

Разработка гибкого индукционного нагревателя внутренней изоляции сварного стыка трубопроводов

© 2022

Никитин Юрий Александрович, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации технологических процессов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа (Россия)

E-mail: nikyu@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8419-8218>

Поступила в редакцию 25.04.2022

Принята к публикации 14.07.2022

Аннотация: Для обеспечения качества нанесения антикоррозионной изоляции сварных соединений в трубопроводах с внутренним защитным покрытием необходимо с высокой точностью выдерживать температурные режимы заданной зоны нагрева сварного стыка, включая скорость нагрева и поддержание в течение определенного времени температуры нагрева антикоррозионной изоляции. Поскольку в настоящее время промышленность не выпускает компактные и удобные в эксплуатации устройства для нагрева сварного стыка трубопроводов небольшого диаметра при нанесении внутренней изоляции в полевых условиях, требуется провести исследования, направленные на разработку данного типа устройств, и определить эффективность их применения на практике. В исследовании применяется индукционный метод нагрева с использованием гибкого индукционного нагревателя сварного стыка трубопроводов. Нагреватель отличается простотой установки на трубопроводы и позволяет обеспечить необходимые технологические режимы нагрева изоляции внутри трубопроводов. Приведены результаты моделирования тепловых процессов, исследовано распределение температуры вдоль состыкованных трубопроводов с использованием пакета COMSOL Multiphysics. Выявлено, что вследствие неравномерности нагрева стыка трубопроводов могут возникать отклонения температуры, выходящие за пределы заданного диапазона. Предложено решение данной проблемы, заключающееся в конструктивном решении разработанного гибкого индуктора. Для обеспечения требуемых показателей нагрева применена определенная укладка обмотки индуктора. Получены экспериментальные зависимости изменения температуры от времени нагрева внутри состыкованных трубопроводов в заданных зонах нагрева, показывающие соответствие требованиям технологии нанесения изоляционного покрытия, при выходе на требуемые режимы нагрева. Для нагрева трубопроводов диаметром 159 мм и толщиной стенки 8 мм мощность индукционного нагревателя составила не более 3 кВт. Разработанные нагреватели обеспечивают возможность быстрой и удобной установки на трубопроводы, безопасность и автоматизацию работ по нанесению изоляции. Проведенные исследования позволили решить важный аспект проблемы практического применения технологии противокоррозионной защиты сварного раструбного соединения трубопроводов небольшого диаметра в нефтегазовой отрасли промышленности.

Ключевые слова: сварной стык трубопровода; околовшовный участок; температурные режимы; индукционный нагреватель; гибкий индуктор.

Для цитирования: Никитин Ю.А. Разработка гибкого индукционного нагревателя внутренней изоляции сварного стыка трубопроводов // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 4. С. 90–101. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-4-90-101.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на нефтяных и газовых месторождениях при строительстве нефтесборных и нагнетательных трубопроводов с внутренним защитным покрытием для противокоррозионной защиты сварных соединений внутри трубопроводов либо применяют термоусаживающиеся полимерные материалы, наносимые на сварной стык трубопроводов, либо используют бандаж, представляющий собой многослойный композиционный материал с низковязким эпоксидным связующим, также устанавливаемый внутри трубопровода в месте сварного стыка, защищающего сварной шов трубопроводов [1; 2].

Технические требования, температурные режимы, показатели прогрева околовшовой зоны труб зависят от конкретной технологии приклеивания на внутренней поверхности сварного шва изоляционного материала.

На данный момент они достаточно хорошо изучены и во многом зависят от производителя материала антикоррозионной изоляции [3]. Основная проблема применения термоусаживающихся полимерных или многослойных композиционных материалов, наносимых на сварной стык трубопроводов, а также наклеивания бандажных лент заключается в том, что требуется не только обеспечить нагрев определенного участка сварного стыка трубопроводов, но и поддерживать температурные режимы нагрева по времени и скорости нагрева в соответствии с заданной технологией нагрева, контролировать процесс нагрева, особенно если работы производятся в полевых условиях [4–6].

Известные методы электронагрева [7–9] не позволяют обеспечить эффективную работу данной технологии и в большинстве случаев являются неприемлемыми для внутреннего нагрева трубопроводов или требуют значительных затрат при их технической реализации. Разработчики и авторы технологии противокоррозионной

защиты сварного раструбного соединения и приклеивания на внутренней поверхности сварного шва изоляционного материала выдвинули гипотезу об эффективности использования в разработанной ими технологии именно метода индукционного нагрева [4]. Поскольку индукционный метод нагрева является бесконтактным методом нагрева металла [10], его следует считать наиболее приемлемым методом нагрева в технологии нанесения покрытий, однако проверить данную гипотезу для трубопроводов небольшого диаметра оказалось проблематичным. Это связано с тем, что обычно применение индукционного нагрева при изоляции сварных стыков труб в трассовых условиях [11; 12] требует использования мощных дорогостоящих индукционных установок [13–15] и специальной техники для реализации данной технологии¹, применяемой только для трубопроводов большого диаметра. Поэтому в настоящее время вопросы разработки индукционных нагревателей трубопроводов небольшого диаметра при реализации технологии нанесения изоляции в полевых условиях являются актуальными. Такие нагреватели должны быть компактными (иметь небольшую массу и габариты), безопасными и удобными в эксплуатации, иметь высокий уровень автоматизации [16; 17]. Обзор зарубежной и отечественной литературы и анализ современного состояния вопросов, связанных с технологией нанесения внутренних защитных покрытий сварного стыка трубопроводов небольшого диаметра, а также проведенные маркетинговые исследования показывают, что на сегодняшний день нет готовых решений для практического применения выпускаемых промышленностью индукционных нагревателей в рассматриваемой технологии. Таким образом, выявлена важная область, в которой необходимо расширить исследования, так как их недостаточно.

Цель исследования – разработка легкоъемного и быстро устанавливаемого гибкого индукционного нагревателя сварного стыка трубопроводов небольших диаметров, обеспечивающего автоматическое поддержание заданных температурных режимов как по времени, так и по скорости нагрева, и проверка эффективности его работы при натуральных испытаниях изготовленных опытных образцов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Порядок проведения исследования

Исследование включало несколько этапов.

Этап 1. Предварительно проведено моделирование тепловых процессов в околошовной зоне состыкованных труб заданных размеров с целью оценки возможности обеспечения температурных режимов, определения требуемой мощности нагрева и получения наглядного представления о распределении температуры вдоль околошовного участка состыкованных труб в процессе нагрева. Для моделирования использовался пакет COMSOL Multiphysics.

¹ ТИ 04-02-16 «Технологическая карта по нанесению термоусаживающейся манжеты «ТИАЛ-МПП» на сварные стыки труб в трассовых условиях с использованием индукционного нагрева».

Этап 2. Выбрана концепция реализации гибкого индуктора индукционного нагревателя и разработана его конструкция с соответствующим выбором: 1) материалов для практического изготовления индуктора; 2) преобразователя на требуемую мощность и частоту преобразования.

