

**Зарипов Вадим Назиуллинович**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕРЕВОДНИКОВ БУРИЛЬНЫХ КОЛОНН  
ФИНИШНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук



Москва, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (МГТУ имени Н. Э. Баумана)

Научный руководитель: **Федоров Сергей Константинович** доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Морозов Александр Викторович** доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина», заведующий кафедрой «Технология производства и ремонт машин»

**Иванников Александр Юрьевич** кандидат технических наук, ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), старший научный сотрудник лаборатории физико-химических основ металлургии цветных и редких металлов.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

Защита состоится «16» октября 2024 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок 8(499) 263-66-33 доб. 36-28

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь совета  
к.т.н., доцент



Богданов А.В.

### **Актуальность работы.**

Увеличение долговечности переводников бурильных колонн является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность работы нефтяных и газовых компаний при бурении скважин. Статистические данные эксплуатации переводников бурильных колонн (БК) свидетельствуют, что средняя наработка на отказ составляет, в лучшем случае, не более 500 циклов навинчивания-свинчивания, после чего происходит износ исполнительных поверхностей и их заменяют новыми.

Переводники бурильных колонн изготавливают из качественных среднеуглеродистых низко- и среднелегированных сталей 40ХН, 40ХГМА, 40ХН2МА, 40Х2Н4А, 38ХН3МФА (производители России); 42CrMo4V, 34CrNiMo (европейские производители); AISI4145, AISI4340 (США) на специальных трубонарезных универсальных или станках с ЧПУ. Наиболее характерными дефектами переводников являются износ наружного диаметра, задиры на упорном уступе муфты, задиры на упорном торце ниппеля, а также повреждение наружной и внутренней конической замковой резьбы. Наличие указанных дефектов приводит к нарушению непрерывности бурения скважин, возникновению неустраняемого брака, простоям буровых установок и большим экономическим потерям.

Низкая долговечность указанных участков переводников объясняется невысокой твердостью поверхностного слоя витков резьбы и контактных поверхностей ниппеля и муфты после объемной термообработки, не превышающей 28...32 НРС.

Анализом работ ведущих ученых в области повышения долговечности резьбовых соединений Жуковского Н.Е., Биргера И.А., Писаревского М.И., Иосилевича Г.Б., Северного А.Э., Якушева А.И., Якухина В.Г., Поляченко А.В. и других исследователей, установлены основные требования к геометрии и физико-механическим свойствам исполнительных поверхностей деталей с резьбой. Решение указанной проблемы невозможно без увеличения поверхностной твердости резьбы при сохранении высоких физико-механических свойств в середине витков.

Одним из эффективных технологических методов повышения долговечности деталей является электромеханическая обработка (ЭМО), основанная на одновременном термомеханическом воздействии высококонцентрированного потока электрической энергии на поверхностный слой заготовок из стали, формирующая высокую твердость и градиентную мелкодисперсную структуру. Результаты исследований и опытно-экспериментальных работ, выполненных в области ЭМО Аскинази Б.М., Багмутовым В.П., Ерохиным М.Н., Захаровым И.Н., Кряжковым В.М., Рыжовым Э.В., Морозовым А.В., Федоровой Л.В., Федоровым С.К., а также их учениками и последователями, указывают на возможность повышения долговечности высоконагруженных поверхностей переводников.

### **Цель работы**

Повышение долговечности переводников бурильных колонн посредством исследования и разработки технологии финишной ЭМО наружной и внутренней замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Выявить основные причины низкой долговечности переводников бурильных колонн и критерии выбраковки деталей при эксплуатации.

2. Выполнить комплексный анализ известных способов и схем упрочнения поверхностного слоя наружной и внутренней конической замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля переводников и определить их взаимосвязь с эксплуатационными требованиями.

3. Теоретически обосновать и экспериментально подтвердить целесообразность применения технологии финишной ЭМО наружной и внутренней конической замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля при изготовлении переводников на трубонарезных станках.

4. Обосновать и исследовать контактное термомеханическое взаимодействие инструментального ролика на изменение геометрических и точностных параметров, структуру и физико-механические свойства поверхностного слоя конической замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля переводников.

5. Провести стендовые и производственные испытания переводников после финишной ЭМО наружной и внутренней конической замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля.

6. Разработать конструкторско-технологическую документацию на оборудование, приспособления, инструмент и процессы ЭМО наружной и внутренней конической замковой резьбы переводников, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля.

7. Внедрить оборудование и технологические процессы ЭМО исполнительных поверхностей переводников и дать технико-экономическую оценку результатов внедрения в производство.

**Объект исследования.** Технологические процессы финишной ЭМО исполнительных поверхностей переводников БК из среднеуглеродистых конструкционных легированных сталей.

**Предмет исследования.** Закономерности влияния режимов финишной ЭМО наружной и внутренней замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля переводников на повышение физико-механических свойств и износостойкости.

#### **Научная новизна.**

1. Теоретически обоснованы граничные условия для формирования глубины упрочнения боковых поверхностей наружной и внутренней замковой резьбы переводников бурильных колонн при сохранении вязкой сердцевины витков, без термомеханического воздействия на впадину и прилегающие радиусные участки резьбы при плотности тока 140-260 А/мм<sup>2</sup>, усилия поджатия инструмента 180-320 Н, скорости обработки 0,6-1,8 м/мин.

2. Выявлены особенности структурообразования и установлены взаимосвязи параметров упрочненных слоев среднеуглеродистых экономно легированных сталей для резьбы ниппельной и муфтовых частей, упорного уступа муфты и

упорного торца ниппеля переводников после финишной ЭМО с формированием градиентных мелкодисперсных структур мартенсита, троостита и сорбита.

3. Исследованы закономерности влияния режимов финишной ЭМО наружной и внутренней замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля переводников бурильных колонн на точность, шероховатость и твердость упрочненного поверхностного слоя.

