

На правах рукописи



Волков Игорь Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ГАЗОПРОВОДОВ В
УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ТЕПЛООТВОДА**

Специальность: 05.02.10 Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Российском государственном университете нефти и газа
(НИУ) имени И.М.Губкина

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ЕЛАГИНА Оксана Юрьевна

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
ЦАРЬКОВ Андрей Васильевич
МГТУ имени. Н.Э. Баумана,
директор Калужского филиала

Кандидат технических наук
ПОНОМАРЕВ Павел Александрович
ФГУП ВИАМ (ГНЦ РФ),
лаборатория сварки и пайки,
ведущий инженер

Ведущая организация: **НИУ «МЭИ» (Москва)**

Защита состоится «14» декабря 2017 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Коновалов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Значительная часть действующих в настоящее время магистральных газопроводов (МГ) характеризуются сроком эксплуатации свыше 30 лет и требует постоянного ремонта. В то же время, согласно статистике диагностирования линейной части (ЛЧ) магистральных газопроводов (МГ) более 30% выявляемых дефектов тела трубы и сварных соединений относятся к несквозным. Это позволяет проводить ремонт без разгерметизации полости газопровода, на трубопроводах, находящихся под избыточным давлением или перекачивающих газ. Существенные экономические и экологические преимущества таких способов ремонта, выполняемых методами наплавки или установкой сварных муфт, определяют все большее их применение в производственной практике.

Проведение ремонтных работ на газопроводах, находящихся под давлением или транспортирующих газ, является сложной в техническом отношении и опасной с точки зрения промышленной безопасности задачей. Ее выполнение требует наличия тщательно проработанной пошаговой технологии ремонта с применения обоснованных режимов и параметров каждой операции. Одной из таких операций при выполнении ремонта методами сварки - наплавки является температура подогрева металла, формирующая вместе с режимами сварки нормативный комплекс механических свойств. Обеспечение требуемых значений температуры подогрева к моменту начала наложения сварочного прохода является важным фактором, регулирующим скорость охлаждения металла в процессе сварки-наплавки. При ремонте на действующих газопроводах выполнение этих требований часто не возможно из-за интенсивного теплоотвода в компримированный газ.

Поэтому при реализации таких способов ремонта очень важно выявлять случаи, при которых не удастся обеспечить требуемую температуру подогрева еще на этапе разработки технологического процесса, а не на месте проведения работ. Принятие решений о введении внеплановых дополнительных подогревов непосредственно при проведении ремонта может не только оказаться безуспешным, но и привести к аварии. Все это определило актуальность данной работы.

Важным параметром, обеспечивающим сохранение температуры сварочного подогрева, является продолжительность межоперационного интервала между окончанием подогрева и началом наложения слоя наплавки. В дей-

ствующей нормативной документации, регламентирующей проведение ремонтных работ на магистральных газопроводах, при назначении сварочного подогрева нормирование и методика оценки продолжительности межоперационного интервала отсутствуют. Также нет указаний по применению компенсирующих мероприятий для увеличения продолжительности максимального межоперационного интервала в тех случаях, когда получаемого для данных условий ремонта интервала времени недостаточно по технологическим или другим соображениям для начала операции сварки-наплавки.

Таким образом, повышение безопасности и качества выполнения ремонтных работ на газопроводах, находящихся под давлением и транспортирующих газ, определяет необходимость обоснования областей применимости технологий ремонта методами сварки-наплавки по критерию обеспечения нормативной температуры подогрева, и разработки требований к предельно допустимой продолжительности межоперационного интервала в условиях интенсивного теплоотвода, обеспечивающей сохранение заданной температуры подогрева.

Целью настоящей работы являлось обоснование максимальной продолжительности межоперационного интервала и разработка корректирующих мероприятий для его увеличения при выполнении предварительного и сопутствующего подогрева зоны ремонта несквозных дефектов участка газопровода, находящегося под давлением или транспортирующего газ.

В диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Разработка расчетной методики определения температурно-временных параметров охлаждения металла стенки трубы после предварительного и сопутствующего подогрева при различных условиях теплоотвода из зоны ремонта;

2. Проведение экспериментальных исследований параметров теплоотвода при предварительном подогреве металла зоны ремонта и в процессе сварки для верификации предложенной расчетной методики;

3. Обоснование областей применимости технологий ремонта газопроводов методами сварки-наплавки в условиях интенсивного теплоотвода по критерию обеспечения нормативной температуры подогрева и разработке нормативных требований к длительности межоперационного интервала до начала процесса сварки-наплавки.

Научная новизна:

1. Определены области применимости технологий ремонта газопроводов под давлением и транспортирующих газ по показателю обеспечения нормативной температуры подогрева, согласно которым диапазон максимально допустимого давления газа в газопроводе пропорционален остаточной толщине стенки трубы с коэффициентом пропорциональности, изменяющимся в зависимости от температуры газа от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости потока газа от 1 м/с до 25 м/с в интервале от $0,5$ до $0,03$ соответственно.
2. Выявлено, что для компенсации теплоотвода при ремонте газопроводов под давлением ширину участка дополнительного подогрева целесообразно назначать не более 200 мм по периметру выборки. При ремонте газопроводов, транспортирующих газ, подобное расширение зоны подогрева не эффективно.
3. На основе результатов математического моделирования процессов конвективного теплообмена с компримированной газовой средой выявлено влияние на снижение температуры сварочного подогрева способа и условий проведения ремонта, а так же параметров дефектного участка газопровода и установлены закономерности позволяющие определить фактическую длительность межоперационного интервала.

