

Министерство образования Российской Федерации
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Предприятие «Пермтрансгаз» ОАО «Газпром»

На правах рукописи

ХАСАНОВ РАМИЛЬ НАЗИПОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА
ГАЗОПРОВОДОВ, ПРОЛОЖЕННЫХ В КАРСТОВОЙ ЗОНЕ,
НА ОСНОВЕ ПОЭТАПНОГО КОНТРОЛЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор СПЕКТОР Ю.И.

Уфа – 2002
Чайковский – 2002

Работа выполнена в

Уфимском государственном
нефтяном техническом
университете и ООО
«Пермтрансгаз» Открытого
акционерного общества
«Газпром»

Научный руководитель

- доктор технических наук,
профессор Спектор Ю.И.

Официальные оппоненты

- доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Азметов Х.А.
- кандидат технических наук,
доцент Рафиков С.К.

Ведущее предприятие

- ООО «Баштрансгаз»

Защита состоится «27» июня 2002 в 11.30 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при Уфимском
государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, г.
Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского
государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан « » 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Ю.Г. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время и в ближайшие десятилетия стабильность экономики России будет определяться нефтегазовым комплексом страны. Достаточно сказать, что если в 2000 году доля газа в энергетическом балансе страны занимала 50%, то в к 2010 году эта доля возрастет до 57 %.

В связи с этим обеспечение эксплуатационной надежности газопроводов, в особенности их линейной части, находится в центре внимания ОАО «Газпром» и всех его производственных подразделений.

Различают стандартные и нестандартные условия работы линейной части. К нестандартным относятся условия, при которых прокладка трассы трубопровода выполняется по территориям со сложными инженерно-геологическими характеристиками. Кроме территорий с подповерхностными пустотами различного происхождения (карстовые пустоты, подрабатываемые территории в зонах шахтного строительства), к нестандартным условиям работы трубопровода относятся также заболоченные и подтопляемые территории, зоны вечномёрзлых грунтов, оползневые и сейсмические зоны.

Совместная деформация трубопровода и грунта в карстовой зоне является сложной и малоисследованной проблемой, решение которой позволит повысить эксплуатационную надежность трубопроводов, проложенных в Пермской, Свердловской областях, республике Башкортостан.

Постоянно протекающие в природных условиях карстовые процессы при техногенном воздействии резко интенсифицируются. Система «труба-карстовый массив» становится неустойчивой и при деформациях карстового массива труба испытывает быстро возрастающие напряжения.

Разработка экологически и экономически обоснованных технических, конструктивных решений по стабилизации системы «труба-

карстовый массив» должна осуществляться на основе принципа минимизации техногенного вмешательства в карстовый массив и оптимального использования закономерностей развития карста. Во всех этих решениях карстовый массив должен исследоваться и рассматриваться в качестве элемента конструкции системы «труба-карстовый массив».

Примером магистральных газопроводов, находящихся под разрушительным воздействием карста, служит Ужгородский коридор из шести ниток диаметром 1420 мм, пересекающих в Прикамье массив карстующихся пород на протяжении 600 км. В частности, из-за воздействия карста в ООО «Пермтрансгаз» дважды происходило разрушение газопроводов. Для решения проблемы защиты магистральных газопроводов от карста ОАО «Газпром» утвердило Программу работ, на основе которой был создан специальный полигон на действующих газопроводах, где выполнены следующие виды работ:

1) разработка и проведение мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопроводов;

2) разработка и реализация проектных решений по ликвидации и предупреждению карстовых явлений, включающих заполнение (засыпка) карстовых образований с учетом водоотводных мероприятий, тампонируание карстовых полостей в пределах энергокоридора; закрепление газопровода с помощью опор различных конструкций; разработка проекта организации постоянного контроля за развитием карстового процесса, экспертиза принятых решений.

Цель работы: разработка и реализация ремонтно-восстановительных мероприятий на газопроводах, подверженных воздействию карстопроявлений, на основе поэтапного контроля напряженно-деформированного состояния трубопровода.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи исследования:

1) разработка системы и методики контроля за напряженно-деформированным состоянием участка газопровода в ходе ремонтно-восстановительных работ и создание опытного полигона в карстовой зоне для отработки противокарстовой защиты;

2) разработка технологических приемов и состава ремонтно-восстановительных мероприятий на линейной части в зависимости от характера карстопроявления и степени деформации трубопровода;

3) анализ напряженно-деформированного состояния подземного участка газопровода, проходящего над карстовой полостью, на этапах выполнения различных видов ремонтно-восстановительных работ.

