

На правах рукописи



Емцев Виталий Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
САМОТЕЧНЫХ ЗЕРНОПРОВОДОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМИ
ПОКРЫТИЯМИ**

05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания
в сельском хозяйстве

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ)

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Астанин Владимир Константинович

Официальные оппоненты **Шалимов Юрий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», главный научный сотрудник кафедры самолетостроение

Чупятов Николай Николаевич, кандидат технических наук, ПАО «Электромеханика», заместитель генерального директора по производству

Ведущая организация: ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Защита диссертации состоится 26 марта 2019 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.057.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: www.rgatu.ru, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации www.vak3.ed.gov.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

Юхин Иван Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В агропромышленном комплексе Российской Федерации уделяется значительное внимание продовольственной безопасности страны. Важную роль в обеспечении сохранности зерна выполняют зернохранилища. Бесперебойная работа зернохранилищ обеспечивается множеством факторов. К их числу относятся процессы транспортировки зерна по самотечным системам зернопроводов. Так в Воронежской области эксплуатируется 43 элеватора и зернохранилища, 6 пивоваренных и мукомольных заводов и 10 зерносушилок. Суммарная протяженность самотечных транспортных систем составляет более 30 км. Местами, наиболее подверженными возникновению очагов истирания деталей зернопроводов, являются поворотные колена и прямые участки набора скорости и торможения зернового потока. Долговечность таких элементов самотеков едва достигает нескольких месяцев, а порой и нескольких недель. Остановка оборудования зерноперерабатывающего комплекса приводит к повышению трудоемкости, себестоимости обработки, к потерям зерна из-за повреждения его острыми кромками внутренней поверхности изношенного зернопровода и замедлению цикла переработки: очистки, сушки.

В настоящее время широко применяются различные способы восстановления и упрочнения деталей зернопроводов: такие как электроконтактная приварка стальных заплат, использование полимерных вставок и другие способы. Известно, что восстановление изношенных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин и оборудования железнением с последующим их упрочнением хромированием позволяет повысить долговечность деталей в 2-8 раз, а трудоемкость и стоимость восстановления изношенных деталей снизить на 30-40%.

Таким образом, совершенствование технологии восстановления самотечных зернопроводов нанесением электролитических покрытий сплавами на основе железа и хрома с заданными физико-механическими свойствами на наиболее изнашиваемых участках зернопроводов, посвященное повышению долговечности зернопроводов является актуальной задачей, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

Степень разработанности темы исследования. Изучению изнашивания рабочих органов сельскохозяйственных машин и оборудования потоками абразивных частиц посвящено большое количество работ ученых: А.И. Селиванова, Ю.А. Конкина, И.И. Трепененкова, И.В. Крагельского, Б.И. Костецкого, М.М. Тененбаума, С.П. Козырева, В.В. Кузнецова, Г.М. Сорокина и многих других.

Вопросами восстановления деталей машин и оборудования функциональными покрытиями занимались С.Н. Вялых, В.А. Денисов, И.Г. Голубев, М.Н. Ерохин, В.П. Лялякин, В.Я. Микотин, А.Э. Северный, В.И. Черноиванов, Н.Н. Чупятов и другие.

В источниках отечественной литературы современной теории электролитического нанесения покрытий на основе железа и хрома посвящены

работы В.И. Серебровского, В.В. Серебровского, С.Ю. Жачкина, В.М. Юдина, Ю.А. Стекольников, А.И. Фаличевой, Ю.Р. Копылова, Ю.Е. Кисель, В.В. Сафонова, С.Д. Полищук, Ю.Н. Шалимова, И.А. Спицына, Ю.А. Захарова, Ю.П. Перелыгина, Г.В. Гурьянова и других. Отмечается, что легирование восстанавливаемого слоя фосфором повышает его износостойкость. В то же время применение электролитических технологий для восстановления и упрочнения зернопроводов недостаточно представлено в литературе. А так же недостаточно изучены способы нанесения электролитических покрытий в виде сплавов металлов и неметаллов на основе железа и хрома на внутренние поверхности тонкостенных цилиндрических деталей.

Цель работы. Повышение ресурса самотечных зернопроводов восстановлением изношенных поверхностей электролитическими железоникелевыми и железо-никель-фосфорными сплавами и упрочнением хромом.

Объект исследования. Электролитические покрытия на основе железа и хрома восстанавливаемых поверхностей самотечных зернопроводов.

Предмет исследования. Закономерности формирования гальванических покрытий в зависимости от параметров и режимов процесса осаждения электролитических сплавов.

Научная новизна:

1. Аналитические зависимости динамики изнашивания стенки восстановленных зернопроводов сплавами на основе Fe-Ni-P и упрочненным хромированием, отличающиеся описанием периода притирания квадратичной функцией, износа восстанавливающего и упрочняющего слоев линейными функциями и объединенных в одну непрерывную функцию с помощью функции Хейвисайда.

2. Закономерности влияния условий осаждения электролитических Fe-Ni-P сплавов на структуру, физико-механические и эксплуатационные свойства восстановленных поверхностей зернопроводов.

3. Экспериментально подтвержденные результаты определения износостойкости и прочностных характеристик электролитических покрытий на основе Fe-Ni-P сплавов изношенных и восстановленных участков зернопроводов в сульфатных электролитах на нестационарных режимах осаждения.

Методология исследований. Применялся системный анализ комплекса известных теоретических и экспериментальных результатов по восстановлению и упрочнению деталей. Использовались физико-математические методы обработки исследований в производственных условиях эксплуатационных свойств поверхностных слоев из гальванических покрытий на основе Fe-Ni-P сплавов в сульфатных электролитах на нестационарных режимах осаждения. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных методик, приборов и оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические зависимости динамики изнашивания зерновым потоком стенок самотечных зернопроводов, покрытых слоем восстанавливающего и упрочняющего материала;

2. Практические закономерности формирования структуры и эксплуатационных свойств электролитических покрытий на основе железа и хрома;

3. Технологический процесс восстановления самотечных зернопроводов нанесением электролитических покрытий Fe-Ni, Fe-Ni-P с последующим упрочнением хромированием.