Практическая значимость и ценность результатов диссертации заключается в следующем:

1. Обоснована необходимость нормирования продолжительности межоперационных интервалов при ремонте газопроводов в условиях интенсивного теплоотвода, позволяющая обеспечить сохранение нормативных значений температур предварительного и сопутствующего подогрева и способствующая формированию требуемого уровня механических свойств металла зоны ремонта, особенно на газопроводах бывших в эксплуатации.
2. Предложен расчетно-графический метод оценки продолжительности максимального межоперационного интервала после окончания сварочного подогрева и до начала наплавки, позволяющий определить его фактическое значение в условиях интенсификации теплоотвода при ремонте несквозных дефектов газопровода под давлением и при перекачке газа.
3. Предложены мероприятия по увеличению максимальной продолжительности межоперационного интервала при выполнении предварительного и сопутствующего подогрева путем увеличения ширины участка дополнительного подогрева, а также уменьшения давления и скорости транспортировки газа.

Результаты работы были использованы при разработке Р Газпром 2-2.3-

961-2015 «Технологии сварки при ремонте магистральных газопроводов, находящихся под давлением, методами врезки под давлением, сварными муфтами, сваркой-наплавкой» и Р Газпром 2-2.3-352-2009 «Рекомендации по режимам подогрева при выполнении сварочных работ на газопроводах, находящихся под давлением».

Методология и методы исследования. Методология исследований заключалась в поэтапном изучении влияния различных условий теплоотвода на процесс снижения температуры сварочного подогрева в зоне ремонта: параметров выборки дефектного участка, режима подогрева, а так же температуры окружающей среды на интенсивность теплоотвода в холодный металл стенки трубы; давления и температуры газа в трубе, режима подогрева и размеров и расположения выборки на свободный конвективный теплообмен; давления, температуры, скорости потока газа, а так же диаметра газопровода на вынужденную конвекцию при ремонте на действующем газопроводе.

При этом в теоретической части работы применялась идеализация объекта исследования в виде термически тонкой пластины, проводилось математическое моделирование изменения теплового поля в зоне ремонта при нестационарном режиме теплопроводности и использовалась теория подобия для оценки конвективной составляющей теплообмена с учетом параметров процесса и условий выполнения ремонтных работ на действующем газопроводе и находящимся под давлением. Для верификации полученных зависимостей была проведена экспериментальная проверка адекватности математической модели.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм и методики определения параметров предварительного и сопутствующего подогрева и длительности межоперационного интервала при ремонте дефектов линейной части газопроводов методами сварки-наплавки без стравливания газа, под давлением и без остановки перекачки газа.
2. Результаты лабораторных исследований и полигонных испытаний, подтверждающих применимость предлагаемых расчетных методик.
3. Практические рекомендации по обоснованию областей применимости технологий ремонта методами сварки-наплавки в условиях интенсивного теплоотвода и длительности межоперационного интервала при ремонте дефектов линейной части газопроводов без стравливания газа, под давлением и без остановки перекачки газа.

Достоверность результатов исследования обеспечивалась путем применения апробированных методов экспериментальных исследований,

осуществленных на оборудовании, прошедшем аттестацию и государственную поверку, а также признанных методик расчета процессов конвективного теплообмена и процессов теплопроводности на основе известных теоретических положений и опытных данных термодинамики неравновесных процессов, согласованностью аналитических данных с экспериментальными.

Личный вклад автора в получении основных научных результатов состоит в следующем:

- в разработке расчетной методики определения температурно-временных параметров охлаждения металла стенки трубы после предварительного и сопутствующего подогрева при различных условиях теплоотвода из зоны ремонта;
- в проведении экспериментальных исследований параметров теплоотвода при предварительном подогреве металла зоны ремонта и в процессе сварки для верификации предложенной расчетной методики;
- в обосновании областей применимости технологий ремонта в условиях интенсивного теплоотвода на газопроводах, находящихся под давлением и транспортирующих газ, и разработке нормативных требований к и длительности межоперационного периода после окончания сварочного подогрева.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях: 64-я Международная научная студенческая конференция «Нефть и газ - 2010» (Москва, 2010 г.); VII Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии» (Украина, г. Ворзель, 2013 г.); X Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (Москва, 2014 г.); II Международная научно-техническая конференция «Трубопроводный транспорт: теория и практика-2017» (Москва, 2017 г.); II Международная конференция «Арктика: шельфовые проекты и устойчивое развитие регионов» (Москва, 2017 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 научных статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, заключения, списка литературы из 60 наименований, работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 25 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведена общая характеристика диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы, а так же представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ литературных данных о современных методах ремонта ЛЧ МГ, критериях их выбора и состоянии газотранспортной системы России. Он позволил сделать вывод о том, что в настоящее время по совокупности экономических, экологических и технологических факторов наиболее востребованными являются технологии ремонта поверхностных дефектов, реализуемые на действующих газопроводах и газопроводах, находящихся под давлением с временной остановкой транспортировки газа, методами сварки-наплавки и сварными муфтами.

