входного контроля, при этом проводится визуальный контроль шнековых рабочих органов на наличие повреждений, трещин, поломок, загрязнений, а также визуальный контроль оборудования для упрочнения. Необходимо убедиться в работоспособности оборудования и подключении его с соблюдением всех мер безопасности.

Весь рабочий процесс проходит с соблюдением правил техники безопасности согласно Приказу Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 11 декабря 2020 года N 884н.

010. Подготовка шихты. Все реактивы использовались с реактивами квалификации «ХЧ», «ЧДА», «Ч». Размер фракции не превышал 0,315 мм. Примеры составов представлены в таблице 2.2. главы 2.

Приготовление составов для насыщения поверхности бором осуществлялось в следующей последовательности: предварительно производилась навеска компонентов в требуемой пропорции на весах, после взвешивания производилось смешивание состава в биконусном смесителе в течение двух часов.

Также при составлении композиции использовался плавный флюс П- 0,66, состоящий из прокалённой буры 30 % масс ( $Na_2B_4O_7$ ), борного ангидрида 20 % масс. ( $B_2O_3$ ), силикокальция 10 % масс. ( $CaSi_2$ ) и сварочного флюса 40 % масс. (АН-348А). При приготовлении флюса буру прокаливали в печи при температуре 940 °С в течение 4-х часов, после охлаждения прокалённую буру размалывали и смешивали с остальными компонентами флюса. После смешивания флюс помещали в герметичную ёмкость.

015. Моечная. На данном этапе технологической операции выполняются следующие действия: 1) промывка – удаляют с поверхности масло и другие

загрязнения; 2) обезжиривание – обезжиривают упрочняемую поверхность, применив органические растворители; 3) сушка – проводят сушку упрочняемой поверхности, применив промышленный технический фен или оставив шнек в хорошо обдуваемом помещении до его полного высушивания.

020. Нанесение шихты на рабочую поверхность шнекового рабочего органа. Состав для борирования с использованием СВЧ-нагрева свободно наносится на предварительно подготовленную поверхность шнека либо закрепляется с помощью жидкого стекла, казеинового клея или эпоксидного компаунда (1,5-2 %), вводимого в их состав за счёт уменьшения количества флюса. После чего проводится сушка поверхности с применением промышленного технического фена или в хорошо обдуваемом помещении до полного высыхания шнека.

025. Подготовительная. Выполняется запуск сверхвысокочастотного индукционного нагревателя СВЧ-10А и проводится настройка режимов работы: выставляется сила тока 5.5 А; устанавливается шнек в посадочные месте передней и задней бабки. После чего подводится индуктор к упрочняемой поверхности шнека. В ПО установки вносится геометрическая конфигурация шнека и режим упрочнения.

030. Процесс борирования СВЧ-нагревом в обмазках. После запуска установки проводится визуальный контроль за процессом упрочнения. Нагрев шнека  $T = 950^{\circ}\text{C} \dots 1050^{\circ}\text{C}$  при времени выдержки на каждом участке 70...125 с.

035. Охлаждение шнекового рабочего органа. После проведения процесса борирования шнек вынимается из креплений передней и задней бабки и выставляется для охлаждения в хорошо проветриваемое место либо подвергается объемной закалке в масле.

040. Очистка. После полного охлаждения шнека при помощи шлакоотбойного молотка и стальной щётки удаляются остатки обмазки и шлака из зоны нагрева. В процессе всей технологической операции проводится контроль технологического процесса.

045. Выходной контроль. Контроль упрочнённой поверхности. На заключительном этапе проводится контроль упрочнённого слоя визуальным



осмотром или при помощи специальных дефектовочных спреев. В заключительном этапе обработка упрочнённого слоя не производится.

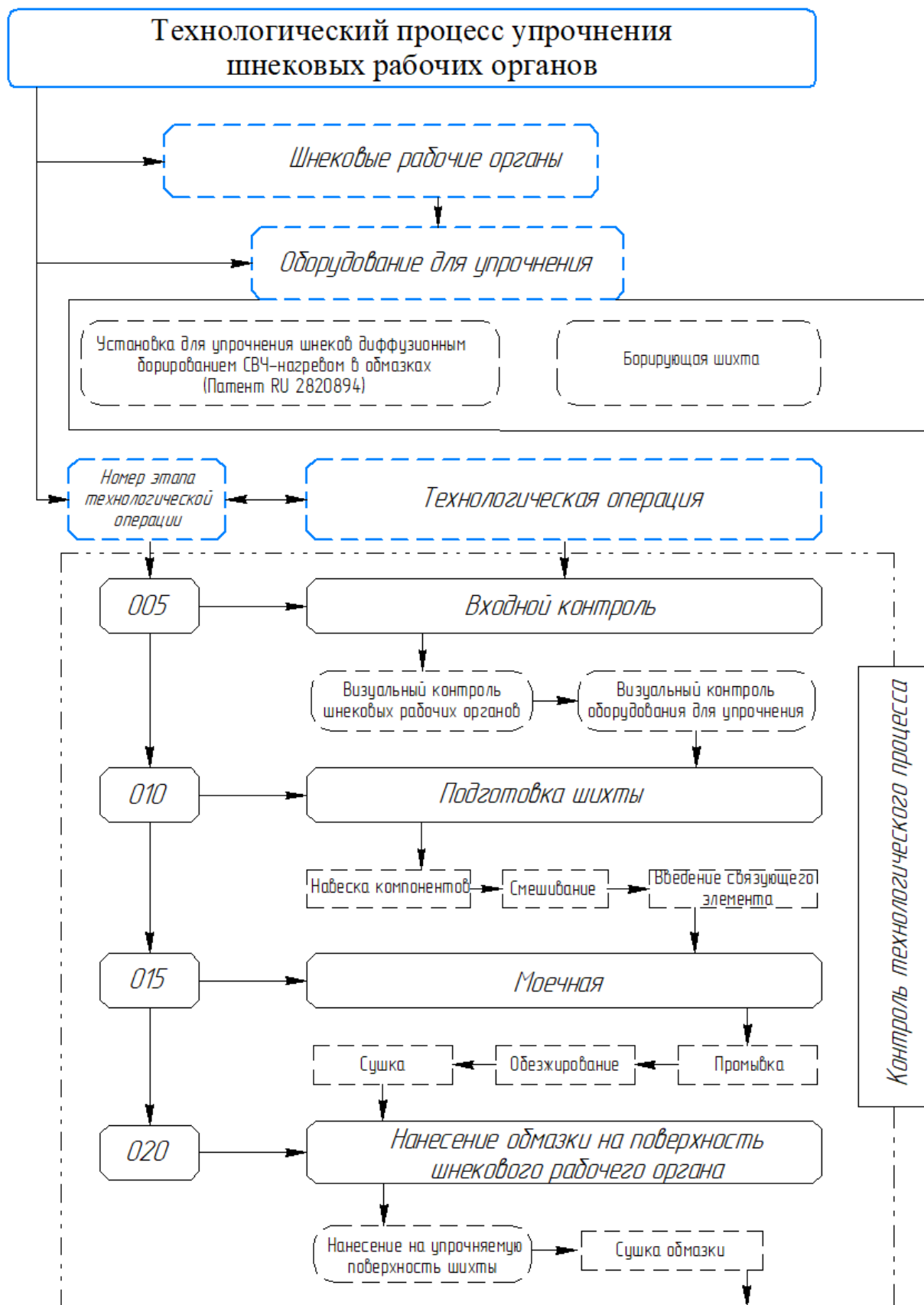
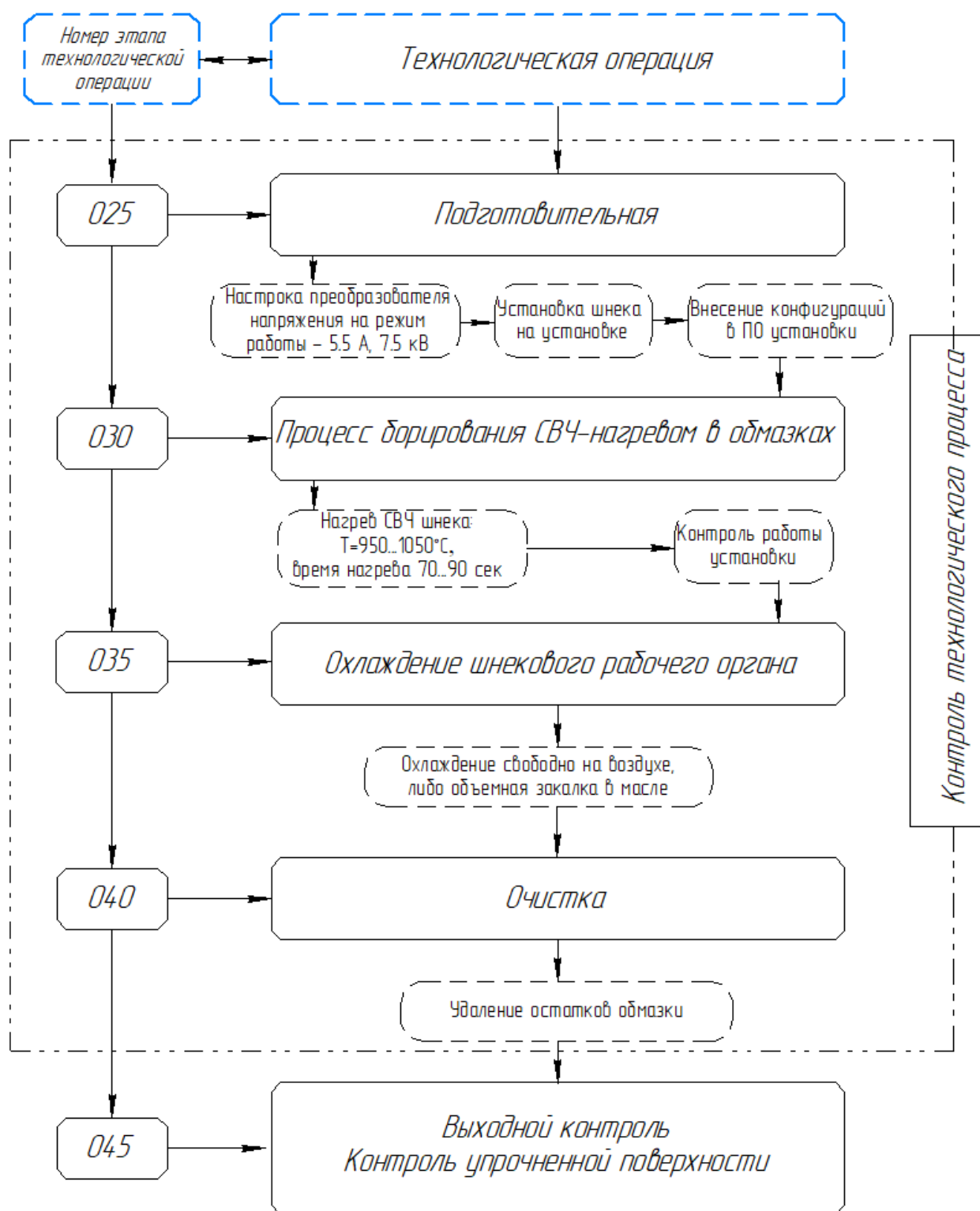