4. Рекомендации использования предложенного преобразователя токов катодного и анодного полупериодов, технологической оснастки для восстановления изношенных участков зернопроводов.

Достоверность результатов, полученных в ходе исследований, подтверждена применением современных методов исследования, поверенных приборов и оборудования, стандартных методик физико-механических исследований и статистических методов обработки результатов.

Теоретическая значимость работы состоит в получении аналитических зависимостей динамики изнашивания зерновым потоком стенок самотечных зернопроводов, покрытых слоем восстанавливающего и упрочняющего материала, новых закономерностей влияния условий осаждения электролитических сплавов Fe-Ni, Fe-Ni-P на структуру, физико-механические и эксплуатационные свойства восстановленной поверхности участков зернопроводов.

Практическая значимость работы состоит в разработке экономичного, экологичного технологического процесса, преобразователя токов катодного и анодного полупериодов, технологической оснастки и рекомендаций по восстановлению железо-никелевыми, железо-никель-фосфорными сплавами и упрочнением хромированием самотечных зернопроводов в условиях сельскохозяйственного предприятия.

Личный вклад автора состоит в определении направления научных исследований, участии на всех этапах процесса проведения теоретических и экспериментальных исследований, получении исходных данных, разработке плана экспериментальных исследований, проведении научных экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных, разработке и модернизации установок для нанесения электролитических покрытий с использованием асимметричного переменного тока, модернизации установки для испытаний деталей на изнашивание, апробации результатов исследования, подготовке публикаций по выполненной работе.

Апробация работы. Основные материалы исследований по диссертационной работе доложены и одобрены на международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича «Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения» в 2017 г., г. Воронеж; проблемы развития технологий создания, сервисного обслуживания и использования технических средств в агропромышленном комплексе: материалы международной научно-практической конференции в 2017 г., г. Воронеж; международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в

области естественных и технических наук» в 2018 г., г. Белгород; 33 международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки 21 века» в 2018 г., г. Москва; международной научно-практической конференции «Роль естественных и технических наук в современном обществе» в 2018 г., г. Белгород, IV международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» в 2018 г., г. Орел, а также на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ в 2015–2018 годах.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 работы в журналах, указанных в «Перечне ВАК», и 1 статья в журнале, входящем в базу данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения (общих выводов), списка литературы, включающего 196 отечественные и зарубежные публикации, 3 приложений. Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы степень разработанности, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Изложены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, цель исследования.

В первой главе «Анализ исследований способов электролитического восстановления деталей сельхозмашин» на основе обзора литературных источников проанализированы существующие технологии восстановления и упрочнения деталей. Проведен анализ научных трудов, посвященных изнашиванию самотечных зернопроводов и способам их восстановления и упрочнения. В качестве одного из перспективных отмечен способ нанесения электролитических покрытий на внутренние поверхности прямолинейных и изогнутых труб. Покрытия на основе железа широко используются при восстановлении и упрочнении рабочих поверхностей машин и оборудования. Добиться улучшения физико-механических свойств покрытий предлагается за счет введения легирующих добавок из металлов и неметаллов. Проанализированы процессы электрокристаллизации при нанесении гальванических покрытий, параметры, влияющие на структуру осадков, особенности электрокристаллизации железа и сплавов на его основе при использовании постоянного и асимметричного переменного тока. Однако процесс восстановления изношенных самотечных зернопроводов электроосаждением железо-никелевых и железо-никель-фосфорных сплавов исследован не достаточно.

На основе проведенного анализа сформулированы **задачи исследования:**

- 1) Исследовать виды и характер износа деталей самотечных зернопроводов, динамику их изнашивания в процессе работы.
- 2) Выполнить теоретическое обоснование процесса восстановления

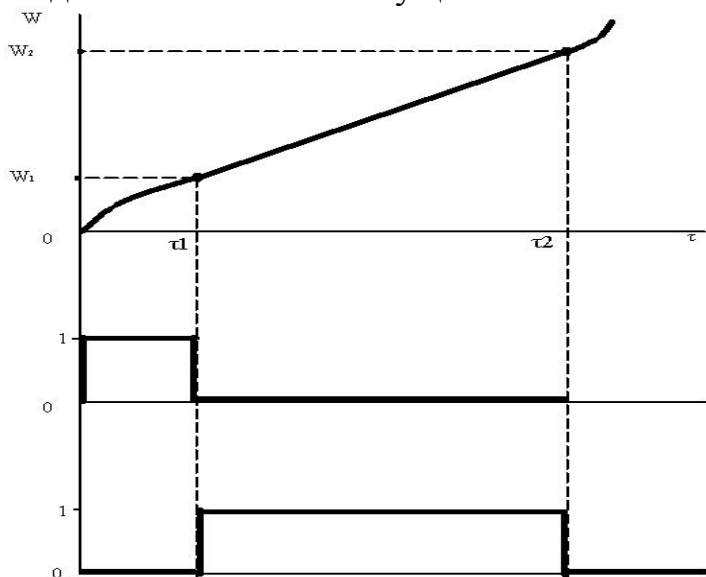
зернопроводов электролитическими покрытиями на основе железа и хрома и исследовать структуру и физико-механические свойства получаемых покрытий для самотечных зернопроводов.

3) Предложить технологию и средства восстановления и упрочнения самотечных зернопроводов, обосновать технологические параметры (плотность тока, температуру и состав электролита) и их влияние на физико-механические и эксплуатационные свойства восстановленных элементов зернопроводов.

4) Разработать практические рекомендации по восстановлению и упрочнению самотечных зернопроводов электролитическими покрытиями на основе железа и хрома с оценкой экономической эффективности предлагаемой технологии.