Объект и методы исследования. Объектом исследования является система «трубопровод – карстовый массив», их совместная деформация на всех этапах реализации технологии ремонтно-восстановительных работ. При решении поставленных задач использовались экспериментальные и теоретические методы исследования. Экспериментальные – инженерно-геологические, геодезические и геофизические изыскания, ультразвуковой метод измерения напряжений, камеральная обработка материалов проектной и исполнительной документации; теоретические – метод конечных элементов в перемещениях для определения НДС газопровода.

На защиту выносятся система и методика контроля за НДС газопровода, проложенного в карстовом массиве, основанные на ультразвуковом методе измерения напряжений в стенке трубы; технология выполнения ремонтно – восстановительных работ на потенциально опасных участках трубопровода, деформирующегося под воздействием карстопроявлений.

Научная новизна

1. Разработаны система и методика контроля за НДС газопровода, проложенного в карстовой зоне, основанные на ультразвуковом методе измерения напряжений в стенке трубы.

2. Разработаны и реализованы технологии выполнения ремонтно – восстановительных работ на потенциально опасных участках трубопровода, деформирующегося под воздействием карстопроявления. На основе предложенной классификации видов ремонтно-восстановительных работ и оценки эффективности практической реализации на опытном полигоне рекомендуется последовательность выбора метода ремонта и технологических приемов выполнения ремонтных работ.

3. Впервые дан анализ напряженно – деформированного состояния подземного участка действующего газопровода на всех этапах ремонта методом установки на опоры с учетом конструктивных особенностей, режимов эксплуатации и грунтовых условий. Установлено, что сохранение конструктивной схемы данного участка на опорах, составленного при сооружении из кривых вставок и прямолинейных труб, деформирующегося с карстовым грунтом, приводит к равномерному распределению нагрузки на опоры и уменьшению максимальных изгибных напряжений в 2 раза по сравнению с вариантом, когда деформированный участок заменяется на новый, составленный только из прямолинейных труб.

Практическая значимость и реализация работы

Разработана и впервые реализована в полном объеме технология ремонтно-восстановительных работ на газопроводах диаметром 1420 мм Ужгородского коридора, подверженных карстовому воздействию. Создан опытно-промышленный полигон, позволяющий моделировать различные случаи поведения системы «труба – карстовый массив» и учитывать

конструктивные особенности трубопровода, подвижки и обрушения грунта и режимы эксплуатации трубопровода.

Разработаны и утверждены следующие нормативно – технические документы:

1) Методические рекомендации по расчету напряженно – деформированного состояния и прочности газопровода, проходящего по карстовой территории (1999 г.);

2) Методика оценки работоспособности балочных переходов магистральных газопроводов через малые реки, ручьи и другие препятствия (ВРД – 39 - 1.10 - 016 - 2000);

3) Методика определения профиля трассы подземных трубопроводов с использованием бесконтактных методов измерения (2001 г.);

4) Методика проведения измерений абсолютных напряжений в магистральных газопроводах ООО «Пермтрансгаз» (2002 г.);

5) Методика проведения мероприятий по разгрузке потенциально опасных участков магистральных газопроводов от чрезмерных напряжений (2002 г.),

которые нашли применение в практике эксплуатации магистральных газопроводов ОАО «Газпром».

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на:

1) Региональной конференции «Геология и полезные ископаемые Западного Урала», Пермь, 1997 г.;

2) Международной научно-практической конференции «Инженерно-геологическое обеспечение недропользования и охраны окружающей среды», Пермь, 1997 г.;

3) III – й Украинской научно-технической конференции по механике грунтов и фундаментостроению, Одесса, 1997 г.;

- 4) Региональной конференции «Проблемы геологии Пермского Урала и Предуралья», Пермь, 1998 г.;
- 5) Международной научно – технической конференции «Проблемы нефтегазового комплекса России», Уфа, 1998 г.;
- 6) III – й международной конференции по экологии, Санкт – Петербург, 1998 г.;
- 7) Республиканской научно - практической конференции «Техника на пороге XXI века», Уфа, 1999 г.;
- 8) Заседаниях секции «Техническое обслуживание и ремонт газопроводов» НТС ОАО «Газпром», Москва, 2000 г., 2001 г.;
- 9) II – ом международном симпозиуме «Наука и технология углеводородных дисперсных систем», Уфа, 2000 г.;
- 10) I – й международной конференции «Техническое обслуживание и ремонт линейной части газопроводов», Словакия, 2000 г.;
- 11) III – ем конгрессе нефтегазопромышленников России, Уфа, 2001 г.