Рисунок 4.8 – Технологический процесс упрочнения шнековых рабочих органов



Продолжение рисунка 4.8 - Технологический процесс упрочнения шнековых рабочих органов

Предлагаемая технология упрочнения шнековых рабочих органов позволит повысить ресурс работы шнековых рабочих органов экструдеров в 1,5...1,7 раза благодаря созданию упрочнённого износостойкого покрытия с микротвёрдостью 14800 МПа.

Для восстановления изношенных шнеков экструдеров рекомендуется вибродуговая наплавка рабочей поверхности шнека экструдера с использованием сварочной проволоки Св08. После наплавки производится механическая обработка до номинальных размеров с финишным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках. Наплавка производится на разработанной нами установке. Для этого требуется перенастройка согласования вращательного движения шнека, поступательного движения сварочной головки и скорости подачи проволоки.

#### **4.8. Рекомендации по организации производственного внедрения технологического процесса упрочнения шнековых рабочих органов**

Разработанный технологический процесс упрочнения шнеков экструдеров включает в себя 9 этапов. Для внедрения разработанной установки и технологии необходимо обеспечить полноценное рабочее место на участке технического обслуживания и ремонта техники кормопроизводственного предприятия. Требования к рабочему месту:

- оно должно полностью соответствовать нормам безопасности на участке согласно ГОСТу 12.3.002-2014 и ГОСТ 12.0.004-2015[26,27];
- должно быть оснащено вентиляцией для отвода газа и вредоносных веществ, выделяющихся при нагреве шихты;
- для работы установки требуется минимизировать воздействие производственных факторов, таких как: вибрация, освещённость и запылённость воздуха, бесперебойная подача электросети.

Для успешной работы установки необходимо соблюдать и контролировать технологический процесс упрочнения шнековых рабочих органов экструдеров.

Установку целесообразнее располагать на базе завода-изготовителя машиностроительной продукции по типу изготовления шнека экструдера. Также она может устанавливаться на станциях технического обслуживания и ремонта запасных частей сельскохозяйственной техники кормоприготовительных предприятий и использоваться в качестве комбинированных технологий «восстановление-упрочнение» рабочих поверхностей шнеков экструдеров.

При упрочнении шнеков экструдеров разработанной установкой допускается следующее: упрочнять рабочий слой шнеков экструдеров при температуре  $T = 900-1050$  °С, при этом разработанная программа позволяет сгенерировать G-code согласно геометрическим параметрам упрочняемого шнека (длина,  $L$ , мм.; шаг витка,  $P$ , мм.; наружный диаметр,  $D$ , мм.; угловая скорость  $\omega$ , рад/с); применять различные составы шихт, позволяющие получать необходимые, по техническому заданию заказчика, покрытия рабочих поверхностей шнеков экструдеров.

Среди перспектив дальнейшей разработки необходимо выделить следующие этапы:

- подбор состава борсодержащей шихты, улучшающей физико-механические свойства упрочняемого покрытия СВЧ-нагревом;

- разработка автоматизированной системы СВЧ-установки, обеспечивающей комбинированный процесс контроля качества и упрочнения шнековых рабочих органов экструдеров, позволяющей выявлять дефекты на начальном этапе и в процессе упрочнения рабочей поверхности.

#### 4.9. Выводы по четвертой главе

1. Установлен оптимальный режим сверхвысокочастотного борирования в обмазках: состав шихты:  $B_4C$  – 89%, флюс «БУРА» - 5%,  $NH_4Cl$  – 6 %, время нагрева 125 с., температура нагрева 1050°С, скорость движения индуктора 0,2 м/мин, угловая скорость вращения шнека  $0,8 \text{ с}^{-1}$ . Полученный режим обеспечивает получение толщины боридного слоя 250 мкм.

2. Получена математическая модель процесса диффузионного борирования сверхвысокочастотным нагревом.
3. Рентгеноспектральный и масс-спектральный анализ покрытий подтверждает образование боридов железа по данной технологии.
4. Доказана возможность образования боридного покрытия в условиях кратковременного сверхвысокочастотного нагрева при сохранении исходных свойств основы деталей.
5. Испытания на машине трения опытных образцов из сталей 65Г и 12Х18Н (цементация), подвергнутых борированию, показали увеличение износостойкости в 2...2,5 раза в сравнении с серийными.
6. Упрочнение деталей борированием сверхвысокочастотным нагревом приводит к повышению коррозионной стойкости сталей в кислой среде в 1,7...2 раза.
7. Разработанная технология упрочнения шнековых рабочих органов включает в себя 45 операций и позволяет повысить ресурс работы шнековых рабочих органов экструдеров в 1,5...1,7 раза благодаря созданию упрочнённого износостойкого и коррозионностойкого покрытия с микротвёрдостью 14800 МПа.
8. Представленные рекомендации к производственному внедрению технологического процесса упрочнения шнековых рабочих органов позволят обеспечить нормальную работу разработанной установки.
9. Эксплуатационные испытания свидетельствуют о высокой надёжности упрочнённых шнековых рабочих органов экструдеров борированными покрытиями. Испытания продолжаются.

## ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

Для обоснования целесообразности внедрения разработанного технологического процесса упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках сверхвысокочастотным нагревом была дана экономическая оценка мероприятий по внедрению технологии. Основными технико-экономическими показателями были выбраны: стоимость основных производственных фондов, капитальные вложения, количество основного оборудования, программа участка, численность персонала участка [11, 68, 73, 86, 99, 112, 131].

### 5.1.1. Капитальные вложения на выполнение проекта (приобретение оборудования и инструмента)

$$K = C_{п} + N_{р} + Z_{м} \quad (5.1)$$

где:  $K$  – капитальные вложения на выполнение проекта, руб;

$C_{п}$  – цена приобретения оборудования и инструмента, руб;

$N_{р}$  – накладные расходы на доставку (15 – 17% от  $C_{п}$ ), руб;

$Z_{м}$  – затраты на монтаж оборудования (25 – 30% от  $C_{п}$ ), руб.

