



Трубная Металлургическая Компания

Система мониторинга и оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода на всем жизненном цикле на основании концепции смарт трубы



2017 г.



- ТМК является одним из ведущих глобальных поставщиков трубной продукции для нефтегазового сектора.
- ТМК объединяет более 30 предприятий, расположенных в России, США, Канаде, Румынии, Омане и Казахстане и два научно-исследовательских центра в России и США.
- Общий объем отгрузки труб в 2016 году составил 3,9 млн тонн.
- Наибольшую долю в структуре продаж Компании занимают нарезные нефтегазовые трубы, отгружаемые потребителям в более 80 странах мира.
- ТМК поставляет продукцию в сочетании с широким комплексом сервисных услуг по термообработке, нанесению защитных покрытий, нарезке премиальных соединений, супервайзингу, складированию и ремонту труб.



- Глобальный лидер по объемам производства
- Более 30 производственных площадок по всему миру
- Сеть сервисных активов
- 15 офисов продаж по всему миру



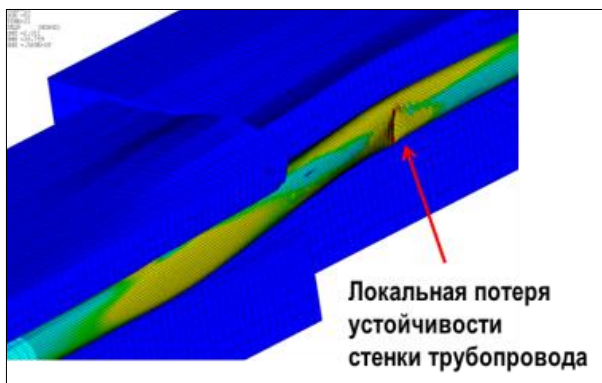
Место TMK по объемам производства стальных труб в 2016 году

	Россия	Мир
Стальные трубы	1	Топ 3
Бесшовные	1	Топ 3
Сварные	2	Топ 15



Цели и задачи мониторинга технического состояния участков МГ на примере зон пересечения активных тектонических разломов

Вероятные угрозы для участка МГ при пересечении активных тектонических разломов



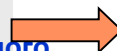
Компенсирующие проектные решения для зон пересечения активных тектонических разломов

1. Трубы с повышенной деформационной способностью
2. Специальные способы строительства
 - пологая конфигурация траншеи
 - наличие дренажной системы
 - засыпка мелкодисперсным грунтом
 - укладка упругим изгибом
 - балластировка с помощью контейнеров из нетканых материалов с грунтовым наполнением
3. Система мониторинга технического состояния в зоне АТР



Задачи системы мониторинга технического состояния участка МГ

1. Мониторинг деформированного состояния участка МГ
2. Мониторинг температуры объекта и окружающего грунта
3. Оценка текущего и прогнозируемого напряженно-деформированного состояния участка МГ
4. Выявление событий, требующих оперативного реагирования



1. Оценка прочности и устойчивости.
2. Анализ влияния накопленных повреждений на несущую способность и ресурс участка МГ.
3. Разработка рекомендаций диспетчерской службе и инженерно-техническим подразделениям по предотвращению и минимизации последствий внезапных отказов.

Пункт по созданию и испытанию опытно-промышленного образца системы мониторинга и оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода на всем его жизненном цикле от производства отдельной трубы до вывода из эксплуатации включен Программу научно-технического сотрудничества ПАО «Газпром» и ПАО «ТМК» на период 2016-2020 гг.

Цель работы:

Разработка эффективной контрольно-измерительной системы оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов и прогнозирования создания аварийных ситуаций на газопроводах в потенциально опасных зонах с подвижным рельефом поверхности, в зонах активных тектонических разломов, в зонах повышенной сейсмической активности и локальных участках трубопроводов в зонах пересечения с транспортными коммуникациями и другими протяженными объектами инфраструктуры, которым назначена повышенная категория.

Факторы эффективности работы:

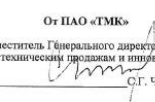
Повышение надежности и долговечности, снижение аварийности и уменьшение рисков, связанных с применением трубной продукции. Внедрение нового экономически-эффективного метода мониторинга состояния газопровода, позволяющего с высокой долей вероятности прогнозировать сроки его безаварийной эксплуатации, проведения ремонтно-восстановительных работ и снизить затраты на ликвидацию последствий разрушения и капитальный ремонт.

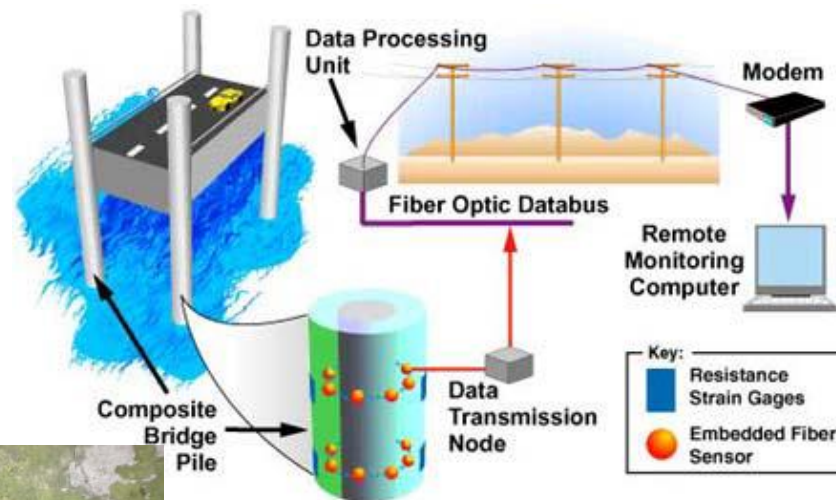
Генеральный директор ПАО «ТМК»  А.Г. Ширяев  2016 г.	Член Правления ПАО «Газпром», начальник Департамента  О.Е. Аксютин  2016 г.
ПРОГРАММА научно-технического сотрудничества ПАО «ТМК» и ПАО «Газпром» на 2016-2020 гг.	
Москва 2016	

