

На правах рукописи



САЛИХЯНОВ Денис Ринатович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СЛОИСТЫХ ИЗДЕЛИЙ И
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НАСОСНО-
КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ В КОРРОЗИОННОСТОЙКОМ ИСПОЛНЕНИИ**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Богатов Александр Александрович

Официальные оппоненты: **Залазинский Александр Георгиевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБУН Институт машиноведения Уральского
отделения Российской академии наук, заведующий
лабораторией системного моделирования;

Серебряков Андрей Васильевич,
кандидат технических наук, ОАО «Первоуральский
новотрубный завод», начальник группы новых видов
труб для атомной энергетики


Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

Защита состоится «18» декабря 2015 г. в 14:00 ч на заседании
диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по
адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2>

Автореферат разослан «___» ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мальцева Людмила Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В России ежегодно добывается более 500 млн. т. нефти, эксплуатируется 150 тыс. добывающих нефтяных скважин. Эксплуатационный фонд насосно-компрессорных труб (НКТ) в нефтяной промышленности России составляет 3,5 млн. т. Трубная промышленность России и поставки труб по импорту ежегодно предоставляют нефтегазовому комплексу 430 – 450 тыс. т. НКТ, в том числе нефтяным компаниям 350 тыс. т. На укомплектование вновь построенных нефтяных скважин требуется 120 – 130 тыс. т., остальные 220 – 230 тыс. т. используются на замену изношенных. Как показывает практика, долговечность НКТ зависит от условий эксплуатации, выбора материала труб и способа защиты нефтедобывающего оборудования.

В условиях осложненной добычи нефти, из-за интенсивного воздействия агрессивных сред в совокупности с эксплуатационными нагрузками наиболее расходуемым материалом являются НКТ среди прочего вида внутрискважинного оборудования. Анализ коррозионных разрушений показал преобладающую долю локальных язвенных повреждений. Выход из строя труб несет в себе как прямые потери, связанные с ремонтом или заменой труб на новые, так и косвенные, связанные с простоем скважин. По этой причине, проблема повышения эксплуатационного ресурса НКТ является давно назревшей и одной из самых актуальных в нефтедобывающей отрасли.

В целях сохранения металлофонда и повышения срока службы НКТ требуются новые инновационные способы повышения их эксплуатационных характеристик. Мировая практика показывает высокую эффективность применения слоистых композиционных материалов взамен монометаллических. За счет использования двух разнородных металлов удается более полно удовлетворить всем выдвигаемым требованиям по механической прочности и коррозионной стойкости труб.

Применительно к нефтедобывающей отрасли использование биметаллических или композиционных труб позволяет использовать недорогую

углеродистую сталь, имеющей невысокое сопротивление коррозионному разрушению, в качестве основы, а дорогостоящую коррозионностойкую сталь в качестве внутреннего тонкого плакирующего слоя, контактирующего с агрессивной средой. В результате срок эксплуатации многократно увеличивается при незначительном увеличении стоимости труб. Получение слоистых композиционных труб возможно несколькими принципиально разными путями: формовка и продольная сварка биметаллического листа, жидкостная диффузионная сварка по поверхностям разделов, сварка взрывом, центробежное литье труб, горячее изостатическое прессование и т. д., в том числе и лейнирование, которое заключается в совместной раздаче внешней трубы и внутренней коррозионностойкой вставки. В нефтегазодобывающей отрасли имеется положительный опыт испытаний опытно-промышленных партий труб из слоистых композиционных материалов в береговых и морских нефтяных скважинах. Такие трубы преимущественно изготавливают совместной гидравлической раздачей на гидропрессах, однако у существующих способов имеются недостатки. Основной проблемой при производстве лейнированных труб является обеспечение герметичности межтрубного зазора, надежного сцепления оболочек друг с другом и изоляция разнородных металлов.

В работе предложена технология производства лейнированных (слоистых композиционных) труб с использованием в качестве внешней оболочки НКТ, исчерпавшие первоначальный эксплуатационный ресурс как исходное сырье. Это позволяет повторно ввести в эксплуатацию трубы, исчерпавшие первоначальный эксплуатационный ресурс и списанные по этой причине в металлолом, и, тем самым, многократно повысить эксплуатационный ресурс НКТ. В основе технологии получения таких труб лежит совместная раздача на оправке насосно-компрессорных труб, бывших в эксплуатации, внутренней тонкостенной коррозионностойкой трубы-вставки (лейнера) и слоя герметика между ними на трубоволоочильном стане-расширителе.

Как показал аналитический обзор отечественных и зарубежных литературных источников, подобная технология ранее нигде не была упомянута, а

ближайшим аналогом является совместная гидравлическая раздача новых труб-заготовок на гидропрессе с целью получения лейнированных труб.

Разработка и реализация технологии лейнирования позволит многократно повысить эксплуатационный ресурс НКТ и технико-экономические показатели добычи нефти в целом, в связи с чем, выполнение диссертационной работы следует считать актуальным.

Степень разработанности темы. Изучению производства слоистых композиционных материалов (СКМ) способами обработки давлением посвящен ряд трудов исследователей. Для анализа процессов совместной деформации СКМ исследователями широко применяются различные методы – метод плоских сечений, функции тока, верхней оценки и конечных элементов. Предложенный способ изготовления лейнированных труб раздачей на жесткой оправке имеет отличительные особенности, к которым относятся малые степени деформации, проведение процесса в холодном состоянии, наличие зон внеочаговой деформации, отмеченные в литературном обзоре. Разрабатываемая в диссертации технологическая схема изготовления лейнированных НКТ и влияние указанных особенностей на свойства готовых изделий ранее в литературе и патентах не рассматривались.

Изложенное выше позволило сформулировать **цель диссертационного исследования:** на основе применения современных средств компьютерного моделирования выполнить исследование процесса калибрования НКТ по внутреннему каналу и процесса совместной раздачи на оправке НКТ и лейнера, а также разработать рациональный способ изготовления лейнированных труб.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи**¹:

1. Разработка методики исследования процесса лейнирования труб способом раздачи на оправке с использованием последних достижений в области моделирования процессов обработки металлов давлением.