Таблица 5.1 - Стоимость оборудования применяемого во внедренной технологии упрочнения шнеков экструдеров

№	Наименование оборудования	Ед. измерения	Базовый вариант	Проектный вариант
1	Стеллажи для хранения смесей	тыс. руб	7	8
2	Стеллаж для готовой продукции	тыс. руб	15	17
3	Установка для упрочнения шнеков экструдеров	тыс. руб	520	600

4	Ящик для хранения брикетов	тыс. руб	7	8
5	Стеллаж для ремонтного фонда	тыс. руб	12	15
6	Шкаф с набором инструмента	тыс. руб	12	15
7	Стол монтажный	тыс. руб	60	80
ИТОГО:		тыс. руб	633	743

$$H_{p.б.} = 633 * 15/100 = 94,95 \text{ тыс.руб.}$$

$$H_{p.п.} = 743 * 15/100 = 111,45 \text{ тыс.руб.}$$

$$З_{м.б.} = 633 * 25/100 = 158,25 \text{ тыс.руб.}$$

$$З_{м.п.} = 743 * 25/100 = 185,75 \text{ тыс.руб.}$$

$$K_B = 633 + 95 + 159 = 887 \text{ тыс.руб.}$$

$$K_{II} = 743 + 112 + 186 = 1041 \text{ тыс.руб.}$$

Общую сумму капитальных вложений определяем по формуле:

$$K_{\Sigma} = K + K_{\text{доп}}, \quad (5.2)$$

где:  $K_{\Sigma}$  – суммарные капитальные вложения, тыс. руб;

$K_{\text{доп}}$  – дополнительные капитальные вложения, тыс. руб.

$K_{\text{доп}}$  - стоимость установки = 550 тыс. руб

$$K_{\Sigma B} = 887 + 550 = 1437 \text{ тыс. руб.}$$

$$K_{\Sigma II} = 1012 + 550 = 1591 \text{ тыс. руб.}$$

Годовой объём ремонтных работ определяем по формуле:

$$Q = D * T / n, \quad (5.3)$$

где  $Q$  – годовой объём ремонтных работ, шт;

$D$  – число рабочих дней в году;

$T$  – продолжительность смены, ч;

$n$  – время упрочнения одного шнека, ч.

$$Q_B = 248 * 8 / 1,5 = 1322 \text{ шт.}$$

$$Q_{II} = 248 * 8 / 1 = 1984 \text{ шт.}$$

Исходные данные для обоснования экономического эффекта по базовому и проектному варианту представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Исходные данные для обоснования экономического эффекта

№	Показатели	Единицы измерения	Базовый вариант	Проектный вариант
1	Производственная программа	шт/год	1322	1984
2	Количество рабочих	чел.	2	2
3	Капитальные вложения	тыс.руб	887	1041
4	Доп. капитальные вложения	тыс.руб	550	550
5	Суммарные кап. вложения	тыс.руб	1437	1591
6	Норма амортизационных отчислений: - на кап.вложения - на доп. кап.вложения	%	12,5	12,5
			12,5	12,5
7	Норма отчислений на текущий ремонт и ТО: - на кап.вложения - на доп. кап.вложения	%	10,5	10,5
			8,5	8,5
8	Часовая тарифная ставка одного рабочего	руб/чел	400	400
9	Мощность оборудования	кВт	48	48

## 5. 2. Определение прямых эксплуатационных затрат

$$Пз = З_{от} + З_a + З_{тор} + З_m + З_{эл}, \quad (5.4)$$

где  $Пз$  – прямые эксплуатационные затраты, тыс. руб.;

$З_{от}$  – затраты на оплату труда рабочих, тыс. руб.;

$З_a$  – затраты на амортизацию, тыс. руб.;

$З_{тор}$  – затраты на ТО и ремонт оборудования, тыс. руб.;

$З_m$  – затраты на ремонтные материалы, тыс. руб.;

$З_{эл}$  – затраты на электроэнергию для работы оборудования, тыс. руб.



Затраты на оплату труда рабочих определяем по формуле:

$$Z_{от} = C_{ч} * (1 + K_{д}) * (1 + K_{от}) * T_{з}, \quad (5.5)$$

где  $C_{ч}$  – часовая тарифная ставка, руб./ч;

$K_{д}$  – коэффициент начислений дополнительной заработной платы;

$K_{от}$  – коэффициент отчислений на социальные нужды;

$T_{з}$  – затраты труда производственных рабочих, чел-ч.

Затраты труда производственных рабочих определяем по формуле:

$$T_{з} = N * \Phi_{г}, \quad (5.6)$$

где  $N$  – количество рабочих на участке, чел;

$\Phi_{г}$  – годовой фонд рабочего времени работы участка, ч.

$$T_{зБ} = 2 * 2024 = 4048 \text{ чел.-ч.}$$

$$T_{зП} = 2 * 2024 = 4048 \text{ чел.-ч.}$$

$$Z_{отБ} = 400 * (1 + 0,2) * (1+0,3) * 4048 = 2\,525 \text{ тыс. руб.}$$

$$Z_{отП} = 420 * (1 + 0,2) * (1+0,3) * 4048 = 2652 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на амортизацию определяем по формуле:

$$Z_a = (B * N_a) / 100, \quad (5.7)$$

где:  $B$  – балансовая стоимость оборудования, тыс. руб;

$N_a$  – норма амортизации, %.

Капитальные вложения:

$$Z_{aБ} = (887 * 12,5) / 100 = 111 \text{ тыс. руб.}$$

$$Z_{aП} = (1041 * 12,5) / 100 = 131 \text{ тыс. руб.}$$

Суммарные затраты на амортизацию определяем по формуле:

$$Z_{a\Sigma} = Z_a + Z_{a \text{ доп}}, \quad (5.8)$$

Базовый вариант:  $Z_{a\Sigma} = 111 + 68 = 179$  тыс. руб.

Проектный вариант:  $Z_{a\Sigma} = 131 + 72 = 203$  тыс. руб.

Затраты на ТО и ремонт оборудования определяем по формуле:

$$Z_{\text{тор}} = (B * N_t) / 100 \quad (5.9)$$

где  $N_t$  – норма отчислений на ТО и Р оборудования, %

Базовый вариант:  $Z_{\text{тор Б}} = (887 * 10,5) / 100 = 94$  тыс. руб.

Проектный вариант:  $Z_{\text{тор П}} = (1041 * 10,5) / 100 = 110$  тыс. руб.

Суммарные затраты на ТО и ремонт определяем по формуле:

$$Z_{\text{тор } \Sigma} = Z_{\text{тор}} + Z_{\text{тор доп}}, \quad (5.10)$$

Базовый вариант:  $Z_{\text{тор } \Sigma} = 94 + 46,7 = 140,7$  тыс. руб.

Проектный вариант:  $Z_{\text{тор } \Sigma} = 110 + 50 = 160$  тыс. руб.

Затраты на ремонтные материалы для шнеков:

$$Z_m = (C_{\text{куз}} * Q * 10) / 100 \quad (5.11)$$

где  $C_{\text{куз}}$  – средняя стоимость нового шнека, тыс. руб;

$Q$  – производственная программа, шт.

$Z_{\text{мБ}} = (241 * 3 * 10) / 100 = 723$  тыс. руб.

$Z_{\text{мП}} = (261 * 3 * 10) / 100 = 783$  тыс. руб.

Затраты на электроэнергию для работы оборудования определяем по формуле:

$$Z_{эл.} = N_{эл.} * \Phi_{эл.} * 0,75 * C_{эл.} \quad (5.12)$$

где  $N_{эл.}$  – мощность оборудования, кВт;

$\Phi_{эл.}$  – годовой фонд времени работы оборудования, ч;

$C_{эл.}$  – стоимость электроэнергии, руб./ кВт-ч.

Базовый вариант:  $Z_{эл.Б} = 45 * 2010 * 0,75 * 4,80 = 324$  тыс. руб.

Проектный вариант:  $Z_{эл.П} = 48 * 2010 * 0,75 * 4,80 = 348$  тыс. руб.

Прямые эксплуатационные затраты:

Базовый вариант:  $\Pi_{зБ} = 1262 + 179 + 140,7 + 723 + 324 = 2629$  тыс. руб.

Проектный вариант :  $\Pi_{зП} = 1389 + 203 + 160 + 783 + 348 = 2883$  тыс. руб.

Себестоимость ремонта одного шнека определяем по формуле:

$$C = \Pi_3 / Q, \quad (5.13)$$

$C_Б = 2629 / 1322 = 1,99$  тыс. руб.

$C_П = 2883 / 1984 = 1,45$  тыс. руб.