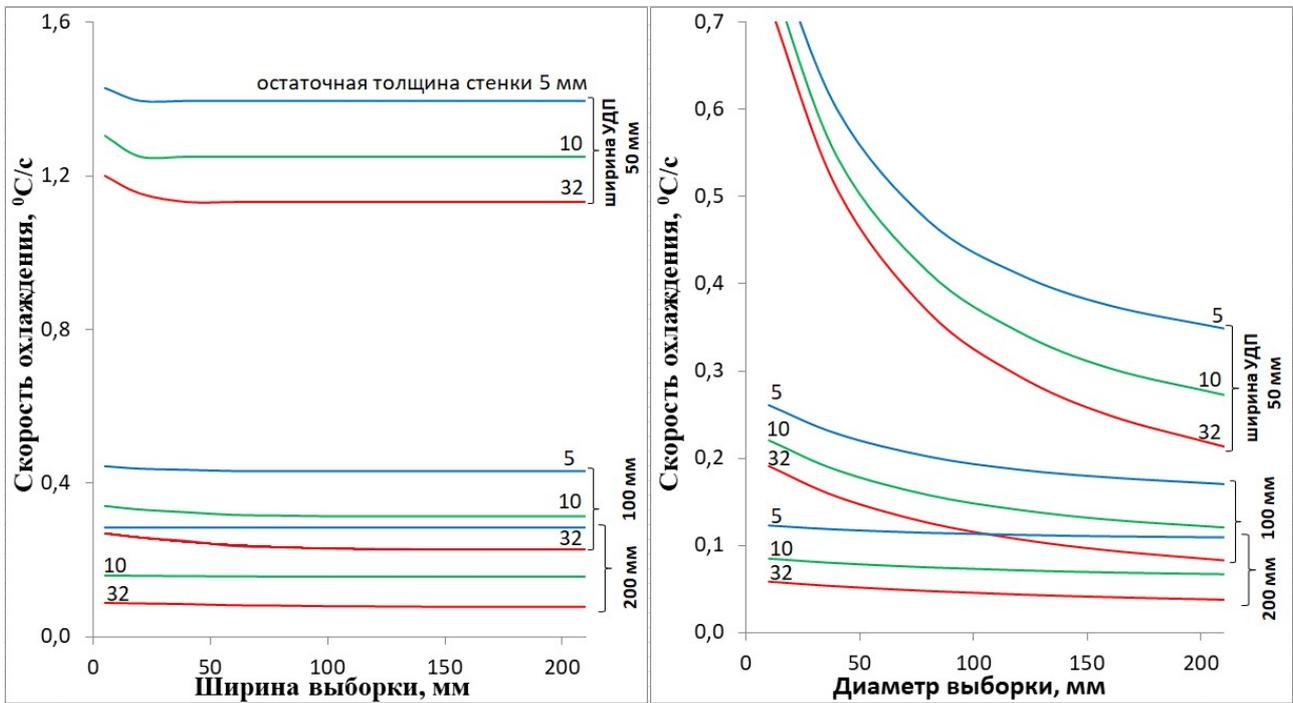
Проанализированы требования действующей нормативной документации к технологиям ремонта несквозных дефектов газопроводов и к получаемым механическим свойствам металла восстановленных участков. Рассмотрена проблема сохранения этих свойств на нормативном уровне в условиях интенсификации теплоотвода при ремонте на газопроводе, находящемся под избыточным (остаточным) давлением. В качестве решения предложены оценка применимости технологий по критерию возможности обеспечения нормативной температуры подогрева и регламентация предельно допустимой продолжительности межоперационного интервала между окончанием сварочного подогрева и началом наплавки на этапе разработки технологического процесса ремонта.

Выполнен анализ существующих методов расчета тепловых полей для случая локального сварочного подогрева в интервалах регламентированных температур, осложненного интенсивным теплоотводом в компримированный газ в различных условиях проведения ремонтных работ на ЛЧ МГ. Исходя из обеспечения приемлемой точности решения и возможности упрощенного графического представления полученных зависимостей для практического применения установлено, что тепловой расчёт зоны ремонта в межоперационный интервал целесообразно проводить с помощью аналитического решения нестационарного уравнения теплопроводности методом источников с учетом поверхностной теплоотдачи, оцениваемой с помощью широко применяемых в расчётах теплообмена критериальных уравнений подобия.

Во второй главе было представлено общее решение тепловой задачи охлаждения ремонтируемого участка стенки трубы после подогрева с учетом условий однозначности исходя из рассмотренных в первой главе требований нормативных документов к проведению ремонтных работ на магистральных газопроводах методами сварки-наплавки и сварными муфтами. Выявлены параметры, оказывающие основное влияние на скорость охлаждения металла зоны ремонта в регламентированных интервалах температур при различных способах проведения ремонтных работ: в условиях полного сброса давления в газопроводе; под давлением с временной остановкой транспортировки газа; и при ремонта на действующем газопроводе. На основе общего решения тепловой задачи и принятых для расчета критериальных уравнений подобия, с учетом влияния основных значащих параметров и исходя из нормируемых диапазонов их значений получены графические зависимости для определения скорости охлаждения в рассматриваемых интервалах температур подогрева в зависимости от способа проведения ремонтных работ.

При отсутствии избыточного давления в газопроводе наибольшее влияние на снижение температуры металла зоны ремонта после сварочного подогрева оказывает теплопроводность. Расчетный анализ изменения скорости охлаждения в зависимости от различных параметров показал, что наиболее значимыми в этом случае являются форма и наименьший габаритный размер выборки, ширина участка дополнительного подогрева, остаточная толщина стенки трубы, а так же температура окружающего воздуха и нормативная температура подогрева стенки трубы при проведении ремонтных работ. На Рис. 1 представлены примеры графиков изменения скоростей охлаждения, отображающие полученные зависимости.