Публикации

По результатам исследований опубликовано 16 научных работ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 208 страницах машинописного текста, 27 рисунках, 16 таблицах; список литературы включает 128 наименований.

Во введении приводится общая характеристика работы, раскрыта актуальность темы исследований. Сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дано краткое содержание работы.

В первой главе выполнен анализ научных работ, посвященных карстообразованию и ремонту трубопроводов, проложенных в сложных инженерно – геологических условиях.

Исследованиями проблем карстообразования и инженерно – строительного освоения закарстованных территорий занимались Гаев А.Я., Килин Ю.А., Костарев В.П., Кухарев Н.М., Лукин В.С., Максимович Г.А., Толмачев В.В., и др. Среди исследований, посвященных непосредственно вопросам взаимодействия трубопроводов с карстовым массивом, можно отметить работы Готмана Н.З., Карпова Е.Г., Чичелова В.А., Шаммазова А.М. и др.

Эксплуатация газопроводов в карстовых зонах относится к области нестандартных условий их функционирования, которые также классифицируются как сложные инженерно – геологические. Взаимодействие карстового массива и трубопровода приводит к возникновению наряду с общими внешними закономерными проявлениями, характерными для трубопроводов, работающих в других нестандартных условиях, своих особенностей совместной деформации на потенциально опасном участке. При техногенном вмешательстве интенсивность карстовых процессов возрастает иногда в несколько раз, что вызывает аварийные ситуации.

По результатам обследований и анализа разрушений газопроводов, эксплуатирующихся в нестандартных условиях, установлено, что основной причиной аварий явились чрезмерные изгибные деформации, о чем свидетельствует характер разрушения труб: раскрытие кольцевых монтажных стыков или образование трещин по этим стыкам. Перенапряжение труб происходило в результате действия неучтенных в проектной документации нагрузок: силовое воздействие оползающих грунтов, размыв подводных трубопроводов, просадка грунтов и оголение трубопровода в карстовой зоне.

Вопросам ремонта линейной части магистральных трубопроводов посвящены многочисленные научно – технические публикации. Однако большинство из них относится к капитальному и аварийному ремонту нефтепроводов. Что касается магистральных газопроводов большого диаметра, которые, в основном, были сооружены относительно недавно и срок амортизации их еще не истек, то технология и средства их ремонта пока еще занимают мало внимания исследователей.

Аварии на газопроводах происходят чаще всего на участках, проложенных в сложных инженерно – геологических условиях. Среди исследователей, занимающихся проблемой разработки ремонтно – восстановительных мероприятий на таких участках газопроводов, а также нефтепроводов, следует отметить Азметова Х.А., Асадуллина М.З., Бородавкина П.П., Быкова Л.И., Гумерова А.Г., Тимербулатова Г.Н., Халлыева Н.Х. и др. Большой вклад в анализ и разработку ремонтно – восстановительных мероприятий на газопроводах внес Харионовский В.В., который обобщил опыт ремонта линейной части, проложенной в нестандартных условиях эксплуатации.

Прогнозирование изменения условий эксплуатации газопроводов на этапе проектирования затруднительно. В связи с этим возникла проблема определения реально существующего в конструкции напряженно – деформированного состояния трубопровода с учетом эксплуатационных и изменяющихся природно – климатических нагрузок для обоснования целесообразности, очередности и выбора ремонтных мероприятий. Эта задача решается выполнением натурных измерений напряжений в стенке трубы, которыми на газопроводах занимались Зорин Е.Е., Курганова И.Н., Макаров Г.И., Недосека А.Я., Фесенко С.С. и др. Анализ применяемых в настоящее время методов контроля напряженно – деформированного состояния трубопроводов показал, что ультразвуковой метод измерения напряжений в металле трубы свободен от таких негативных

метрологических факторов, как недостаточная надежность датчиков и недостоверность показаний ввиду дрейфа «нуля». Этот метод может быть рекомендован к использованию в диагностике и для контроля НДС газопровода в карстовой зоне.

Обобщение вышеприведенного материала позволило сформулировать задачи исследования.

Во второй главе представлена разработка системы и методики контроля за напряженно – деформированным состоянием газопровода на опытном полигоне в карстовой зоне, где выполнен комплекс работ в соответствии с «Программой работ по решению проблемы карстовых явлений», утвержденной в ОАО «Газпром» 21.10.95 г. Инструментом системного контроля за НДС газопровода явился спектрально – акустический прибор «Астрон», который состоит из акустоэлектронного блока, датчиков сдвиговых и продольных волн, компьютера с программным обеспечением. Система контрольных мероприятий включает установку тензопостов и контрольно – измерительных колонок по трассе газопровода, для которых отрываются специальные шурфы. Местоположение шурфов на трассе устанавливалось с использованием материалов проектной и исполнительной документации по сооружению газопровода, инженерно – геологических изысканий, проведенных до и после строительства. Ультразвуковой метод измерения напряжений заключается в возбуждении в стенке трубы сдвиговых и продольных волн и фиксации их различной скорости распространения, которая в металле зависит от уровня и знака действующих напряжений в трубе.