¹ Автор выражает благодарность Николаю Александровичу Богатову за консультации и обсуждение некоторых разделов диссертационной работы

2. Определение и разработка требований к режимам обработки и исходным материалам для получения лейнированной трубы.

3. Разработка и исследование вариантов изготовления лейнированных насосно-компрессорных труб.

4. Поиск рациональной схемы производства лейнированных насосно-компрессорных труб.

5. Исследование напряженно-деформированного состояния и неравномерности распределения деформации по толщине стенки труб при раздаче на оправке.

6. Разработка методики исследования точности труб и ее изменения при раздаче на оправке с использованием пакетов моделирования методом конечных элементов (МКЭ-моделирования).

7. Разработка способов повышения точности труб.

8. Исследование неравномерности распределения послойных деформаций при лейнировании и его зависимости от технологических факторов лейнирования.

9. Исследование параметров формоизменения слоистых труб от технологических факторов лейнирования.

Диссертационная работа представляет часть исследований, проводимых на кафедре «Обработка металлов давлением» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, в соответствии со следующими государственными программами и хоз. договорами:

- Проект «Создание новых технологических процессов, машин и систем автоматизированного проектирования в области обработки металлов давлением на основе современных достижений механики, прикладной математики и информатики» (2011 – 2013 гг.), проводимого в соответствии с программой Минвуза РФ;

- Президентская программа повышения квалификации кадров «Инновационные технологические процессы обработки металлов давлением» № гос. рег. 55-2013-3-ЭФ, приказ по Минобрнауки России № 328 от 30.04.2013 г.;

- «Разработка научных основ физики и механики обработки металлов давлением с целью создания энерго- и ресурсосберегающих инновационных технологий производства металлургической продукции ответственного назначения» (государственное задание в сфере научной деятельности № 11.1369.2014/К от 18.07.2014, № гос. регистрации 114122470051);

- Программа повышения конкурентоспособности (далее – ППК) УрФУ на 2013 – 2020 гг. создание и развитие научной группы «механики обработки материалов давлением и прогрессивных технологических процессов»;

- «Разработка режимов промышленной технологии восстановления служебных свойств насосно-компрессорных труб в условиях УК ООО «ТМС ГРУПП»» по договору № Н 977.210.055/13 от 23.10.2013 г.

Методология и методы исследования: методы статистического анализа данных; методы механики обработки металлов давлением, в частности метод конечно-элементного моделирования процесса деформации труб на оправке в холодном состоянии.

Научную новизну и теоретическую ценность представляют следующие разработки диссертации:

- новая концепция, постановка и реализация проблемы восстановления служебных свойств насосно-компрессорных труб, исчерпавших первоначальный эксплуатационный ресурс;

- разработка новых способов восстановления служебных свойств НКТ;

- закономерности формоизменения труб при раздаче на оправке с учетом внеочаговой деформации;

- закономерности изменения точности внутреннего канала труб в зависимости от технологических факторов;

- закономерности формоизменения лайнера и НКТ при совместной раздаче;

- результаты исследования неравномерности распределения деформации между лайнером и НКТ при совместной раздаче, ее влияние на соотношение прочностных свойств материалов.

Практическую ценность диссертации составляют следующие результаты:

- результаты статистического анализа размеров НКТ, выраженные в рекомендациях по режимам изготовления лейнированных НКТ;
- определение и разработка требований к исходным материалам для изготовления лейнированных НКТ;
- разработка двух технологических схем изготовления лейнированных НКТ;
- выбор рациональной схемы изготовления лейнированных НКТ;
- методика исследования точности труб с применением пакета конечно-элементного моделирования процессов обработки металлов давлением;
- разработка новой конструкции оправки, применение которой многократно повышает точность калиброванных труб по сравнению с применением оправки традиционной конструкции;
- защита интеллектуальной собственности разработкой и оформлением двух заявок на изобретение, по одной из которых получено положительное решение о выдаче патента (№ 2014119965 от 19.05.2014 «Способ восстановления служебных свойств насосно-компрессорных труб лейнированием»).

На защиту выносятся следующие положения:

- технологические схемы изготовления лейнированных труб с учетом разработанных требований к исходным материалам;
- научное обоснование и выбор рациональной схемы изготовления лейнированных труб;
- методика исследования точности труб с помощью пакетов МКЭ-моделирования;
- закономерности изменения точности труб при раздаче на оправке;
- способы повышения точности внутреннего диаметра горячекатаных труб;
- новая конструкция оправки, позволяющая многократно повысить точность внутреннего диаметра труб, направляемых на лейнирование;
- закономерности формоизменения лейнера и НКТ в процессе их совместной раздачи на оправке;

- закономерности распределения деформации между лейнером и НКТ и его влияние на соотношение прочностных свойств материалов в процессе их раздачи на оправке.

Достоверность подтверждается использованием для компьютерного моделирования программного комплекса Deform – 3D, основанного на методе конечных элементов, в соответствии с рекомендуемой методикой моделирования процессов обработки металлов давлением, а также успешным изготовлением опытной партии лейнированных НКТ предложенным способом раздачи на оправке.

Результаты диссертационной работы использованы при разработке предложения по формированию тематики исследования в рамках программного мероприятия 1.3 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» и учебного пособия по условиям эксплуатации насосно-компрессорных труб в нефтедобыче и способам повышения их эксплуатационного ресурса для студентов, обучающихся по направлению «Металлургия».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: 6-й международной молодежной научно – практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А.Ф. Головина». УрФУ, Екатеринбург, 2012; 10-й международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ – 2013)», СПбГПУ, Санкт-Петербург, 2013; XIV-ой международной научной конференции «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering», Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова (Польша), 2013; XV-ой международной научной конференции «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering», Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова (Польша), 2014; 22-ой международной конференции «ТРУБЫ-2014», Челябинск, 2014; международной конференции «3rd International Conference COMAT on Recent Trends in Structural Materials», Пльзень (Чехия), 2014;

7-й международной молодежной научно – практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», УрФУ, Екатеринбург, 2014; международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 2015; 11-й международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ – 2015)», СПбГПУ, Санкт-Петербург, 2015.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 12-ти печатных трудах, в том числе в 4-х печатных трудах, опубликованных в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Две статьи вошли в международную базу научного цитирования Scopus и одна – в базу Web of Science. Подготовлены и направлены две заявки на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и изложена на 158 страницах машинописного текста, включая 57 рисунков, 25 таблиц, 4 приложения и библиографический список из 91 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выполненной диссертационной работы и дана общая характеристика работы.