4.	Создание и испытание опытно-промышленного образца системы мониторинга и оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода на всем его жизненном цикле от производства	2016-2018	ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ПАО «ТМК», ОАО «РосНИТИ».	ООО «Газпром ВНИИГАЗ».	ПАО «ТМК», ОАО «РосНИТИ».	Опытный образец системы мониторинга НДС трубопровода.
Цель работ: Предоставление научно-технической информации. Разработка эффективной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния трубопроводов.						
Факторы эффективности работ: Повышение надежности и долговечности, снижение аварийности и уменьшение рисков, связанных с применением трубной продукции.						

Примечание:
1) Освоение производства трубной продукции производится после подтверждения ПАО «Газпром» потребности в трубной продукции и подтверждения экономической целесообразности.

Координаторы Программы:

От ПАО «ТМК» Заместитель Генерального директора По техническим продажам и инновациям  С.Т. Чикалов	От ПАО «Газпром» Начальник управления  М.Ю. Недведев
Исполнительный директор - Перший Заместитель Генерального директора  В.Б. Оборский	Начальник отдела  А.Б. Арабей

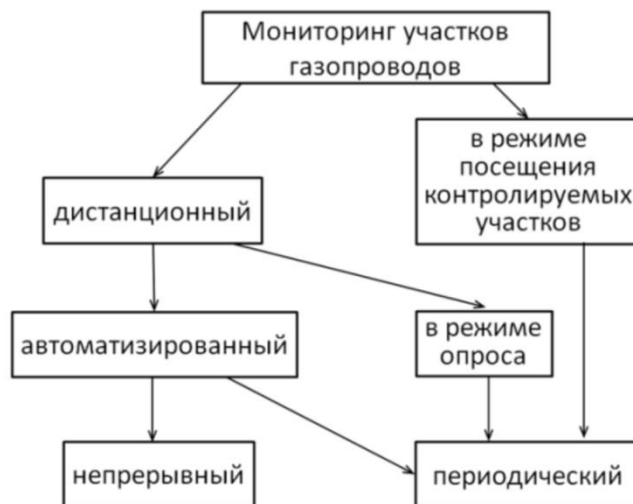


Резистивные тензометрические датчики

- Низкая цена контроллера
- Простая компактная конструкция контроллера
- Сложности поддержания свойств тензорезистора во времени

Волоконно-оптические датчики напряженно-деформированного состояния

- Высокая стабильность свойств датчика во времени
- Высокая стоимость контроллера
- Сложная конструкция контроллера
- Большие габариты контроллера



Связь видов мониторинга участков МГ

Мониторинг в режиме посещения:

- НДС трубопровода
- Повреждённость

Онлайн-мониторинг

- НДС трубопровода
- Повреждённость
- Температура
- Утечки
- Акустоэмиссия (контроль доступа)



Особенности применения проводного и беспроводного интерфейса компонентов «Интеллектуальной трубы»

Проводной

Онлайн-мониторинг

- Подготовка инфраструктуры для передачи данных
- Мониторинг в режиме посещения
- Разработка/адаптация и согласование стандарта передачи информации
- Исследование возможности применения существующих контроллеров или разработка специализированных

Беспроводной

Контроль состояния трубы в режиме посещения

- Необходимость установки контроллера непосредственно в (на) трубу
- Необходимость разработки контроллеров малых габаритов, которые можно интегрировать в защитное покрытие трубы
- Удорожание конструкции трубы
- Повышенные требования к транспортировке

Питание

Беспроводные способы передачи электропитания

- Малая мощность
- Малое расстояние передачи
- Возможность выполнения измерений только при подаче электропитания
- "Неограниченный" срок службы

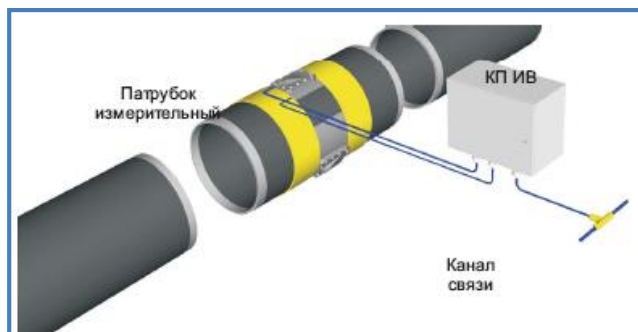
Встроенный источник питания

- Ограниченный срок службы
- Необходимость периодической замены источника питания
- Возможность выполнения измерений в постоянном режиме