4. Установлено, что после финишной ЭМО износостойкость резьбы переводников увеличивается до шесть раз, в сравнении с деталями после закалки и высокого отпуска в термических печах.

#### **Основные положения, вносимые на защиту:**

1. Анализ и обобщение теоретических и экспериментальных данных по финишным методам поверхностного упрочнения наружной и внутренней резьбы, с учетом схемы нагружения и условий эксплуатации изделий;

2. Теоретические основы формирования геометрии и физико-механических свойств боковых поверхностей наружной и внутренней замковой резьбы переводников бурильных колонн путем термомеханического воздействия концентрированного потока электрической энергии промышленной частоты при финишной ЭМО;

3. Способы и технологии финишной ЭМО замковой резьбы ниппеля и муфты переводников, упорного торца ниппеля и упорного уступа муфты, рекомендации по их реализации на трубонарезных станках.

**Методология и методы исследований.** При выполнении работы использована комплексная методика исследований, включающая теоретический анализ, лабораторные, стендовые и производственные испытания образцов и переводников бурильных колонн. При теоретическом исследовании использованы законы контактного термомеханического воздействия концентрированных потоков электрической энергии на поверхностный слой боковых участков наружной и внутренней замковой резьбы, торцовые поверхности упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля переводников. Экспериментальные исследования включали в себя: определение физико-механических свойств и структуры поверхностных слоев металла образцов и деталей с использованием общепринятых методик; определение параметров, влияющих на износостойкость и прочность контактных поверхностей переводников; влияние режимов ЭМО на изменение точности и шероховатости обработанных участков переводников.

**Достоверность** полученных результатов исследований и выводов в диссертационной работе обеспечена применением установленных методов и средств исследований в соответствии с требованиями международных стандартов, подтверждена актами лабораторных и производственных испытаний.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработана и изготовлена усовершенствованная установка ЭМО, позволяющая производить финишное упрочнение наружной и внутренней конической замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля при изготовлении переводников на трубонарезных станках.

2. Разработан инструментальный узел (патент РФ № 186927), позволяющий производить центрирование инструмента по боковым поверхностям витков и обеспечивающий его установку на угол подъема витков наружной и внутренней конической замковой резьбы в процессе финишной ЭМО переводников.

3. Разработаны практические рекомендации по применению технологии финишной ЭМО исполнительных поверхностей переводников различного типоразмера.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований представлены в виде технологических рекомендаций по использованию способа финишной ЭМО наружной и внутренней конической замковой резьбы переводников на трубонарезном станке. В условиях ООО «Ковровский завод бурового оборудования» Владимирской области на испытательном стенде МС - 4 проведены испытания переводников с конической замковой резьбой 3-117, упрочненные по разработанной технологии и показавшие высокие результаты при навинчивании-свинчивании резьбовых соединений. Результаты испытаний подтверждены актом испытаний стойкости конической замковой резьбы 3-117 от 26.09.2016 года. Результаты производственных испытаний переводников П147/147, П133/133 производства ООО «НИГМАШ» республика Башкортостан, выполненных ООО «Управляющая компания «Татбурнефть» ПАО «ТАТНЕФТЬ» подтвердили высокую износостойкость резьбы упрочненной по технологии финишной ЭМО. Результаты испытаний, фиксирующие двукратное повышение количества навинчивания-свинчивания резьбовых соединений, подтверждены актом испытаний стойкости переводников от 07.09.2017 года.

Опытно-экспериментальные исследования, выполненные в ООО «ПКНМ», «ПКНМ-Краснокамск», ООО «ПФ ВЗД» г. Кунгур также подтвердили высокую эффективность технологии финишной ЭМО. Специалистами ООО «ПФ ВЗД» и учеными МГТУ им. Н.Э. Баумана выполнена финишная ЭМО наружной и внутренней конической замковой резьбы переводников (заключение от 20.06.19 г.) для ПАО «Сургутнефтегаз» (протокол испытаний №33М-19 от 08.07.19 г.).

**Апробация работы.** Результаты исследований доложены, обсуждены и получили положительную оценку на научном семинаре кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана в (Москва 2018 – 2020); VI МНТК «Проблемы и опыт разработки трудноизвлекаемых запасов нефтегазоконденсатных месторождений» С-Пб горный университет (Санкт-Петербург 2017); III МНПК «Бурение скважин в осложненных условиях» С-Пб Горный Ун-т. (Санкт-Петербург 2018); Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов "Будущее машиностроения России" МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва 2018 – 2020); МНТК, посвященной 150-летию со дня рождения академика А.А. Байкова, Юго-Западный государственный университет (Курск. 2020).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 2 публикации – в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, 3 статьи – в изданиях Scopus, 1 патент РФ на полезную модель.

**Личный вклад автора** состоит в выполнении следующих этапов диссертационного исследования: анализ научно-технической литературы и патентный поиск; анализ направлений ЭМО и обоснование применения финишной ЭМО исполнительных поверхностей переводников на трубонарезных станках; проведение исследований структуры и физико-механических свойств поверхностного слоя переводников после финишной ЭМО; исследование влияния режимов финишной ЭМО на глубину упрочнения, точность и шероховатость обработанных поверхностей; обработка и анализ результатов экспериментальных исследований, включая подготовку научных статей и выступление с докладами на научных конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы. Общий объем работы составляет 123 страницы, список литературы содержит 112 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы по повышению долговечности переводников бурильных колонн посредством разработки оборудования и совершенствования технологии финишной ЭМО исполнительных поверхностей наружной и внутренней конической замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля с учетом условий их эксплуатации и схемы нагружения в процессе эксплуатации.

**В Главе 1** представлены результаты научно-технического обзора, анализа научных работ Российских и зарубежных ученых, обзор патентного поиска по применению известных способов и оборудования для повышения долговечности деталей с резьбой.