Измерения напряжений проводились в семи точках сечения трубы на каждом шурфе: на 7^{30} , 9^{00} , 10^{00} , 12^{00} , 1^{30} , 3^{00} , 4^{30} часах по ходу газа. Измерению подлежали продольные напряжения, которые вызываются внутренним давлением газа, усилиями температурной деформации и изгибом трубопровода.

Периодические замеры осуществлялись на шести нитках Ужгородского коридора магистральных газопроводов, начиная с августа 1996 г. Первые замеры в 1997 г. были проведены в апреле на участке 1650 – 1653 км. Сравнением полученных данных с результатами предыдущих измерений, выполненных в ноябре 1996 г., была установлена динамика развития деформаций газопроводов за ранневесенний период. Повторные замеры в 1997 г. осуществлялись в августе. В табл. 1 для примера представлены результаты замеров только для одной нитки коридора – газопровода «Ямбург – Западная граница» (Прогресс). Целым числом указаны результаты измерений 1996 г. В дроби числитель представляет замеры 1996 г., в знаменателе через косую черту представлены замеры апреля 1997 г. и августа – сентября 1997 г. Кроме того, здесь же содержатся данные мониторинга на другом участке $1648 \div 1650 + 300$ м, указанные в виде дроби, где в числителе стоит прочерк, а в знаменателе – значение напряжения.

Анализ НДС данной нитки газопроводов по результатам первичных замеров 1996 г. показывает следующее. В шурфах № 3, 4, 6 измеренные напряжения невысокие. В шурфе № 7 зафиксированы достаточно большие напряжения сжатия: $\sigma = -270$ МПа на 9^{00} часах. В шурфе № 5 обнаружены большие растягивающие напряжения $\sigma = 320$ МПа на 7^{30} . Этот локальный участок трубопровода определен как потенциально опасный и вызывает особое внимание ввиду большой его деформации. Зафиксированные здесь напряжения растяжения оказались самыми высокими во всем исследуемом участке коридора.

Результаты повторных замеров свидетельствуют о том, что до апреля 1997 г. напряженное состояние нитки было стабильное. С апреля зафиксирован рост напряжений в шурфе № 5, который составил по обеим плоскостям деформации трубы равную величину $\Delta\sigma = 25$ МПа.

На основании проведенных в 1996 году измерений системой «Астрон» и последующего мониторинга можно сделать заключение, что в пределах контролируемого участка трассы имеются потенциально опасные участки, находящиеся в области шурфа № 5, где уровни растягивающих напряжений достаточно велики и где наблюдается тенденция к их росту.

Достигнутые к сентябрю 1997 г. уровни растягивающих напряжений остаются меньше допустимого СНиПом 2.05.06.85* значения, однако ввиду имеющейся тенденции к росту на данных локальных участках необходимо продолжать комплексный мониторинг в обязательном порядке.

По разработанной методике замеров напряжений был выполнен второй этап мониторинга НДС газопровода. На шестой нитке было изготовлено дополнительно 8 шурфов. В трех из них – 51, 52 и 56 – зафиксированы незначительные напряжения по нижней образующей трубы, не превышающие 190 МПа. В остальных шурфах уровень напряжений также невысокий, и, в целом, данная нитка не имеет потенциально опасных участков.

В третьей главе предложена классификация видов и изложена технология выполнения ремонтно – восстановительных работ в зависимости от характера карстопроявлений и степени деформации трубопровода. Предлагается два направления разработки ремонтно – восстановительных мероприятий.

Первое направление включает разработку методов и средств воздействия на карстовый массив с целью предотвращения или уменьшения отрицательного воздействия на газопровод. В рамках этого направления выделены методы и средства, имеющие пассивный и активный характер. Использование пассивного воздействия не требует большого объема работ и оно должно обязательно включаться в технологию ремонтно – восстановительных работ. К этим видам работ

отнесены заполнение грунтом поверхностных карстопроявлений, целенаправленный отвод поверхностного водостока с трассы газопровода, а также создание водонепроницаемых покрытий и заградительных стенок. К мероприятиям активного характера отнесены работы, направленные на возвращение трубопровода в проектное положение и на заполнение подземных карстопроявлений (тампонирование карстовых полостей грунтом, глиняным раствором, пенобетоном и др.). Эти виды работ могут потребовать больших материальных затрат (особенно тампонирование развитых глубинных карстовых полостей), а также временного отключения газопровода.