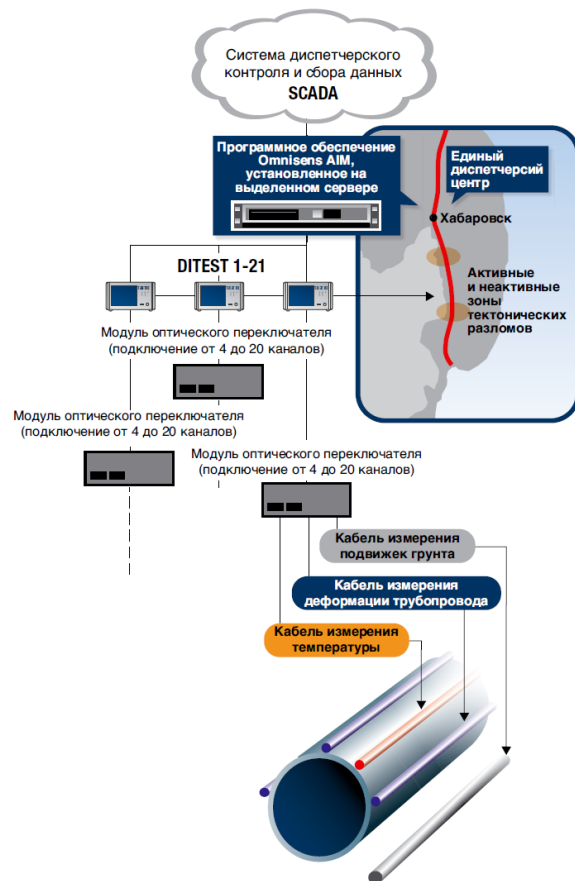
Альтернативные способы подачи питания

- ЭХЗ
- Создание питающего потенциала на трубе

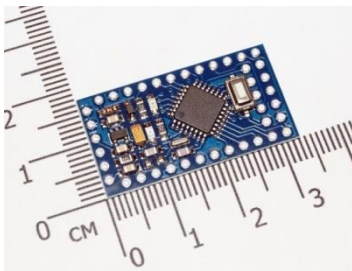
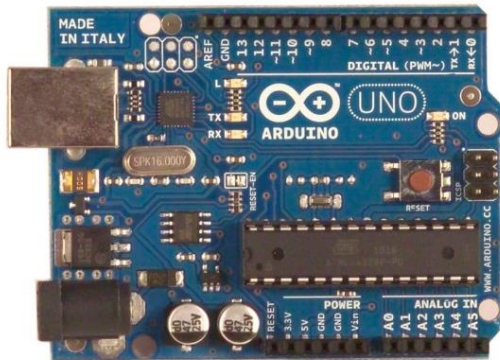
Разработка/адаптация и согласование стандарта передачи информации



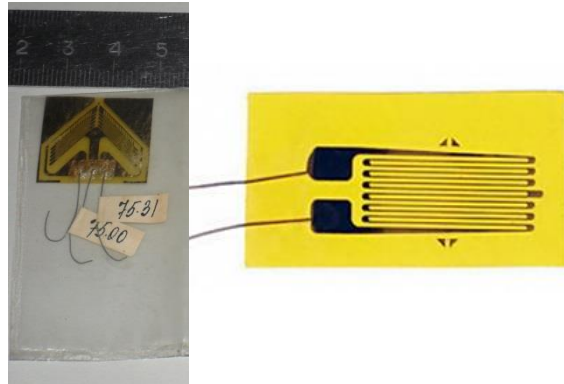
Интеллектуальные вставки



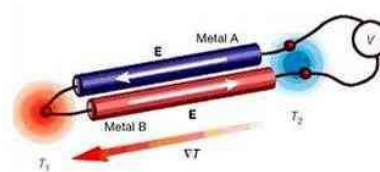
**Мониторинг с применением
распределённых волоконно-оптических
сенсоров**



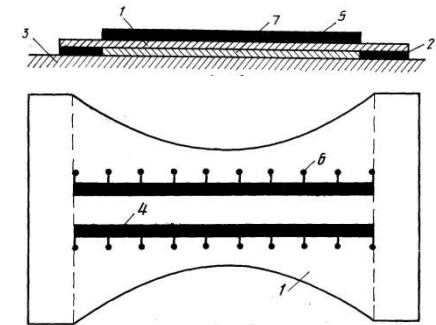
Контроллеры, в том числе на базе существующих с открытой архитектурой



Тензорезистор



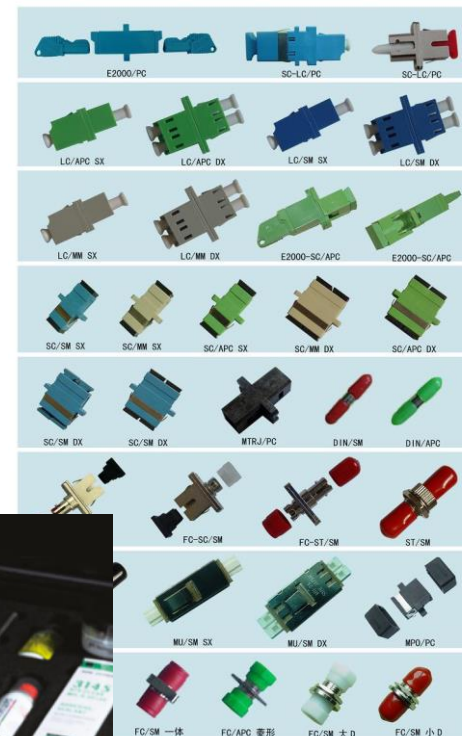
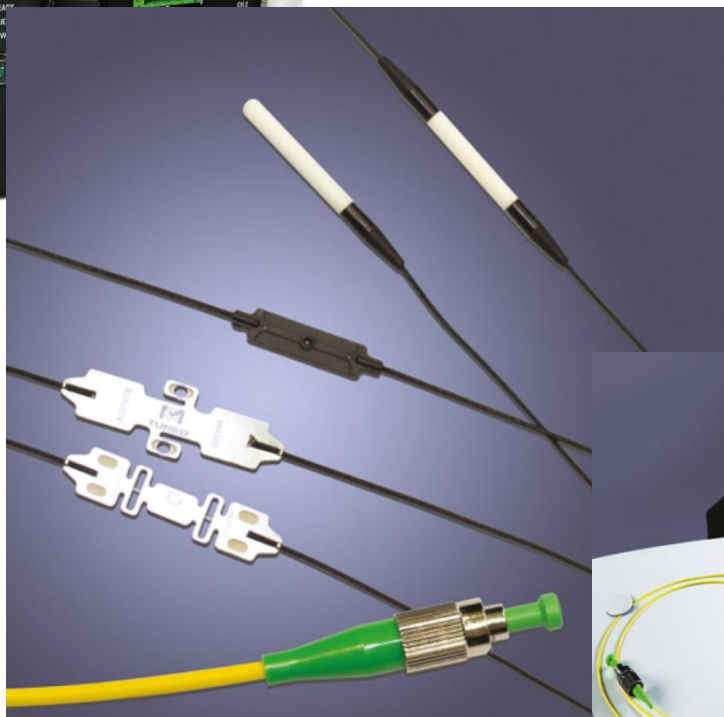
Термопара (датчик температуры)