При выборе финишного метода обработки переводников ЭМО необходимо исходить из следующих особенностей и преимуществ его перед другими способами:

- отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности, связанное с тем, что термомеханический цикл "нагрев-выдержка-деформирование-охлаждение" происходит за сотые доли секунды, а сам процесс протекает только в зоне контакта;
- возможность обработки ограниченных участков, без термомеханического воздействия на остальные поверхности детали;
- индивидуальный подход к каждой конкретной поверхности, с учетом схемы нагружения и условий эксплуатации;
- возможность обработки пустотелых и длинномерных деталей и их отдельных поверхностей без нарушения геометрических параметров обработанных участков, при минимальном уровне термического воздействия;
- обработанные поверхности имеют высокое качество, их отличает однородность структуры и механических свойств по сечению и длине поверхности;
- используя оборудование и совершенствуя оснастку для электромеханической обработки можно получать изделия различной конфигурации и типоразмера;
- экологическая чистота и электробезопасность процессов.

Незначительный срок эксплуатации переводников БК приводит только к износу их контактных поверхностей и не сопровождается дефектами усталостного характера. Поэтому особенностью финишной ЭМО резьбы переводников является необходимость упрочнения только боковых поверхностей и вершин витков. Износ резьбы соединения «переводник-бурильная труба», в большинстве случаев, не связан с удалением части металла поверхностного слоя, а проявляется в виде искажения формы витков, наличия задигов на боковых контактных поверхностях двух-трех наиболее нагруженных витков. Дальнейшая эксплуатация таких деталей запрещена, а зачастую и не возможна по причине ее технического состояния. Учитывая данное обстоятельство необходимо технологическими методами, на стадии изготовления обеспечить более высокие показатели качества витков резьбы по твердости, структуре и глубине упрочнения поверхностного слоя.

Существующие технологии изготовления переводников этого не обеспечивают, о чем свидетельствуют статистические результаты эксплуатации и характерные дефекты деталей. При износе исполнительных поверхностей переводники утилизируются и восстановлению не подлежат.

**В Главе 2** приведены теоретические предпосылки повышения долговечности переводников бурильных колонн финишной электромеханической обработкой результаты термомеханического взаимодействия инструментального ролика с боковыми поверхностями наружной и внутренней конической замковой резьбы. Выполнен расчет площади пятна контакта инструмента и резьбы; эмпирически выведена формула для определения глубины закаленного слоя витков резьбы; выполнено планирование экспериментов при поиске оптимальных режимов финишной ЭМО боковых поверхностей резьбы переводников.

При электромеханической обработке наружной и внутренней замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорном торца ниппеля ( $F_{ЭМПЗ}$ ) необходимо обеспечить оптимальные температурные  $X_1$ , временные  $X_2$ , скоростные  $X_3$ , силовые  $X_4$ , технологические  $X_5$  показатели технологических процессов ЭМО (1).

$$F_{ЭМПЗ} = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \rightarrow \max \quad (1)$$

Проблему повышения эксплуатационных свойств резьбовых соединений необходимо решать на основе комплексного подхода, с учетом конструктивных ( $f_k$ ), технологических ( $f_T$ ) и эксплуатационных ( $f_3$ ) факторов:

$$f = f_k + f_T + f_3 \quad (2)$$

В данной работе на основе известных конструктивных и эксплуатационных факторов рассмотрено технологическое направление повышения качества поверхностей ЭМО:

$$f_T = f_{T1}(d_2, d, d_1, d_3; \alpha, \alpha/2; R) \cdot f_{T2}(f_p, f_\alpha, H, T_{d2}, T_{d1}) \cdot f_{T3}(R_z, S, S_m, t_p, R_{max}, R_a) \cdot f_{T4}(HV, \sigma_b, \sigma_{0,2}, \delta, \sigma_s) \cdot f_{T5}^5(\sigma_{-1}) \cdot f_{T6}(Ок., Об.) \cdot f_{T7} \cdot f_{T8}^8 \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $f_{T1}$  – геометрические параметры;  $f_{T2}$  – параметры точности;  $f_{T3}$  – параметры шероховатости;  $f_{T4}$  – механические свойства;  $f_{T5}$  – физические свойства;  $f_{T6}$  – химические свойства;  $f_{T7}$  – технологические свойства;  $f_{T8}$  – структурные показатели.

Финишная ЭМО исполнительных поверхностей переводников осуществляется инструментальным роликом, деформирующие элементы которого взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью по схеме качения. Упрочнение осуществляется высокотемпературным источником нагрева с равномерно

распределенной плотностью теплового потока, движущегося по поверхностям переводника. При этом необходимо стабилизировать температурную деформацию в зоне контакта “инструмент-поверхность” и обеспечить выполнение следующих условий:

– температура контактного нагрева в зоне упрочнения ( $T_H$ ) должна быть больше температуры, при которой происходят фазовые изменения материала детали ( $T_\phi$ ):

$$T_H > T_\phi \quad (4)$$

– время выдержки ( $t_b$ ) должно быть достаточным, чтобы обеспечить протекание термомеханического взаимодействия ( $t_T$ ) инструмента с обрабатываемой поверхностью:

$$t_b = t_T \quad (5)$$

– скорость охлаждения ( $v_o$ ) должна быть выше критической скорости, при которой происходит поверхностная закалка ( $v_3$ ). Для этого необходимо, чтобы количество тепла, которое способна “поглотить” технологическая система, было бы больше требуемого для охлаждения с протеканием фазовых изменений:

$$v_o \geq v_3 \quad (6)$$

– давление ( $Q$ ) в зоне контакта должно быть таковым, чтобы обеспечить протекание термодинамического эффекта ( $Q_T$ ) при деформировании микронеровностей с формированием оптимальной текстуры волокон металла, а также при отсутствии искажения геометрической формы поверхностей и нарушения точности их взаимного расположения:

$$P = P_T \quad (7)$$

Усилие в зоне контакта “инструмент-резьба” в режиме финишной ЭМО определяется из условия:

$$P = \omega \cdot k \cdot \sigma'_B \cdot F \left( \frac{R_z}{R_z - a} \right)^m, \quad (8)$$