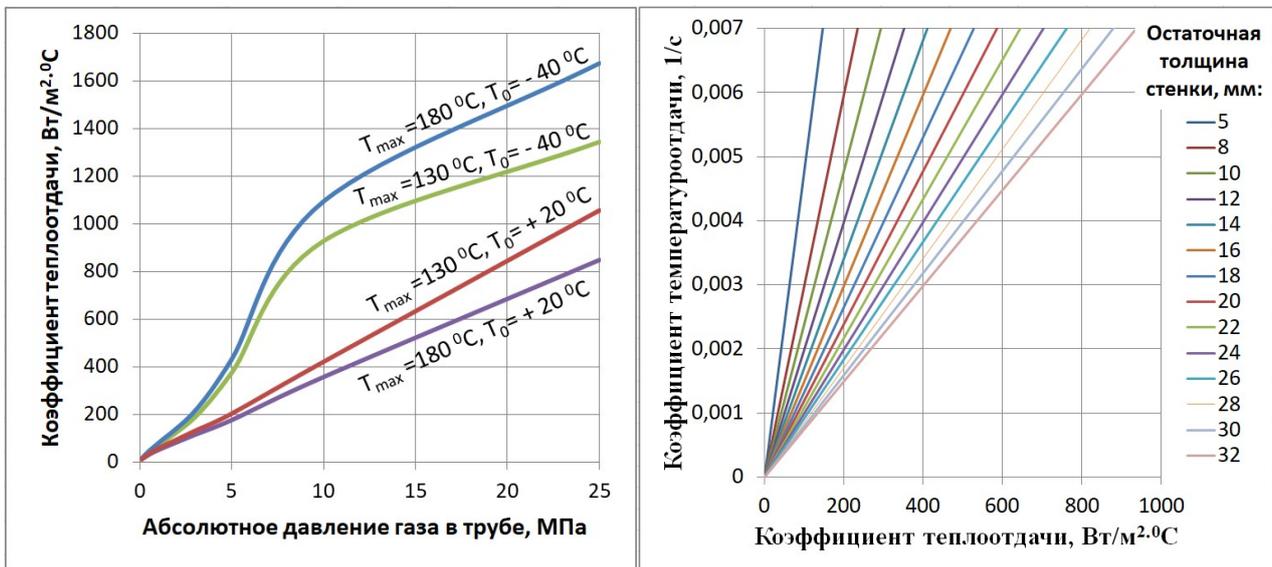
Изменение теплофизических свойств газа при наличии избыточного давления в газопроводе является существенным фактором, усиливающим теплоотвод за счет конвективного теплообмена между внутренней поверхностью стенки трубы и сжатым газом. Дополнительное влияние оказывают температура сжатого газа, которая при длительной остановке перекачки опускается до температуры окружающей среды, и пространственное расположение зоны ремонта по периметру трубы. Для расчета коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции применялись критериальные уравнения выведенные В.П.Исаченко. Были получены и графически представлены зависимости для коэффициента теплоотдачи от давления и температуры газа в трубе (Рис. 2а), изменения коэффициента теплоотдачи от величины



б)

а)

Рис.1. Диаграммы скоростей охлаждения металла после предварительного подогрева: а) для прямолинейной выборки в интервале 180 °С -120 °С различной ширины при температуре окружающего воздуха -40 °С, б) круглой выборки в интервале 130 °С -80 °С различного диаметра при температуре окружающего воздуха +20 °С



а)

б)

Рис. 2. Диаграммы параметров конвективного теплообмена: а) коэффициента теплоотдачи при различном давлении и температуре газа; б) коэффициента температуроотдачи от теплоотдачи при различной остаточной толщине стенки коэффициента теплоотдачи при различной остаточной толщине стенки трубы в

зоне ремонта (Рис. 2б) и зависимости для скорости охлаждения металла выборок различной формы и размеров, и различной ширины участка дополнительного подогрева (пример на Рис. 3).

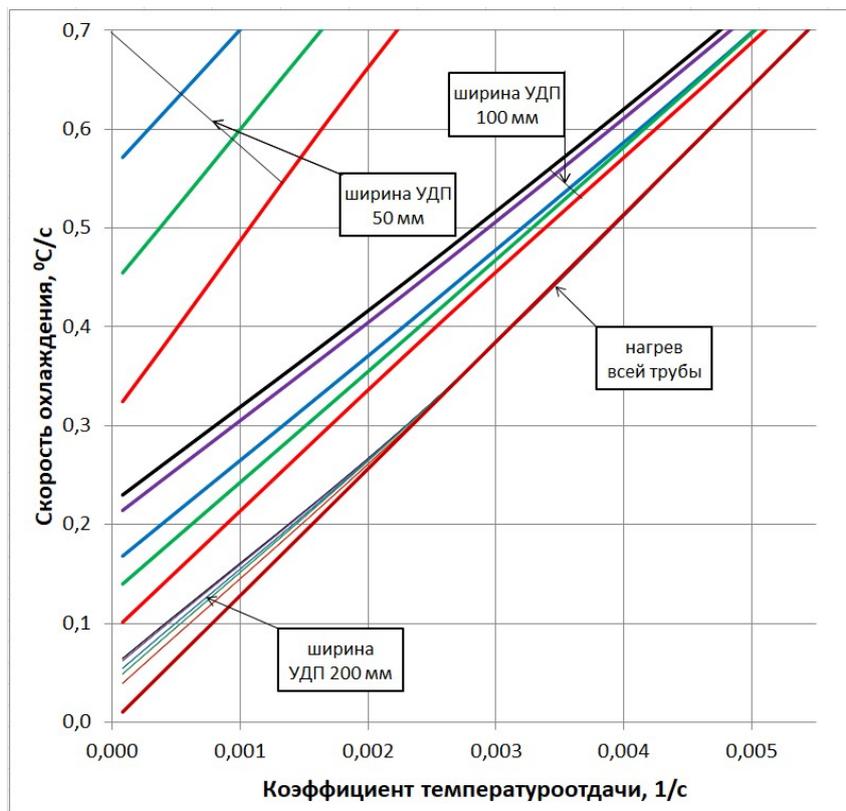


Рис. 3. Диаграмма изменения скорости охлаждения металла в интервале 180 °С-120 °С для круглых выборок различного диаметра и ширины УДП после предварительного подогрева

Проведение ремонтных работ на газопроводах без остановки перекачки газа характеризуется максимальным теплоотводом в компримированный газ из-за влияния вынужденной конвекции. Для расчета коэффициента теплоотдачи использовались критериальные уравнения М. А. Михеева. В результате расчетного моделирования было выявлено, что основными значащими факторами при этом методе ремонта являются давление, скорость потока газа и его температура, а также диаметр ремонтируемого участка газопровода и его остаточная толщина стенки. Для удобства расчетов было предложено представить коэффициент теплоотдачи в виде произведения двух комплексных величин - α_0 и K , зависящих от температуры, давления, скорости потока газа и диаметра газопровода. На Рис. 4 и в Таблице 1 представлены полученные зависимости для их определения исходя из условий проведения ремонтных работ. Последующий расчет скорости охлаждения предложен проводить с использованием найден-

ного значения коэффициента теплоотдачи по представленным ранее графикам на Рис. 2б и Рис. 3.