Вторая глава «Анализ износов и теоретическое обоснование режимов электролитического восстановления зернопроводов» посвящена теоретическому анализу процессов изнашивания новых самотечных зернопроводов, выпускаемых промышленностью, и восстановленных нанесением электролитических покрытий железом с легирующими добавками никеля и фосфора, а так же упрочненных хромированием.

В процессе изнашивания зернопроводов выделяются три этапа: притирания, основного износа, и интенсивного износа (рисунок 1, а). Износ на каждом из этих этапов осуществляется по определенному закону.



а)

б)

в)

Рисунок 1 – График динамики изнашивания (а) и функция Хевисайда для первого этапа притирания (б) и второго этапа основного износа (в)

Начальный этап работы детали характеризуется износом с постепенно уменьшающейся интенсивностью за счет притирания, удаления с поверхности выступов и не прочно связанных частиц.

Второй этап (основного износа) динамики изнашивания описывается в общем виде линейной функцией.

Третий участок интенсивного износа в расчет не включался, так как по времени он очень мал и в период его действия происходит протирание стенки зернопровода до сквозного отверстия и разрушение зернопровода.

Нами предлагается совместить две зависимости: линейную и квадратичную в одну непрерывную функцию с помощью функции Хевисайда (рисунок 1, б-в). При использовании функции Хевисайда зависимость динамики

изнашивания будет иметь вид:

$$W = \left[\frac{p}{\tau_1^2} \cdot \tau^2 + \left(\frac{2p}{\tau_1} + q \right) \cdot \tau \right] \cdot \Phi(\tau) \cdot \Phi(-\tau_1) + [q\tau + p] \cdot \Phi(\tau_1), \quad (1)$$

где τ – продолжительность изнашивания;

q – показатель интенсивности изнашивания;

p – показатель смещения кривой относительно начала координат;

τ_1 – продолжительность изнашивания до окончания первого этапа и начала второго этапа (точка касания кривых 1 и 2).

Зависимость 1 позволяет аналитически определить величину износа нового зернопровода и обосновать его ресурс.

При восстановлении и упрочнении детали появляются дополнительные этапы: этап изнашивания упрочняющего слоя и этап изнашивания восстанавливающего слоя. График зависимости изнашивания упрочненного и восстановленного зернопровода от количества прошедшего материала представлен на рисунке 2.

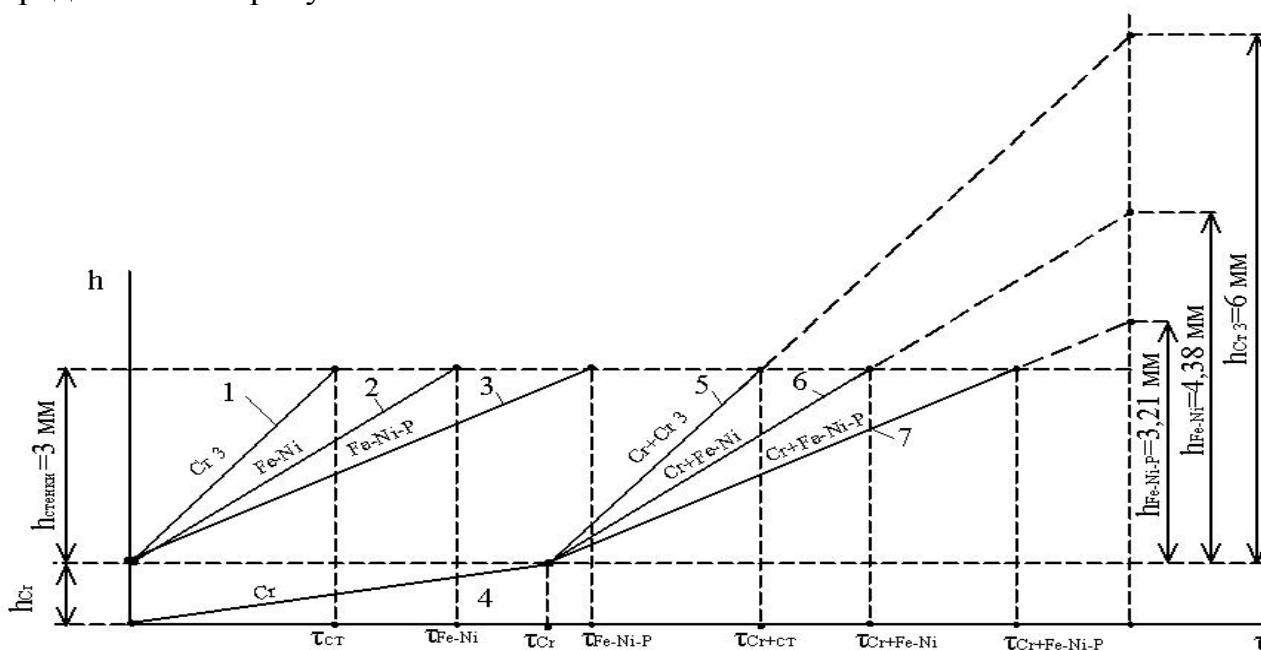


Рисунок 2 – График зависимости изнашивания восстановленной и упрочненной стенок зернопровода от количества прошедшего материала

Здесь h – толщина стенки зернопровода, изготовленного из листовой стали. По оси x откладывается продолжительность изнашивания, которая выражается или в единицах времени или в тонах зерна прошедших через зернопровод. Кривая 3 показывает зависимость износа восстанавливающего слоя предлагаемого нами Fe-Ni-P сплава. В качестве сравнения использовался известный Fe-Ni сплав, кривая 2, который традиционно применяется для восстановления деталей с/х машин. Здесь видно, что наработка восстанавливающего слоя Fe-Ni больше чем из листовой стали, а Fe-Ni-P сплавом еще больше.