где  $\omega = 1,2 \dots 1,6$  коэффициент, зависящий от скорости обработки;  $k = 0,9$  – коэффициент, характеризующий отношение между пределом текучести и временным сопротивлением металла детали;  $\sigma'_B = 0,1\sigma_B$  – отношение предела прочности при ЭМО и временное сопротивление металла в холодном состоянии;  $m = 1,2$  – показатель политропы сжатия при нагреве стали;  $a$  – глубина внедрения инструмента в резьбу (для ЭМО резьбы  $a \approx 0,25R_z$ );  $F$  – площадь пятна контакта «инструмент-резьба».

– геометрические параметры инструментального ролика и профиля резьбы должны быть идентичны.

Анализ теплового баланса показал, что общее количество теплоты при финишной ЭМО складывается из теплоты, выделяемого проходящим электрическим током  $Q_1$  и теплоты от трения качения инструмента об обрабатываемую поверхность  $Q_2$ :

$$Q_{ЭМО} = Q_1 + Q_2, \quad (9)$$

С учетом потерь во вторичной электрической цепи:

$$Q_1 = \eta I_2 U_2 \tau, \quad (10)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий потери электрического тока во вторичной цепи;  $I_2$  – сила тока во вторичной цепи, А;  $U_2$  – напряжение вторичной цепи, В;  $\tau$  – время обработки, с.

Величина  $Q_2$  определяется по формуле:

$$Q_2 = P_{\text{и}} H f_k / 102, \quad (11)$$

где  $P_{\text{и}}$  – усилие в зоне контакта инструмент–поверхность;  $H$  – высота высокотемпературной зоны;  $f_k$  – коэффициент трения качения при установившемся процессе. Учитывая, что процессы ЭМО поверхностей переводника выполняются при скоростях обработки 0,6...1,2 м/мин,  $P_{\text{и}}=200...400\text{Н}$ ,  $f_k=0,6...0,8$  при  $H=0,2...0,4$  мм величиной  $Q_2$  можно пренебречь.

Общее количество теплоты, выделенной в зоне контакта, определяется по закону Джоуля-Ленца:

$$Q_{\text{ЭМО}} = 0,24 I_2 U_2 \tau \quad (12)$$

Количество теплоты  $Q_T$ , поглощаемого в высокотемпературной зоне обрабатываемой поверхности переводника и инструмента за время обработки  $\tau$ :

$$Q_T = 0,24 I_2 U_2 \tau k_{\text{п}} k_{\text{и}}, \quad (13)$$

где  $k_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{и}}$  – коэффициенты, учитывающие отвод тепла соответственно в переводник и инструмент.

С другой стороны, исходя из уравнения теплового баланса:

$$Q_T = g C T_T, \quad (14)$$

где  $g = H\delta V\gamma$  – масса высокотемпературного объема, кг;  $C$  – удельная теплоемкость металла, Дж/кг °С;  $T_T$  – температура фазовых превращений металла, °С;  $V$  – ширина высокотемпературной зоны, м;  $\delta$  – глубина упрочнения, м;  $\gamma$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>. Следовательно:

$$Q_T = H \delta V \gamma C T_T \quad (15)$$

Приравнявая одно значение  $Q_T$  к другому получим:

$$0,24 \eta I_2 U_2 \tau k_{\text{п}} k_{\text{и}} = H \delta V \gamma C T_T \quad (16)$$

Зависимость (16) справедлива для ЭМО с получением структуры закалки и позволяет определить значения  $\delta$ ,  $P_{\text{и}}$ ,  $\tau$  исходя из экспериментально установленных режимов обработки.

Анализ эксплуатаций замковых резьбовых соединений и контактных поверхностей переводников показал, что интенсивный износ приходится на сопрягаемые поверхности, поэтому необходимо и достаточно упрочнение непосредственно площади контакта поверхностей. Для решения данной задачи разработаны схемы электромеханического упрочнения наружной и внутренней резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля.

Зона термомеханического взаимодействия инструментального ролика с обрабатываемой поверхностью представляет собой полосовой контакт. Считаем, что процесс термомеханического влияния на переводник проходит равномерно по всей площади контакта. Зона активного тепловыделения при обработке является закрытой для конвективного и лучевого теплообмена. Непосредственно в зоне контакта отсутствует влияние охлаждающей жидкости на процесс тепловыделения. На рисунке 1 отражен процесс ЭМО поверхности переводника движущимся полосовым высокотемпературным источником.

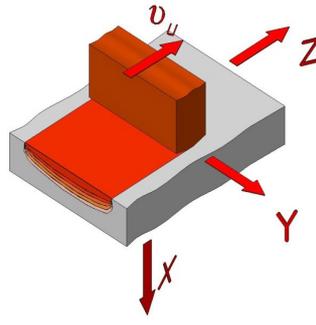


Рисунок 1.

Расчетная схема определения температурного поля при финишной ЭМО

Таким образом, задача сводится к определению температурного поля закрытого контактного источника с теплообменом на свободной поверхности. В данном случае можно применить теорию быстродвижущегося источника и расчеты вести по методике расчетов тепловых процессов, предложенных профессором Рыкалиным Н.Н.

На рисунке 1 видим, как по поверхности полубесконечного тела, где имеется теплообмен, с постоянной скоростью  $v_u$  движется закрытый полосовой источник в положительном направлении оси  $Z$ . Плотность теплового потока  $q$  принимаем по всей площади контакта распределенной равномерно.