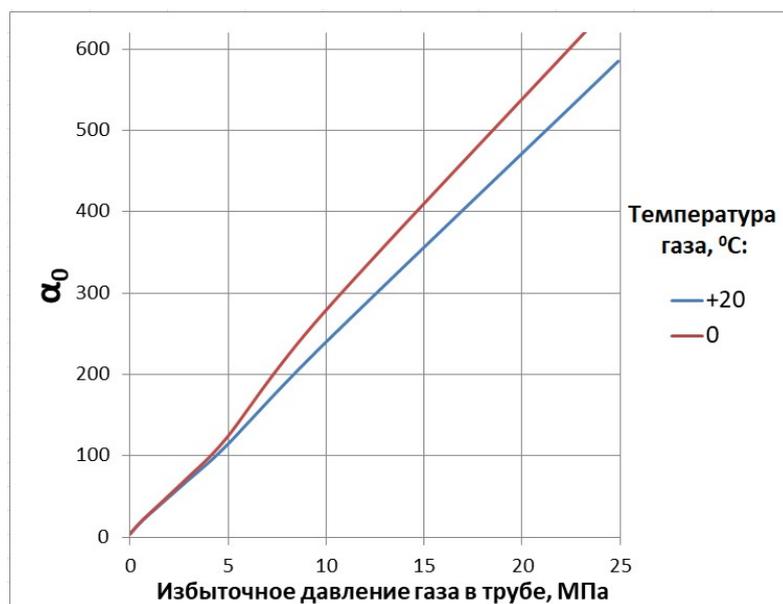


Рис. 4. Графики изменения комплексного показателя α_0 в зависимости от избыточного давления и температуры газа

Таблица 1.

Значения комплексного показателя K в зависимости от скорости перекачки газа и диаметра газопровода

Диаметр газопровода, мм	Скорость транспортировки газа, м/с				
	1	3	5	7	25
426	1,92	4,64	6,88	9,12	25,12
530	1,76	4,48	6,56	8,64	24,0
720	1,76	4,16	6,24	8,16	22,56
1020	1,6	3,84	5,76	7,52	20,96
1220	1,6	3,68	5,6	7,36	20,32
1420	1,44	3,68	5,44	7,04	19,68

В третьей главе для верификации полученных в работе расчетных зависимостей и методик был выполнен цикл экспериментальных исследований. Исследования проводились на опытных образцах в лабораторных условиях и на фрагментах труб на полигоне при выполнении аттестации технологий ремонта. Также проводилась оценка необходимости введения сопутствующего подогрева при наложении отдельных слоев шва.

Для экспериментальной оценки скоростей охлаждения за счет свободной и вынужденной конвекции, был изготовлен лабораторный стенд, обеспечивающий принудительное движение воздушного потока со скоростью от 0 м/с до

25 метров в секунду. Выполнялся нагрев устанавливаемых в стенде пластин стали 09Г2С толщиной 6,5 и 25 мм и проводилась запись графиков охлаждения с предварительно засверленных в пластины термопар многоканальным регистратором РМТ-69L .

На первом этапе, были записаны кривые охлаждения при свободной конвекции (Рис. 5). Кривые охлаждения нагретых пластин в контакте с воздушным потоком, движущимся с различной скоростью, представлены на страницах 109-112 текста диссертации. Сопоставление полученных экспериментальных значений с результатами расчета скорости охлаждения металла в регламентируемом интервале температур показало отклонение в пределах 20-25%.