Датчик усталостных повреждений конструкций



Датчики на основе оптического волокна



Волоконно-оптический сенсор (ВОС) обеспечивает реализацию следующих функций:

1. Измерение приращения деформаций при растяжении или сжатии сенсора:

- Измерение деформаций на поверхности трубопровода, к которому прикреплен сенсор, по линии размещения кабеля;
- Индикация деформаций в грунте, вмещающем сенсор.

2. Измерение температуры среды, вмещающей сенсор

- измерение температуры трубопровода,
- измерение оценка температуры грунта, вдоль линии размещения кабель

3. Выявление и оценка параметров вибраций, передаваемых через грунт, в котором размещен сенсор

Возможные области применения ВОС в рамках геотехнического мониторинга (ГТМ)

- оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) объекта (участка трубопровода)
- выявление подвижек грунта (просадки, выпучивание, оползневые процессы в грунтовом массиве)
- измерение температуры объекта, в том числе для целей выявления утечек
- измерение температуры в массиве грунта , в том числе для целей выявления утечек, контроля температуры в зоне вечномерзлых и промерзающих грунтов
- выявление, оценка интенсивности и идентификация типа динамических воздействий на грунт, в том числе для целей контроля доступа

Параметр	Оптоволоконный	Резистивный
Установка и опрос датчика	Быстро (< 20 мин на датчик); Легко (не требуются специалисты; не требуется дополнительных проводов)	Затраты времени (на доп. провода) Требует квалифицированных и опытных специалистов
Усталостная прочность	Несущественные изменения при более чем 2 миллионах циклов при +/- 0.24 % деформациях	Подобные свойства не приемлемы для резистивных тензодатчиков
Цена (датчик + устройство опроса)	Более эффективен при большом числе датчиков. Точка безубыточности уже при 20 датчиках	Цена увеличивается прямопропорционально кол-ву датчиков, т.к. каждому датчику необходим собственный канал для опроса
Температурный эффект	Нет	Резисторы выделяют температуру, тем самым внося ошибку в измерения.
Чувствительность к внешним воздействиям	Только к температуре	К электромагнитным воздействиям и температуре, неприемлем в агрессивных средах



Характерные типы предельных состояний трубопровода в зависимости от природно-геологических условий

Природно-геологические условия по трассе	Характерные виды нагружения	Типы предельных состояний
Активные тектонические разломы	Продольное сжатие	Общая потеря устойчивости
	Изгиб	Местная потеря устойчивости
	Изгиб + растяжение	Нарушение критерия прочности; Местная потеря устойчивости
	Изгиб + сжатие	Общая потеря устойчивости
Оползневые процессы Карстовые образования Многолетнемёрзлые грунты Слабонесущие грунты	Изгиб	Местная потеря устойчивости
	Изгиб + растяжение	Местная потеря устойчивости
	Изгиб + сжатие (при наличии доп. факторов, вызывающих продольное сжатие)	Общая потеря устойчивости
Все рассмотренные природно-геологические условия	Независимо от вида нагружения	Нарушение прочности трубопровода; Нарушение прочности сварных швов; Критерии долговечности (при наличии циклических нагрузок).

Технические требования

к системам геотехнического мониторинга с применением распределённых волоконно-оптических сенсоров (ВОС), размещённым на объектах транспортировки газа в зонах активных тектонических разломов, оползневых процессов, карстовых образований, многолетнемерзлых и слабонесущих грунтов

Технические требования распространяются:

- на системы мониторинга сухопутных магистральных газопроводов ПАО «Газпром» условным диаметром более 400 мм на базе распределённых волоконно-оптических сенсоров;
- на системы мониторинга, предназначенные для контроля деформаций трубопровода, подвижек грунта, температуры трубопровода и грунта;
- на системы мониторинга, предназначенные для оценки технического состояния газопровода и геотехнического состояния прилегающего грунта.

В Технических требованиях определены структура, перечень и количественные значения показателей, определяющих эксплуатационно-технологические возможности систем мониторинга геотехнического состояния объектов транспорта газа ПАО «Газпром».