Математическая задача о нахождении температурного поля в поверхностном слое, нагреваемом непрерывным электрическим током  $q$ , движущимся по поверхности детали со скоростью  $v_u$  решали на основе дифференциального уравнения теплопроводности в пространстве:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + v_u \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (17)$$

С начальными и граничными условиями следующего вида:

$$T|_{t=0}, \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\infty} = 0; -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \Big|_{|z|>h} + \alpha T \Big|_{x=0} \Big|_{|z|>h} = 0, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \Big|_{|z|>h} = q = const \quad (18)$$

С целью удобства решения задачи вводим безразмерные комплексы:

$$\frac{V(z-z')}{2a} = \varepsilon, \frac{v_u z}{2a} = Z, \frac{v_u x}{2a} = X, \frac{v_u h}{2a} = H, \quad (19)$$

а также обозначения безразмерной температуры  $\psi$ , характеризующей закон распределения температуры, и безразмерный коэффициент теплообмена  $\beta$ , характеризующий интенсивность теплообмена:

$$\psi = \frac{\pi \lambda v_u T}{2qa}, \beta = \frac{2\alpha a}{\lambda v_u} \quad (20)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности слоя, Вт / (см · °С);  $a$  – коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/с;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/ (см<sup>2</sup> · °С);  $q$  – плотность теплового потока, Вт/см<sup>2</sup>.

Граничные условия в новых обозначениях:

$$\frac{\partial \psi}{\partial X} \Big|_{X=0} \Big|_{|Z|>H} = \beta \psi \Big|_{x=0} \Big|_{|z|>h}, - \frac{\partial \psi}{\partial X} \Big|_{X=0} \Big|_{|Z|<H} = \pi - \beta \psi, \quad (21)$$

Сформулируем задачу о нахождении температурного поля в некотором объеме (в нашем случае по линии непосредственного контакта рабочей поверхности резбового ролика и профиля резьбы), нагреваемом тепловым источником, движущимся со скоростью  $v$  и подачей  $S$ , на основе дифференциального уравнения теплопроводности в пространстве.

Порядок расчета температурных полей при финишной ЭМО:

1. Подобрать теплофизические, энергетические и кинематические параметры, характеризующие процесс, и применяемые материалы.
2. Определить скорость движения теплового источника.
3. Определится площадь контакта инструмента и заготовки.
4. Определить плотность теплового потока  $q$  по формуле:

$$q = \frac{N}{S_{п.к.} \cdot \tau} \cdot n = \frac{\eta \cdot I \cdot U}{S_{п.к.} \cdot \tau} \cdot n, \left[ \frac{Дж}{см^2 \cdot с} \right], \quad (22)$$

где  $N$  – мощность теплового источника, Вт;  $S_{п.к.}$  – площадь зоны теплового контакта,  $см^2$ ;  $\tau$  – время термомеханического воздействия, с;  $n$  – коэффициент, показывающий долю тепла, проникающего в переводник:

$$n = \frac{K_{\epsilon}}{1+K_{\epsilon}}, \quad (23)$$

где  $n$  – отношение тепловых активностей инструмента по отношению к заготовке, исходя из научных трудов Лыкова А.В.

$$n = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \gamma_1}{\lambda_2 c_2 \gamma_2}} \quad (24)$$

Теплофизические параметры  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\gamma$  с индексами 1 и 2 характеризуют, соответственно, обрабатываемое изделие и материал инструмента.

5. Рассчитать безразмерную полуширину теплового источника  $H = \frac{v_u \cdot h}{2a}$
6. Рассчитать значение безразмерной температуры  $\psi$ .
7. Определить расчетную температуру по формуле

$$T = \frac{2qa}{\pi \lambda v_u} \cdot \psi, \text{ } ^\circ C \quad (25)$$

При этом необходимо обеспечить закалку поверхностного слоя, формировать текстуру волокон металла вытянутую вдоль профиля, обеспечить точность и исключить явления искажения геометрической формы витков резьбы. Для этого необходимо выполнение следующих условий:

На рисунке 2 показана схема финишной ЭМО для определения площади пятна контакта при обработке детали  $Rd$  роликом имеющим радиус  $Rp$ . Площадь контакта  $F$  недеформируемого инструмента с пластичной поверхностью резьбы определяли из условия пересечения поверхностей в двух проекциях:

$$F = L_n \cdot L_k \quad (26)$$

где  $L_n$  – величина контакта по периметру резьбы, мм;  $L_k$  – длина дуги контакта, мм.

Площадь пятна контакта при ЭМО резьбы инструментальным роликом:

$$F = R_p \sin \sqrt{\frac{R_d^2 - X^2}{R_p(1,23P - 1,1R)}}, \quad (27)$$

где  $X = R_d - (2H_{BH} R_p - H_{BH}^2) / 2(R_d - H_{BH} + R_p)$ ;  $H_{BH} = 0,708H + (\Delta + \Delta\rho)$ ;

$\Delta$  – пластическая деформация;  $\Delta\rho$  – упругая деформация;  $H$  – высота исходного треугольного профиля резьбы;  $P$  – шаг резьбы.

Используя зависимость (27), можно определить пятно контакта для широкой номенклатуры деталей с замковой резьбой различного типоразмера.

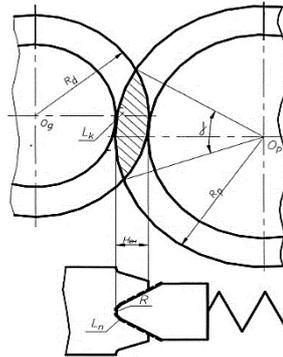


Рисунок 2.

Схема определения площади пятна контакта инструмента с замковой резьбой переводника при финишной ЭМО

В Главе 3 приведена общая методика исследований процессов финишной ЭМО наружной и внутренней конической замковой резьбы, упорного уступа муфты, упорного торца ниппеля переводников.