Кривая 4 на графике представляет собой износ упрочняющего слоя хрома. После того как будет изношен этот слой начинается износ основного материала. Из точки окончания износа хрома нами для сравнения построены

три прямые линии износа: 5 – износ листовой стали, 6 – износ Fe-Ni сплава, 7 – износ Fe-Ni-P сплава. По пересечению этих линий с горизонтальной линией толщины стенки определяется наработка зернопровода до сквозного износа стенки. Пересечением этих линий с вертикальной линией заданной наработки определяется необходимая толщина нанесенного слоя стенки зернопровода, чтобы получить заданную наработку.

Зависимости динамики износа упрочненного и восстановленного зернопровода представлены формулами 2 и 3.

$$W(\tau) = \left[\frac{p_B \cdot \tau^2}{\tau_1^2} + \left(\frac{2p_B}{\tau_1} + q \cdot d_B \right) \cdot \tau \right] \cdot \Phi(\tau) \cdot \Phi(-\tau_1) + [q \cdot d_B \cdot \tau + p_B] \cdot \Phi(\tau_1) \cdot \Phi(-\tau_2) + \left[(q\tau + s - \frac{p_B}{d_B}) \cdot \Phi(\tau_2) \right] \quad (2)$$

$$W(\tau) = q \cdot d_B \cdot \tau \cdot \Phi(\tau) \cdot \Phi(-\tau_2) + q\tau + h_B - \frac{h_B}{d_B} \cdot \Phi(\tau_2) \quad (3)$$

Полученные выше зависимости носят эмпирический характер. Для них нами экспериментально определены показатели q и p . Полученные зависимости позволяют решить обратную задачу: обосновать толщину нанесенных слоев для определения заданной наработки. На графике видно, что толщина Fe-Ni-P сплава должна быть 3,2 мм, Fe-Ni – 4,38 мм, листовой стали – 6 мм. Это подтверждается результатами эксперимента.

Третья глава «Программа и методика экспериментальных исследований» посвящена описанию методики экспериментальных исследований.

Микротвердость покрытий определялась на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТу 9450-76, при пересчете длины диагонали алмазной пирамиды по справочным данным. Химический и элементный анализ проводился с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6380LV (JEOL, Япония) с системой микроанализа INCA 250 (OxfordInstrument, Великобритания). Анализ кристаллических фаз выполнен при помощи рентгеновской дифрактометрии ARL X'TRA (Thermo Scientific, Швейцария). Износостойкость железных, железо-никелевых, железо-никель-фосфорных и упрочненных хромом покрытий определялась в соответствии с ГОСТ 30480 и ГОСТ 17367 на изготовленной лабораторной установке на базе станка 1К62. Величина износа определялась весовым методом.

Электроосаждение железо-никелевых (Fe-Ni) покрытий проводилось из электролита, содержащего серную кислоту (H_2SO_4) с $pH=1,0-0,6$ – 350-400 г/л: сернокислое железо ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) – 150-350 г/л, никель сернокислый ($NiSO_4$) – 35-75 г/л, аскорбиновую кислоту ($C_6H_8O_6$) – 3-7 г/л.

Электролит для железо-никель-фосфорных (Fe-Ni-P) покрытий содержал помимо названных компонентов гипофосфит натрия ($Na(PH_2O_2)$) – 5-15 г/л.

Процесс хромирования осуществлялся в малоконцентрированном электролите с составом: хромовый ангидрид (Cr_2O_3) – 90-150 г/л, серная кислота (H_2SO_4) – 0,9-1,5 г/л, кристаллический фиолетовый (КФ) – 0,9-1,5 г/л.

Нанесение покрытий происходило на следующих режимах:

- Fe-Ni и Fe-Ni-P на асимметричном переменном токе: катодная плотность тока составляла в пределах 2-35 А/дм², катодно-анодное отношение

$\beta = 1,3 - 12$, температура электролита находилась в пределах $20-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, кислотность электролита $\text{pH} = 0,9-1,0$;

- хрома на асимметричном переменном токе с плотностью тока $40 - 150\text{ А/дм}^2$, $t_{\text{кат}}/t_{\text{ан}} = 50 - 70$, $\beta = 1 - 3$, при температуре $30 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для обработки данных эксперимента использовали методы математической статистики с применением программного обеспечения MicrosoftExcel.

Четвертая глава «Результаты и анализ экспериментальных исследований» посвящена исследованию физико-механических и эксплуатационных характеристик деталей, восстановленных железоникелевыми, железо-никель-фосфорными сплавами и упрочненных хромовыми покрытиями, а так же изучению структурных составов покрытий, и факторов, влияющих на эти характеристики.

Микротвердость Fe-Ni и Fe-Ni-P сплавов зависит от величины катодно-анодного отношения β (т.е. условий электролиза). На рисунке 3 изображено влияние катодно-анодного отношения и плотности тока на микротвердость Fe-Ni-P покрытия.