Структура критериев предельных состояний при оценке прочности и устойчивости участка трубопровода

Критерий прочности основного металла

$$\sigma_{\text{экв}} \leq \sigma_B,$$

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_{\text{кц}}^2 - \sigma_{\text{кц}} \sigma_{\text{пр}} + \sigma_{\text{пр}}^2}$$

Критерий местной потери устойчивости

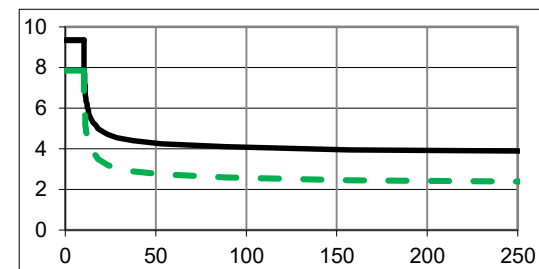
$$\sigma(\varepsilon) = \frac{2}{3} \sqrt{E_t(\varepsilon) \cdot E_s(\varepsilon)} \frac{2h}{D},$$

Критерий общей потери устойчивости

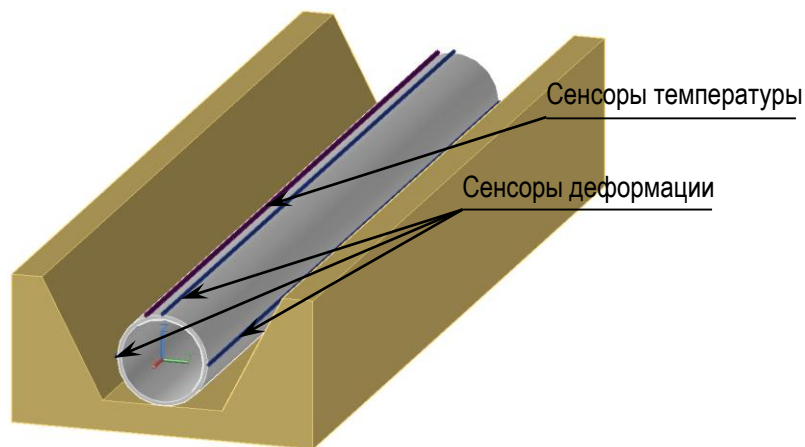
СП 36.13330.2012

Критерий прочности сварных соединений

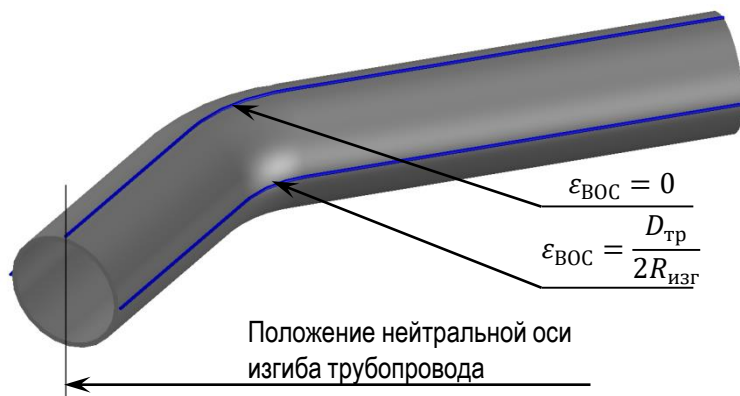
СТО Газпром 2-2.4-715



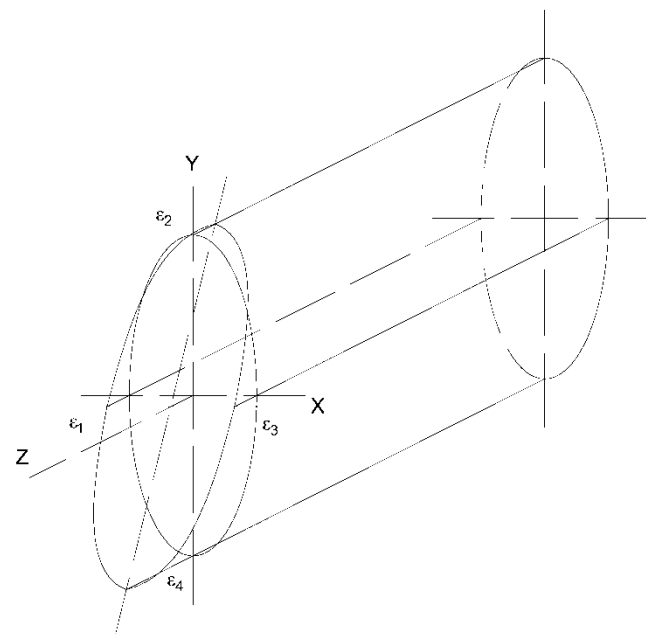
Обоснование допустимой погрешности определения деформации трубопровода



Конфигурация волоконно-оптических сенсоров для контроля НДС трубопровода



Деформация ВОС при изгибе трубопровода в горизонтальной плоскости



$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - деформация ВОС

$$|\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3|$$

Погрешность определения деформации трубопровода на нижней образующей:

$$|\varepsilon_4| = 3 \cdot |\varepsilon_2|$$



Деформационный волоконно-оптический сенсор:

- точность измерения относительной деформации до 0,0001
- диапазон измерения деформаций от -4% (сжатие) до 4% (растяжение), в зависимости от типа волокна и конструкции сенсора
- работа при больших деформациях (>1%) приводит к уменьшению продолжительности срока службы оптического волокна

Температурный волоконно-оптический сенсор:

- точность измерения температур до 0,1°C, в зависимости от типа волокна и конструкции сенсора
- диапазон измерения температуры от -273°C до 700°C

Пространственно-временное разрешение систем мониторинга на основе ВОС

- точность позиционирования зоны возмущения по длине сенсора от 0,5 м и более (с увеличением протяженности участка точность позиционирования снижается)
- время опроса сенсоров от 20 сек и более, в зависимости от протяженности участка, количества сенсоров и необходимой разрешающей способности
- длина участка мониторинга до 100 км, зависит от требуемой разрешающей способности и максимального допустимого времени измерения

Целевые технические параметры систем мониторинга на основе ВОС в составе «Технических требований...»