В **первой главе** представлены описание существующей технологии производства бесшовных и сварных НКТ, требования нормативно-технической документации к их качеству, сведения об их коррозионной стойкости и долговечности в современных условиях добычи нефти. Анализ факторов, влияющих на коррозионную стойкость труб в нефтедобывающей скважине, показал сложность обеспечения защиты металла труб от разрушения в условиях высокой агрессивности скважин, вследствие чего срок службы НКТ намного меньше нормативного. В результате аналитического обзора путей увеличения эксплуатационного ресурса труб, применяемых в настоящее время

нефтедобывающими компаниями, была отмечено, что большой перспективностью обладают слоистые композиционные и лейнированные трубы в сравнении с известными и применяемыми способами. Как показал мировой опыт, в результате использования таких труб возможно многократное увеличение эксплуатационного ресурса в условиях высокой коррозионной активности скважины. Лейнирование заключается в совместной раздаче трубы из углеродистой стали, выступающей в качестве наружной оболочки, и тонкостенной трубы из коррозионностойкой высоколегированной стали, выступающей в качестве внутренней оболочки. При этом соединение труб обеспечивается за счет сжимающих остаточных напряжений на межслойной границе труб. Отсюда вытекают главные преимущества лейнированных труб по сравнению с прочими способами получения слоистых композиционных труб: меньшая себестоимость производства, меньшее требуемое время для освоения производства новой продукции. Вместе с тем, отмечены только несколько отечественных и зарубежных работ, в которых упомянуты лейнированные трубы, изготовленные способом гидравлической раздачи. Обзор работ, посвященных аналитическому исследованию процесса раздачи монометаллических труб на оправке и исследованию процесса совместной гидравлической раздачи труб из разнородных металлов, показал отсутствие исследований по теме диссертации, позволил сформулировать цель и задачи исследования, приведенные во введении работы.

Вторая глава посвящена разработке технического предложения производства лейнированных насосно-компрессорных труб (ЛНКТ). В работе предложена технология производства лейнированных труб, использующих в качестве исходного сырья НКТ, исчерпавшие первоначальный эксплуатационный ресурс. Это позволяет повторно ввести в эксплуатацию изношенные трубы, имеющие на внутренней поверхности локальные язвенные повреждения. В основе технологии получения таких труб лежит совместная раздача на оправке НКТ, бывших в эксплуатации, внутренней тонкостенной коррозионностойкой трубы-вставки (лейнера) и слоя герметика между ними, заполняющего коррозионные изъявления на внутренней поверхности НКТ на трубоволочильном стане-

расширителе (Рисунок 1). Особая роль герметика заключается также в повышении надежности сцепления оболочек, исключения контакта металлов слоев, предотвращения коррозии на внутренней поверхности НКТ.

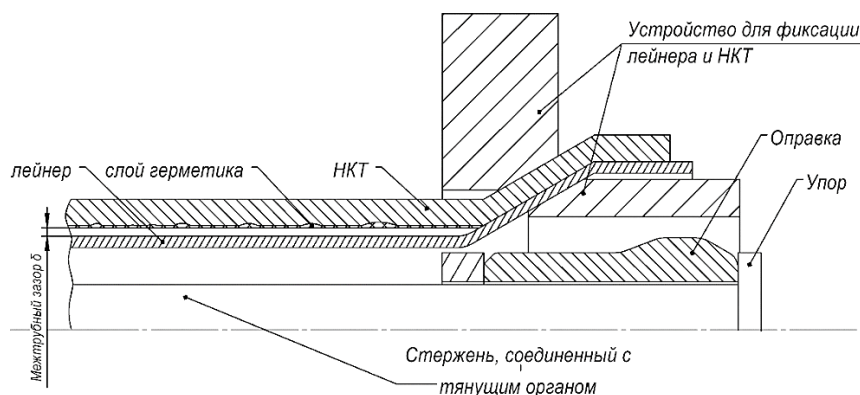


Рисунок 1 – Схема совместной раздачи труб на оправке

С целью разработки режимов изготовления лейнированных НКТ, был выполнен статистический анализ размеров НКТ, бывших в эксплуатации, типоразмера 73x5,5 мм, который показал наличие значительного разброса значений внутренних диаметров труб – диапазон значений находится в пределах от 60,2 мм до 63,9 мм. Разница 3,7 мм вызывает затруднения при осуществлении операции совместной раздачи лейнера и НКТ на оправке. Об этом свидетельствует также частотное распределение зазора между НКТ и лейнером 2δ при сборке (Рисунок 2), которое для лейнера 57x1,5 мм находится в пределах от 3,7 мм до 7,5 мм. Деформация лейнера при раздаче будет находиться в пределах от 6 % до 12 %, что накладывает особые требования к пластичности лейнера при раздаче.

Из-за отсутствия в отечественной и зарубежной практике нормативно-технической документации по технологии изготовления лейнированных труб способом раздачи на оправке, были разработаны требования к операции совместной раздачи в виде минимально и максимально допустимой степени деформации. Одним из главных условий получения ЛНКТ является обеспечение прочного соединения НКТ и лейнера при совместной раздаче, которое выражено в виде минимально допустимой степени раздачи ε_{\min} , на которую необходимо раздать НКТ и лейнер. С учетом упругой разгрузки материалов после совместной

деформации, раздачу целесообразно проводить до достижения пластической деформации НКТ.

