

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ И СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Трифонов Олег Владимирович

д.т.н., начальник лаборатории научно-методического и нормативного обеспечения проектирования газопроводов ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ГАЗОПРОВОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ ОБ НДС И ПРОСТРАНСТВЕННОМ ПОЛОЖЕНИИ

Навигационные блоки внутритрубных устройств



Применяется для определения положения трубопровода (необходима геодезическая привязка опорных точек)

Определяет кривизну участка трубопровода не менее $k=1/500D$ (предел чувствительности $k=1/2500D$).

Погрешность определения радиуса составляет не более 15% на плече не более 30 м.

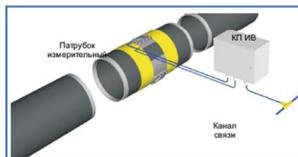
Интеллектуальные вставки



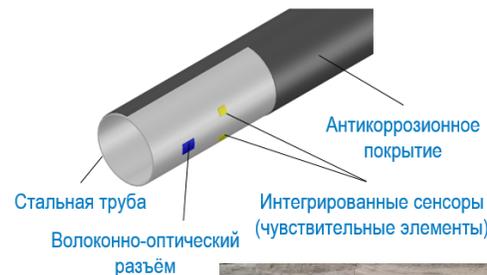
Измерение в месте установки интеллектуальной вставки; с потерей точности – до 10 м.

Необходимость точного позиционирования интеллектуальной вставки в месте возникновения максимальных нагрузок

Абсолютная точность измерения деформаций в месте установки $\sim 0,01\%$



КРМ «Умная труба»

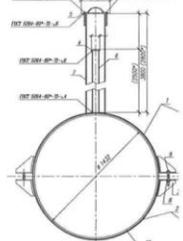


Трубное изделие с интегрированными регистрирующими волоконно-оптическими датчиками, расположенными в трех сечениях на трёх образующих трубы ($0^\circ - 120^\circ - 240^\circ$) и датчиками температуры

Диапазон измерения деформаций трубопровода минус 0,5% – плюс 0,5%

Точность измерения деформаций трубопровода 0,04 %

Радиолокационная интерферометрия



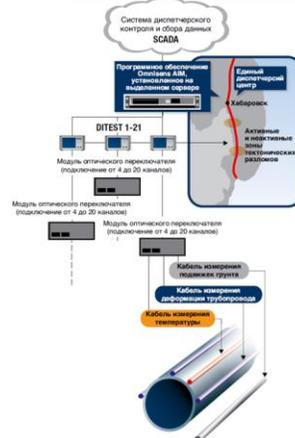
Минимальное расстояние между наблюдательными пунктами 40 м

Во время измерений:
- на УО должен отсутствовать снежный покров
- не должно быть грозы и осадков

Амплитуда смещений УО в направлении на спутник должна быть не более ± 10 мм

Среднеквадратичная ошибка измерений смещений УО в направлении на спутник не более ± 3 мм

Волоконно-оптические сенсоры



Протяжённость участков измерения – от 200 м (фактически) до 50 км (потенциально)

Высокая сложность монтажа в полевых условиях; низкая устойчивость сенсора по отношению к внешним воздействиям;

Абсолютная точность измерения деформаций в месте установки $\sim 0,04\%$

Мониторинг площадных объектов (зданий, сооружений) КС, ДКС и МКУ



Контроль перемещений контрольных точек фундаментов, зданий, технологического оборудования и трубопроводов КС. Погрешность измерений – 3 мм.

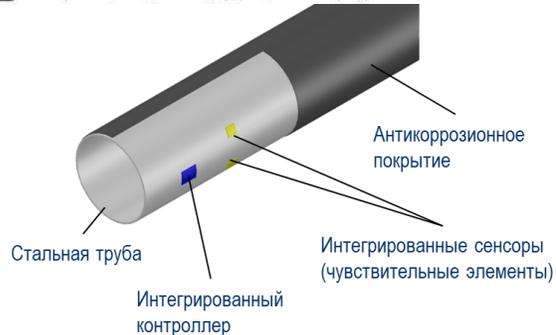
Контроль деформаций контрольных сечений подземных участков технологических трубопроводов точечными волоконно-оптическими датчиками

Контроль углов наклона несущих конструкций (балок, колонн) укрытий ГПА

Расчетно-экспериментальная оценка НДС зданий, сооружений и технических устройств высокоточными методами (цифровой двойник)

КРМ «Умная труба» включает в себя трубное изделие с интегрированными регистрирующими волоконно-оптическими датчиками, расположенными в трех сечениях на трёх образующих трубы ($0^\circ - 120^\circ - 240^\circ$) и датчиками температуры