Характеристика	Значение	Примечание
Диапазон измерения деформаций трубопровода	Минус 0,5% – плюс 0,5%	Деформации на уровне предела текучести для высокопрочных сталей
Диапазон измерения деформаций грунта	0 – 0,5%	Исходя из мирового опыта, перед образованием обвалов можно зафиксировать плавное нарастание продольных деформаций грунта до величины ~0,2%
Точность измерения деформаций сенсора (измерительный режим)	0,01%	~20 МПа упругих напряжений, ~5% предела текучести (в зависимости от класса прочности стали); При установке трёх ВОС с шагом 90° данная точность позволяет достичь точности определения деформаций трубопровода 0,04%
Точность измерения деформаций трубопровода	0,04%	С учётом типовой конфигурации сенсоров и положений разработанных ТТ по точности взаимного позиционирования сенсоров
Точность измерения деформаций (индикаторный режим)	0,03%	~10% предела текучести
Измерение температур в диапазоне, Рабочий диапазон температур	от $(T_{min} - 10)^\circ\text{C}$ до $(T_{max} + 10)^\circ\text{C}$	T_{min} – минимальная температура эксплуатации газопровода; T_{max} – максимальная температура эксплуатации газопровода
Точность измерения температуры	2°C	Значение выбрано исходя из необходимости использования температурного сенсора для компенсации температурного расширения трубопровода. Указанное значение соответствует компенсации продольных напряжений величиной 5 МПа.



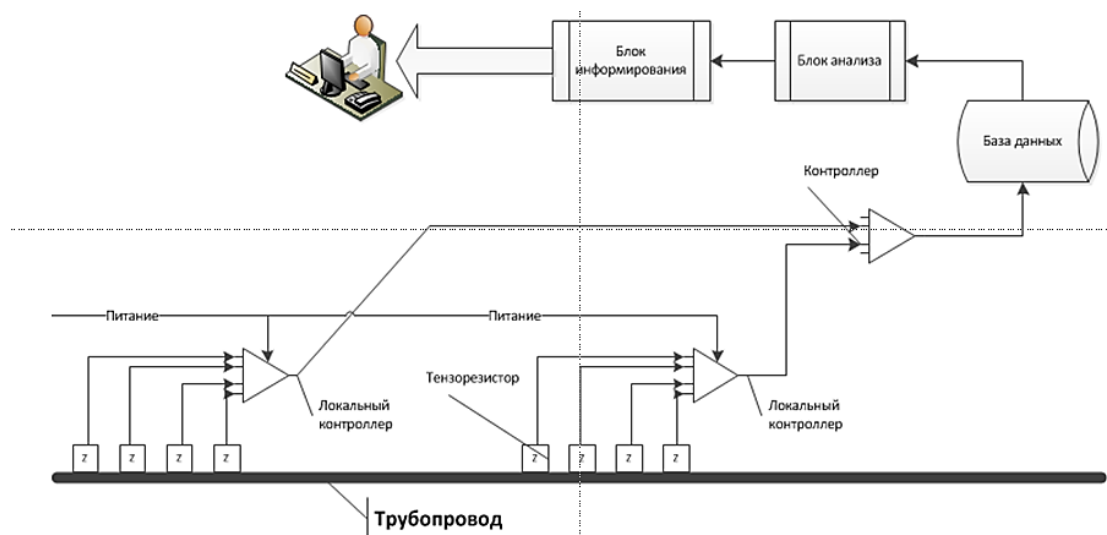
ПАО «ТМК» предлагает совместно с ПАО «Газпром» разработать комплексную информационно-измерительную систему (КИИС) мониторинга состояния трубопроводов, обеспечивающую сбор данных и диспетчеризацию, обмен данных с контрольно-измерительного устройства в компьютеризированную систему, выполняющую полноценную оценку работоспособности, надежности и безопасности технического состояния объекта.