Этап 3. После стадии изготовления и отладки гибкого индуктора проведено натурное испытание индукционного нагревателя на состыкованных трубах с автоматизированной записью температурных режимов при различных стадиях нагрева в соответствии с заданной технологией.

Этап 4. Доработана конструкция гибкого индуктора с перераспределением и определенной укладкой витков его обмотки для обеспечения заданного технологией температурного режима нагрева внутри трубопроводов.

Требования к температурным режимам и зонам нагрева состыкованных труб

Важными составляющими постановки экспериментального исследования процесса нагрева околошовной зоны состыкованных труб явились требования, предъявляемые как к объекту нагрева, так и к конструкции индуктора и тепловым режимам прогрева околошовной зоны труб с целью соблюдения технологии приклеивания на внутренней поверхности сварного шва изоляционного материала (бандажа).

1. Индукционный нагреватель должен быть разработан для применения на трубопроводах диаметром 159 мм и толщиной стенки 8 мм.

2. Исходная температура труб при эксплуатации индукционного нагревателя – от –40 до +50 °С.

3. Нагреваемый участок трубы – 250 мм, т. е. по 125 мм от сварного стыка трубопроводов.

4. Индуктор нагревателя должен быть в гибкой защитной оболочке, съемной конструкции и иметь небольшой вес. Использование индуктора, требующего намотки, недопустимо.

5. Температура наружной поверхности труб на расстоянии 200 мм от сварного стыка не должна превышать 100 °С как в одну, так и в другую сторону от сварного стыка трубопроводов.

В месте стыка должны быть обеспечены следующие временные стадии:

– прогрев до 100 °С не более 10 мин;
– далее выдержка при температуре 100 °С не менее 3 мин;

– прогрев после 100 °С до соответствующей постановке эксперимента заданной средней температуры поверхности труб (например, 145 °С или выше в зависимости от состава применяемых композиционных материалов для изоляции сварного стыка трубопроводов) не более 10 мин;

– отклонения от заданного температурного режима не должны превышать ±5 °С.

Для корректного проведения исследований были определены точки установки датчиков температуры Т1, Т2, Т3, Т4, Т5 и Т6 (представлены на рис. 1) как наиболее удовлетворяющие условиям соблюдения технологии приклеивания изоляционного материала к внутренней поверхности состыкованных труб. При этом важным условием исследования являлась необходимость поддерживать температуру на внутренней поверхности

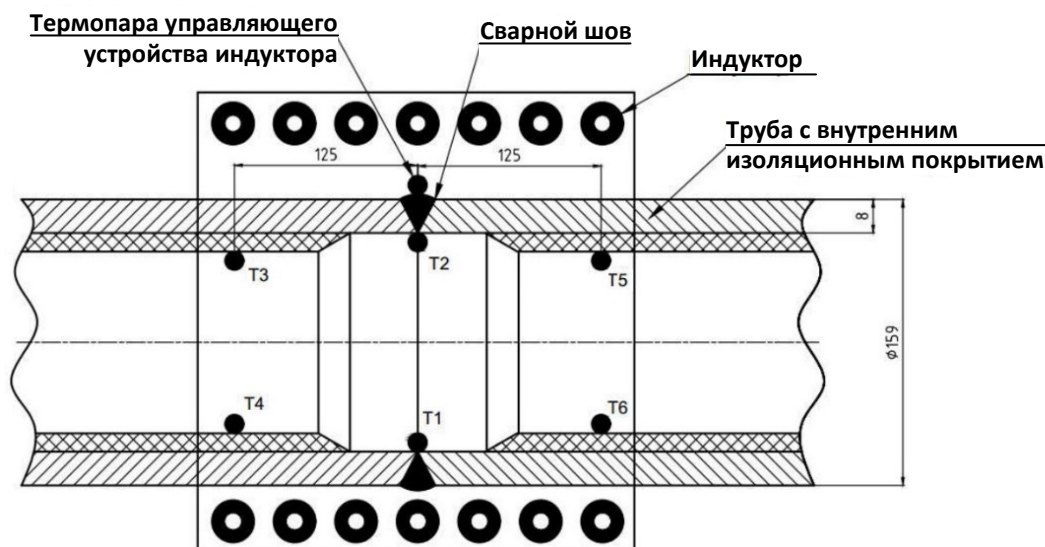


Рис. 1. Схема расположения точек контроля температуры
 Fig. 1. Diagram of the temperature control points location

трубы в точках Т1–Т6 после выхода на режим с отклонением не более ± 5 °С от заданной планом эксперимента средней температуры.

Технические средства контроля температуры при нагреве

При проведении исследований использовались термопары ТХК (L)², закрепленные в точках Т1–Т6 (рис. 1) с помощью импульсной сварки. При нагреве состыкованных труб возможно перерегулирование температуры. Для исключения данного явления и обеспечения требуемого по времени выхода на заданный режим нагрева использован ПИД-терморегулятор ТРМ-1 фирмы «ОВЕН». Режим работы регулятора и настройки коэффициентов, устанавливаемых в ТРМ-1, были подобраны экспериментальным путем для получения заданной зависимости температуры от времени нагрева с наилучшими показателями качества регулирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительное моделирование

Исходными данными при моделировании были приняты следующие:

- температура окружающей среды от -40 до $+50$ °С;
- поверхность участка стыка двух трубопроводов теплоизолированная;
- процесс нагрева осуществляется в открытой окружающей среде, коэффициент теплопередачи $25 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$;
- мощность нагревателя – 3000 Вт;
- геометрические размеры модели соответствуют предъявленным выше конструктивным требованиям.

Результаты моделирования представлены на рис. 2 и рис. 3. Средняя температура нагрева околошовной зоны состыкованных труб при моделировании была принята равной 145 °С.

Из представленных графиков (рис. 2 и рис. 3) видно, что:

- по мере прогрева и перехода из одной стадии нагрева в другую происходит, с одной стороны, выравнивание температуры относительно средней в месте стыка труб, а с другой стороны, увеличивается разность температур слева и справа от стыка труб по горизонтальной плоскости;
- разница температур по окончании периода нагрева относительно средней заданной температуры может достигать $\pm 9,5$ °С;
- могут быть обеспечены заданные условия нагрева, достаточно близкие к предъявляемым требованиям, но для выявления технической возможности обеспечения заданного технологического режима нагрева необходимо проведение натуральных экспериментов на реальных образцах индукторов.

Конструкция гибкого индуктора индукционного нагревателя

Используемые при исследовании образцы легкоъемных индукторов состоят из отдельных элементов [18], таких как (рис. 4):

- плоская обмотка из многожильного медного провода в термостойкой изоляции, равномерно уложенная на полимерную ткань и залитая термостойким компаундом;
- теплоизоляционная защита, выполненная из негорючего высокотемпературного материала в термостойкой оболочке.

За счет своей конструкции гибкий легкоъемный индуктор обеспечивает простоту установки на объект нагрева и равномерный нагрев стыков и манжет, при этом в процессе эксплуатации износу подвержена только

² ГОСТ Р 8.585–2001 ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. М.: Издательство стандартов, 2002. 77 с.