Таблица 5.3 Эксплуатационные затраты на ремонт шнека экструдера:

Показатели	Ед.измерения	Базовый вариант	Проектный вариант
Затраты на оплату труда рабочих	тыс. руб.	2552	2652
Затраты на амортизацию	тыс. руб.	179	203
Затраты на ТО и ремонт оборудования	тыс. руб.	140,7	160
Затраты на ремонтные материалы	тыс. руб.	723	783
Затраты на электроэнергию	тыс. руб.	324	348
ИТОГО:	тыс. руб.	3918,7	4146

### 5.3. Экономическая оценка проекта

Годовую экономию средств определяем по формуле:

$$\Gamma_{\text{э}} = (C_{\text{Б}} - C_{\text{П}}) * Q_{\text{п}}, \quad (5.14)$$

где  $C_{\text{Б}}$  – себестоимость ремонта шнека в базовом варианте, тыс. руб.

$C_{\text{П}}$  – себестоимость ремонта шнека в проектном варианте, тыс. руб.

$Q_{\text{п}}$  – производственная программа в проектном варианте, шт.

$$\Gamma_{\text{э}} = (1,99 - 1,45) * 221 = 1072 \text{ тыс. руб.}$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений определяем по формуле:

$$T_{\text{о.д.}} = (K_{\Sigma\text{П}} - K_{\Sigma\text{Б}}) / \Gamma_{\text{э}}, \quad (5.15)$$

где:  $K_{\Sigma\text{Б}}$  – суммарные капитальные вложения в базовом варианте, тыс. руб;

$K_{\Sigma\text{П}}$  – суммарные капитальные вложения в проектном варианте тыс. руб.

$$T_{\text{о.д.}} = (1591 - 1437) / 1072 = 0,14 \text{ года}$$

Прибыль предприятия от ремонта шнека определяем по формуле:

$$\Pi = (\text{Ц} - C) * Q, \quad (5.16)$$

где  $\text{Ц}$  – тариф за единицу выполненной работы, тыс. руб.;

$C$  – себестоимость ремонта, тыс. руб.;

$Q$  – производственная программа, шт.

$$\Pi_{\text{Б}} = (40 - 1,99) * 1322 = 50249 \text{ тыс. руб.}$$

$$\Pi_{\text{П}} = (40 - 1,45) * 1984 = 76483 \text{ тыс. руб.}$$

Приведённые затраты на единицу выполненной работы определяем по формуле:

$$\Pi_{\text{ПЗ}} = C + E_{\text{н}} * K_{\text{уд}} \quad (5.17)$$

где  $C$  – себестоимость ремонта шнека, тыс. руб.;

$E_H$  – нормативный коэффициент относительной эффективности капитальных вложений ( $E_H = 0,25$ );

$K_{уд}$  – удельные капитальные вложения, тыс. руб.

Удельные капитальные вложения определяем по формуле:

$$K_{уд.} = K_{\Sigma} / Q \quad (5.18)$$

где  $K_{\Sigma}$  – суммарные капитальные вложения, тыс. руб.;

$Q$  – производственная программа, шт.

$$K_{уд.б} = 1437 / 1322 = 1 \text{ тыс. руб./ шт.}$$

$$K_{уд.п} = 1591 / 1984 = 0,8 \text{ тыс. руб. / шт.}$$

$$П_{пз.б} = 13,21 + 0,25 * 0,3 = 5 \text{ тыс. руб./ шт.}$$

$$П_{пз.п} = 13,05 + 0,25 * 0,2 = 3 \text{ тыс. руб. /шт.}$$

Годовой экономический эффект определим по формуле:

$$\mathcal{E}_r = [(C + E_H * K) - (C + E_H * K)] * Q_2, \quad (5.19)$$

$$\mathcal{E}_r = [(5 + 0,25 * 0,3) - (5 + 0,25 * 0,2)] * 221 = 110,5 \text{ тыс. руб.}$$

Срок окупаемости капиталовложений:

$$T_{ок} = \frac{K_B - K_{ПР}}{\mathcal{E}_r} = 0,2 \text{ года} \quad (5.20)$$

Таблица 5.4 Результаты расчета экономической эффективности внедрения технологии диффузионного борирования при упрочнении шнеков экструдеров

Показатели	Усл. обозначения	Ед. измерения	Базовый вариант	Проектный вариант
Капитальные вложения	К	тыс. руб.	1437	1591
Производственная программа	Q	шт.	723	783
Себестоимость ремонта одной лапы	С	тыс. руб.	13,21	13,05
Годовая экономия средств	ГЭ	тыс. руб.	-	35,4
Годовой экономический эффект	ЭГ	тыс. руб.	-	110,5
Срок окупаемости дополнительный капитальных вложений	ТОК	лет	-	0,2

По результатам произведённых расчётов можем сказать, что применение нового оборудования на участке по упрочнению шнеков экструдеров будет экономически обосновано, что при заданной программе ремонта в 1984 шнека, годовой экономический эффект составит 2 525 000руб.

На выполнение проекта необходимы капитальные вложения в размере 1591 000 руб., на приобретение нового оборудования упрочнения шнеков экструдеров. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений при заданной программе ремонта - 1984 шнека в год, при неизменности цены и себестоимости реализации составит 0,2 года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Шнеки экструдеров в кормопроизводстве АПК работают в условиях коррозионно-механического изнашивания. Рабочий процесс экструзии кормосмесей протекает при давлении прессования 2,0...5,0 МПа, температуре нагрева до 180°C, влажности 10...30%. Перспективным методом упрочнения шнеков экструдеров является диффузионное борирование сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

2. Теоретически доказана возможность протекания процесса борирования в условиях сверхвысокочастотного нагрева поверхности стальных деталей.

3. Решен вопрос синхронизации поступательного движения индуктора с вращательным движением шнека экструдера с целью обеспечения качества получаемых покрытий.

4. Разработана новая установка, позволяющая упрочнять шнековые рабочие органы экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

5. Оптимальный режим сверхвысокочастотного борирования в обмазках: состав шихты: В<sub>4</sub>С – 89%, флюс «БУРА» - 5%, NH<sub>4</sub>Cl – 6 %, время нагрева 125 с., температура нагрева 1050°C, скорость движения индуктора 0,2 м/мин, угловая скорость вращения шнека 0,8 с<sup>-1</sup>.

6. Получены покрытия толщиной 250 мкм на основе боридов железа Fe<sub>2</sub>B и FeB. Микротвердость покрытия на уровне 14800 МПа обеспечила повышение износостойкости упрочненных образцов из сталей 65Г и 12Х18Н (цементация) в 2...2,5 раза в сравнении с серийными. Покрытия увеличивают коррозионную стойкость деталей в 1,7...2 раза.

7. Разработана новая технология упрочнения шнеков экструдеров кормов диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

8. Технология принята внедрению в СПК «Путь к Новой Жизни» Нижегородской области. Годовой экономический эффект на программу в 1984 шнеков составит 2,5 млн. руб.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апатенко А.С. Методы эффективного использования машинно-тракторных агрегатов в мелиорации / Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2020. № 10. С. 56-60.
2. Аулов В.Ф. Разработка технологии упрочнения рабочих органов сельхозмашин с большим износом / В.Ф Аулов, В.П. Лялякин, А.В. Ишков и др. // Труды ГОСНИТИ. - 2016. Т. 123. - С. 153-158.
3. Аулов В.Ф. Разработка технологии упрочнения рабочих органов сельхозмашин с большим износом / В.Ф Аулов, В.П. Лялякин, А.В. Ишков и др. // Труды ГОСНИТИ. - 2016. Т. 123. - С. 153-158
4. Аулов В.Ф. Наплавка ТВЧ износостойких покрытий для упрочнения лап культиваторов / В.Ф. Аулов, П.В. Лужных, А.Н. Строев // Инновации в сельском хозяйстве. - 2013. - № 3 (5). - С. 54-56.
5. Басов С.С. Борирование с использованием ТВЧ нагрева / С.С. Басов // Сборник студенческих научных работ: по материалам докладов, 72-й Международной студенческой научно-практической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения А.Г. Дояренко, Москва, 26–29 марта 2019 года. Том Выпуск 26. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. – С. 18-20. – EDN FDXJYX
6. Басов С.С. Обоснование выбора метода упрочнения шнеков кормовых экструдеров / С.С. Басов // Естественные и технические науки. – 2024. – № 4(191). – С. 288-294. – DOI 10.25633/ETN.2024.04.06. – EDN SZRHBY.
7. Басов С.С. Устройство для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках в ТВЧ / С. С. Басов // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов: Сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.), посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора



Николая Федоровича Тельнова, Москва, 19–20 декабря 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2024. – С. 219-223. – EDN DFJIVD.