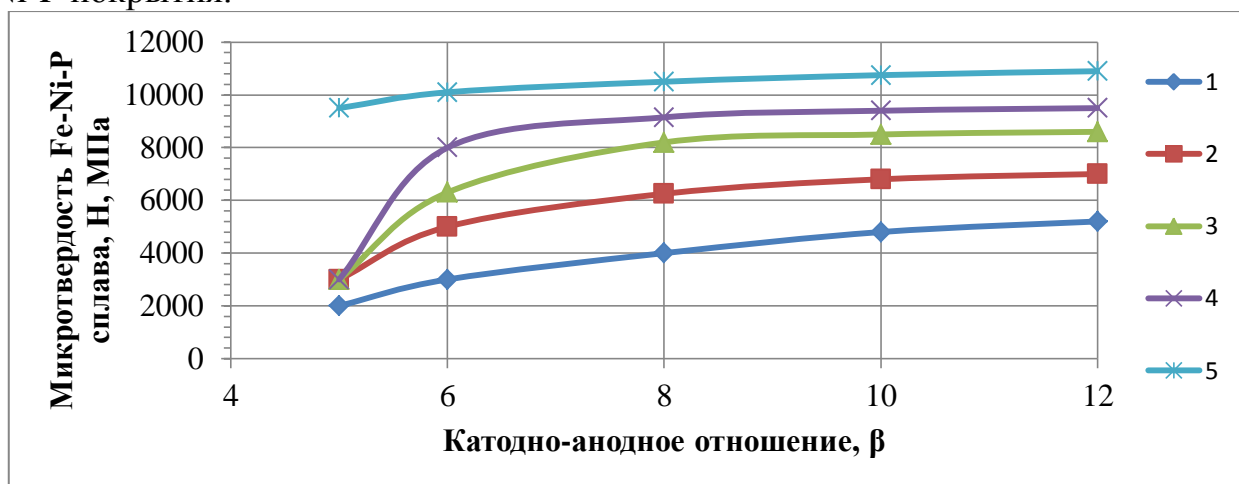


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости покрытий Fe-Ni-P от плотности тока и катодно-анодного отношения: 1 – 2 А/дм², 2 – 10 А/дм², 3 – 20 А/дм², 4 – 30 А/дм², 5 – 30 А/дм² с термообработкой (при $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в защитной атмосфере в течение часа)

Из рисунка 3 следует, что микротвердость Fe-Ni-P сплава возрастает с увеличением катодно-анодного отношения и плотности тока. Более резкое увеличение значений микротвердости наблюдается при небольших значениях катодно-анодного отношения с $\beta < 7$, в интервале плотностей тока от 10 до 30 А/дм², а после $\beta \geq 7$ рост значений микротвердости не значителен. Максимальная величина микротвердости 9,5 ГПа.

Содержание фосфора в железо-никель-фосфорном сплаве (рисунок 4) влияет на его микротвердость: при увеличении содержания фосфора в покрытии наблюдалось увеличение значений микротвердости, что подтверждает гипотезу, выдвинутую при анализе микроструктуры наносимого сплава.

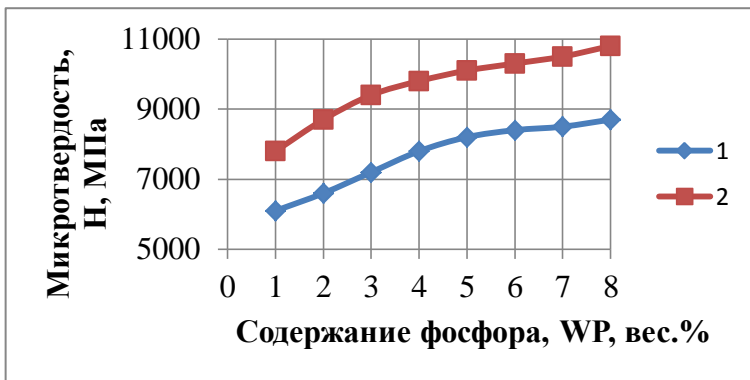


Рисунок 4 – Зависимость микротвердости сплава Fe-Ni-P от содержания фосфора в сплаве без термообработки (1), после термообработки (2) при 20 А/дм² и катодно-анодном отношении β=6

Содержание фосфора в покрытии (рисунок 5) зависит от режимов осаждения – плотности тока и катодно-анодного отношения.

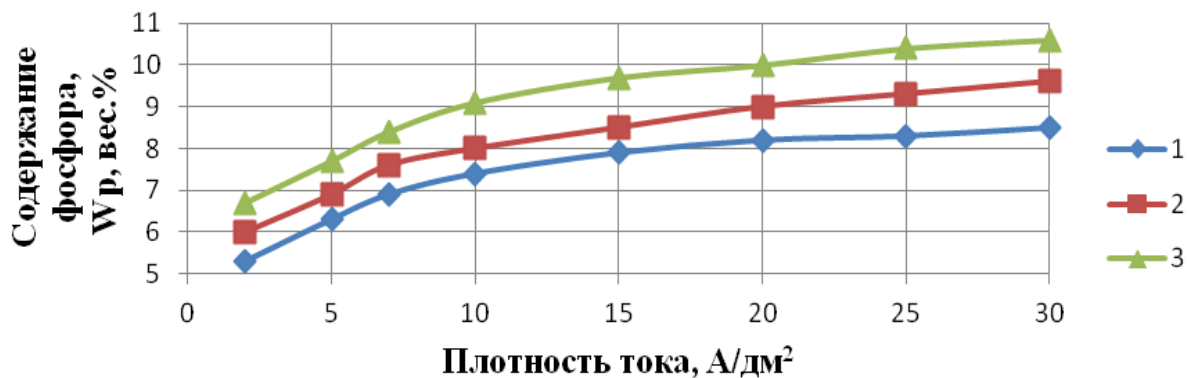


Рисунок 5 – Зависимость содержания фосфора в покрытии Fe-Ni-P от плотности катодного тока и катодно-анодного отношения при толщине покрытия 30 мкм: кривая 1 - при β=4; кривая 2 - при β=8; кривая 3 - при β=12

На асимметричном переменном токе с увеличением плотности катодного тока в интервале от 2 до 15 А/дм² и катодно-анодного отношения происходит резкое увеличение содержания фосфора в покрытии (на 2,5%), а при значениях тока от 15 до 30 А/дм² увеличение содержания фосфора происходит незначительно (на 1%). Рост катодно-анодного отношения от 4 до 12, приводит к увеличению содержания фосфора в покрытии на 1,7 %.

При увеличении концентрации гипофосфита натрия от 15 до 50 г/л в составе Fe-Ni-P электролита и при неизменной концентрации других компонентов происходит повышение содержания фосфора в сплаве Fe-Ni-P, что позволяет регулировать содержание Ni и P, физико-механические и эксплуатационные свойства осажденного слоя.