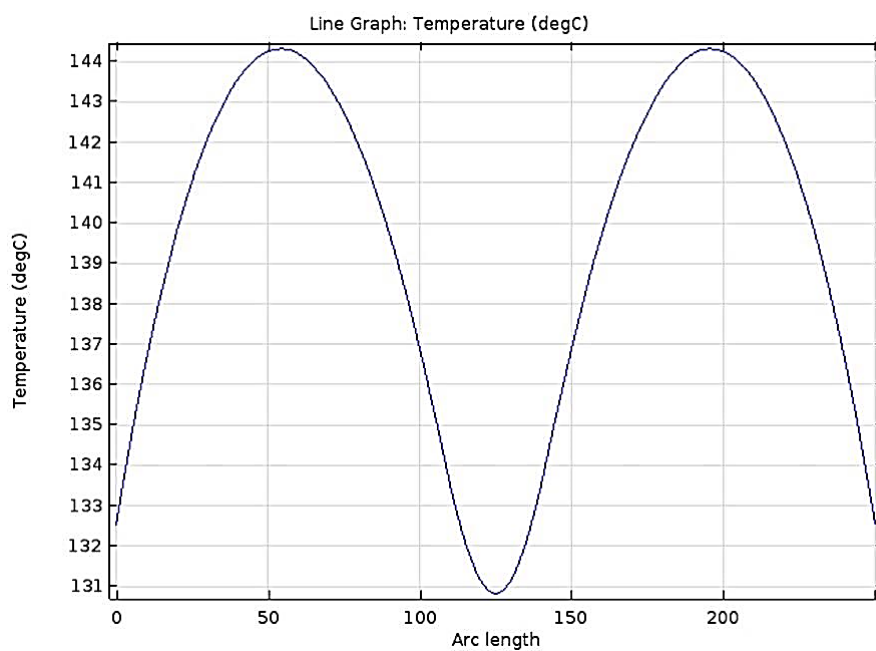


Рис. 2. Распределение температуры вдоль околошовного участка состыкованных труб (размеры по оси абсцисс приведены в мм, время нагрева 8 мин)

Fig. 2. Temperature distribution along the weld-adjacent area of joint pipes (X-axis size is indicated in mm, heating time is 8 minutes)

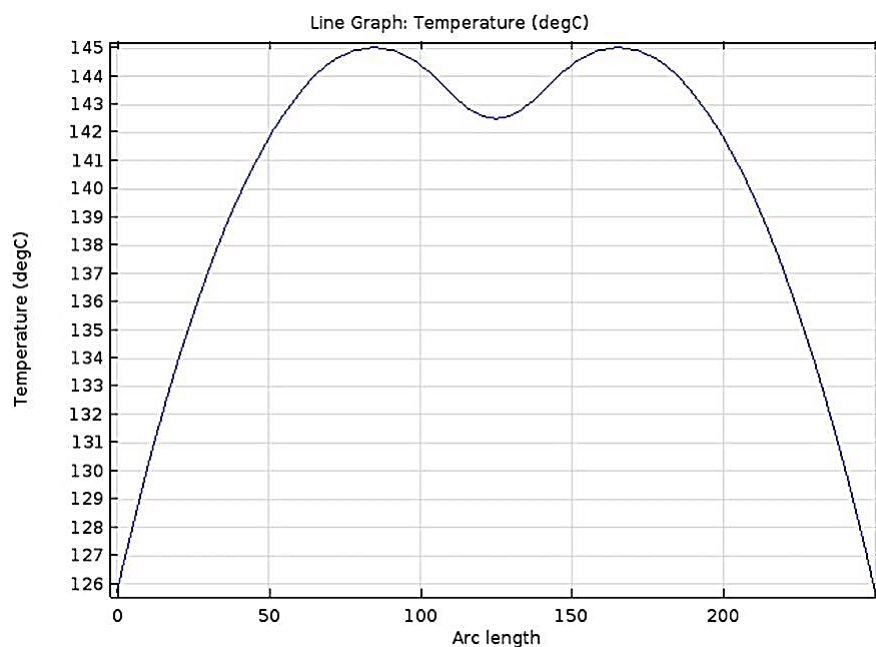


Рис. 3. Распределение температуры вдоль околошовного участка состыкованных труб в режиме поддержания заданной мощности нагрева (время нагрева 28 мин)

Fig. 3. Temperature distribution along the weld-adjacent area of joint pipes in the mode of keeping specified heating power (heating time is 28 minutes)

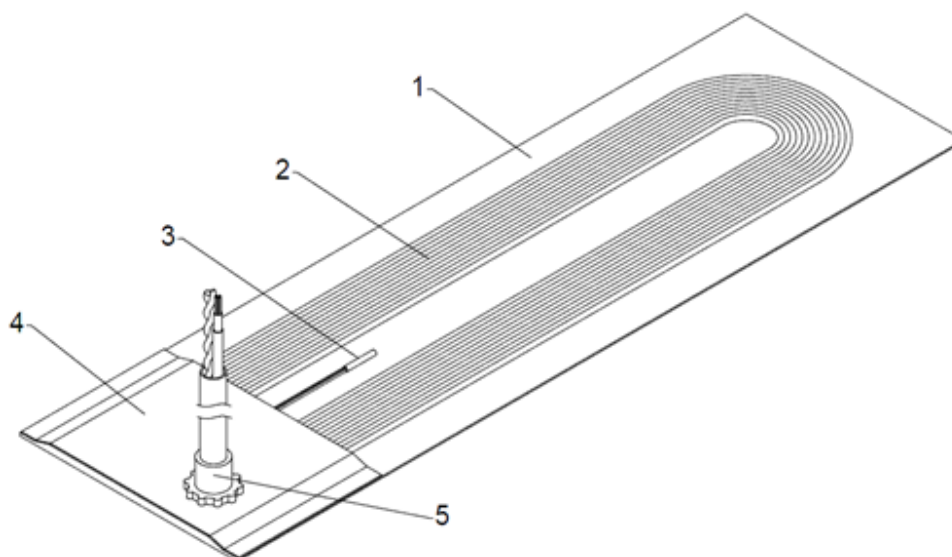


Рис. 4. Гибкий индуктор в разрезе:

- 1 – внутренний защитный слой из технической ткани;
 2 – кабель индуктора; 3 – датчик температуры;
 4 – внешний защитный слой из технической ткани; 5 – кабельный ввод

Fig. 4. Flexible inductor in section:

- 1 – inner protective layer made of industrial fabric;
 2 – inductor cable; 3 – temperature sensor;
 4 – external protective layer made of industrial fabric; 5 – cable enter

легко заменяемая теплоизоляционная защита. Нагреватель подключается к питающей сети 220/380 В в зависимости от мощности. Температура нагрева объекта до +200 °С.