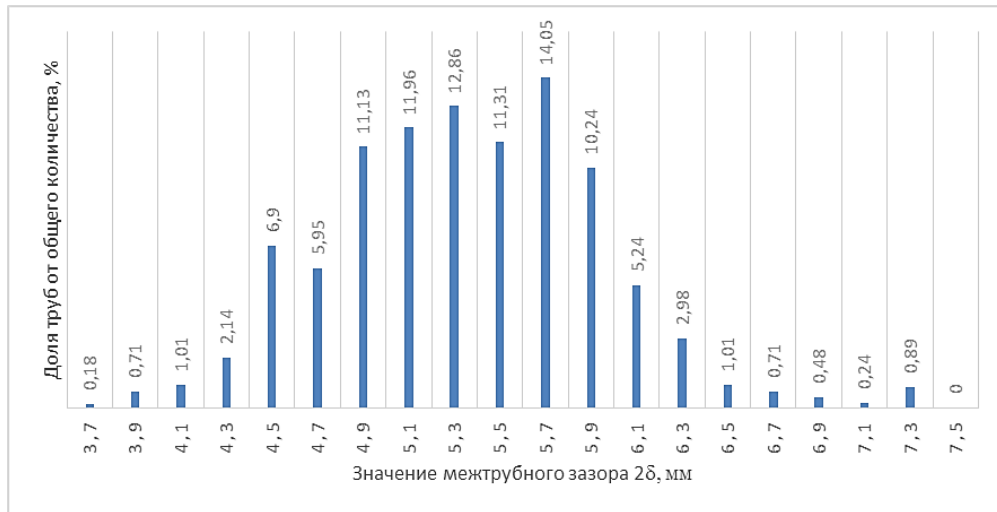


Рисунок 2 – Частотное распределение значений межтрубного зазора 2δ , мм

Вторым важным условием успешного получения ЛНКТ раздачей является отсутствие каких-либо микрповреждений и трещин в материале лайнера, т.е. необходима проверка на возможность зарождения микроразрушения с помощью расчета микрповрежденности материала ω и ограничение в виде максимально допустимой степени деформации ϵ_{\max} . Третьим важным условием получения ЛНКТ является обеспечение размеров ЛНКТ в поле допусков по действующим стандартам.

С целью решения проблем получения лайнированных труб без разрушения лайнера при совместной раздаче с НКТ, снижения неконтролируемого удлинения лайнера при раздаче, увеличивающего расходный коэффициент дорогостоящего металла лайнера, получения равномерного распределения механических свойств и обеспечения размеров ЛНКТ в пределах допусков были разработаны несколько схем изготовления лайнированных труб, среди которых следует отметить **применение предварительно спрофилированного лайнера** перед сборкой с НКТ так, чтобы межтрубный зазор был близок к нулю при распрямлении лайнера (Рисунок 3). При распрямлении профиля лайнера практически отсутствует опасность его разрушения по шву при раздаче.

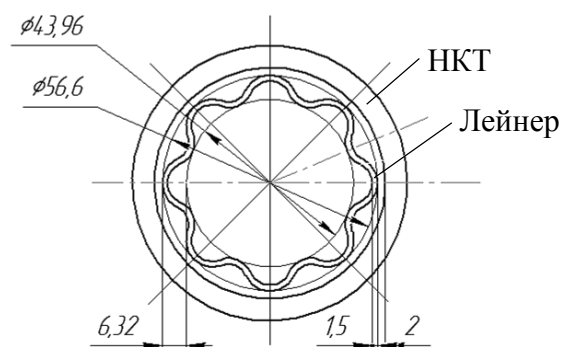


Рисунок 3 – Профиль спрофилированного восьмигранного лейнера

Несмотря на решение проблемы снижения степени деформации лейнеров, недостатками такого решения является введение дополнительной операции профилирования лейнеров.

Другим техническим решением является **предварительное калибрование НКТ** с целью уменьшения разброса значений их внутренних диаметров. В этом случае достигается уменьшение межтрубного зазора 2δ в зависимости от выбранного диаметра оправки $d_{\text{опр}}$ для калибрования, кратное уменьшение степени деформации и относительного удлинения лейнеров при раздаче с калиброванными НКТ. Однако калибрование ведет за собой и увеличение наружного диаметра готовых труб, что может послужить причиной выхода их за пределы требований по ГОСТ Р 52203-2004 по наружному диаметру.

С целью оценки количества лейнированных труб, удовлетворяющих ГОСТ Р 52203-2004 по наружному диаметру, был выполнен аналитический расчет с помощью табличного редактора MS Excel. В качестве исходного массива НКТ был принят массив НКТ, по которому выполнялся статистический анализ размеров НКТ. При анализе варьировались диаметры оправок для калибрования и совместной раздачи и оценивалась доля труб, удовлетворяющих требованиям стандарта. Из результатов расчета следует, что, при стремлении получить наибольшее количество труб, удовлетворяющих ГОСТ, не обеспечивается при этом соединение всех НКТ с лейнерами. Следует учесть и тот факт, что исходное количество труб, входящее в допуски по наружному диаметру ГОСТ равно 75,42

%, а при дальнейших операциях неизбежно сокращение этого числа труб. В связи с этим, для лейнированных НКТ предложена разработка специального ТУ, допускающего большие значения наружного диаметра, а дальнейшее внимание следует уделить совершенствованию операции калибрования и поиску технического решения повышения точности НКТ для лейнирования.

В третьей главе выполнено исследование процесса калибрования НКТ на оправке с точки зрения изменения точности труб в результате выполнения операции. Исследование выполнялось с помощью программного комплекса МКЭ-моделирования Deform-3D. Моделирование в программном пакете Deform – 3D позволило выявить особенности очага деформации трубы при раздаче, который состоит из нескольких характерных участков (Рисунок 4): линейного участка непосредственного контакта трубы и конусной оправки, являющегося геометрическим очагом деформации и двух криволинейных участков на входе и выходе, являющихся зонами внеочаговой пластической деформации. За зоной внеочаговой раздачи следует зона упругой разгрузки, вызывающей сужение внутреннего канала трубы.