Структура покрытий Fe-Ni и Fe-Ni-P совершенная, слоисто-блочная, плотная (рисунок 6, а и 6, б). Основными фазами в сплаве Fe-Ni-P является α-Fe и β-Ni и FePO₄.

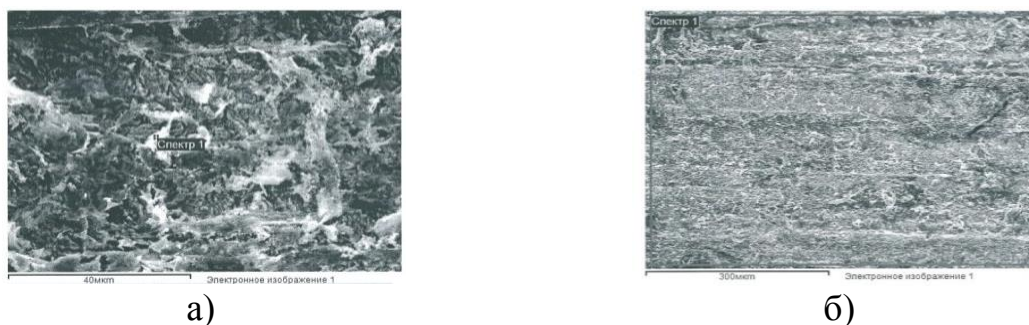


Рисунок 6 – Микроструктура поверхности железо-никелевого (а) и железо-никель-фосфорного (б) покрытий

При этом с возрастанием содержания фосфора в покрытии формируется сплошное равномерное глобулярно-сфероидальное покрытие со слоистой-блочной структурой, которое повышает значение микротвердости и износостойкости.

Покрытия Fe-Ni-P, полученные при $\beta = 1,3 - 2$, имеют твердость, которая возрастает от 850 до 890 МПа ($C_p=2,5-4,9\%$), а при $\beta=8-10$ от 8000 до 8500 МПа. Постепенное изменение катодно-анодного отношения от $\beta = 1,3$ до $\beta = 10$ дает возможность получать твердые осадки Fe-Ni сплава на мягком подслое, который образуется при электролизе на малой асимметрии переменного тока ($\beta=1,3...2$). Постепенное наращивание твердости обеспечивает не резкое, а постепенное развитие внутренних напряжений и, как следствие, удовлетворительное сцепление осадка с основным металлом.

Исследование зависимости выхода по току Fe-Ni и Fe-Ni-P сплавов показало, что с увеличением плотности асимметричного переменного тока и катодно-анодного отношения увеличивается выход металла по току. Выход по току Fe-Ni и Fe-Ni-P сплавов составляет 85-97% и 85-95%, начиная с $\beta=6$ и выше.

Результаты испытаний на изнашивание образцов, изготовленных из Ст3 без покрытия, а так же покрытых железо-никелевым и железо-никель-фосфорным сплавами, приведены на рисунке 7. У сплавов Fe-Ni и Fe-Ni-P величина износа меньше, исходя из потерь массы.

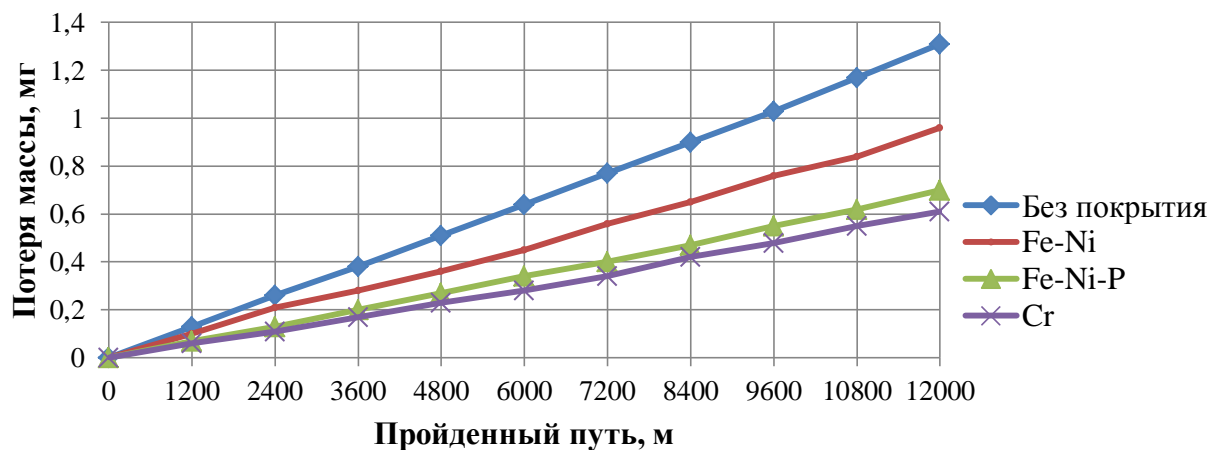


Рисунок 7 – Результаты испытаний на износ

Диаграмма значений показателя относительной интенсивности изнашивания восстановленного Fe-Ni и Fe-Ni-P и упрочненного Cr слоев приведена на рисунке 8.