Схемотехнические решения, примененные в преобразователе сетевого напряжения в высокочастотный ток, пропускаемый через обмотку индуктора (частота преобразования выбрана равной 22 кГц), построены на условии обеспечения минимальных потерь в полупроводниковых ключах [19; 20]. Поэтому в основе силовой части преобразователя использованы квазирезонансные схемы [21; 22], что позволило обеспечить низкие массогабаритные показатели индукционного нагревателя и легкость его установки на объект нагрева.

На рис. 5 приведены внешний вид разработанного индукционного нагревателя и результаты тепловизионной съемки нагрева стыка трубопроводов.

Из рис. 5 видно, что стык трубопроводов при термообработке прогрет до необходимой температуры за заданное время. Однако применение, как было предложено в [18], равномерно уложенного в обмотке индуктора провода приводит к тому, что максимальная температура в некоторых точках может превышать заданную для данной технологии величину, поэтому потребовалось дополнительное проведение исследований с целью обеспечения указанных выше требований по температурным режимам нагрева сварного стыка.

Натурные испытания

Для выявления отклонений от требуемых параметров нагрева околошовной зоны было проведено тщательное измерение разницы температур по окружности трубы во время нагрева. При этом монтаж индуктора

был выполнен встык, без нахлеста. Мощность, потребляемая индукционным нагревателем из сети при проведении экспериментальных исследований, не превышала 3 кВт.

На рис. 6 а, 7 а, 8 а приведены полученные экспериментальные зависимости температуры нагрева внутренней поверхности состыкованных труб в точках Т1–Т6 (рис. 1) при температуре нагрева наружной поверхности 155, 160, 165 °С. На основании графиков были построены наглядные диаграммы распределения температуры, представленные на рис. 6 б, 7 б, 8 б.

Анализ диаграммы, представленной на рис. 6 б, соответствующей температуре наружной поверхности труб 155 °С, показывает, что распределение температуры нагрева внутри труб на расстояниях 125 мм от их стыка как в одну, так и в другую сторону отличается не более чем на 4 °С. При этом допустимое отклонение в соответствии с техническими требованиями, указанными выше, составляет 5 °С.

Анализ диаграммы, представленной на рис. 7 б, соответствующей температуре наружной поверхности труб 160 °С, показывает, что распределение температуры нагрева внутри труб на расстояниях 125 мм от их стыка как в одну, так и в другую сторону отличается не более чем на 5 °С, за исключением правой крайней плоскости, в которой отличие от средней плоскости по горизонтали составляет 7 °С, а по вертикали – 10 °С, что превышает допустимое значение 5 °С в 2 раза.

Анализ диаграммы, представленной на рис. 8 б, соответствующей температуре наружной поверхности труб 165 °С, показывает, что распределение температуры нагрева внутри труб на расстояниях 125 мм от их стыка как в одну, так и в другую сторону отличается

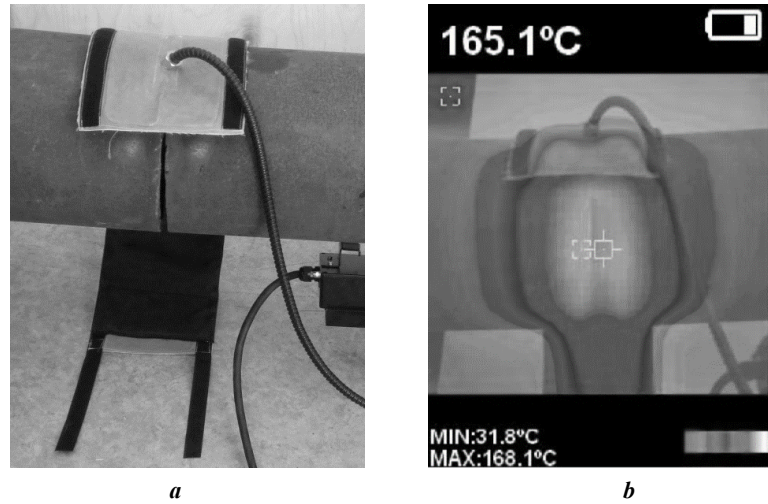


Рис. 5. Расположение отстегнутого гибкого индуктора на сварном стыке трубопроводов после нагрева (а) и тепловизионная съемка нагретого стыка трубопроводов гибким индуктором (б)
Fig. 5. The location of the unclipped flexible inductor on a pipeline welded joint after heating (a) and thermal imaging of a pipeline joint heated by flexible inductor (b)

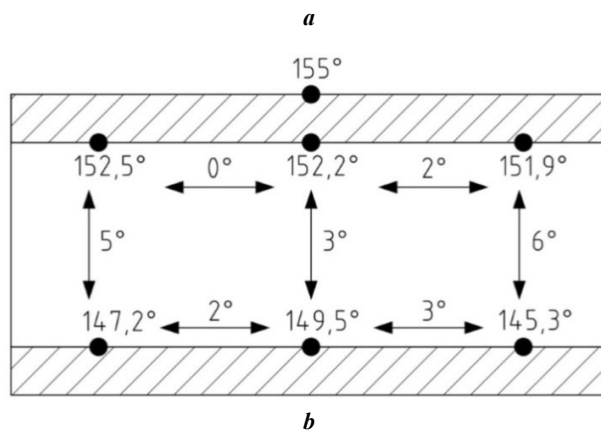
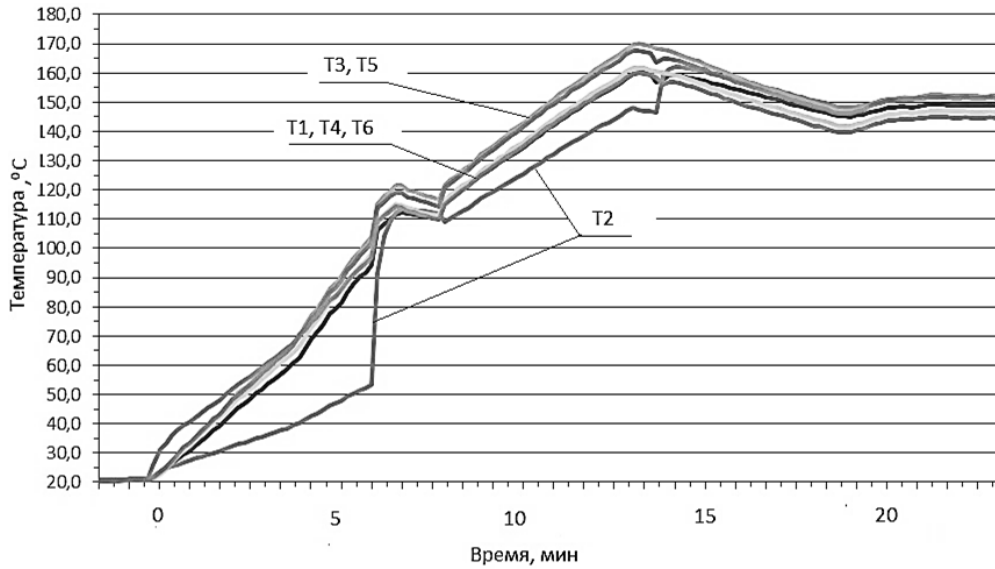