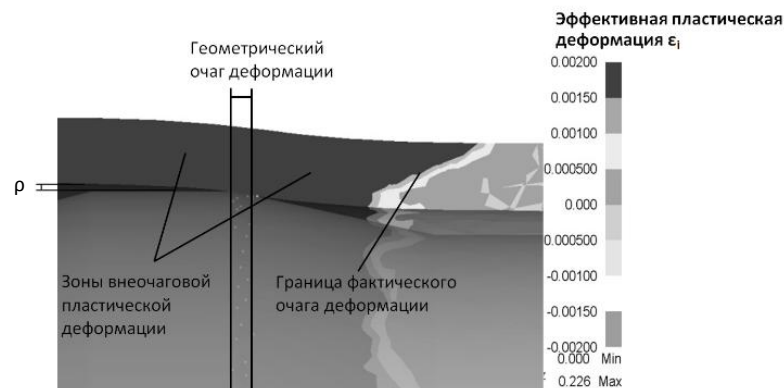


Рисунок 4 – Очаг деформации при МКЭ-моделировании

Увеличение внутреннего диаметра трубы $2r$ в зоне внеочаговой пластической деформации на выходе является характеристикой внеочаговой раздачи, а точность калиброванных труб во многом зависит от величины внеочаговой деформации на выходе $\Delta \epsilon_1$, которая рассчитывается по формуле

$\Delta\varepsilon_1 = \frac{d_{max}-d_{опр}}{d_{опр}}$, где d_{max} – максимальное значение внутреннего диаметра трубы на выходе из очага деформации, $d_{опр}$ – диаметр оправки. На рисунке 5 приведен график зависимости степени внеочаговой деформации на выходе $\Delta\varepsilon_1$ от степени раздачи ε , из которого видно монотонное возрастание величины при увеличении степени раздачи, причем для более тонкостенных труб, выраженных отношением наружного диаметра трубы к внутреннему m , наблюдается большая степень внеочаговой деформации на выходе.

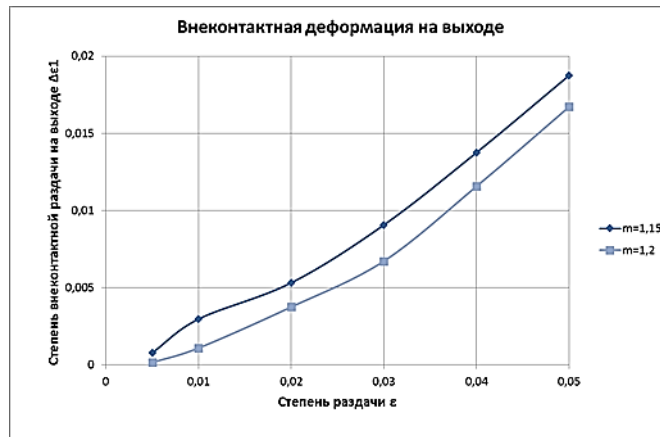


Рисунок 5 – Зависимость степени внеконтактной деформации на выходе от степени раздачи

Для оценки повышения точности труб в процессе калибрования на оправке был использован показатель разброса значений внутренних диаметров массива труб до и после калибрования: до раздачи $p_0 = \frac{d_{вн0max}-d_{вн0min}}{2 \cdot d_{ср0}}$, где $d_{ср0} = d_{вн0min} + \frac{d_{вн0max}-d_{вн0min}}{2}$, $d_{вн0max}$ и $d_{вн0min}$ – максимально и минимально возможное значение внутреннего диаметра труб до раздачи; и после раздачи – $p_1 = \frac{d_{вн1max}-d_{вн1min}}{2 \cdot d_{ср1}}$, где $d_{ср1} = d_{вн1min} + \frac{d_{вн1max}-d_{вн1min}}{2}$, $d_{вн1max}$ и $d_{вн1min}$ – максимальное и минимальное значение внутреннего диаметра труб после раздачи. После калибрования труб раздачей на оправке диапазон возможных значений сужается, следовательно, повышается точность внутреннего диаметра труб. Было исследовано изменение шести постепенно расширяющихся диапазонов, с соответствующими степенями

деформации $\varepsilon = 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 \%$, в результате калибрования. Эффективность калибрования оценивалась отношением p_0/p_1 – коэффициентом повышения точности.

Результаты исследования показали, что при раздаче трубы с малой степенью раздачи $\varepsilon = 0,5\%$ внутренний диаметр трубы становится меньше диаметра оправки $d_{\text{опр}}$, а с ростом степени раздачи $\varepsilon > 1 \%$, внутренний диаметр трубы $d_{\text{вн1}}$ становится больше $d_{\text{опр}}$. На рисунке 6 приведен график коэффициента повышения точности, из которого видно, что в области значений степени раздачи $\varepsilon = 0,5 - 2 \%$ эффективность калибрования внутреннего диаметра труб является наивысшей, а с ростом ε до 5% эффективность снижается. С ростом показателя сил трения ψ отношение p_0/p_1 становится меньше. С целью повышения эффективности калибрования труб при раздаче на конической оправке, одним из возможных решений является ограничение степени раздачи диапазоном от 0 до $2,5 \%$, разбивая входной массив НКТ на несколько групп.

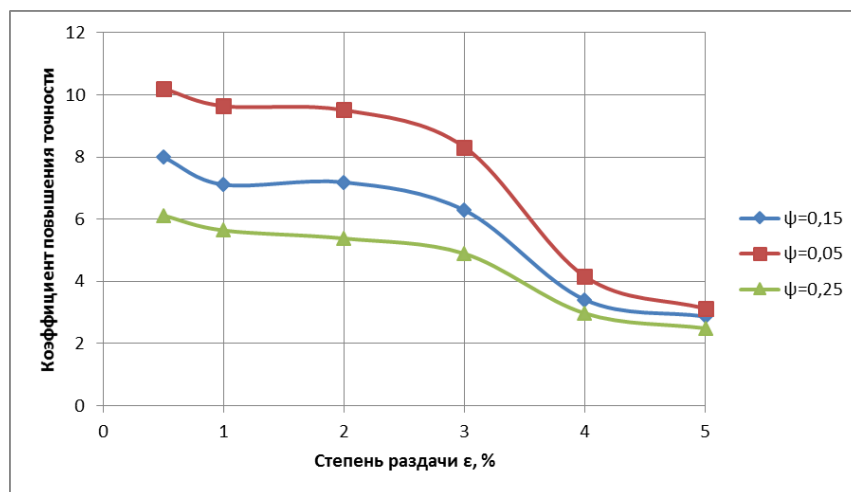


Рисунок 6 – Коэффициент повышения точности

Выполненная проверка по предложенной методике исследования точности с помощью МКЭ-моделирования технического решения сортировки труб на две группы и применение оправок двух размеров для калибрования на отдельные группы труб не обеспечивает решение проблемы.