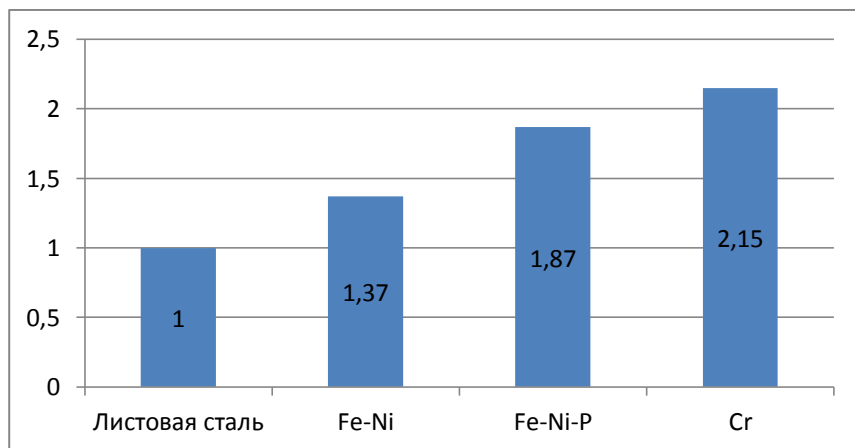


Рисунок 8 – Значения показателя относительной интенсивности изнашивания восстановленного Fe-Ni и Fe-Ni-P и упрочненного Cr слоев

Из диаграммы видно, что износостойкость железо-никель-фосфорного покрытия приближается к износостойкости покрытия хромом (меньше на 28%) и в некоторых случаях оно может быть рекомендовано к использованию без упрочняющего слоя хромом.

Количество поглощенного водорода Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытиями зависит от условий электролиза и в случае асимметричного переменного тока оно меньше, чем на постоянном токе (рисунок 9). Увеличение плотности как катодного постоянного тока, так и асимметричного переменного тока приводит к снижению количества поглощенного водорода с минимумом при 15 А/дм^2 , которое далее не изменяется как в случае Fe-Ni, так и Fe-Ni-P покрытий. При аналогичных плотностях асимметричного переменного тока по сравнению с постоянным, содержание водорода в 1,3-1,5 раза меньше, что снижает водородную хрупкость покрытия.

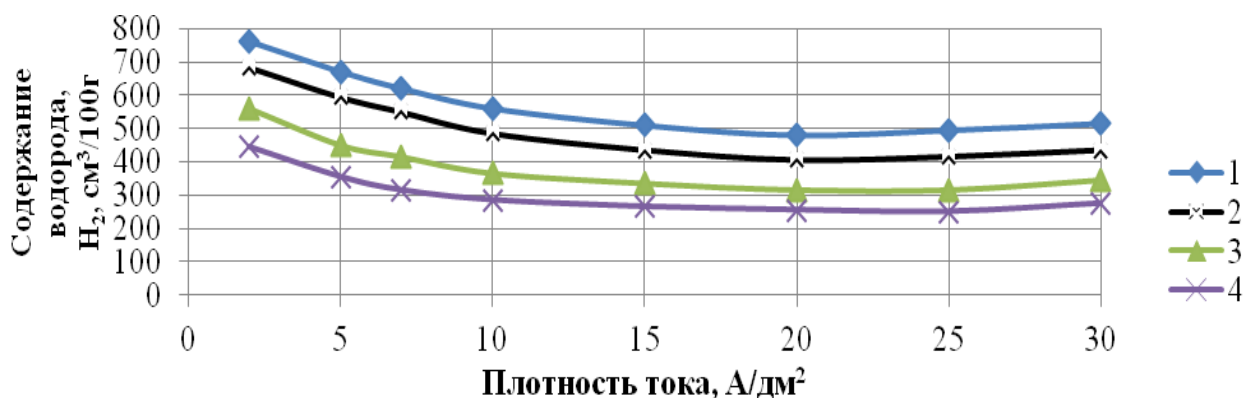


Рисунок 9 – Зависимость содержания водорода в Fe-Ni (кривые 1, 3) и Fe-Ni-P (кривые 2, 4) покрытиях на постоянном (кривые 1, 2) и асимметричном переменном токе (кривые 3, 4) при толщине покрытия 30 мкм и $\beta=6$

В пятой главе «Рекомендации производству и технико-экономическое обоснование эффективности восстановления зернопроводов» разработаны и

предложены практические рекомендации и технологические процессы (таблица 1) для восстановления и упрочнения самотечных зернопроводов электролитическими покрытиями на основе железа и хрома.

Таблица 1 – Технологические операции восстановления и упрочнения поворотных колен предлагаемого технологического процесса в сравнении с типовым

№ пп	Наименование операции типового технологического процесса	Наименование операции предложенного технологического процесса
9	Приготовление или регулирование хлоридного электролита	Приготовление или регулирование сульфатного электролита
10	Приготовление 30 % раствора серной кислоты для анодного травления	–
11	Погружение в ванну травления	Заполнение сульфатным электролитом
12	Анодное травление	Анодное травление
13	Промывка подвески с деталями в холодной проточной воде	–
14	Промывка деталей в дистиллированной воде	–
15	Электроосаждение в хлоридном электролите	Электроосаждение в сульфатном электролите

Железнение предложено выполнять Fe-Ni-P сплавом, который по прочности и долговечности приближается к хромированию. Легирование фосфором позволяет снизить выделение водорода. Использование сульфатных электролитов позволяет упростить технологию нанесения за счет исключения операций приготовления отдельного электролита для анодного травления, а так же дополнительных промывочных операций, что позволяет снизить экологическую нагрузку на производственную среду.

Эксплуатационные испытания восстановленных и упрочненных зернопроводов доказали возможность применения разработок на предприятиях, эксплуатирующих самотечное оборудование, что подтверждено актом внедрения в ООО «Воронежпищепродукт».

Экономические расчеты восстановления протертых самотечных зернопроводов электролитическим железом с легирующими компонентами никелем и фосфором, и упрочненных хромированием подтверждают целесообразность применения данного метода. В связи с тем, что долговечность восстановленного и упрочненного зернопровода увеличивается минимум в 2 раза, то при рыночной цене одного поворотного колена в 1800 рублей и себестоимости восстановления и упрочнения в 1437 рублей, экономия денежных средств составит 363 рубля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Износ деталей самотечных транспортных систем зерноперерабатывающих предприятий наиболее интенсивно происходит преимущественно в локальных местах, где зерновой поток изменяет направление движения, при этом площадь раковины от 10 до 300 см², глубина - до образования сквозных протертостей.