Химический анализ образцов проводили на лазерном атомно-эмиссионном спектрометре «ЛАЭС». Шлифы готовили по стандартной методике на оборудовании для пробоподготовки Stuers. Травление образцов осуществляли в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver.D1m при увеличениях от 200 до 1000 крат. Микротвердость измеряли на твердомере DuraScan 70 при нагрузке 100 грамм. Микрошлифы готовили по традиционной методике - шлифованием, полированием, травлением. Резку образцов производили на установке Discotom – 6. Для резки образцов использовались отрезные диски 40A25. Нарезанные образцы после удаления грубых заусенцев с помощью алмазных надфилей разной зернистости запрессовывали в смолу Durofast на установке CitoPress-20

Полировка и шлифование производились на специальной установке с поэтапным использованием шлифовальных и полировальных дисков разной зернистости. После каждого этапа образцы и установку промывали для удаления частиц металла. Полирование выполняли на диске с сукном смачиваемом водной суспензией, содержащей абразивные частицы с размером 9 мкм, 3 мкм, 1 мкм. Травление шлифов проводили в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте.Metalлографические исследования проводили на микроскопе GX-51 фирмы OLYMPUS при различных увеличениях. Измерение микротвердости образцов

проводили на приборе DuraScan вдавливанием алмазной пирамиды при нагрузке 98 Н.

Измерение геометрических параметров резьбы проводили на контурографе модели 220 ТУ 3943-005-70281271-2011, ГР58193-14 компании «Завод Протон».

Контроль точности резьбы ниппеля выполняли резьбовыми калибрами с использованием микрометрического нутромера точностью 0,01 мм. Контроль технического состояния резьбы муфты проводили резьбовой пробкой.

**Глава 4** посвящена выбору схемы и отработке режимов финишной ЭМО наружной и внутренней конической замковой резьбы переводников, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля.

На Рисунке 4, а представлены результаты измерения микротвердости витков резьбы из сталей 40ХН, 40ХГМА, 40ХН2МА, 40Х2Н4А, 38ХН3МФА после финишной ЭМО. После финишной ЭМО более чем в три раза повышается твердость, формируется мелкодисперсная мартенситная структура поверхностного слоя (Рисунок. 4, б), что в целом увеличивает прочность витков, препятствует пластическому деформированию и повышению задиростойкости резьбового соединения.

Уравнение регрессии экспериментальных исследований по влиянию плотности тока во вторичной цепи ( $X_1$ ), усилия прижатия инструмента ( $X_2$ ) и скорости обработки ( $X_3$ ) на глубину упрочнения, в кодированных значениях факторов имеет вид (29-31) (Рисунок 5, Рисунок 6, Рисунок 7).

Таблица 1.

Результаты стендовых испытаний переводников с резьбой 3-117

Наименование показателей	Улучшение заготовки	Улучшение и финишная ЭМО	Карбонитрация
Твердость, НРС	32-36	52-56 – на поверхности, 32-36 – в середине	52-56 – на поверхности, 32-36 – в середине витков
Кол-во циклов испытаний, шт.	47- 66	500	500
Состояние резьбы	Задиры	Резьба без повреждений	Резьба без повреждений
Прочие дефекты	Задиры на торце муфты и упорном буртике ниппеля	Средний износ торца муфты и упорного буртика ниппеля	Незначительный износ торца муфты и упорного буртика ниппеля
Рыночная цена образца, руб.	350	600	1200

Стендовые испытания при навинчивании-свинчивании резьбовых соединений переводников, проведенные в ООО «Ковровский завод бурового оборудования» подтвердили эффективность технологии финишной ЭМО в Таблице 1.

Исследования проведены на переводниках с замковой резьбой 3-133 в ООО «ПКНМ-Урал» г. Краснокамск. Финишная ЭМО резьбы, торца муфты и упорного буртика ниппеля переводников выполнена на станке СА983Ф3.

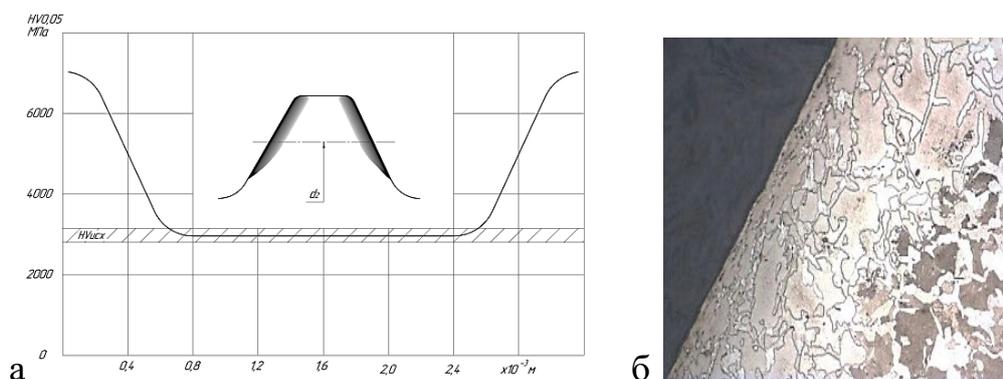


Рисунок 4.