С помощью МКЭ-моделирования была отмечена особенность процесса калибрования труб на традиционной оправке с конической рабочей частью,

закрывающаяся в малой протяженности длины контакта внутренней поверхности трубы и оправки. Начиная со степеней раздачи от 1 %, внутренняя поверхность контактирует с малым участком рабочей части оправки, при этом контакт на калибрующем пояске оправки полностью отсутствует, как видно на рисунке 4. Учитывая это, для получения высокой точности внутреннего диаметра труб необходима разработка новой конструкции оправки, позволяющей минимизировать внеочаговую деформацию.

Для совершенствования процесса калибрования были разработаны несколько конструкций оправок – со сферической рабочей частью и специальной двухступенчатой формой рабочей части оправки. Рабочая часть двухступенчатой оправки (Рисунок 7) состоит из трех последовательно расположенных участков – начального сферического участка (участок *A*), следующего за ним конического участка (участок *B*), имеющего низкое значение угла конусности α (менее 4°) и калибрующего пояска (участок *C*). При калибровании исходной трубы с исходным внутренним диаметром $d_{вн0}$ 1 двухступенчатой оправкой 2, труба последовательно деформируется сферическим участком 3, коническим участком 4, имеющим малый угол конусности и калибрующим пояском 5 с диаметром, равным $d_{опр}$. После прохождения оправки и упругой разгрузки, калиброванная труба 6 имеет окончательное значение $d_{вн1}$. Минимальное значение разброса внутреннего диаметра массива труб обеспечивается за счет предварительной деформации труб, имеющих значение внутреннего диаметра, близкого к минимальному, на сферическом участке, при степенях раздачи от 2 %, после чего труба деформируется на коническом и калибрующем участках. При малых степенях деформации ϵ до 2 %, труба проходит только через конический участок с малым углом конусности и калибрующий поясок. Таким образом, и при больших и при малых степенях раздачи, трубы проходят через конический участок и калибрующий поясок, формируя на них окончательную форму и размеры.

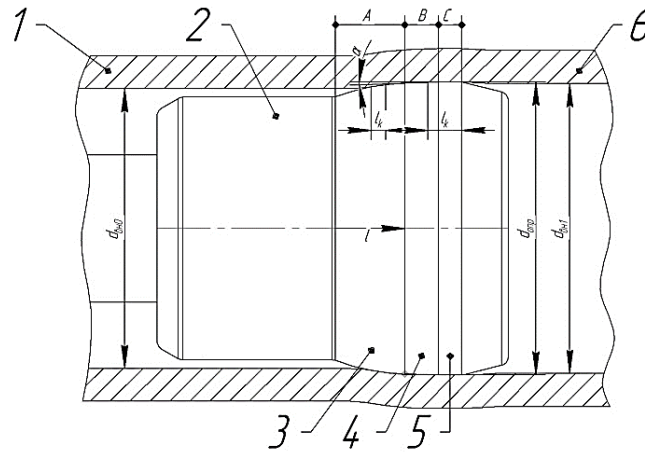


Рисунок 7 – Эскиз двухступенчатой оправки

Применение оправки с двухступенчатой рабочей частью позволяет уменьшить изгиб стенки трубы при калибровании, увеличить протяженность длины контакта и уменьшить внеочаговую деформацию. Из сопоставления разброса значений исходного диапазона труб, труб, калиброванных конической оправкой, сферической оправкой и двухступенчатой оправкой (Рисунок 8, а), а также коэффициента повышения точности (Рисунок 8, б) для разных видов оправок, видно, что при всех степенях раздачи калибрование труб на двухступенчатой оправке обеспечивает минимальный разброс значений их внутренних диаметров и высокую эффективность.

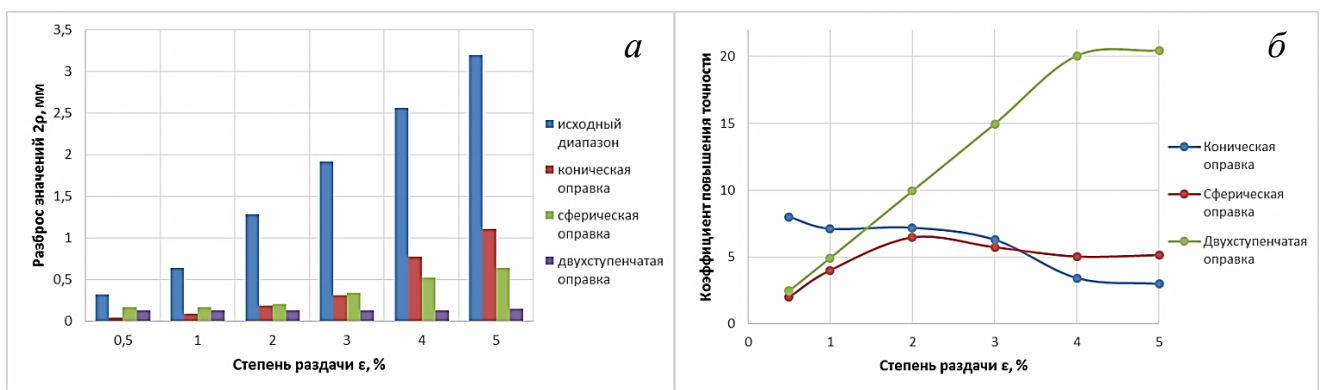


Рисунок 8 – Разброс значений внутренних диаметров труб (а) и коэффициенты повышения точности труб при калибровании разными видами оправок (б)

Таким образом, калибрование труб двухступенчатой оправкой позволило достичь семикратного уменьшения разброса значений внутренних диаметров по

сравнению с калиброванием на конической оправке, а ширина диапазона разброса значений внутренних диаметров калиброванных двухступенчатых оправкой труб не превышает 0,1 мм.