Второе направление разработки ремонтно – восстановительных мероприятий предусматривает приспособление конструкции деформирующегося трубопровода к изменяющимся грунтовым условиям под воздействием развивающегося карста. После выполнения этих видов работ трубопровод остается в непроектном положении, но принятое конструктивное решение позволяет исключить чрезмерные напряжения в стенке трубы. К такому виду мероприятий отнесено подведение опор под трубопровод на потенциально опасных участках, находящихся в карстовом грунте. Использование данного направления разработки технологии работ рекомендуется в случае неэффективности мероприятий первого направления, что выявляется поэтапным контролем НДС ремонтируемого участка трубопровода.

Технология засыпки карстовых воронок проста: подвоз засыпного материала, засыпка бульдозером с периодической трамбовкой. Но следует иметь в виду, что выполнение противокарстовых мероприятий требует устройства подъездных дорог с минимальным антропогенным влиянием на развитие карста.

Анализ опыта засыпки карстовых воронок показывает, что эта мера защиты газопроводов хотя и необходима, но недостаточно эффективна,

поскольку на участках открытого карста в трещиноватых породах процессы выщелачивания идут постоянно и образуются новые воронки, требующие, наряду с существующими, увеличения объема работ.

Динамика объемов засыпанного материала, завезенного на карстоопасный участок, характеризуется следующими цифрами: 1994 г. – 18,1 тыс. т., 1995 г. – 20,8 тыс. т., 1996 – 133,4 тыс. т., 1997 – 18,1 тыс. т.

Устройство водонепроницаемых покрытий, предупреждающих проникновение воды в толщу пород и способствующих замедлению карстовых процессов в районе залегания газопроводов, производилось с использованием водоупорного материала – глины.

Для создания водонепроницаемых преград на пути движения профильтровавшейся воды и грунтовых вод производилась подбивка газопроводов недренирующим грунтом – глиной. С этой целью отрывалась траншея до уровня 0,3 – 0,5 м ниже нижней образующей трубы и осуществлялась замена и уплотнение основания трубопровода. Подбивка газопроводов нужна там, где результаты геологических исследований показали наличие протяженных полостей непосредственно под трубопроводами. Протяженность выполненной подбивки составила 3516 м, объем переработанного грунта – 48333 м³. Несмотря на, казалось бы, простую технологию, такие работы иногда технически были трудно выполнимы из-за наличия гипсовых ложементов, в которых были уложены трубопроводы.

Характеризуя эффективность этого вида ремонтно-восстановительных работ, также следует отметить невозможность полного прекращения доступа агрессивных поверхностных вод в глубинные слои грунта.

Были выполнены работы по тампонированию приповерхностных полостей, находящихся на глубине до 6 м. Производили вскрытие кровли экскаватором, обрушали грунт над полостью, а образовавшуюся воронку

засыпали глиной. Таким образом, было затампонировано 17519 м³ приповерхностных полостей. Для глубинного тампонирования было выбрано 12 наиболее опасных зон с открытыми полостями большого объема, расположенными на глубине более 6 м. Объем тампонирования по нескольким полостям приведен в табл. 2.

Тампонирование включает бурение и цементирование нагнетательных и нагнетательно-наблюдательных скважин, приготовление тампонажного раствора и его заливку в полость, а также другие вспомогательные работы.

Таблица 2

Объемы произведенных тампонажных работ в аномальной зоне

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	Всего, м ³
Полость № 1	330	1500	2200	4030
Полость № 2		1300		1300
Полость № 3		300	1500	1800
Полость № 4			1800	1800
Итого	330	3100	5500	8930

Оценивая опыт применения тампонирования, сделаны следующие выводы:

- 1) тампонирование представляет собой сложную и дорогостоящую операцию;
- 2) применение тампонирования может быть рационально для небольших глубинных полостей.

Если проведенными мероприятиями по организации поверхностного стока, по снятию грунта с верха трубы, по засыпке карстовых воронок и тампонированию не удастся существенно разгрузить трубопровод и повысить его эксплуатационную надежность, то учитывая значительную длину участка газопровода, который может перемещаться вместе с грунтом, предлагается для закрепления газопровода применять опорную конструкцию, т.е. применять схему многопролетного балочного перехода.