8. Басов С.С. Применение борирования в твердой фазе для упрочнения рабочих органов экструдеров / С. С. Басов, Д. М. Скороходов, И. Ю. Игнаткин, Н. В. Серов // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей Международной научно-технической конференции, Воронеж, 12 октября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. – С. 74-77. – DOI 10.47581/2023.TM-03.Basov-01. – EDN RHLKLJ.

9. Басова А.С. Роль управленческих решений в эффективности современного производства. Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". 2013. № 3 (59). С. 104-108.

10. Батеенков П.С. Расчет экономической эффективности внедрения новой техники. Саратов: ЦНТИ, 1994. – 18 с.

11. Батеенков П.С. Расчет экономической эффективности внедрения новой техники. Саратов: ЦНТИ, 1994. – 18.

12. Берман Г.К., Мачихин Ю.А. Течение вязко-пластичных масс по коническому каналу // Известия вузов, Пищевая технология. – 1972. – №5. – С. 122-124.

13. Берман Г.К., Мачихин Ю.А. Течение вязко-пластичных масс по коническому каналу // Известия вузов, Пищевая технология. – 1972. – №5. – С. 122-124.

14. Боль А.А. Индукционная наплавка. Технология, материалы, оборудование / Боль А.А., Иванайский В.В., Лесков С.П., Тимошенко В.П. - НПО АНИТИМ. 1992-148 с.

15. Боль А.А. Индукционная наплавка. Технология, материалы, оборудование / Боль А.А., Иванайский В.В., Лесков С.П., Тимошенко В.П. - НПО АНИТИМ. 1992-148 с.
16. Бондарева И.А. Совершенствование процесса гранулирования комбикормов: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – М., 1985. – 22 с.
17. Ваншин В.В. Экструзионная обработка растительного сырья: учебное пособие / В.В. Ваншин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2021. – 108 с. ISBN 978-5-7410-2609-0.
18. Виноградов В.В. Исследование технического состояния стрелчатых лап широкозахватных культиваторов типа КШУ, упрочненных методом КВДУ / В.В. Виноградов // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сборник научных статей в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал - 2016». Ставрополь. - 2016. - С. 315-320.
19. Голубев И.Г. Направления импорт замещения сельскохозяйственной техники / И.Г. Голубев // ФГБНУ «Росинформагротех». – 2016. – № 3. – С. 104-106.
20. Голубев И.Г. Опыт импортозамещения запасных частей зарубежной сельскохозяйственной техники / И.Г. Голубев, П.И. Носихин, А.Ю. Фадеев – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 32 с.
21. Голубев И.Г. Оценка качества технического сервиса тракторов / И.Г. Голубев, А.Ю. Фадеев, В.А. Макуев // Техника и оборудование для села. – 2010. – № 7. – С. 40-41.
22. Голубев И.Г. Ремонт сельскохозяйственных машин в условиях мастерских сельских товаропроизводителей / И.Г. Голубев, И.А. Спицын. – М.: Изд-во ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 86 с.
23. Голубев И.Г. Система технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин и механизмов/ И.Г. Голубев, В.М. Тататоркин // Издательство «Академия». – М.:– 2017. с. 384.
24. Голубев И.Г. Технология ремонта сельскохозяйственных машин в фермерских хозяйствах / И.Г. Голубев, И.А. Спицын. – М.:ФГНУ «Росинформагротех», 2002.– 45с.

25. Голубев И.Г. Цифровые решения при техническом сервисе сельскохозяйственной техники: Аналитический обзор / И. Г. Голубев, Н. П. Мишуров, В. Ф. Федоренко [и др.]. – Москва: ФГБНУ "Росинформагротех", 2020. – 76 с. – ISBN 978-5-7367-1569-5. – EDN GCUZEQ.

26. ГОСТ 12.0.004-2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда. Общие положения (вместе с Программами обучения безопасности труда) (введен в действие Приказом Росстандарта от 09.06.2016 N 600-ст) – 2015 г. – 42 с.

27. ГОСТ 12.3.002-2014 "Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности" – 2014г - 12 с.

28. Данилкин А.П. Разработка и обоснование шнекового пресс – экструдера с боковым расположением фильер: автореф. канд. техн: 05.20.01. – Оренбург: ОГУ, 2007. – 21 с.

29. Денисов С.В. Повышение эффективности приготовления кормосмеси на основе стебельчатого корма и обоснование параметров пресс-экструдера: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Самара, 2006. – 33 с.

30. Дидманидзе О.Н. Оптимизация по критериям ресурсосбережения состава и режимов работы средств для сбора, транспортировки и переработки чайного листа /диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Российский государственный аграрный университет- Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева. Москва, 1995

31. Дидык Т.А. Повышение эффективности технологического процесса и обоснование параметров шнекового пресса для экструдирования зернового материала: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Саратов, 2006. – 33 с.

32. Дидык Т.А. Повышение эффективности технологического процесса и обоснование параметров шнекового пресса для экструдирования зернового материала: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Саратов, 2006. – 24 с.

33. Дородов П.В. Пути повышения износостойкости поверхностей трения. В сборнике: Аграрная наука - сельскохозяйственному производству. материалы Международной научно-практической конференции: в 3 томах. Министерство

сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВО Ижевская государственная сельскохозяйственная академия. 2019. С. 42-47.

34. Дорохов А.С. Повышение эффективности входного контроля качества запасных частей и сельскохозяйственной техники: дис... док. техн. наук: 05.20.03 / Дорохов Алексей Семенович. – М, 2011. – 457 с.

35. Дорохов А.С. Система контроля качества деталей сельскохозяйственных машин / А. С. Дорохов, К. А. Краснящих, Д. М. Скороходов. – Москва: Редакция журнала "Механизация и электрификация сельского хозяйства", 2019. – 192 с. – ISBN 978-5-6042796-8-7. – EDN VUXKQW.

36. Е.М. Абуталипова, А.А. Александров, Ю.В. Лисин, И.В. Павлова, Н.С. Шулаев, математическое моделирование кинетики нагрева системы полимерный материал–металл трубопровода при свч-обработке // ISSN 1812-3368. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 2 // с. 118

37. Ерохин М.Н., Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде / М. Н. Ерохин, С. М. Гайдар, Д. М. Скороходов, С.М. Ветрова, А.С. Барчукова // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 72-78. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78. – EDN QVBHFB.

38. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Пастухов А.Г., Скороходов Д.М., Логачёв К.М. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16. N3. С. 4-11.

39. Ерохин М.Н., Плетнёв Л.В., Чупятов Н.Н. Управление процессом формирования карбидохромовых CVD-покрытий на внешней поверхности цилиндрической подложки // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 124. №3. С. 26-34. EDN: WWRUIZ

40. Ерохин М.Н., Чупятов Н.Н., Казанцев С.П. Применение карбонильного хрома для получения упрочняющих покрытий на деталях сельскохозяйственной техники. В сборнике: Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организация технического сервиса в АПК. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию

Белорусского государственного аграрного технического университета и памяти первого ректора БИМСХ (БГАТУ) д-ра техн. наук, проф. В.П. Сулова. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Республиканское объединение «Белагросервис»; под общей редакцией И.Н. Шило, Н.А. Лабушева. 2014. С. 275-278.

41. Ерохин М.Н. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде / М. Н. Ерохин, С. М. Гайдар, Д. М. Скороходов [и др.] // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 72-78. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78. – EDN QVBNFB.

42. Ерохин М.Н. Импортозамещение рабочих органов сельскохозяйственных машин для животноводства / М. Н. Ерохин, Д. М. Скороходов, А. С. Павлов // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева: Сборник статей, Москва, 05–07 июня 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 557-561. – EDN DZZRWD.

43. Ерохин М.Н. Применение керамических материалов для упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин в условиях абразивного изнашивания / М.Н. Ерохин, В.С. Новиков, А.А. Собко и др. // Состояние перспективы восстановления, упрочнения и изготовления деталей. - М.: ВНИИТУВИД «Ремдеталь». - 1999. - С. 167-168

44. Ерохин, М.Н. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиции принципа 5М / М. Н. Ерохин, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба [и др.] // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 8. – С. 701-704. – DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704. – EDN BUMPSG.

45. Жушман А.И., Карпов В.Г., Коптелова Е.К. Новое в технике и технологии производства пищевых продуктов экструзионным методом. – М., 1991. – 210 с.