Рис. 6. Режим нагрева наружной поверхности труб 155 °С:
 а – изменение температуры нагрева внутри трубы в точках установки датчиков (Т1–Т6) в зависимости от времени нагрева;
 б – диаграммы распределения температуры внутри трубы
Fig. 6. The mode of heating the pipeline external surface to 155 °С:
 а – heating temperature change inside of a pipe at the points of installing sensors (Т1–Т6) depending on the heating time;
 б – diagrams of temperature distribution in a pipe

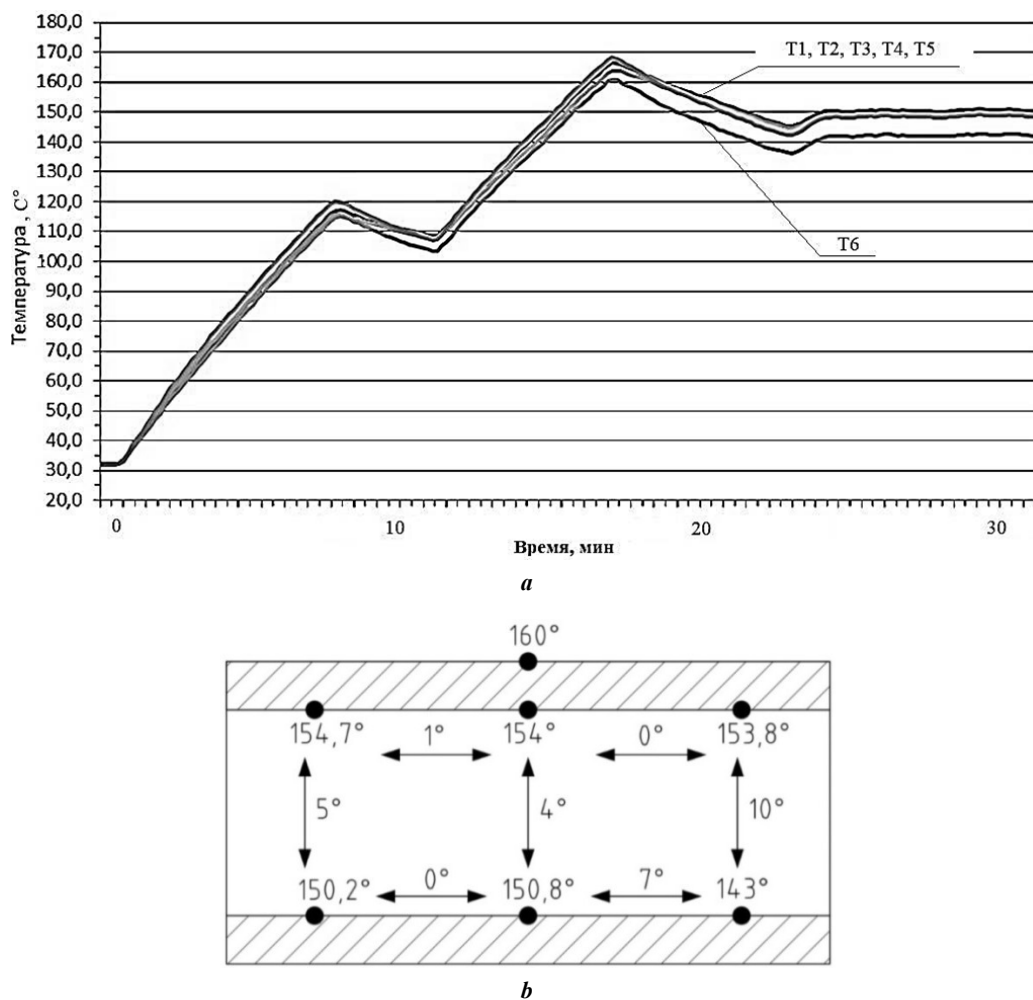


Рис. 7. Режим нагрева наружной поверхности труб 160 °С:

a – изменение температуры нагрева внутри трубы в точках установки датчиков (T1–T6) в зависимости от времени нагрева;

b – диаграммы распределения температуры внутри трубы

Fig. 7. The mode of heating the pipeline external surface to 160 °C:

a – heating temperature change inside of a pipe at the points of installing sensors (T1–T6) depending on the heating time;

b – diagrams of temperature distribution in a pipe

не более чем на 4 °С, за исключением правой крайней плоскости, в которой отличие от средней плоскости по горизонтали составляет 11 °С, а по вертикали – 14 °С, что превышает допустимое отклонение от нормы 5 °С в 3 раза.

Доработка и изменение конструкции гибкого индуктора

Так как рабочая температура нагрева наружной поверхности в средней плоскости должна быть 165 °С и в некоторых случаях выше, потребовалось обеспечить при этих температурах разницу между температурами нагрева внутренней поверхности в правой крайней и в средней плоскостях в пределах нормы, т. е. привести температуру нагрева внутренней поверхности в правой крайней плоскости в соответствие с температурой нагрева в левой крайней плоскости. Поэтому для обеспечения требуемых температурных режимов была доработана и изменена конструкция гибкого индуктора, и в первую очередь перераспределены определенным образом витки обмотки 2 индуктора (рис. 4) для снижения

выявленного краевого эффекта. Кроме того, для реализации условий соблюдения всех температурных режимов, востребованной технологией приклеивания на внутренней поверхности сварного шва состыкованных трубопроводов изоляционного материала, был скорректирован диапазон требуемых температур внутри трубы при выходе индукционного нагревателя на заданный режим нагрева наружной поверхности труб (рис. 9).

Экспериментальным путем в процессе исследований были определены геометрические размеры, количество витков и шаг укладки обмотки индуктора (расстояние между витками плоской обмотки).

В результате проведенных испытаний доработанного индуктора получены экспериментальные зависимости, представленные на рис. 10, анализ которых подтверждает положительные результаты по нагреву околшовной зоны сварного стыка, удовлетворяющие требованиям технологии приклеивания изоляционного материала на внутренней поверхности трубопровода.