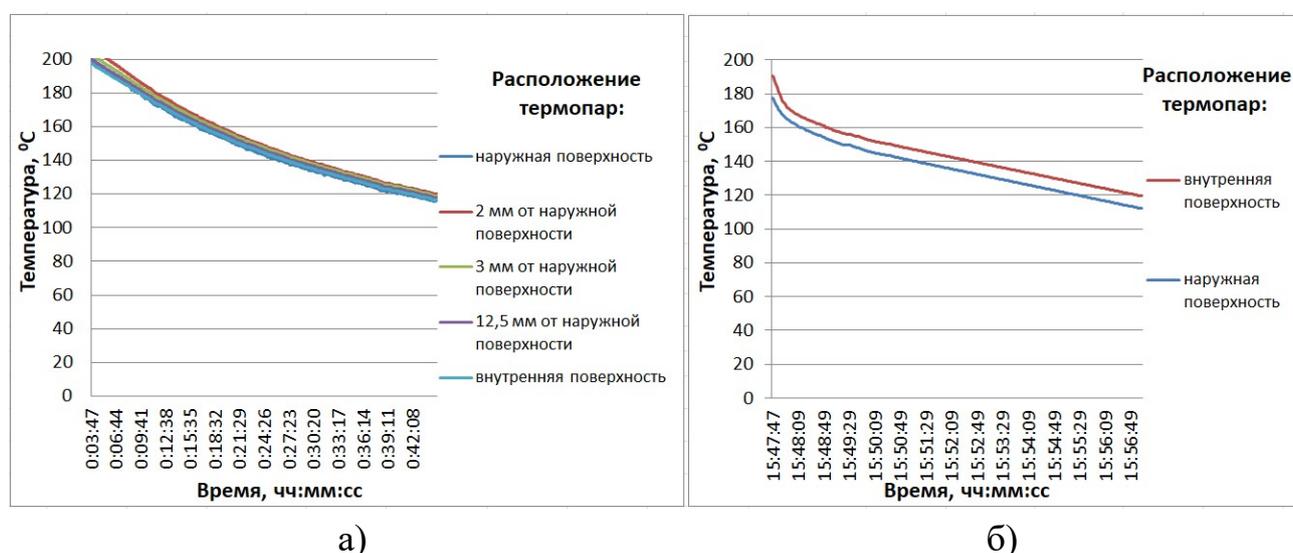


Рис. 5. Кривые охлаждения пластин толщиной 6,5 мм (а) и 25 мм (б) в условиях свободной конвекции

Оценка скорости охлаждения металла зоны ремонта в условиях полигона осуществлялась после предварительного подогрева перед заваркой выборки кольцевого сварного шва и вваркой заплаты на опытных фрагментах труб диаметром 1420 мм, толщиной стенки 27,7 мм из стали 10Г2ФБ. Предварительный подогрев выполнялся газопламенным способом до температуры 150^{+30} °С согласно технологической карте ремонта. Графики полученных ветвей охлаждения представлены на Рис.6, а сопоставление расчетных значений скорости охлаждения с экспериментальными данными показало отклонение в пределах 20%. Таким образом, выполненные лабораторные и полигонные испытания подтвердили возможность применения предложенных расчетных зависимостей и методик для определения максимальной продолжительности межоперационного интервала.

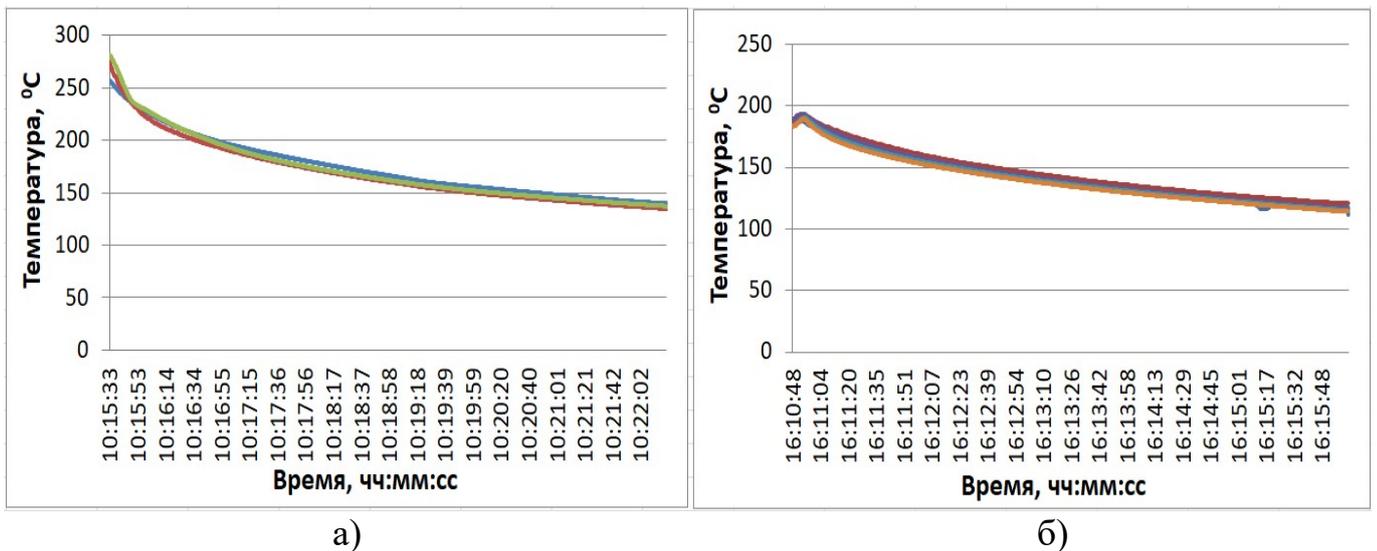


Рис. 6. Графики ветвей охлаждения термического цикла предварительного подогрева: а) перед наплавкой кольцевой выборкой; б) перед варкой заплата

Для экспериментальной оценки необходимости проведения сопутствующего подогрева металла зоны ремонта в процессе выполнения многопроходной наплавки в условиях интенсивного теплоотвода была выполнена запись термических циклов сварки в зоне термического при ремонте дефекта кольцевого шва и варке заплата механизированным способом проволокой и ручной дуговой сваркой в диапазонах погонных энергий 1,28-1,7 кДж/мм. Полученные термические циклы наплавочного процесса при заварке выборки и варке заплата представлены на Рис.7.