Исследуемая в работе опорная конструкция (рис. 1), принята в виде эстакадного строения и представляет собой ряд отдельно стоящих опор с шагом через 6 метров, состоящих из траверс (стальные балки) и буронабивных бетонных свай, устраиваемых с помощью обсадных труб диаметром 300 мм и длиной 16 метров.

Для детализации условий сооружения опорной конструкции и с целью дальнейшего использования в расчетах было выполнено определение физико-механических характеристик грунтов. Отбор проб грунтов производился в трех точках по длине газопровода, на разной глубине по вертикальному разрезу в двух точках – над и под трубой, т.е. количество точек отбора равно 6.

Разработанный проект защиты по безопасной работе газопроводов в карстовых зонах является нетрадиционным и отличается от типовых балочных переходов через овраги, малые реки, над горными выработками и т.п. тем, что предусмотрена последующая засыпка трубопровода на опорной конструкции грунтом, обусловленная требованиями безопасной работы газопроводного коридора. Каждый этап сооружения опорной конструкции под действующим газопроводом требует мониторинга его напряженного состояния, а также анализа НДС трубопровода с учетом конструктивных особенностей и грунтовых условий.

Возможность использования данного конструктивного решения как типового для других условий прохождения газопровода в карстовых зонах должна приниматься индивидуально на основании проектно-исполнительской документации, дополнительных геологических исследований и расчета НДС трубопровода.

На рис. 2, где представлена схема измерений НДС газопровода Ямбург – Западная граница (1762 км), места расположения сечений по длине трубы указаны жирными штриховыми линиями. Результаты замеров напряжений для двух этапов работы в сечении $L=64$ м приведены на

рис. 3 и 4. Они демонстрируют сложный характер изменения продольных напряжений, а также изменение пространственного положения трубопровода на этапах выполнения РВР.

Контроль НДС участка газопровода на отдельных этапах сооружения опорной конструкции показал, что:

- а) частичное снятие грунта не обеспечивает полную разгрузку трубопровода над карстовой полостью;
- б) дальнейшее снятие грунта вдоль трассы газопровода нецелесообразно, т.к. трубопровод находится на резкопересеченной местности, а сам трубопровод составлен из выпуклых и вогнутых вставок;
- в) после установки газопровода на опоры отсутствуют потенциально опасные сечения, что свидетельствует о правильности выбранного технического решения.

В четвертой главе выполнены исследования НДС участка газопровода на всех этапах ремонтно-восстановительных работ с использованием опорной конструкции с учетом трассовых условий, конструктивных особенностей участка (заложенных в проектное решение и осуществленных в процессе ремонта) и эксплуатационных параметров.

Сложность расчетной схемы подземного трубопровода, состоящего из произвольного сочетания прямолинейных и криволинейных участков, разнообразие характеристик грунта по длине рассматриваемого участка, существенная нелинейность системы и среды вызвали необходимость применения численных методов, разработанных под руководством профессора А.М. Шаммазова. При составлении базы данных для расчета из проектной и исполнительной документации выбирается информация: абсолютные отметки; инженерно – геологические характеристики трассы и др., а также учитываются эксплуатационные параметры (давление, температура газа), которые берутся по журналу диспетчерской службы. Используя численные методы применительно к этапам выполнения РВР (труба до начала РВР, труба после снятия грунта, труба после установки на опоры, труба на опорах после засыпки грунта), получены основные характеристики НДС газопровода. Продольные перемещения u и прогиб w трубопровода, угол поворота ω его продольной оси, продольная осевая сила T , поперечная сила Q и осевой изгибающий момент M определялись непосредственно из решения задачи как составляющие векторов обобщенных перемещений и усилий, относительно которых составлена и решена система нелинейных дифференциальных уравнений методом конечных элементов в перемещениях, а изгибные напряжения σ_m и напряжения от продольных усилий σ_T находились по формулам:

$$\sigma_m = \frac{M}{w_o}; \quad \sigma_T = \frac{T}{F_o},$$

где w_o и F_o –соответственно, момент сопротивления и площадь поперечного сечения стенки трубы.

Результаты расчета и анализ НДС участка на первом этапе выполнения РВР газопровода (после снятия грунта) до установки его на опоры, позволяют заключить, что снятие грунта привело к уменьшению

изгибных напряжений в центральной части и на склонах участка, а также продольных растягивающих напряжений на левом склоне участка. Тем не менее, продольное осевое сжатие, которое имело место на выпуклых вставках до снятия грунта и определялось величиной продольных сжимающих напряжений порядка минус 50 МПа, осталось на том же уровне. Это обусловлено наличием сложной конструкцией ремонтируемого участка трубопровода. Кроме того, анализ НДС работающего ($p_o = 5,8$ МПа; $\Delta t = 24$ °С) и неработающего ($p_o = 0,25$ МПа; $\Delta t = 24$ °С) трубопровода до и после снятия грунта свидетельствует о том, что сложная конструкция трубопровода и грунтовые условия трассы не позволяют полностью разгрузить трубопровод.