Изменение микротвердости (а) и микроструктура (б) витков замковой резьбы в сечении среднего диаметра после финишной ЭМО

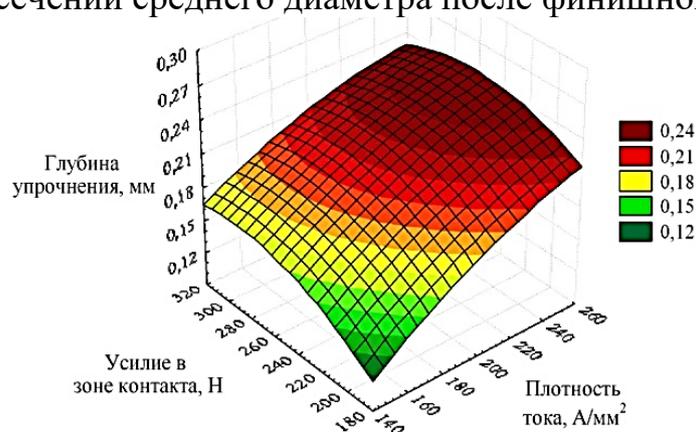


Рисунок 5.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия плотности тока  $X_1$  и усилия прижатия  $X_2$  инструмента в натуральных значениях факторов

$$\delta = 0,2115 + 0,0422 X_1 + 0,0213 X_2 - 0,0004 X_1^2 + 3,8189 \cdot 10^{-7} X_1 X_2 - 0,0002 X_2^2 \quad (29)$$

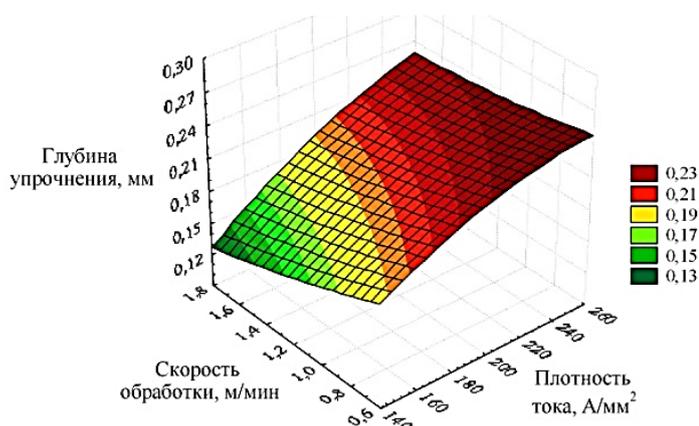


Рисунок 6.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия плотности тока  $X_1$  скорости обработки  $X_3$  натуральных значениях факторов

$$\delta = 0,2067 + 0,0422 X_1 - 0,0147 X_3 - 0,0004 X_1^2 + 6,6147 \cdot 10^{-7} X_1 X_3 + 0,0001 X_3^2 \quad (30)$$

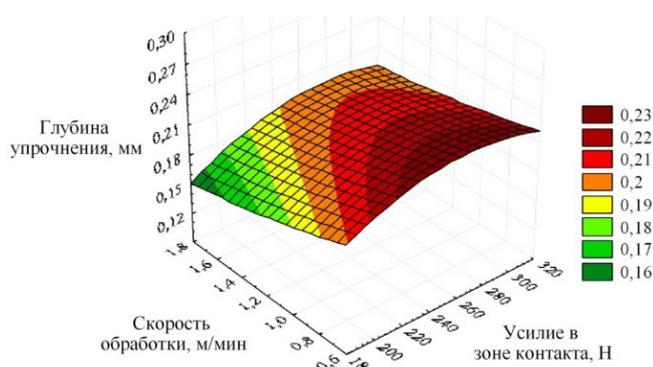


Рисунок 7.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия усилия в зоне контакта  $X_2$  и скорости обработки  $X_3$  в натуральных значениях факторов

$$\delta = 0,2078 + 0,0213 X_2 - 0,0147 X_3 - 0,0002 X_2^2 + 3,2596 \cdot 10^{-7} X_2 X_3 + 0,0001 X_3^2 \quad (31)$$

В Главе 5 приведены технологические особенности финишной ЭМО переводников, результаты испытаний переводников П-133/133, П – 147/147 при бурении нефтяных скважин в ООО «УК «Татбурнефть», а также технико-экономическая эффективность исследований.

Для финишной ЭМО разработан инструментальный узел позволяющий производить установку инструмента на угол подъема витков наружной и внутренней конической замковой резьбы (патент РФ №186927).

При финишной ЭМО резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля переводников (Рисунок 8) заготовку устанавливают и закрепляют в патроне трубонарезного станка, и ей сообщается главное движение вращения  $D_r$ . Инструментальный ролик устанавливают и прижимают к поверхности заготовки с фиксированной силой.

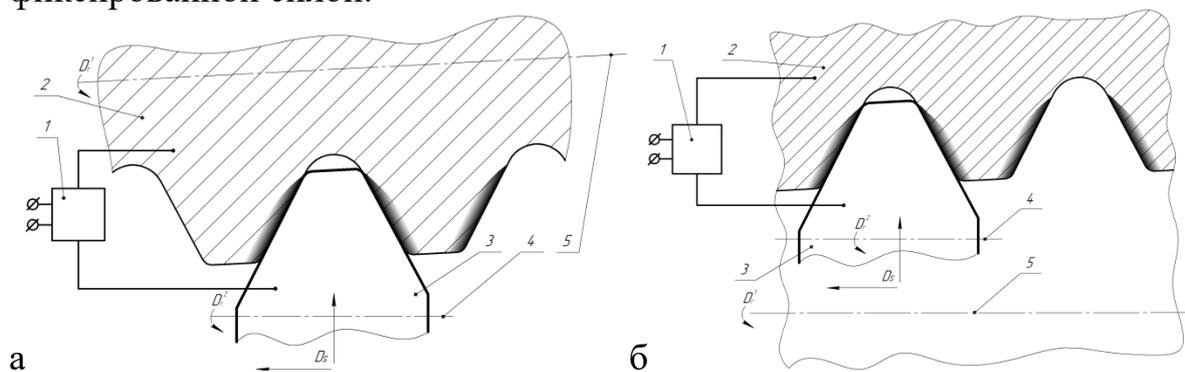


Рисунок 8.

Схема финишной ЭМО конической замковой резьбы ниппельной (а) и муфтовой (б) частей переводника: 1 – установка ЭМО; 2 – заготовка переводника; 3 – ролик инструментальный; 4 – ось инструментального ролика; 5 – ось заготовки переводника

В условиях ООО «УК«Татбурнефть» проведены эксплуатационные испытания переводников П-133/133, П-147/147 производства ООО «ПТФ НИГМАШ», изготовленных из стали 40ХН2МА, с конической замковой резьбой после финишной ЭМО.