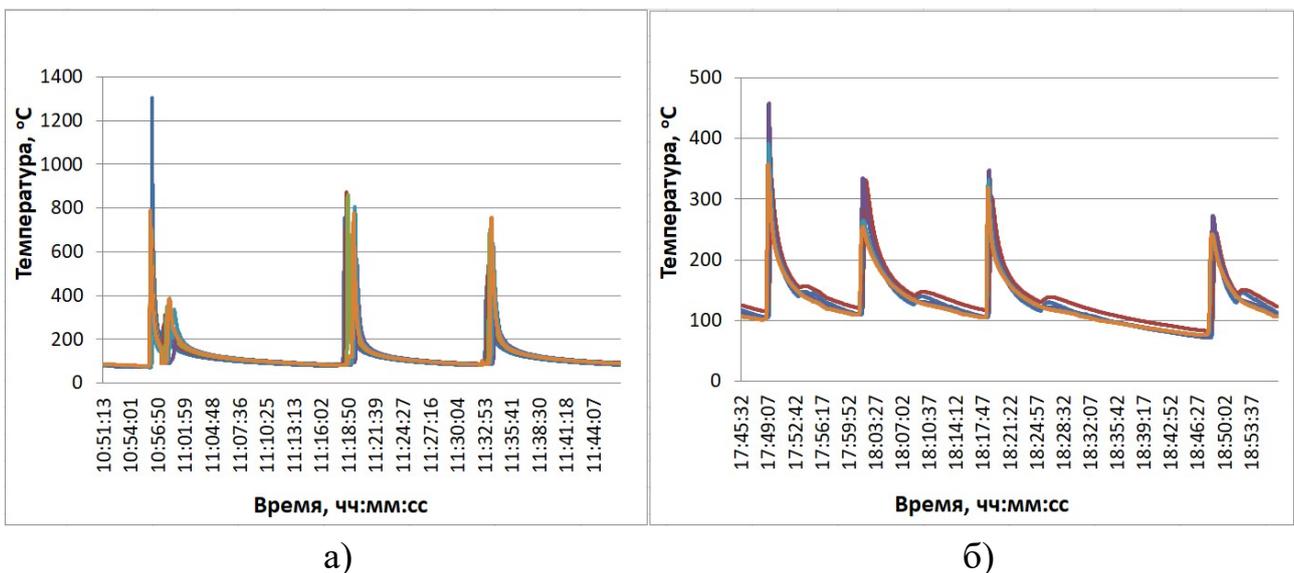


Рис. 7. Термические циклы сварки-наплавки: а) при заварке выборки кольцевого шва, б) при варке заплата

Было установлено, что при заварке выборки большой длины и малой ширины в диапазоне погонных энергий 1,3-1,5 кДж/мм на всех этапах сварки

межслойная температура опускалась ниже минимального нормативного уровня. Увеличение погонной энергии на 20-35% при сварке заплата не привело к обеспечению нормативных значений межслойной температуры. Полученные данные характеризуют теплоотвод из зоны ремонта при его проведении на разгерметизированном газопроводе и показывают необходимость проведения сопутствующего подогрева при наложении отдельных слоев шва даже в условиях ремонта с полным сбросом давления. Таким образом, в условиях интенсификации процесса охлаждения из-за наличия компримированного газа и движения газового потока необходимость в сопутствующем подогреве будет возрастать.

В четвертой главе на основе выполненных расчетных и экспериментальных исследований были определены области применимости технологий ремонта без стравливания газа по критерию обеспечению нормативной температуры подогрева в течении технологически минимальной продолжительности межоперационного интервала 90 секунд. На Рис. 7 представлены примеры полученных диаграмм областей применимости для ремонта под давлением с временной остановкой транспортировки газа и на действующем газопроводе. Показаны области невозможности обеспечения нормативной температуры подогрева при данном методе ремонта и условиях его проведения, и области ниже кривых – удовлетворяющие ему.

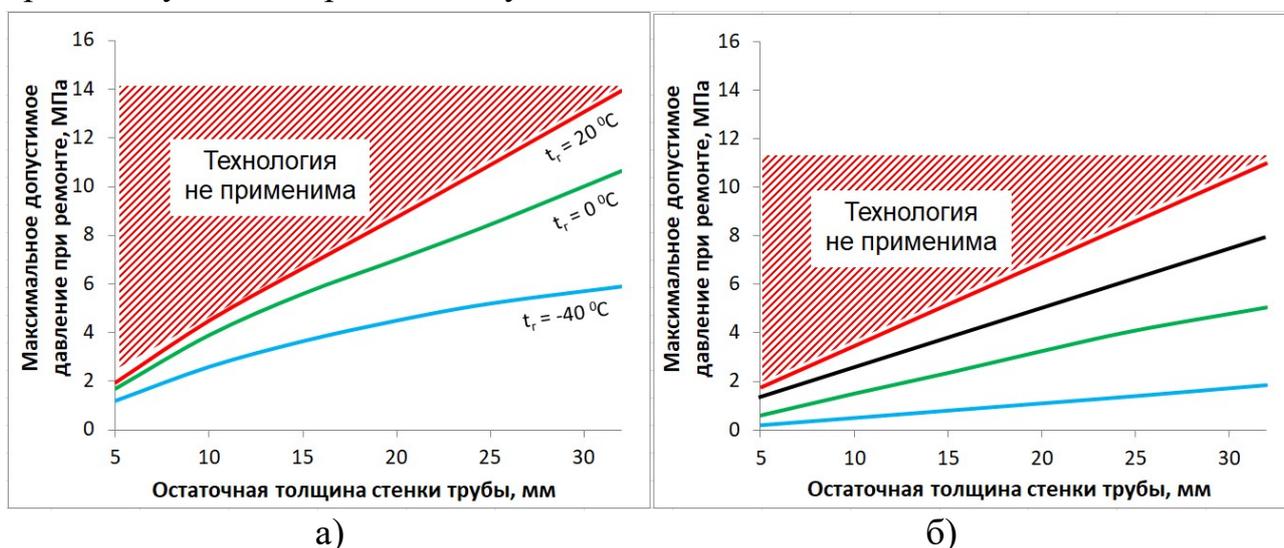


Рис. 8. Диаграммы применимости технологий ремонта несквозных дефектов на газопроводе диаметром 1420 мм, транспортирующем газ, по критерию обеспечения нормативной температуры сварочного подогрева при температуре газа, равной 0°C для диапазона температур подогрева $180-120^\circ\text{C}$ при ремонте под давлением с временной остановкой транспортировки газа (а) и на действующем газопроводе (б)