46. Иван Именохоев, Ханс Виндсхаймер, Роланд Вайтц, Надя Кинтсель и Хорст Линн / Технология СВЧ-Нагрева: потенциал и границы/ LINN HIGH THERM GmbH, Heinrich-Hertz-Platz 1, 92275 Eschenfelden, Germany.

47. Иванов А.Г. Структурно-параметрический синтез и анализ механизмов грохотных калибрующих машин диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ижевский государственный технический университет". Ижевск, 2005/

48. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Восстановление герметичности соединения "вал-манжета" редукторов общего назначения с применением ремонтных втулок. В сборнике: Инновационные технологии реновации в машиностроении. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана. под общ. ред. В. Ю. Лавриненко. 2019. С. 171-175.

49. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Способ восстановления изношенной поверхности вала редуктора в соединении "вал-манжета" с применением ремонтной втулки и полимерных материалов / Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". 2019. № 6 (94). С. 40-45.

50. Игнаткин И.Ю., Серов А.В., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением ремонтной детали и полимерных материалов / Вестник НГИЭИ. 2021. № 5 (120). С. 53-64. С

51. Ипатов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Дородов П.В., Малинин А.В. Физико-механические свойства керамических покрытий, получаемых короткоимпульсной лазерной наплавкой порошковой смеси на основе бора Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 1. С. 71-76.

52. Ипатов А.Г., Харанжевский Е.В., Шмыков С.Н., Волков К.Г. Трибологические показатели упрочняющих и восстановительных керамических покрытий на основе карбида БОРА. Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 7. С. 12-19.

53. Исследование микротвердости боридных покрытий, полученных на стали 65Г из различных составов борирующих смесей / Д. М. Скороходов, С. С. Басов, В. А. Денисов, А. С. Свиридов // Технический сервис машин. – 2021. – № 2(143). – С. 144-150. – DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-2-144-150. – EDN DEJMUUF.

54. Ишков А.В. Боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники: получение, структура и износостойкость в реальных условиях / А.В. Ишков, В.В. Иванайский, Н.М. Мишустин и др. // Труды ГОСНИТИ. - 2012. - Т. 109. - С. 7-11.

55. Кабдушева А.С. Повышение эффективности экструдера за счет совершенствования его параметров при переработке растительных материалов / Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD) Республика Казахстан 2022.

56. Кадыров Д., Гарзанов А., Экструзионная переработка биологических отходов в корма // Птицеводство. – 2008. – №7. – С. 51-54.

57. Казанцев С.П. Восстановление деталей комбинированными диффузионными покрытиями / С. П. Казанцев // Техника и оборудование для села. – 2004. – № 3. – С. 15. – EDN ZFDJXJ.

58. Казанцев С.П. Восстановление изношенных деталей многокомпонентной диффузионной металлизацией / С. П. Казанцев, В. А. Прилепин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – № 4. – С. 31-32. – EDN ZFDGMN.

59. Казанцев С.П. Восстановление плунжерных пар топливных насосов распределительного типа диффузионным хромонитридными покрытиями: дис. ... канд. техн. наук: / Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, М., 1988.

60. Казанцев С.П. Новая технология получения комбинированных диффузионных покрытий / С. П. Казанцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2003. – № 7. – С. 30-32. – EDN ZFDIGH.

61. Казанцев С.П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. Москва, 2006 (зеленый 3).

62. Казанцев С.П. Технология восстановления деталей сельскохозяйственной техники нанесением железоборидных покрытий / С. П. Казанцев, В. Н. Боярский, О. П. Андреев // Техника в сельском хозяйстве. – 2001. – № 2. – С. 34-35. – EDN WRPZFI.

63. Казанцев С.П., Кочетов Э.И., Понин А.И. Изменение шероховатости поверхности при диффузионном хромировании стали / Труды МИИСП. – М.: МИИСП, 1997. – С. 41...43.

64. Казанцев С.П., Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей с/х техники: дисс. д. т. н / МГАУ им. В.П. Горячкина, М., 2006.

65. Катаев Ю.В. Анализ факторов, влияющих на нагарообразования в ДВС / Ю. В. Катаев, В. М. Корнеев // Сборник статей по итогам II международной научно-практической конференции "ГОРЯЧКИНСКИЕ ЧТЕНИЯ", посвященной 150-летию со дня рождения академика В.П. Горячкина, Москва, 18 апреля 2018 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. – С. 256-261. – EDN OSCBWR

66. Катаев Ю.В. Способ организации технического обслуживания и ремонта деталей сельскохозяйственной техники / Ю. В. Катаев, А. А. Соломашкин, В. С. Герасимов // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 5. – С. 67-72. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-5-67-72. – EDN SBHAJZ.

67. Конкин Ю. А. Организация и экономическая оценка рационализации рабочих мест на предприятиях технического сервиса в АПК: Метод. Рек. По вып.



Курсовой работы /Ю.А.Конкин, В.П. Копчиков – М: ФГОУ ВПО МГАУ, 2005 – 71с.

68. Конкин Ю.А. Организация и экономическая оценка рационализации рабочих мест на предприятиях технического сервиса в АПК: Метод. Рек. По вып. Курсовой работы/ Ю.А. Конкин, В.П. Копчиков – М: ФГОУ ВПО МГАУ, 2005 – 71с.

69. Коротков В.Г. Влияние влажности и высоты фильеры на процесс экструдирования комбикормов / В.Г. Коротков, В.Ю. Полищук, Д.А. Мусиенко // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2000. – № 2. – С. 117-119. – EDN HVZAXN.

70. Кравченко И.Н. Новые подходы к повышению ресурса деталей машиностроения методами газотермического напыления наноструктурированными покрытиями / И.Н. Кравченко, А.Ф. Пузряков, А.В. Коломейченко [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2014. № 6. С. 32–35.

71. Кравченко И.Н. Новые подходы к повышению ресурса деталей машиностроения методами газотермического напыления наноструктурированными покрытиями / И.Н. Кравченко, А.Ф. Пузряков, А.В. Коломейченко [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2014. № 6. С. 32–35.

72. Кравченко И.Н., Коломейченко А.В., Корнеев В.М. и др. Проектирование предприятий технического сервиса: Учебное пособие. – Орел: Изд-во ООО «Модуль-К» – 2014.

73. Кравченко И.Н., Коломейченко А.В., Корнеев В.М. и др. Проектирование предприятий технического сервиса: Учебное пособие. – Орел: Изд-во ООО «Модуль-К» – 2014.

74. Краснящих К.А. Совершенствование технологии входного контроля качества запасных частей сельскохозяйственной техники в условиях технического сервиса: дис... канд. техн. наук: 05.20.03 / Краснящих Константин Александрович. – М, 2013. – 217 с.

75. Лаврухин В.А. Основная и предпосевная обработка почвы / В.А. Лаврухин, И.С. Терещенко, Н.В. Черкашин. - М.: Россельхозиздат, 1975. - 320 с.

76. Лебедев Л.Я., Корепанов Ю.Г. Экструдер с червячной передачей для переработки сельхоз продукции. В сборнике: Динамика механических систем. материалы II Международной научно-практической конференции, посвященной памяти профессора А.К. Юлдашева. Казань, 2021. С. 251-256.

77. Лебедев Л.Я., Шкляев А.Л. Проектирование и расчет приводов технологического оборудования учебное пособие / (2-е издание) Ижевск, 2016.

78. Левшин А.Г. / ПЛАНИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА / Левшин А.Г., Левшин А.А., Бутузов А.Е., Майстренко Н.А. Учебное пособие / Москва – 2016.

79. Левшин А. Г. Организация и технология испытаний сельскохозяйственной техники: ч. 2 / А. Г. Левшин – М.: Лаб. ОП ФГОУ ВПО МГАУ, 2004 – 92 с.

80. Леонов О.А. Методы и средства измерений / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2014. – 256 с.

81. Леонов О.А. Техничко-экономические основы метрологии, стандартизации и сертификации / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Г.Н. Темасова. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2004. – 236 с.

82. Литвинец Ю.И. Основы материальных расчетов и выбора оборудования для переработки пластических масс экструзией. – Екатеринбург, 2001. – 46 с.

83. Лялякин В.П. Восстановление деталей машин в агропромышленном комплексе. Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного комплекса. Коллективная монография. Под редакцией В.В. Окоркова. Иваново. 2019. С. 254-258.

84. Лялякин В.П. Выбор метода восстановления изношенных поверхностей деталей / В. П. Лялякин, В. А. Денисов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14, № 12(168). – С. 536-539. – EDN YPWFH.

85. Макаров Е.С. Определение параметров процесса экструдирования кормов и разработка методики расчета пресс-экструдера: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – М., 1985. – 27 с.