Результаты испытаний свидетельствуют, что при бурении скважин после 978 циклов (норматив 500) навинчивания-свинчивания переводников П-147/147, износа наружной и внутренней замковой резьбы, упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля не зафиксировано.

**В Главе 6** приведено технико-экономическое обоснование исследований.

#### **Основные выводы**

1. Установлено, что основной причиной низкой долговечности переводников бурильных колонн является износ наружной и внутренней конической замковой резьбы, из-за невысокой твердости (32...36 HRC) и недостаточной прочности витков после объемной термической обработки, а также из-за износа (задиры) на упорном торце муфты и на упорном уступе ниппеля.
2. Разработана технология и оборудование (патент РФ № 186927) финишной ЭМО, позволяющие повысить долговечность переводников бурильных колонн за счет увеличения износостойкости наружной и внутренней конической замковой резьбы, упрочнения упорного торца муфты и упорного уступа ниппеля на трубонарезных станках.
3. Выведена формула для расчета глубины закаленного слоя после финишной ЭМО боковых поверхностей витков конической замковой резьбы, а также выполнено математическое планирование по влиянию плотности электрического тока во вторичной цепи, скорости обработки и усилия в зоне термомеханического контакта «инструмент-боковые поверхности замковой резьбы» на глубину упрочнения.
4. Проведены экспериментальные исследования и стендовые испытания переводников после финишной ЭМО в ООО «Ковровский завод бурового оборудования», в ООО «ПКНМ-Урал» г. Краснокамск, которые свидетельствуют о полном соответствии геометрических параметров конической замковой резьбы требованиям ГОСТ Р 50864-96, ГОСТ 28487-2018, стандарту Американского нефтяного института API 7.
5. Проведена независимая оценка результатов финишной ЭМО резьбы ниппельной и муфтовых частей бурильных труб ТБПК 127x9,2 (протокол исследований №33М-19 от 08.07.2019 г.), дополнительно указывающая на увеличение твердости поверхностного слоя с 28...32 HRC до 52...56 HRC на глубине до 0,24 мм с получением градиентной мелкозернистой структуры мартенсита глубиной до 0,10 мм, а также на полное отсутствие трещин и наличия упрочненных боковых участков резьбы.
6. Испытания переводников П147/147, П133/133 верхнего привода буровой колонны производства ООО «НИГМАШ», в условиях ООО «Управляющая компания «Татбурнефть» ПАО «ТАТНЕФТЬ», показали, что после финишной ЭМО, количество циклов свинчивания-развинчивания резьбовых соединений увеличилось на 60 %. (акт испытаний стойкости переводников от 07.09.2017 года).
7. Подтверждена эффективность технологии финишной ЭМО наружной и внутренней конической замковой резьбы переводников и повышения износостойкости резьбового соединения с замковой резьбой «ниппель-муфта», а также упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля.

8. Результаты исследований внедрены в ООО «ПФ ВЗД» г. Кунгур при финишной ЭМО исполнительных поверхностей переводников (заключение от 20.06.2019 г.).

**Основные положения диссертации отражены в работах:**

**Публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ:**

1. Повышение долговечности переводников бурильных колонн электромеханической обработкой / В.Н. Зарипов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2020, № 10 (727), С. 38-46. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
2. Исследование структуры среднеуглеродистых сталей после электромеханической обработки / В.Н. Зарипов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. №10, С. 473-477. (0,3 п.л./0,2 п.л.)
3. The effect of combined processing schedules on the value and nature of residual stresses in the surface layer of cylindrical friction pairs / V. Zaripov [and other] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P.1-8. (0,4 п.л./0,2 п.л.)
4. Increasing the wear resistance of the executive surfaces of machine parts concentrated energy flows / V. Zaripov [and other] // Materials Today: Proceedings. 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019. Amsterdam, 2021. P. 388-392. (0,3 п.л./0,1 п.л.)
5. Improving wear resistance of drill pipe sub thread by using final electromechanical surface hardening / V. Zaripov [and other] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 963, Modern power engineering (MPMB 2020). Moscow, Russian Federation. 2020. P 1-8. (0,5 п.л./0,3 п.л.)
6. Инструментальный узел для электромеханической обработки резьбы: пат. 2018106130 Рос. Федерация. №186927 U1 / В.Н. Зарипов [и др.]; заявл. 19.02.2019; опубл. 11.02.2019. Бюлл. №5. 6 с. (0,4 п.л./0,2 п.л.)
7. Зарипов В. Н., Хуснетдинов Т.Р., Федоров С.К. Повышение долговечности переводников бурильных колонн электромеханической обработкой. В сб.: Будущее машиностроения России: М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. С. 342-345. (0,3 п.л./0,2 п.л.)
8. Повышение износостойкости деталей с резьбой / В.Н. Зарипов [и др.] // РИТМ машиностроения. 2018. №7. С. 38-40. (0,2 п.л./0,1 п.л.)
9. Физико-механические свойства поверхностного слоя деталей после упрочнения электромеханической обработкой / В.Н. Зарипов [и др.] // Главный механик.2019. №2(186). С.26-31. (0,4 п.л./0,2 п.л.)
10. Повышение долговечности резьбовых соединений электромеханической обработкой / В.Н. Зарипов [и др.] // В сб.: Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов. Юго-Западный государственный университет г. Курск. 2020. С. 228-231. (0,3 п.л./0,1 п.л.)
11. Зарипов В.Н., Федоров С.К. Технологическое обеспечение и повышение долговечности переводников бурильных колонн электромеханической обработкой. В сб.: Будущее машиностроения России: М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2020. С. 265-267. (0,2 п.л./0,1 п.л.)