2. Предложены аналитические зависимости динамики изнашивания восстановленной стенки самотека, позволяющие обосновать толщину электролитического покрытия изношенной части самотека, обеспечивающую сезонную наработку, железо-никелевым $h=4,38$ мм и железо-никель-фосфорным $h=3,21$ мм сплавами, упрочнение восстановленной или новой поверхности хромированием.

3. Предложена методика восстановления изношенных участков зернопроводов электролитическими покрытиями Fe-Ni-P сплавами. Анализом микроструктуры железо-никель-фосфорного покрытия установлено: с возрастанием содержания фосфора формируется сплошное равномерное глобулярно-сфероидальное покрытие со слоисто-блочной структурой, которое обеспечивает повышение микротвердости до 8500-9500 МПа. Микротвердость поверхности увеличивается на 30% при повышении содержания фосфора от 1 до 8 %, и на 70% при повышении катодно-анодного отношения от 1,3 до 10. Потеря массы металла в результате изнашивания поверхности, восстановленной сплавом Fe-Ni-P, на 40-50% меньше поверхности зернопровода без покрытия.

4. Предложен усовершенствованный технологический процесс, преобразователь тока катодного полупериода и катодно-анодного отношения, и технологическая оснастка для восстановления и упрочнения изношенных самотечных зернопроводов покрытием Fe-Ni-P, при температуре 20-30 °С, плотности асимметричного переменного электрического тока 2-30 А/дм², при катодно-анодном отношении 1,3-10 с применением сульфатного электролита и электрода, соответствующего площади раковины.

5. Результаты исследований внедрены в учебный процесс ВГАУ им. Императора Петра Iи на ООО «Воронежпищепродукт». Долговечность восстановленного и упрочненного зернопровода увеличивается минимум в 2 раза, экономия денежных средств при восстановлении одного поворотного колена составляет 363 рубля. Экономический эффект от внедрения технологии восстановления самотечных зернопроводов в масштабах предприятия с годовым объемом 20 поворотных колена и 10 самотечных труб составляет 98 868 руб.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Предложенная технология, технологическое оборудование и оснастка рекомендуется для восстановления и упрочнения изношенных зернопроводов электролитическими покрытиями в условиях сельскохозяйственных предприятий, эксплуатирующих самотечные зернопровода.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Дальнейшие исследования направлены на углубление теоретических и практических исследований влияния режимов нанесения и составов электролита на процесс электроосаждения покрытий на основе железа, с использованием различных легирующих добавок для восстановления деталей машин и оборудования на сельскохозяйственных предприятиях.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ СОИСКАТЕЛЕМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

1. Емцев В.В. Восстановление изношенных деталей сельскохозяйственной техники гальваническими покрытиями / Н.Ю. Стекольников, Ю.А. Стекольников, В.К. Астанин, В.В. Емцев, Э.М. Санников // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2017. - № 133. - С. 173-185.

2. Емцев В.В. Износостойкость деталей, восстановленных хромированием на нестационарных режимах осаждения / В.К. Астанин, Ю.А. Стекольников, В.В. Емцев, Э.М. Санников // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета, 2017. - № 2. - С. 102-109.

3. Емцев В.В. Наводороживание основного металла и хромовых покрытий / В.К. Астанин, Ю.А. Стекольников, Н.Ю. Стеколькова, В.В. Емцев, Э.М. Санников // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева, 2018. - № 2 (38). - С. 127-136.

Публикации в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных(Scopus)

4. Emtsev V.V. Hardening parts by chrome plating in manufacture and repair / V.K. Astanin, E.V. Pukhov, Y.A. Stekolnikov, V.V. Emtsev, O.A. Golikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 327, Material Science in Mechanical Engineering, 2018.

Статьи в научных журналах и материалах конференций

5. Емцев В.В. Наводороживание в процессе хромирования при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники/ В.В. Емцев, Н.Ю. Стеколькова, Э.М. Санников, В.К. Астанин, Н.В. Кузовкин // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича., г. Воронеж, 6 апреля 2017 г. В 2-х ч. Ч. 2. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. - С. 27-31.

6. Емцев В.В. Анализ износов сельскохозяйственных машин / В.В. Емцев // Проблемы развития технологий создания, сервисного обслуживания и использования технических средств в агропромышленном комплексе: материалы международной научно-практической конференции., г. Воронеж, 15-

16 ноября 2017 г. В 2-х ч. Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 266-270.

7. Емцев В.В. Восстановление самотечных зернопроводов / В.В. Емцев, В.К. Астанин, Ю.А. Стекольников, Э.М. Санников // Фундаментальные и прикладные исследования в области естественных и технических наук по материалам международной научно-практической конференции., г. Белгород, 27 апреля, 2018. – С. 73-75.

8. Емцев В.В. Износ деталей и виды восстановления / В.К. Астанин, Ю.А. Стекольников, В.В. Емцев, Э.М. Санников // 33 международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки 21 века», 2018. - С. 38-43.

9. Емцев В.В. Оценка способов нанесения электролитических покрытий на внутренние стенки цилиндрических деталей / В.В. Емцев, В.К. Астанин, Ю.А. Стекольников, Э.М. Санников // Роль естественных и технических наук в современном обществе: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – Белгород: ООО АПНИ, 2018. – С. 91-94.

10. Емцев В.В. Применение электроосажденного Fe-Ni-P покрытия для восстановления деталей сельскохозяйственных машин / В.К. Астанин, Е.В. Пухов, Ю.А. Стекольников, В.В. Емцев // Инновации в сельском хозяйстве, 2018. - №3 (28). – С. 295-300.

Подписано в печать 25.01.2019г. Формат 60x80¹/₁₆. Бумага кн.-журн.
П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ №18904.
Типография ФГБОУ ВО ВГАУ 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.