86. Мартынов А.В., Сенин П.В., Ионов П.А. Ресурсосбережение на основе повышения межремонтной наработки изделия // Техника в сельском хозяйстве. №5, 2008. – С.19-23.

87. Мартынова Д.В. Повышение эффективности процесса производства экструдированных кормов за счет из изменения конструктивных параметров шнека пресс-экструдера: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Оренбург: ОГАУ, 20017. – 16 с.

88. Мартынова Д.В. Повышение эффективности процесса производства экструдированных кормов за счет из изменения конструктивных параметров шнека пресс-экструдера: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Оренбург: ОГАУ, 20017. – 16 с.

89. Мартынова Д.В., Соловых С.Ю., Попов В.П., Антимонов С.В., Мартынов Н.Н. Исследование влияния экструдированных кормовых продуктов на мясную продуктивность крупного рогатого скота. /В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. материалы Всероссийской научно-методической конференции. Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВО "Оренбургский государственный университет". 2018. С. 2051-2058.

90. Мартынова Д.В. Повышение эффективности процесса производства экструдированных кормовых продуктов за счет изменения конструктивных параметров шнека пресс-экструдера: монография / Д.В. Мартынова, В.П. Попов, В.П. Ханин, Г.Б. Зинюхин, С.В. Антимонов, Г.А. Сидоренко – Оренбург: ИПК Университет, 2018. – 208 с. ISBN 978-5-4417-0738-1.

91. Мачихин Ю.А. Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.

92. Мишустин Н.М. Износостойкие боридные покрытия, полученные на конструкционных и легированных сталях с использованием ТВЧ-нагрева : диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.09 / Мишустин Никита Михайлович; [Место защиты: Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова]. - Барнаул, 2012. - 198 с.

93. Надежность технических систем: учеб. для вузов / Под общ. ред. Е.А. Пучина и О.Н. Дидманидзе. – М.: ООО «УМЦ Триада» - 351с.
94. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов [Текст] / Ф.С. Новиков, Н.Б. Арсов. — М.: Машиностроение, Техника. - 1980. – 304
95. Новиков В.С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: монография /| ИНФРА-М, 2019. — 155 с.
96. Новиков Е.А. Новый метод контроля содержания абразивных частиц в дизельных топливах // Аналитический контроль нефти и нефтепродуктов [neftemir.ru](http://neftemir.ru): Мир нефтепродуктов №6. – 2020. – 34 – 38 с.
97. Пахомов В.И., Рудой Д.В., Тупольских Т.И. и др. Технологии и оборудование для экструдирования растительного сырья: учеб. пос. – Р-на-Д., 2018. – 109 с.
98. Первушин В.Ф., Федоров О.С., Широбоков В.И., Ипатов А.Г., Салимзянов М.З. Анализ износа сошника сеялки *primera dmc 9000* фирмы *amazone* (германия). В сборнике: Научные разработки и инновации в решении стратегических задач агропромышленного комплекса. Материалы Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Ижевск, 2022. С. 211-213.
99. Петухов Р.М. Оценка эффективности промышленного производства. - М.: Экономика, 1990. – 35 с.
100. Программа формирования G-code для управления установкой упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмзках нагревом ТВЧ / Скороходов Д.М., Ерохин М.Н., Павлов Я.Д., Карпов В.И., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю., Басов С.С. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024669388, 16.08.2024. Заявка от 31.07.2024.
101. Розовский А.Я. Кинетика топохимических реакций [Текст]. - М.: Химия. -1974. -224 с.
102. Севостьянов М.В., Дублин Н.Н., Михайличенко С.А. и др. Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование // Строительные материалы. – 2004. – №11. – С. 2-5.

103. Скороходов Д.М. Анализ современных смесителей-кормораздатчиков и их рабочих органов / Д.М. Скороходов, Н.Н. Чупятов, А.С. Павлов // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов : Сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.), посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова, Москва, 19–20 декабря 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2024. – С. 265-269. – EDN AMXPDR.

104. Скороходов Д.М. Влияние факторов на точность контроля качества запасных частей сельскохозяйственной техники автоматизированным измерительным устройством / Д. М. Скороходов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2018. – № 2(84). – С. 44-49. – DOI 10.26897/1728-7936-2018-2-44-49. – EDN YWRDJP.

105. Скороходов Д.М. Исследование микротвердости боридных покрытий, полученных на стали 65Г из различных составов борлирующих смесей / Д. М. Скороходов, С. С. Басов, В. А. Денисов, А. С. Свиридов // Технический сервис машин. – 2021. – № 2(143). – С. 144-150. – DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-2-144-150. – EDN DEJMUF.

106. Скороходов Д.М. Метод борирования с нагревом ТВЧ для упрочнения режущих элементов почвообрабатывающих машин / Д. М. Скороходов, С. С. Басов // Доклады ТСХА, Москва, 03–05 декабря 2019 года. Том Выпуск 292, Часть I. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. – С. 623-625. – EDN WAWADZ.

107. Скороходов Д.М. Совершенствование методов и средств контроля качества запасных частей сельскохозяйственной техники: специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Скороходов Дмитрий Михайлович. – Москва, 2017. – 21 с. – EDN WFDUMK.

108. Скороходов Д.М. Совершенствование методов и средств контроля качества запасных частей сельскохозяйственной техники: специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Скороходов Дмитрий Михайлович. – Москва, 2017. – 178 с. – EDN ВКРХУК.

109. Скороходов Д.М. Совершенствование методов и средств контроля качества запасных частей сельскохозяйственной техники: диссертация кандидата технических наук: 05.20.03.

110. Скороходов Д.М. Условия эксплуатации шнеков экструдеров в кормопроизводстве для животноводства / Д.М. Скороходов, А.Н. Скороходова, С.С. Басов // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 19-26. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-4-19-26. – EDN FTWEAY.

111. Скороходов Д.М. Условия эксплуатации шнеков экструдеров в кормопроизводстве для животноводства / Д. М. Скороходов, А. Н. Скороходова, С. С. Басов // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 19-26. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-4-19-26. – EDN FTWEAY.

112. Соловьев О.В. Мясоперерабатывающее оборудование нового поколения Справочник. — М.: ДеЛи принт, 2010. — 470 с.

113. Соловьев О.В. Мясоперерабатывающее оборудование нового поколения. Справочник. – М.: ДеЛи принт, 2010. – 470 с.

114. Степин Б.Д. Методы получения особо чистых неорганических веществ [Текст] / Степин Б.Д., Горштейн И.Д., Блюм Г.З., Курдюнов Г.М., Оглоблина И.П. - И.: «Химия». 1969. - 480 с. Степин, Б.Д. Методы получения особо чистых неорганических веществ [Текст] / Степин Б.Д., Горштейн И.Д., Блюм Г.З., Курдюнов Г.М., Оглоблина И.П. - И.: «Химия». 1969. - 480 с.

115. Сырокоренский И.С. Анализ конструкций современных экструдеров российского производства // Молодой ученый. – 2018. – №31. – С. 36-39.

116. Тимофеева Д.В. Обоснование оптимальных параметров экструдирования различных видов сырья в канале одношнекового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, В.Г. Коротков, В.П. Попов, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: Материалы Всероссийской научно-методической конференции, Оренбург, 29–31 января 2014 года. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2014. – С. 1298-1305. – EDN SLHHVP.

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

118. Урьев Н.Б., Талейсник М.А. Пищевые дисперсные системы. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс. – М.: Агропромиздат, 1985. – 296 с.

119. Установка для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом токами высокой частоты: Патент № 2023126676 : заявл. 18.10.2023 опубл. 11.06.2024 / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, С.В. Золотарев [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – EDN KSETAE.

120. Устройство для бесконтактных измерений: пат. 108599 Рос. Федерация: МПК G01B 11/00 (2006.01) / В.А. Семейкин, А.С. Дорохов, К.А. Краснящих; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО МГАУ – № 2010144149/28; заявл. 29.10.2010; опубл. 20.09.11. Бюл. № 26. – 2 с.

121. Федоров С.К., Федорова Л.В., Гамидов А.Г., Бураков В.О. Повышение износостойкости втулок защитных насосов электромеханической поверхностной закалкой. Международный технико-экономический журнал. 2013. № 5. С. 91-96.

122. Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Воронина М.В., Садовников А.В., Никитин В.Н. Повышение долговечности переводников и

бурильных труб электромеханической обработкой. Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 539-546.

123. Фёдорова Л.В., Фёдоров С.К., Иванова Ю.С., Исаев К.Р. Структура и износостойкость стали 65Г после электромеханической поверхностной закалки. Технология металлов. 2017. № 3. С. 27-30.