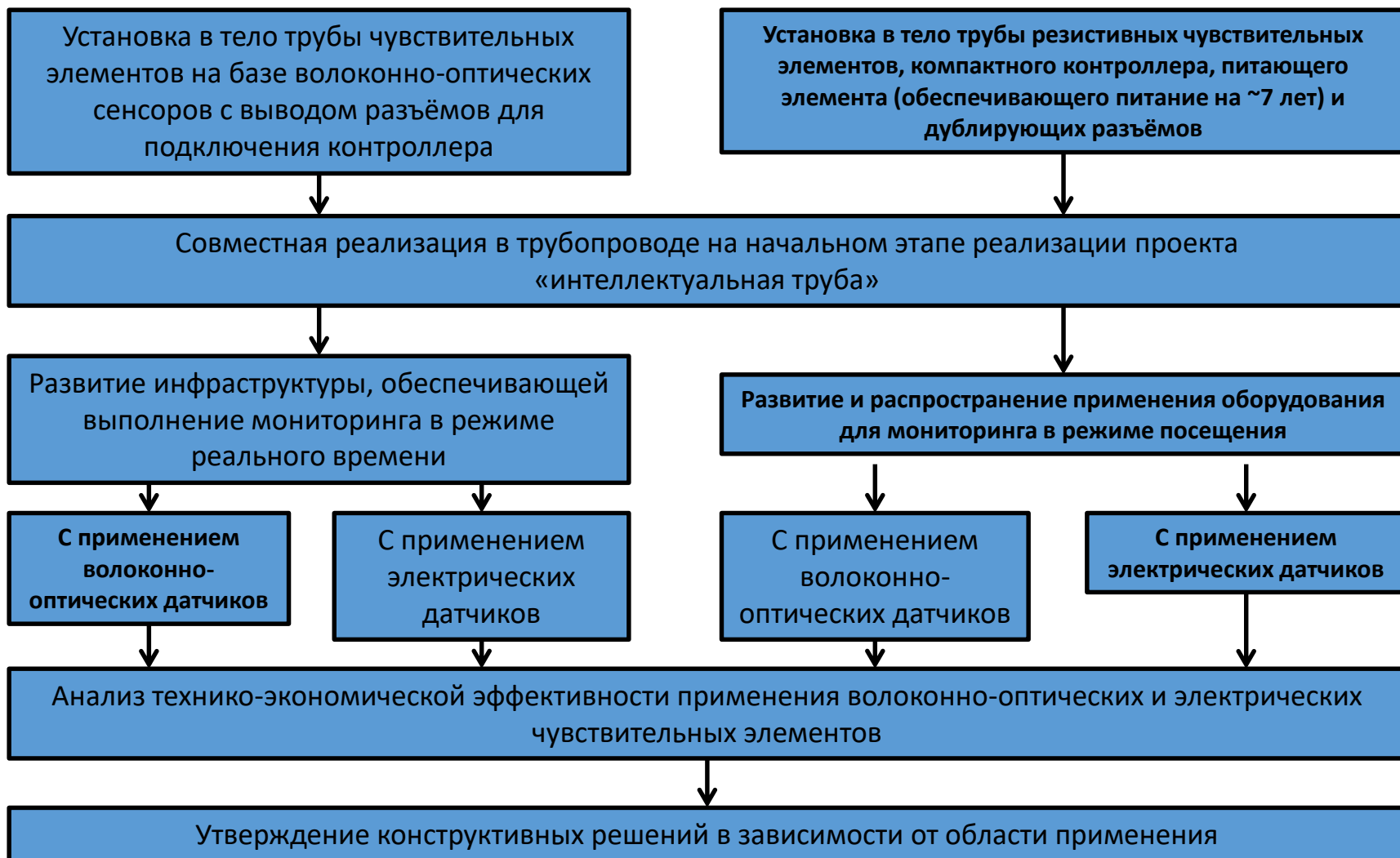
Функции реализуемые КИИС, включают в себя :

- высокоточное измерение и непрерывная регистрация изменений НДС участка трубопровода по конечно-элементным моделям с учетом всех силовых факторов, действующих на трубопровод;
- контроль и сравнение значений НДС с «нулевыми» и эталонными, сравнение и расчет превышения допустимых значений, согласно НТД;
- уточнённый расчет значений НДС участка с использованием оболочечных и объёмных конечно-элементных моделей;
- фактическое распознавание зарождения и локализация дефектов;
- определение сил и моментов, действующих на границах участка;
- выявление наиболее нагруженных труб участка;
- ранжирование участка трубопроводной конструкции на основе: НДС, расположения дефектов, их изменения и влияния на работоспособность и надежность технического состояния;
- анализ и прогноз несущей способности участка на основе критериев теории прочности и разрушения.

Контрольно-измерительная информационная система (КИИС) реализуется с помощью создания:

- контрольно-измерительные устройства (КИУ), интеллектуальные контролеры (локальные), предназначены для измерения деформации поверхности объекта при воздействии статических и динамических нагрузок:
- точечные — датчики, отвечающие за измерения непосредственно в одной локальной точке;
- распределенные — опто-волоконные сенсоры, представляющие результаты измерений вдоль протяженной системы, существенно большей, чем в точечном случае;
- квазираспределенные — представляют собой сеть точечных элементов, каждый из которых снимает показания в своей точке привязки.
- база данных (БД), в которой собираются данные об объекте и об эксплуатационных параметрах, воздействиях параметров технологического режима и база знаний (БЗ), в которой собираются данные классификации состояний объекта по определенным критериям;
- блок анализа (БА) и обработки классифицированного состояния объекта, где формируются рекомендации по его эксплуатации и управляющих воздействий при переходе с режима на режим на основе имитационного моделирования;
- блок информирования (БИ) и отображение параметров в фоновом режиме с помощью моделирующей системы, в который благодаря повторяющейся обучающей систематике восстанавливается «поведение» объекта на экране компьютера. В нелинейной вариации, с помощью адаптированных к решению проблемы математических моделей осуществляется аппроксимация данных измерения.