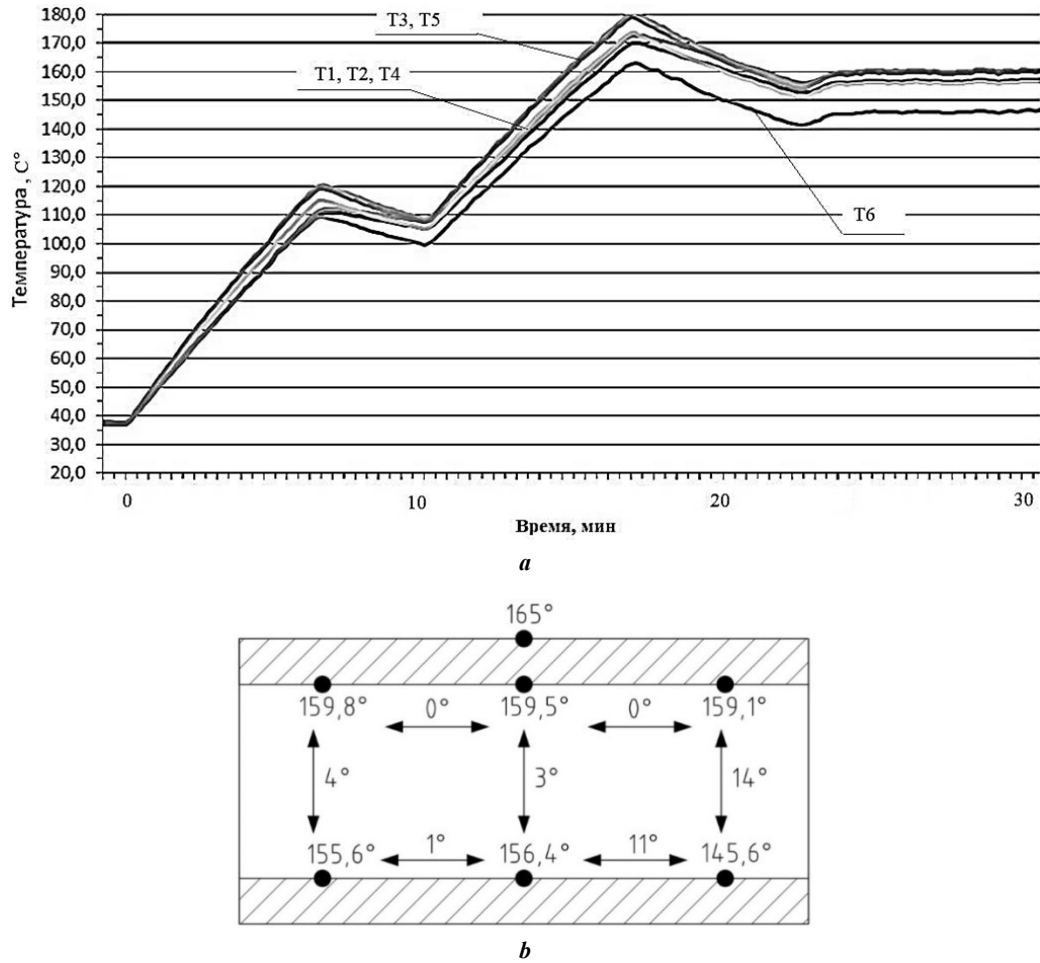


Рис. 8. Режим нагрева наружной поверхности труб 165 °С:
a – изменение температуры нагрева внутри трубы в точках установки датчиков (Т1–Т6) в зависимости от времени нагрева;
b – диаграммы распределения температуры внутри трубы

Fig. 8. The mode of heating the pipeline external surface to 165 °С:
a – heating temperature change inside of a pipe at the points of installing sensors (Т1–Т6) depending on the heating time;
b – diagrams of temperature distribution in a pipe

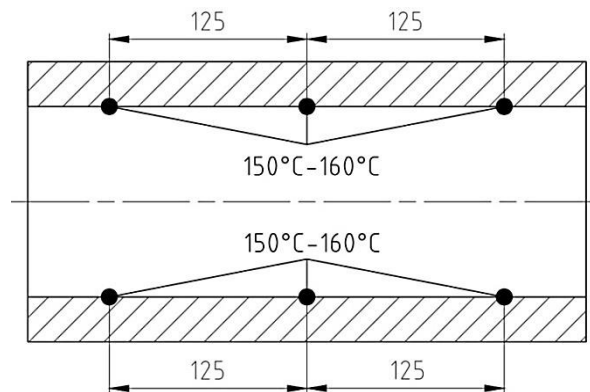


Рис. 9. Диапазон требуемых температур внутри трубы при выходе доработанного индуктора на заданный режим нагрева наружной поверхности труб
Fig. 9. The range of required temperatures inside of a pipe when the updated inductor enters the specified mode of heating of the pipeline external surface

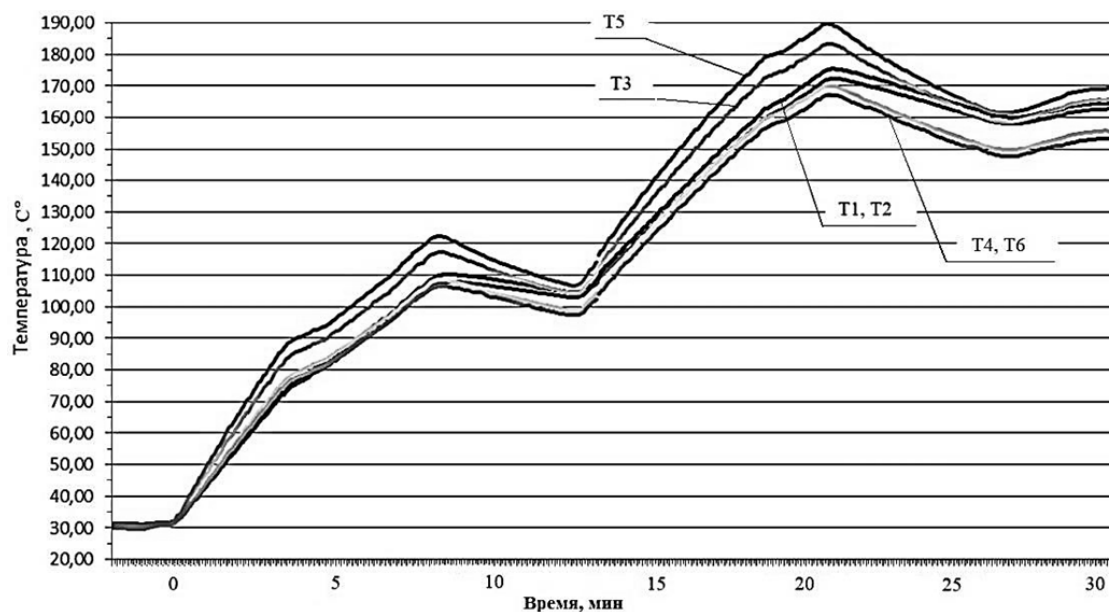


Рис. 10. Изменение температуры нагрева внутри трубы в точках установки датчиков (Т1–Т6) зависимости от времени нагрева при выходе на режим нагрева наружной поверхности труб 168 °С

Fig. 10. Heating temperature change inside of a pipe at the points of installing sensors (Т1–Т6) depending on heating time when entering the mode of heating of the pipe external surface to 168 °С

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты исследований показали, что с увеличением нагрева поверхности труб увеличивается отклонение температуры от заданной внутри трубопровода только в правой крайней плоскости, как по вертикали, так и по горизонтали. При предварительном проведении моделирования тепловых процессов в пакете COMSOL Multiphysics данного краевого эффекта выявлено не было. Выявленное отклонение температуры внутри трубопровода в крайней правой плоскости связано с конструктивными особенностями индуктирующей обмотки гибкого индуктора, ее геометрией и способностью наведения электромагнитного поля. Для исключения отклонений от требуемых значений температуры были проведены работы по изменению конструкции гибкого индуктора, подбору витков индуктора, изменению расположения витков индуктора на плоскости, изменению расстояния между некоторыми витками обмотки (шага укладки обмотки). В результате был определен необходимый конструктив индуктора, значительно снижающий выявленный краевой эффект. Это позволило обеспечить заданные температуры в важных с точки зрения применяемой технологии зонах нагрева сварного стыка трубопроводов.