124. Ханин В.П. Ресурсосберегающий процесс экструзионной обработки зернового сырья: дис. ... канд. техн: 05.20.01. – Оренбург: ОГУ, 1999. – 130 с.

125. Ханин В.П. Ресурсосберегающий процесс экструзионной обработки зернового сырья: дис. ... канд. техн: 05.20.01. – Оренбург: ОГУ, 1999. – 130 с.

126. Черноиванов В.И. Развитие системы технического обслуживания машин в животноводстве / Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2012. № 1 (5). С. 18-26.

127. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Соломашкин А.А. Способ определения остаточного ресурса деталей машин Технический сервис машин. 2020. № 1 (138). С. 50-57.

128. Эйдис А.Л. Обоснование нормативного срока службы машины на стадии ее создания / А. Л. Эйдис, Е. П. Парлюк, Н. А. Тимошенко // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 2. – С. 54-58. – EDN THALVB

129. A. Milinović, D. Krumes, R. Marković: An investigation of boride layers growth kinetics on carbon steels, Tehnički vjesnik 19, 1(2012), p. 27-31, ISSN 1330-3651, UDC/UDK [621.785.53:669.14]:620.186

130. Babajanyan A. The results of the study of the amino acid composition of compound feeds during the extrusion of wheat grain with the addition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.) / A. Babajanyan, V. Pakhomov, D. Rudoy, S. Braginet, T. Maltseva // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2022), Tashkent, Uzbekistan, 25–28 января 2023 года. Vol. 371. – Tashkent, Uzbekistan: EDP Sciences, 2023. – P. 01074. – DOI 10.1051/e3sconf/202337101074. – EDN MNSCRZ.



131. Basova A.S. (2021) Investment Partnerships in Economic Activities: Theory and Applications. In: Bogoviz A.V. (eds) Complex Systems: Innovation and Sustainability in the Digital Age. Studies in Systems, Decision and Control, vol 283. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58823-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58823-6_9)
132. DKG-Fachtagung “Moderne Verfahren in der Trocknungstechnik“, 14./15. Februar 2012, Eschenfelden
133. Egorov M. S., Dombrovskiy Yu. M., Tsordanidi G. G., Egorova R. V. Technological Methods of Boriding Products from Stainless Alloys Operating in Aggressive Conditions. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no.3, pp. 68–74. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-68-74>.
134. Feher, L. Energy Efficient Microwave Systems, Springer Verlag, 2009.
135. Genel K., Ozbek I., Bindal C. // Mater. Sci. and Eng. A. 2003. V. 347, №1–2. P. 311–314.
136. Gopalakrishnan P., Shankar, Balamrugaan S.S., Thiagi A.K. // J. Mater. Sci. and Technol. (Bulgaria). 2002. V. 10, № 4. pp. 45–51.
137. Imenokhoyev, I.: Computergestützte 3D-Modellierung von Mikrowellen-Erwärmungsanlagen. Berichte aus der Verfahrenstechnik. Aachen: Shaker Verlag, zugl. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Dissertation, 2007 – ISBN 978-3-8322-6604-2.
138. Kummer, M. Grundlagen der Mikrowellentechnik. 1. Auflage, Berlin: Technik, 1986 – ISBN 3-341-00088-7/
139. M.A.Yorulmaz: An investigation of boriding of medium carbon steels, Marmara University, Faculty of Engineering, Istanbul, 2007/
140. Meredith, R. Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998 – ISBN 0852969163.
141. Möller, M. und Waitz, R. Mikrowellen In-Fass Trocknung Effektives Eindampfen von radioaktiven Flüssigabfällen. In atw 52. Jg. (2007) Heft 12 – Dezember, S. 807-810, Internationale Zeitschrift für Kernenergie.
142. Production and Repair of Agricultural Equipment: Analysis by the 5M Principle / M. N. Erokhin, O. A. Leonov, N. Zh. Shkaruba [et al.] // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 10. – P. 1242-1245. – DOI 10.3103/s1068798x23100076. – EDN NHCOVN.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2820894

### Установка для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом токами высокой частоты

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Ерохин Михаил Никитьевич (RU), Казанцев Сергей Павлович (RU), Золотарев Сергей Васильевич (RU), Скороходов Дмитрий Михайлович (RU), Басов Сергей Сергеевич (RU), Игнаткин Иван Юрьевич (RU), Мельников Олег Михайлович (RU), Серов Никита Вячеславович (RU), Павлов Александр Егорович (RU)*

Заявка № 2023126676

Приоритет изобретения 18 октября 2023 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 11 июня 2024 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 18 октября 2043 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 42976a0fe3563164ba196f83b73b4aa7  
Владелец: *Зубов Юрий Сергеевич*  
Действителен с 10.06.2023 по 02.08.2024

*Ю.С. Зубов*



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024669388

**«Программа формирования G-Code для управления установкой упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагретом ТВЧ»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» (RU)*

Авторы: *Скорыходов Дмитрий Михайлович (RU), Ерохин Михаил Никитьевич (RU), Павлов Ярослав Дмитриевич (RU), Карпов Василий Иванович (RU), Казанцев Сергей Павлович (RU), Игнаткин Иван Юрьевич (RU), Басов Сергей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2024667715

Дата поступления 31 июля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 августа 2024 г.





*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0692e7e1a6300b154f2401670bca2026  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

*Ю.С. Зубов*



«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по науке  
и инновационному развитию  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева

  
А. В. Журавлёв  
«» 2024 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Председатель СПК  
«Путь к Новой Жизни»  
Нижегородская область,  
Воскресенский р-н, д.  
Бараново, Советская ул, д. 2  
А. Н. Мозжанов  
«» 2024 г.

**АКТ**

**внедрения технологии упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом ТВЧ**

Мы, нижеподписавшиеся, председатель сельскохозяйственного производственного кооператива СПК «Путь к Новой Жизни» А.Н. Мозжанов с одной стороны, и представителей ФГБОУ ВО РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева д.т.н., профессора Казанцева С.П., к.т.н., доцента Скороходова Д.М. и аспиранта Басова С.С. с другой стороны, составили настоящий акт о том, что по завершению проведения эксплуатационных испытаний технология упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках сверхвысокочастотным нагревом будет внедрена на предприятии путём реализации технологического процесса упрочнения шнеков экструдеров.

Результатом законченной научно-исследовательской работы является: «Технологический процесс упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках». Внедряемая научно-исследовательская работа содержит заявку на патент RU 2023 126676.

Номенклатура восстанавливаемых и упрочняемых деталей – шнеки экструдеров.

Разработанные технологические процессы восстановления и упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом ТВЧ приняты к внедрению. Эксплуатационные испытания ведутся. Отказы не выявлены.


Председатель СПК  
«Путь к Новой Жизни»

  
А.Н. Мозжанов

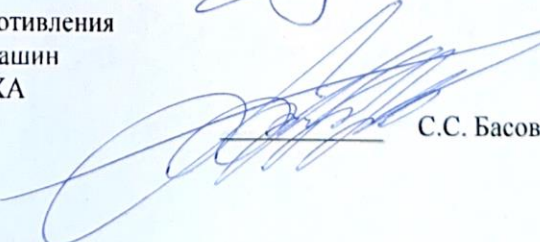
Заведующий кафедрой сопротивления  
материалов и деталей машин,  
д.т.н., профессор  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева

  
С.П. Казанцев

к.т.н., доцент кафедры сопротивления  
материалов и деталей машин  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева

  
Д.М. Скороходов

аспирант кафедры сопротивления  
материалов и деталей машин  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева

  
С.С. Басов



**ВГТУ**

ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# ДИПЛОМ

**ВТОРОЙ СТЕПЕНИ  
НАГРАЖДАЕТСЯ**

**Басов Сергей Сергеевич, аспирант**

**Скороходов Дмитрий Михайлович, к.т.н., доцент**

**Игнаткин Иван Юрьевич, д.т.н., профессор, доцент**

**Серов Никита Вячеславович, к.т.н., доцент, доцент**

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

**Статья ПРИМЕНЕНИЕ БОРИРОВАНИЯ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ ДЛЯ  
УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЭКСТРУДЕРОВ**

За предоставление статьи и активное участие в работе

Международной научно-технической конференции

«СОВРЕМЕННОЕ ПЕРСПЕКТИВНОЕ

РАЗВИТИЕ НАУКИ, ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ»,

которая проходила 12 октября 2023 года

в Воронежском государственном техническом

университете, г. Воронеж, Россия

Декан факультета

Машиностроения и аэрокосмической  
техники ВГТУ, д.т.н., профессор

Председатель

Организационного комитета

д.т.н., профессор ВГТУ