В четвертой главе изложены результаты исследования процесса совместной деформации труб при раздаче на оправке. Показано, что процесс совместной деформации труб можно условно разделить на стадии, отличающиеся характером деформации – свободную раздачу лайнера и совместную деформацию лайнера и НКТ. Выполнено исследование неравномерности распределения послойных деформаций между лайнером и НКТ при совместной раздаче. В зависимости от влияния технологических факторов, деформация при совместной раздаче труб может распределяться по слоям в разном соотношении.

На формоизменение слоистых труб при лайнировании можно влиять за счет выбора наружного диаметра лайнера и зависящего от него межтрубного зазора 2δ и за счет выбора диаметра оправки $d_{\text{опр}}$ для совместной раздачи. Выбор межтрубного зазора 2δ и выбор диаметра оправки $d_{\text{опр}}$ определяют соотношение свободной раздачи лайнера $\epsilon_{\text{своб}}$ и совместной раздачи лайнера и НКТ $\epsilon_{\text{совм}}$ в общей степени раздачи лайнера ϵ . Обобщенной их характеристикой является коэффициент совместной деформации $\frac{\epsilon_{\text{совм}}}{\epsilon}$, отражающая величину предварительного наклепа лайнера перед совместной деформацией.

Неравномерность распределения деформации по слоям оценивалась показателем неравномерности деформации $\frac{\epsilon_{\text{НКТ}}^{\text{совм}}}{\epsilon_{\text{Л}}^{\text{совм}}}$ - отношением среднего значения степени деформации НКТ и лайнера. Исследование показало, что с уменьшением межтрубного зазора 2δ , увеличением диаметра оправки $d_{\text{опр}}$ и с увеличением зависящим от этих величин коэффициентом совместной деформации наблюдается более равномерное распределение деформации между НКТ и лайнером (Рисунок 9).

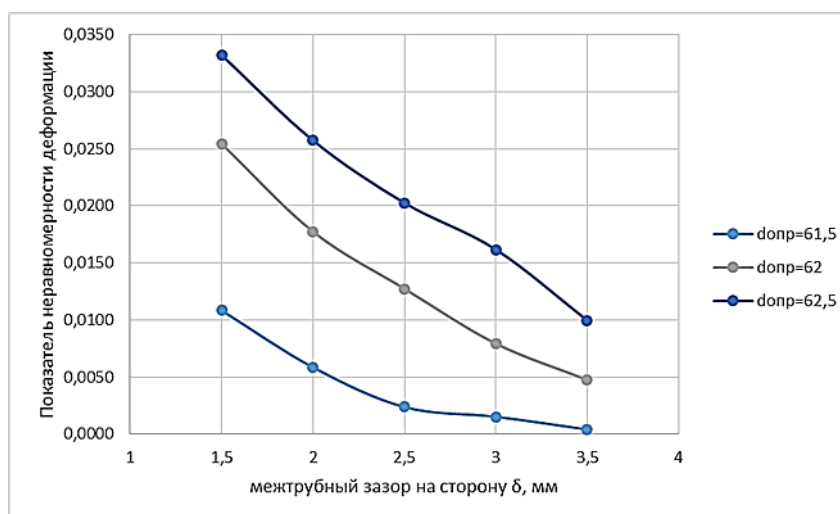


Рисунок 9 – Зависимость показателя неравномерности деформации от межтрубного зазора на сторону δ и диаметра оправки $d_{\text{опр}}$

Неравномерность деформации влечет за собой изменение соотношения прочностных характеристик, выражаемых отношением сопротивления деформации лайнера (сталь 12X18H10T) и НКТ (сталь 45) $\frac{\sigma_{\text{л}}}{\sigma_{\text{НКТ}}}$ – в результате совместной деформации отношение меняет свое значение с 0,58 до (1,1 – 1,45), т. е. материал лайнера к концу совместной раздачи приобретает большее значение сопротивления деформации, чем материал НКТ.

Кроме того, были получены зависимости параметров формоизменения и соотношения слоев лайнера и НКТ от межтрубного зазора сборной трубы и диаметра оправки. Исследование показало, что деформация распределяется между относительным утонением и удлинением лайнера и относительным увеличением внутреннего и наружного диаметров НКТ. Полученные зависимости следует учитывать при разработке режимов деформации для конкретных материалов.

В заключение приведены результаты проверки качества изготовленных опытных образцов лайнированных труб² гидравлическим испытанием по ГОСТ Р 52203-2004 и испытания опытно-промышленной партии в промышленных условиях в составе насосно-компрессорной колонны. Экспериментальное исследование

² Работы выполнялись совместно с ООО НПО «ГЭМП»

эксплуатационного ресурса лейнированных труб осуществлялось на основе экспертной оценки эксплуатационных характеристик и механических свойств новых и лейнированных труб после их длительной эксплуатации в реальных промышленных условиях – на четырех объектах, условия эксплуатации на которых характеризуются как тяжелые. Демонтаж нагнетательной насосно-компрессорной колонны осуществлялся через приблизительно 900 суток.