Для оценки максимально допустимой продолжительности межоперационного интервала на этапе разработки технологии ремонта несквозных дефектов методами сварки-наплавки и сварными муфтами на магистральном газопроводе без стравливания газа в атмосферу, были разработаны методики, позволяющие на основе полученных в главе 2 расчетно-графических зависимостей и данных о состоянии ремонтируемого участка газопровода, а так же условий проведения ремонта рассчитать эту величину. Так же предложены рекомендации по увеличению максимального межоперационного интервала за счет снижения скорости транспортировки газа, понижения давления в газопроводе и увеличения ширины участка дополнительного подогрева в зависимости от реализуемой технологии ремонта.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Показана необходимость нормирования в технологических картах продолжительности межоперационного интервала после сварочного подогрева при выполнении ремонтных работ сваркой-наплавкой на газопроводах под давлением и транспортирующих газ для выполнения требования по обеспечению требуемой температуры подогрева без перегрева стенки трубы.
2. Определены области применимости технологий ремонта сваркой-наплавкой на газопроводах под давлением по критерию обеспечения нормативной температуры подогрева, гарантирующие безопасность выполнения ремонтных работ.
3. На основе предложенных расчетно-графических зависимостей разработаны методики определения продолжительности межоперационного интервала и его корректировки при выполнении подогрева при ремонте на газопроводах находящихся под давлением и транспортирующих газ.
4. Показано, что компенсацию теплоотвода за счет расширения участка дополнительного подогрева при ремонте газопровода под давлением целесообразно проводить до величины 200 мм по периметру выборки, та как в этих условиях основной вклад в снижение температуры вносит конвективный теплоотвод в компримированный газ.
5. Выявлено, что увеличение размеров выборки приводит к снижению скорости охлаждения металла после сварочного подогрева за счет теплопроводности, а уменьшение остаточной толщины стенки – к ее увеличению за счет

конвективной теплоотдачи. При этом понижение температуры окружающей среды и металла трубы сокращает влияние остаточной толщины стенки трубы и вклад конвективного теплообмена в величину скорости охлаждения металла в межоперационном периоде.

6. Показано, что ремонт, особенно при отрицательных температурах, требует строго соблюдения нормативного значения ширины УДП, так как ее уменьшение приводит к резкому возрастанию скорости охлаждения, а при ширине УДП менее 50 мм приводит к невозможности обеспечения нормативной температуры подогрева даже в течении минимально регламентированных 90 секунд.
7. Показано, что наибольшее влияние при выполнении ремонтных работ на газопроводе, находящемся под давлением, на коэффициент теплоотдачи из зоны подогрева оказывает величина избыточного давления, которая обеспечивает приrost его значений в зависимости от температуры нагрева на 40-80 Вт/м²град на 1 МПа.
8. Экспериментально подтверждено, что предложенные для определения скорости охлаждения металла расчетные выражения могут быть использованы в методиках определения максимальной продолжительности межоперационного интервала. При этом отклонение полученных расчетных значений от экспериментальных не превышает 20%.
9. Экспериментально показано, что тепловая энергия электрической дуги не позволяет полностью компенсировать отток теплоты из зоны ремонта и обеспечить поддержание нормативной температуры подогрева металла без нормирования продолжительности выполнения отдельного слоя, поэтому в условиях интенсивной теплоотдачи при проведении работ на газопроводе, находящемся под давлением или транспортирующим газ, введение сопутствующего подогрева является обязательной операцией технологического процесса.
10. Результаты расчетных и экспериментальных исследований вошли в отраслевые рекомендации ПАО Газпром, касающиеся проведения ремонтных работ на магистральных газопроводах, находящихся под давлением: Р Газпром 2-2.3-352-2009 «Рекомендации по режимам подогрева при выполнении сварочных работ на газопроводах, находящихся под давлением» и Р Газпром 2-2.3-961-2015 «Технологии сварки при ремонте магистральных газопроводов, находящихся под давлением, методами врезки под давлением, сварными муфтами, сваркой-наплавкой».

Основные содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Волков И.В., Елагина О.Ю. Влияние размеров выборки дефектного участка магистрального газопровода на регламентацию продолжительности предварительного подогрева при ремонте сваркой-наплавкой // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2016. № 2. С. 84–96. (0,7 п.л./0,5 п.л.)
2. Елагина О.Ю., Ефименко Л.А., Волков И.В. Исследование влияния деформационного старения на процесс коррозионного разрушения и субмикроструктуру низкоуглеродистых сталей для газораспределительных газопроводов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 6. С. 42–45. (0,21 п.л./0,1 п.л.)
3. Elagina O.Y., Efimenko L.A., Volkov I.V. Study of the effect of strain ageing on corrosion failure and submicrostructure of low-carbon steels for gas-distribution pipelines // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51(5). P. 433–437. (0,23 п.л./0,11 п.л.)
4. Repair features of mechanical and corrosion damage in a main gas pipeline under pressure. Volkov I.V. [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 50(11-12). P. 749-757. (0,46 п.л./0,23 п.л.)
5. Особенности ремонта механических и коррозионных повреждений на магистральном газопроводе, находящемся под давлением. Волков И.В. [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 11. С. 41–48. (0,48 п.л./0,24 п.л.)
6. Влияние избыточного давления на параметры сварного соединения при сварке–наплавке подводных участков магистральных газопроводов. Волков И.В. [и др.] // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2010. № 2. С. 41–46. (0,32 п.л./0,16 п.л.)
7. Исследование величины допустимого давления для обеспечения безопасности сварочных работ при врезке в газопровод под давлением. И.В. Волков [и др.] // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2009. № 3. С. 33–37. (0,25 п.л./0,12 п.л.)