Дальнейшие исследования гибкого индукционного нагревателя необходимо связать с анализом и синтезом системы автоматического регулирования процесса нагрева с целью правильного выбора коэффициентов ПИД-регулятора для оптимального процесса регулирования и исключения перерегулирования при выходе на требуемый установившийся режим нагрева.

Полученные в настоящей работе результаты позволяют внести существенный вклад в развитие современных технических средств, используемых при реализа-

ции внутренней защиты от коррозии сварного стыка газонефтепроводов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Определены геометрические размеры, количество витков и шаг укладки обмотки гибкого индуктора для нагрева сварного соединения трубопроводов диаметром 159 мм и толщиной стенки 8 мм. Мощность индукционного нагревателя при этом составляет не более 3 кВт при температуре окружающей среды от –40 до +50 °С.

Разработан легкосъемный быстро устанавливаемый гибкий индукционный нагреватель, который обеспечивает требуемый температурный режим нагрева внутри трубопроводов небольшого диаметра в соответствии с технологией нанесения внутренней антикоррозионной защиты сварного стыка трубопроводов. Разработанный гибкий индукционный нагреватель имеет небольшую массу и габариты, обеспечивает автоматизацию и легкость проведения работ по нанесению внутренней изоляции на трубопроводы в полевых условиях и может найти широкое применение в нефтегазовой отрасли промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуменюк А.В. Увеличение срока службы нефтепромышленного оборудования за счет применения новых технических решений и современных антикоррозионных защитных покрытий // Нефть. Газ. Новации. 2016. № 5. С. 64–67. EDN: [WGBUQT](#).
2. Ерченков В.В., Крылов Е.А. Защита газонефтепроводов от коррозии // Труды Российского государст-

- венного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2009. № 2. С. 32–36. EDN: [MTWVLJ](#).
3. Протасов В.Н. Теория и практика применения полимерных покрытий в оборудовании и сооружениях нефтегазовой отрасли. М.: Недра, 2007. 374 с. EDN: [QNBNEH](#).
 4. Протасов В.Н., Штырев О.О. Способ Протасова В.Н. противокоррозионной защиты сварного раструбного соединения: патент на изобретение РФ № 2584016. 2016.
 5. Протасов В.Н., Коробов Д.А. Обеспечение требуемого уровня качества внутренней противокоррозионной изоляции сварных соединений стальных элементов нефтепромысловых трубопроводов с внутренним эпоксидным покрытием // Территория НЕФТЕГАЗ. 2018. № 12. С. 48–55. EDN: [YPXOAH](#).
 6. Кершенбаум В.Я., Протасов В.Н., Коробов Д.А., Штырев О.О. Методические основы разработки технических требований к противокоррозионной изоляции неразъемных соединений сложных технических систем на примере сварных соединений нефтепромысловых трубопроводов из стальных элементов с полимерными покрытиями // Территория НЕФТЕГАЗ. 2020. № 3-4. С. 70–78. EDN: [UWJCVA](#).
 7. Фонарев З.И. Электроподогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности. Л.: Недра, 1984. 148 с.
 8. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. М.: Инфра-Инженерия, 2015. 270 с.
 9. Пантелеймонов Е.А. Оборудование для термообработки сварных соединений трубопроводов // Автоматическая сварка. 2012. № 4. С. 53–56. EDN: [TEBPXR](#).
 10. Демидович В.Б. Развитие технологий индукционного нагрева (к 140-летию со дня рождения Вологодина Валентина Петровича) // Электричество. 2021. № 5. С. 51–55. DOI: [10.24160/0013-5380-2021-5-51-55](#).
 11. Борисов В.Б. Изоляция стыков трубопроводов в трассовых условиях, проблемы и решения // Территория НЕФТЕГАЗ. 2012. № 4. С. 30–31. EDN: [OXYKBH](#).
 12. Петрусенко Е.В. Применение индукционного нагрева при изоляции сварных стыков труб в трассовых условиях // Территория НЕФТЕГАЗ. 2016. № 7-8. С. 58–61. EDN: [WKGBGT](#).
 13. Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Strupinskiy M.L., Khrenkov N.N. Development and research of characteristics of linear inductors for heating of steel ferromagnetic plates and tubes // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). 2018. Vol. 63. № 3. P. 459–466. EDN: [YBKWRN](#).
 14. Макулов И.А., Никитин Ю.А. Оборудование и особенности применения индукционного нагрева в нефтегазовой промышленности // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2014. № 3. С. 50–53. EDN: [SYPBWJ](#).
 15. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Меднов А.А. Преобразователи частоты для электротехнологических процессов, включающих индукционный нагрев // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2. С. 72–82. EDN: [EMLNEZ](#).
 16. Lucia O., Maussion P., Dede E.J., Burdío J.M. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. Vol. 61. № 5. P. 2509–2520. DOI: [10.1109/TIE.2013.2281162](#).
 17. Esteve V., Jordan J., Dede E.J., Sanchis-Kilders E., Martinez P.J., Maset E., Gilabert D. Optimal LLC Inverter Design with SiC MOSFETs and Phase Shift Control for Induction Heating Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2022. Vol. 69. № 11. P. 11100–11111. DOI: [10.1109/TIE.2021.3121730](#).
 18. Никитин Ю.А., Осипов В.В., Никитин А.Ю. Обогреватель трубопроводной арматуры, трубопроводов и емкостей: патент на полезную модель РФ № 165070. 2016.
 19. Силкин Е.М. Транзисторные преобразователи частоты для индукционного нагрева // Электротехника. 2004. № 10. С. 24–30.
 20. Kelemen A., Kutasi N. Modelling and Analysis of the Induction Heating Converters // Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials. 2011. P. 49–74. DOI: [10.5772/14057](#).
 21. Муркин М.Н., Земан С.К., Ярославцев Е.В. Исследование коммутационных процессов в инверторе тока // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 4. С. 111–116. EDN: [KYRLJN](#).
 22. Ngo T., Nguyen N. LLC Inverter Design Procedure for Induction Heating with Quantitative Analysis of Power Transfer // Science & Technology Development Journal Engineering and Technology. 2021. Vol. 4. № 1. P. 739–747. DOI: [10.32508/stdjet.v4i1.751](#).