Сравнение данных натурных замеров напряжений для шурфа 6 – 3 – 2, находящегося в точке $L = 64$ м (рис. 2), и соответствующих расчетных значений суммарных продольных напряжений по верхней и нижней образующей трубы до установки ее на опоры для одинаковых эксплуатационных параметров ($p_o = 5,8$ МПа; $\Delta t = 25$ °С), показывает их удовлетворительное совпадение: $\sigma_{пр}^B(нат.) = - 220$ МПа, $\sigma_{пр}^B(расч.) = - 200$ МПа; $\sigma_{пр}^H(нат.) = 130$ МПа, $\sigma_{пр}^H(расч.) = 150$ МПа.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Создан опытно-промышленный полигон на действующих магистральных газопроводах, позволяющий моделировать различные случаи поведения системы «труба – карстовый массив» и учитывать конструктивные особенности трубопровода, подвижки и обрушения грунта и режимы эксплуатации трубопровода.

2. Разработаны система и методика контроля напряженно-деформированного состояния участка газопровода, подверженного карстопроявлениям, основанные на ультразвуковом методе измерения напряжения, отличающимся от ранее применяемых: высокой надежностью

датчиков; возможностью непосредственного измерения напряжения в металле трубы, а не деформаций тензодатчика; достоверностью показаний ввиду отсутствия дрейфа «нуля»; многократностью использования датчика. Промышленная реализация данной разработки на опытном полигоне позволила выявить потенциально опасные участки газопровода, вид и последовательность выполнения ремонтно-восстановительных работ.

3. Предложена классификация видов ремонтно-восстановительных работ в зависимости от характера воздействия на карстовый массив и от степени адаптации конструкции деформирующегося газопровода к изменяющимся грунтовым условиям; разработаны и выполнены на опытном полигоне поэтапные технологии ремонтно-восстановительных мероприятий, направленных на предотвращение или уменьшение карстового воздействия на газопровод. Проведена оценка эффективности выполненных противокарстовых мероприятий по степени воздействия на развитие карста, по сложности проведения этих мероприятий и достигнутой степени разгрузки трубы.

4. Впервые дан анализ напряженно-деформированного состояния подземного участка действующего газопровода на всех этапах его установки на опоры с учетом конструктивных особенностей, режимов эксплуатации и грунтовых условий. Установлено, что сохранение конструктивной схемы данного участка на опорах, составленного при сооружении из кривых вставок и прямолинейных труб, деформирующегося с карстовым грунтом, приводит к равномерному распределению нагрузки на опоры и уменьшению максимальных изгибных напряжений в 2 раза по сравнению с вариантом, когда деформированный участок заменяется на новый, составленный только из прямолинейных труб.

5. Разработаны и утверждены следующие нормативно – технические документы:

1) Методические рекомендации по расчету напряженно – деформированного состояния и прочности газопровода, проходящего по карстовой территории (1999 г.);

2) Методика оценки работоспособности балочных переходов магистральных газопроводов через малые реки, ручьи и другие препятствия (ВРД – 39-1.10-016-2000);

3) Методика определения профиля трассы подземных трубопроводов с использованием бесконтактных методов измерения (2001 г.);

4) Методика проведения измерений абсолютных напряжений в магистральных газопроводах ООО «Пермтрансгаз» (2002 г.);

5) Методика проведения мероприятий по разгрузке потенциально опасных участков магистральных газопроводов от чрезмерных напряжений (2002 г.), которые нашли применение в практике эксплуатации магистральных газопроводов ОАО «Газпром».

Список трудов опубликованных по теме диссертации:

1. Килин Ю.А., Минькевич И.И., Хасанов Р.Н., Чичелов В.А. О необходимости постановки карстомониторинга в полосе магистральных газопроводов /Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – Сб. науч. тр. – Пермь: 1997. – С. 221 – 222.

2. Гаев А.Я., Килин Ю.А., Хасанов Р.Н., Чичелов В.А. Техногенез на магистральных газопроводах, пересекающих карстующиеся горные породы // Инженерно-геологическое обеспечение недропользования и охраны окружающей среды. Материалы Международ. научно-практич. конференции. – Пермь: 1997. – С. 136 –138.