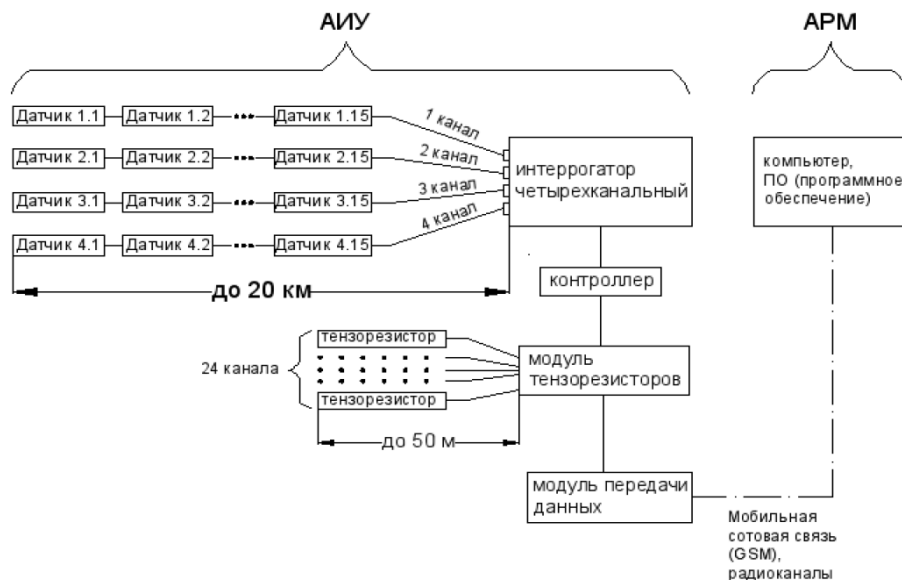
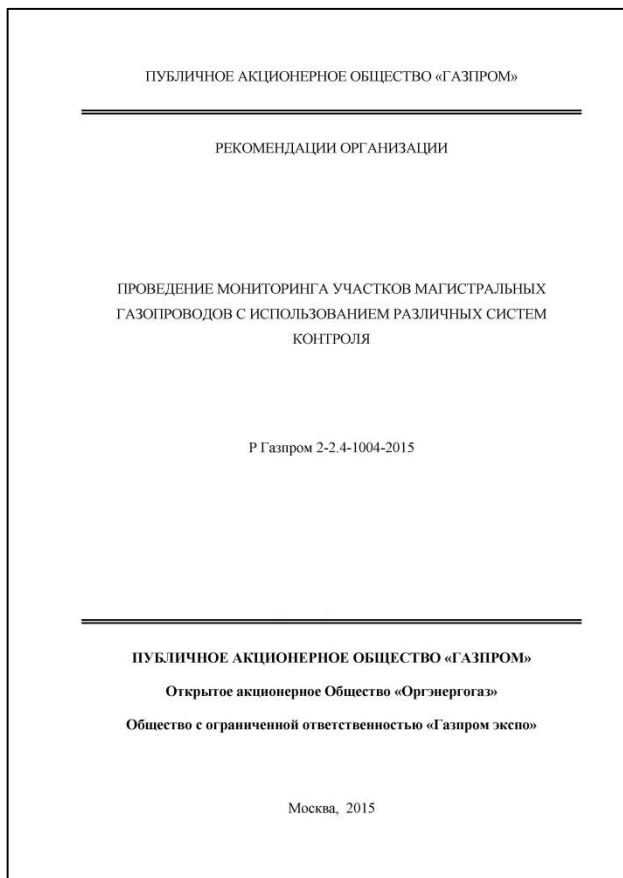
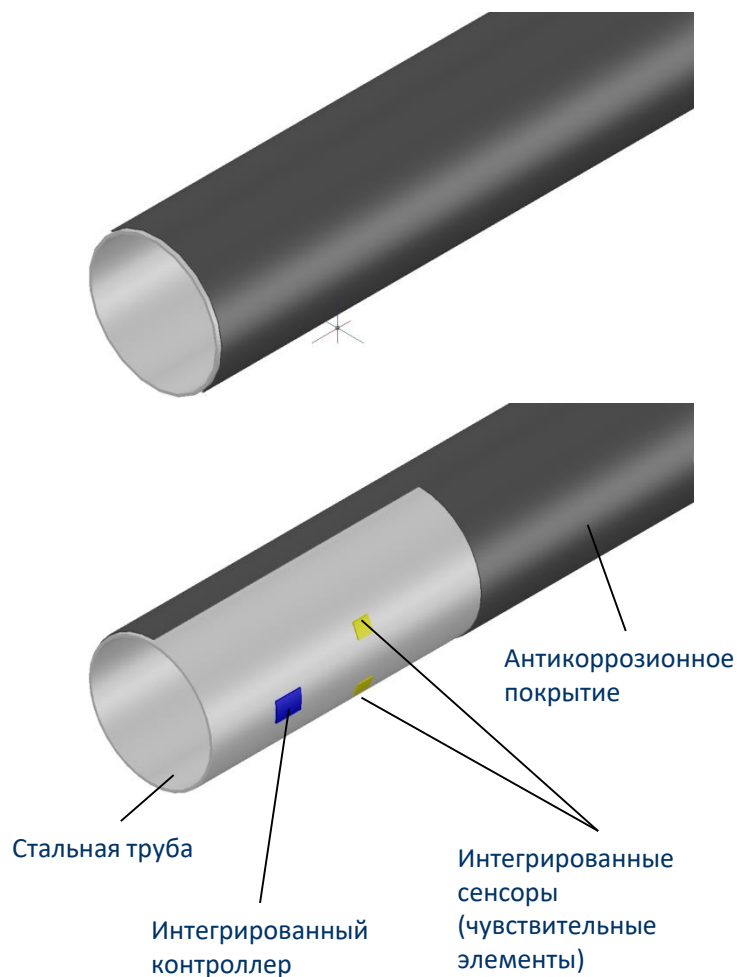


Схема автоматизированной стационарной системы мониторинга с применением волоконно-оптических и тензорезистивных датчиков
(Р Газпром 2-2.4-1004-2015)



- заводская установка чувствительных элементов (тензо- и волоконно-оптических датчиков);
- возможность определения показателей технического состояния и нагруженности трубопровода по отношению к ненагруженной трубе;
- установка контроллеров и регистрирующей аппаратуры непосредственно в конструкцию трубы;
- неизменность массово-габаритных параметров трубы: вес интегрируемых элементов не более 1 – 2 кг, изменение внешнего диаметра трубы (покрытия) – не более 5 – 10 мм;
- малая добавочная стоимость трубы: не более 10% на начальном этапе внедрения с перспективой снижения при массовом производстве;
- отсутствие изменений в технологическом процессе строительства трубопровода.