REFERENCES

1. Gumenyuk A.V. The increase of service life of oilfield equipment through application of new engineering solutions and advanced anti-corrosion protective coatings. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2016, no. 5, pp. 64–67. EDN: [WGBUQT](#).
2. Erchenkov V.V., Krylov E.A. Protection of oil and gas pipelines against corrosion. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefi i gaza imeni I.M. Gubkina*, 2009, no. 2, pp. 32–36. EDN: [MTWVLJ](#).
3. Protasov V.N. *Teoriya i praktika primeneniya polimernykh pokrytiy v oborudovanii i sooruzheniyakh neftegazovoy otrasli* [Theory and practice of application of polymer coatings in equipment and facilities of the oil and gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 2007. 374 p. EDN: [QNBNEH](#).
4. Protasov V.N., Shtyrev O.O. *Sposob Protasova V.N. protivokorroziionnoy zashchity svarnogo rastrubnogo soedineniya* [V.N. Protasov method of anticorrosive protection of a welded bell-to-bell joint], patent na izobretenie RF no. 2584016, 2016.
5. Protasov V.N., Korobov D.A. Goal quality assurance of inner anti-corrosive protection of welded joints in epoxy coated steel pieces of oilfield pipelines. *Territoriya NEFTEGAZ*, 2018, no. 12, pp. 48–55. EDN: [YPXOAH](#).
6. Kershenbaum V.Ya., Protasov V.N., Korobov D.A., Shtyrev O.O. Methodological bases of development of technical requirements for anticorrosive insulation of permanent joints of complex technical systems on the example of welded joints of oil field pipelines made of steel elements with polymer coatings. *Territoriya NEFTEGAZ*, 2020, no. 3-4, pp. 70–78. EDN: [UWJCVA](#).

7. Fonarev Z.I. *Elektropodogrev truboprovodov, rezervuarov i tekhnologicheskogo oborudovaniya v neftyanoy promyshlennosti* [Electrical heating of pipelines, tanks and process equipment in the oil industry]. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 148 p.
8. Strupinskiy M.L., Khrenkov N.N., Kuvaldin A.B. *Proektirovanie i ekspluatatsiya sistem elektricheskogo obogreva v neftegazovoy otrasli* [Design and operation of electric heating systems in the oil and gas industry]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2015. 270 p.
9. Panteleymonov E.A. Equipment for thermal treatment of pipeline welded joints. *Avtomaticheskaya svarka*, 2012, no. 4, pp. 53–56. EDN: [TEBPXR](#).
10. Demidovich V.B. Development of induction heating technologies (to the 140th anniversary of the birth of Valentin Petrovich Vologdin). *Elektrichestvo*, 2021, no. 5, pp. 51–55. DOI: [10.24160/0013-5380-2021-5-51-55](#).
11. Borisov V.B. Pipeline joints insulation within field conditions, problems and solutions. *Territoriya NEFTEGAZ*, 2012, no. 4, pp. 30–31. EDN: [OXYKBH](#).
12. Petrusenko E.V. Application of induction heating with insulation of welded pipe joints in field conditions. *Territoriya NEFTEGAZ*, 2016, no. 7-8, pp. 58–61. EDN: [WKGBGT](#).
13. Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Strupinskiy M.L., Khrenkov N.N. Development and research of characteristics of linear inductors for heating of steel ferromagnetic plates and tubes. *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 459–466. EDN: [YBKWRN](#).
14. Makulov I.A., Nikitin Yu.A. Equipment and application features of induction heating in oil-and-gas industry. *Promyshlennyy elektroobogrev i elektrootoplenie*, 2014, no. 3, pp. 50–53. EDN: [SYPBWJ](#).
15. Roginskaya L.E., Gorbunov A.S., Mednov A.A. Frequency converters for induction heating electrotechnological processes. *Intellektualnaya elektrotehnika*, 2021, no. 2, pp. 72–82. EDN: [EMLNEZ](#).
16. Lucía O., Maussion P., Dede E.J., Burdío J.M. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61, no. 5. pp. 2509–2520. DOI: [10.1109/TIE.2013.2281162](#).
17. Esteve V., Jordan J., Dede E.J., Sanchis-Kilders E., Martinez P.J., Maset E., Gilabert D. Optimal LLC Inverter Design with SiC MOSFETs and Phase Shift Control for Induction Heating Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, vol. 69, no. 11, pp. 11100–11111. DOI: [10.1109/TIE.2021.3121730](#).
18. Nikitin Yu.A., Osipov V.V., Nikitin A.Yu. *Obogrevatel truboprovodnoy armatury, truboprovodov i emkostey* [Heater for pipeline fittings, pipelines and reservoirs], patent na poleznuyu model RF no. 165070, 2016.
19. Silkin E.M. Transistorized frequency converters for induction heating. *Elektrotehnika*, 2004, no. 10, pp. 24–30.
20. Kelemen A., Kutasi N. Modelling and Analysis of the Induction Heating Converters. *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*, 2011, pp. 49–74. DOI: [10.5772/14057](#).
21. Murkin M.N., Zeman S.K., Yaroslavtsev E.V. Studying switching processes in current inverter. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 111–116. EDN: [KYRLJN](#).
22. Ngo T., Nguyen N. LLC Inverter Design Procedure for Induction Heating with Quantitative Analysis of Power Transfer. *Science & Technology Development Journal Engineering and Technology*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 739–747. DOI: [10.32508/stdjet.v4i1.751](#).

Development and research of a flexible induction heater of internal insulation of a welded joint of pipelines

© 2022

Yury A. Nikitin, PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chair of Technological Process Automation

Ufa University of Science and Technology, Ufa (Russia)

E-mail: nikyu@yandex.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8419-8218>

Received 25.04.2022

Accepted 14.07.2022

Abstract: To ensure the quality of applying anti-corrosion insulation of welded joints inside pipelines with the internal protective coating, it is necessary to keep temperature regimes of a welded joint specified heating zone with high accuracy, including the heating rate and keeping the heating temperature of anti-corrosion insulation for a certain time. Nowadays, the industry does not produce compact and easy-to-use devices for heating welded joints of small-diameter pipelines when applying internal insulation in the field environment, so it is necessary to study the development of such types of devices and identify the efficiency of their use in practice. During the study, the author applies the induction heating method using a flexible induction heater of a pipeline welded joint. The heater is easy-to-install and ensures the required technological modes of heating the insulation inside the pipelines. The paper presents the results of modeling thermal processes, and, using the COMSOL Multiphysics package, studies temperature distribution along the joined pipelines. The study identified that due to uneven heating of a pipeline joint, temperature deviations falling outside the specified range occur. The author proposes a solution for this problem, which is a structural solution for the developed flexible inductor. The author used a specific laying of inductor winding to ensure the required heating characteristics. The experimental dependences of temperature change on the heating time inside the joined pipelines at the specified heating zones, which indicate the compliance with the requirement for the technology of insulating coating application, when entering various

heating modes are obtained. The induction heater power required for heating the pipeline with a diameter of 159 mm and wall thickness of 8 mm was no more than 3 kW. The developed heaters provide the possibility of quick and convenient installation on pipelines, safety, and automation of insulation application. The study solves an important aspect of the problem of practical use of the technology of anti-corrosion protection of a welded bell-and-bell joint of pipelines of small diameters in the oil-and-gas industry.

Keywords: pipeline welded joint; weld-adjacent area; temperature modes; induction heater; flexible inductor.

For citation: Nikitin Yu.A. Development and research of a flexible induction heater of internal insulation of a welded joint of pipelines. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 4, pp. 90–101. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-4-90-101.