Инспекцией труб установлено, что лейнированные НКТ не претерпели никаких изменений, все 116 труб пригодны для дальнейшей эксплуатации;

Из лейнированных и новых НКТ (после их эксплуатации в течение около 900 суток) были изготовлены образцы для испытаний на сплющивание, раздачу конусом, бортование, изгиб, адгезию покрытия. Образцы из лейнированных труб успешно прошли испытания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

- выполнен статистический анализ размеров НКТ, показано влияние точности внутреннего диаметра труб на возможность изготовления лейнированных труб, сформулирована научно-техническая проблема;

- разработаны и предложены требования к режимам обработки и исходным материалам для получения лейнированных труб;

- разработаны несколько альтернативных вариантов изготовления лейнированных НКТ, позволяющих решить проблему уменьшения диапазона разброса значений межтрубного зазора сборной трубы из лайнера и НКТ, а также повышения надежности технологического процесса;

- выбрана рациональная схема производства ЛНКТ, исходя из достоинств и недостатков вариантов изготовления ЛНКТ;

- исследованы особенности формоизменения труб при калибровании на оправке, разработана методика исследования точности труб с помощью пакета

МКЭ-моделирования, оценено влияние технологических факторов на изменение точности при раздаче на оправке;

- сформулированы рекомендации по повышению эффективности операции калибрования труб на оправке, оценена получаемая точность НКТ в результате принятых рекомендаций;

- разработана новая, на уровне изобретения, конструкция оправки, позволяющая многократно повысить точность внутреннего диаметра калиброванных труб;

- исследован процесс совместной деформации, предложена методика по оценке неравномерности распределения деформации между лейнером и НКТ, исследовано влияние неравномерности деформации на соотношение прочностных свойств лейнера и НКТ;

- получены закономерности формоизменения лейнированной трубы от технологических факторов лейнирования;

- по материалам диссертации составлено учебное пособие по условиям эксплуатации НКТ в нефтедобыче и способам повышения их эксплуатационного ресурса для студентов, обучающихся по направлению «Металлургия»;

- подготовлены две заявки на изобретение «Способ восстановления служебных свойств насосно-компрессорных труб» (получила положительное решение о выдаче патента) и «Оправка для калибрования внутреннего канала труб»;

Перспективы дальнейшей разработки темы. Полученные в результате выполнения диссертационной работы основные положения рекомендуется использовать при разработке технологии производства лейнированных труб различного назначения и технологии восстановления эксплуатационных характеристик труб, исчерпавших первоначальный эксплуатационный ресурс.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**Публикации в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Салихьянов Д.Р. Конечно-элементный анализ повышения точности внутреннего канала труб конструкционного значения / А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 6. – С. 18 – 22 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

2. Салихьянов Д.Р. Исследование точности внутреннего диаметра горячекатаных труб при раздаче / А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58. № 1. С. 35 – 38 (0,26 п.л./0,13 п.л.).

Salikhyanov D. Internal-diameter precision in the expansion of hot-rolled pipe / A. Bogatov, D. Salikhyanov // Steel in Translation. – 2015. – № 1. P. 25 – 28 (0,29 п.л./0,145 п.л.).

3. Салихьянов Д.Р. Лейнированные коррозионностойкие насосно-компрессорные трубы / Н.А. Богатов, А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // Сталь. – 2014. – № 11. С. 86 – 88 (0,37 п.л./0,12 п.л.).

Salikhyanov D. Corrosion-Resistant Lined Pump and Compressor Pipe / N.A. Bogatov, A.A. Bogatov and D.R. Salikhyanov // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44, № 11. P. 867 – 869 (0,32 п.л./0,11 п.л.).

4. Салихьянов Д.Р. Восстановление служебных характеристик насосно-компрессорных труб, отработавших первоначальный эксплуатационный ресурс, способом лейнирования / Н.А. Богатов, А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // Металлург. – 2014. – № 11. С. 80 – 84 (0,44 п.л./0,15 п.л.).

Salikhyanov D. Use of The Lining Method to restore the Service Characteristic of Pump-Compressor Tubing that has exhausted its original service life / N.A. Bogatov, A.A. Bogatov and D.R. Salikhyanov // Metallurgist. – 2014. – Vol. 58, № 11 – 12. P. 1006 – 1010 (0,45 п.л./0,15 п.л.).

Публикации в других изданиях:

5. Салихьянов Д.Р. Разработка и исследование технологии производства насосно-компрессорных труб из композиционных материалов и оценка их долговечности / Н.А. Богатов, А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов. Екатеринбург. УрФУ, 2012. – С. 669 – 674 (0,56 п.л./0,19 п.л.).

6. Салихьянов Д.Р. Разработка модели образования соединения слоев биметаллического проката и ее применение для совершенствования технологического процесса / А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // Современные металлические материалы и технологии (СММТ – 2013): труды международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург. СПбГПУ, 2013. – С. 308 – 312 (0,26 п.л./0,13 п.л.).

7. Салихьянов Д.Р. Технологические основы восстановления насосно – компрессорных труб, отработавших эксплуатационный ресурс. Н.А. Богатов, А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering: XIV International scientific conference, Vol. 1. Czestochowa, 2013. – P. 301 – 309 (0,44 п.л./0,15 п.л.).

8. Салихьянов Д.Р. Моделирование процесса лейнирования насосно-компрессорных труб методом конечных элементов // New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering: XV International scientific conference. Czestochowa, 2014. - P. 212 – 216 (0,27 п.л./0,09 п.л.).

9. Салихьянов Д.Р. Повышение точности и качества поверхности внутреннего канала горячекатаных труб. А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // Труды XXI Международной научно-практической конференции «Трубы - 2014». Сборник докладов. Челябинск. ОАО «РосНИТИ», 2014. – С. 62 – 66 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

10. Salikhyanov D. Fundamentals of Investigation into Pipe Precision // A. Bogatov, D. Salikhyanov // 3rd International Conference COMAT on Recent Trends in Structural Materials: Conference proceeding. Pilsen, 2014. – P. 41 – 45 (0,32 п.л./0,16 п.л.).

11. Салихьянов Д.Р. Анализ повышения точности внутреннего диаметра труб при раздаче // А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов. Екатеринбург. УрФУ, 2014. – С. 224 – 227 (0,29 п.л./0,14 п.л.).

12. Салихьянов Д.Р. Исследование технологии производства насосно-компрессорных труб и слоистых композиционных материалов. Трансфер инновационных технологий в бизнес / Н.А. Богатов, А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2015): Сборник трудов международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Изд-во Политех. ун-та, 2015. – С. 1545 – 1558 (0,61 п.л./0,2 п.л.).