3. Абдуллин И.Б., Бабин Л.А., Спектор Ю.И., Хасанов Р.Н., Кошин А.Д., Хакимов А.Г. Разработка рациональных конструкций оснований вдольтрассовых проездов в условиях Пермской области. – Тез. докл. / III – я Украинская научно-техническая конференция по механике грунтов и фундаментостроению. – Одесса: 1997. – С. 194.

4. Гаев А.Я., Килин Ю.А., Хасанов Р.Н., Чичелов В.А., Тагиров И.Г. О техногенезе и карстогенезе в связи с эксплуатацией магистральных газопроводов // Проблемы геологии Пермского Урала и Приуралья. Материалы рег. науч. конференции. – Пермь: 1998. – С. 141 – 142.

5. Гаев А.Я., Килин Ю.А., Чичелов В.А., Хасанов Р.Н. Карстовые процессы в районах Предуралья // Газовая промышленность. – 1998. - № 3. – С. 29 – 31.

6. Gaev A. Ya., Kilin Yu.A., Khasanov R.N. About the prevention of emergency situation at the arterial gas mains in the karst dangerous regions // Abstracts of Scientific Reports. – St. – Petersburg, 1998. – С. 118 – 119.

7. Чичелов В.А., Хасанов Р.Н. Расчетно – экспериментальное исследование напряженного состояния газопровода в карстовом грунте. – Тез. докл. /Международная научно – техническая конференция «Проблемы нефтегазового комплекса России». – Уфа: 1998. – С. 38.

8. Зарипов Р.М., Хасанов Р.Н. Напряженно – деформированное состояние трубопроводов, эксплуатируемых в нестандартных условиях / Техника на пороге XXI века. – Сб. научн. тр. АН РБ. – Уфа: ГИЛЕМ, 1999. – С. 65 – 76.

9. Зарипов Р.М., Коробков Г.Е., Шаммазов А.М., Хасанов Р.Н. Определение характеристик НДС газопровода в карстовом грунте / Научно – технические достижения и передовой опыт в нефтегазовой промышленности. – Сб. научн. тр. – Уфа: 1999. – С. 286 – 295.

10. Zaripov R., Korobkov G., Khasanov R., Chichelov V. Maintenance of strength of main pipelines, operating in non – standard conditions //Intellectual Service for Oil & Gas Industry / Analysis, Solutions, Perspectives Ufa State Petroleum Technological University, Miskolc University. – Ufa: – 2000. – P. 247 – 258.

11. Хасанов Р.Н. Противокарстовые мероприятия при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов. – Тез. докл. / I – я международная конференция «Техническое обслуживание и ремонт линейной части газопроводов. – Словакия: 2000. – С.42 – 45.

12.Зарипов Р.М., Коробков Г.Е., Хасанов Р.Н., Чичелов О.В. К методам расчета напряженно – деформированного состояния трубопровода с кривыми вставками / Материалы Второго Международного симпозиума "Наука и технология углеводородных дисперсных систем". Научные труды. Том I. – Уфа: Изд – во "Реактив", 2000. – С. 259 – 260.

13.Чичелов В.А. Хасанов Р.Н., Шаммазов А.М., Зарипов Р.М., Коробков Г.Е., Килин Ю.А.. Фесенко С.С. Новые технологии выполнения противокарстовых мероприятий при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов, проложенных по карстовой территории / Материалы заседания секции "Техническое обслуживание и ремонт газопроводов» НТС ОАО «Газпром». – М.: ИРЦ Газпром, 2000. – С. 47 – 53.

14.Чичелов В.А., Хасанов Р.Н., Фесенко С.С., Зарипов Р.М., Коробков Г.Е. Анализ результатов мониторинга и расчетов напряженно – деформированного состояния газопроводов при установке опор в карстовой зоне / III конгресс нефтегазопромышленников России. Секция Н «Проблемы нефти и газа»: Научные труды. – Уфа: Изд-во «Реактив», 2001. – С. 230 – 232.

15.Хасанов Р.Н., Фесенко С.С., Чичелов О.В., Зарипов Р.М., Коробков Г.Е. Исследование напряженно-деформированного состояния балочных переходов магистральных газопроводов и рекомендации по выбору конструктивных ремонтных схем / III конгресс нефтегазопромышленников России. Секция Н «Проблемы нефти и газа»: Научные труды. – Уфа: Изд-во «Реактив», 2001. – С. 232 – 234.

16.Фесенко С.С., Хасанов Р.Н., Углов А.Л., Попцов В.М. Ультразвуковой способ контроля напряженного состояния газопроводов // Газовая промышленность. – 2001. - № 5. – С. 34 – 35.