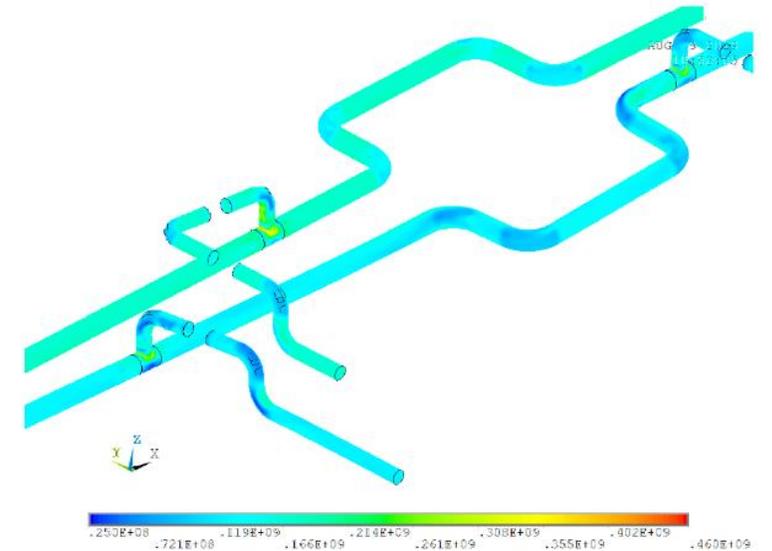
КРМ «Умная труба»



Автоматизированное место оператора (АРМ)



Специализированное программное обеспечение



ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ



геометрия

нагрузки

связи

грунт

топология

Библиотека материалов:

- трубные стали
- грунты

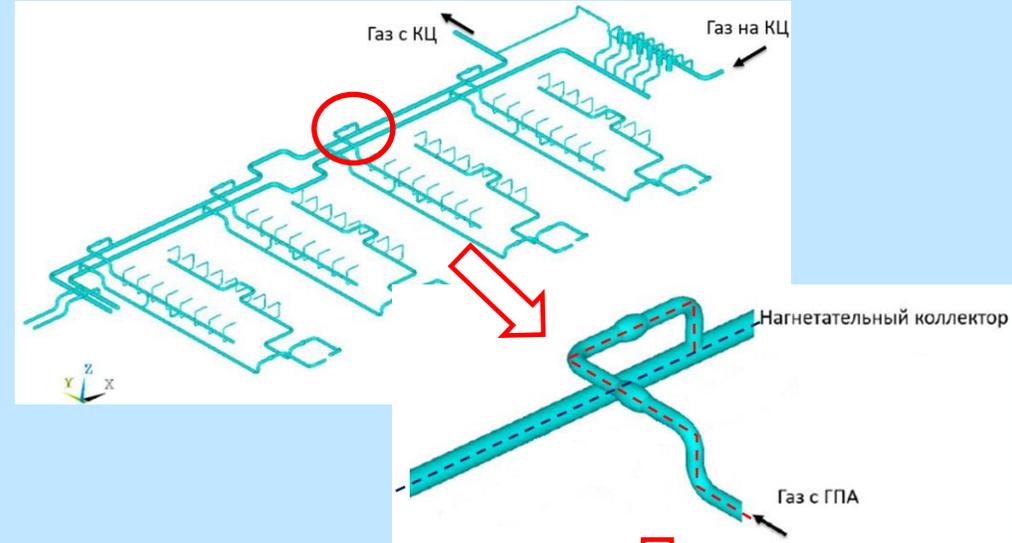
Общие параметры модели:

- Размер КЭ
- Параметры точности решения
- Параметры вывода данных

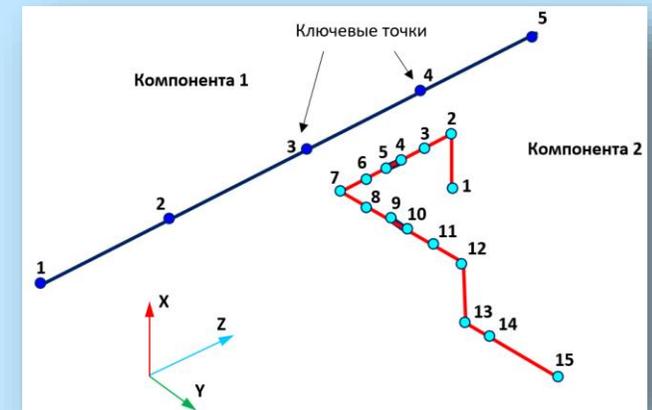
Компонента – непрерывный, односвязный элемент трубопроводной системы, имеющий начало и конец

Ключевая точка – точка изменения геометрии (направления оси, диаметра, толщины стенки), свойств материала, приложения нагрузок или начала участка приложения нагрузок, приложения связей.

Исходный объект

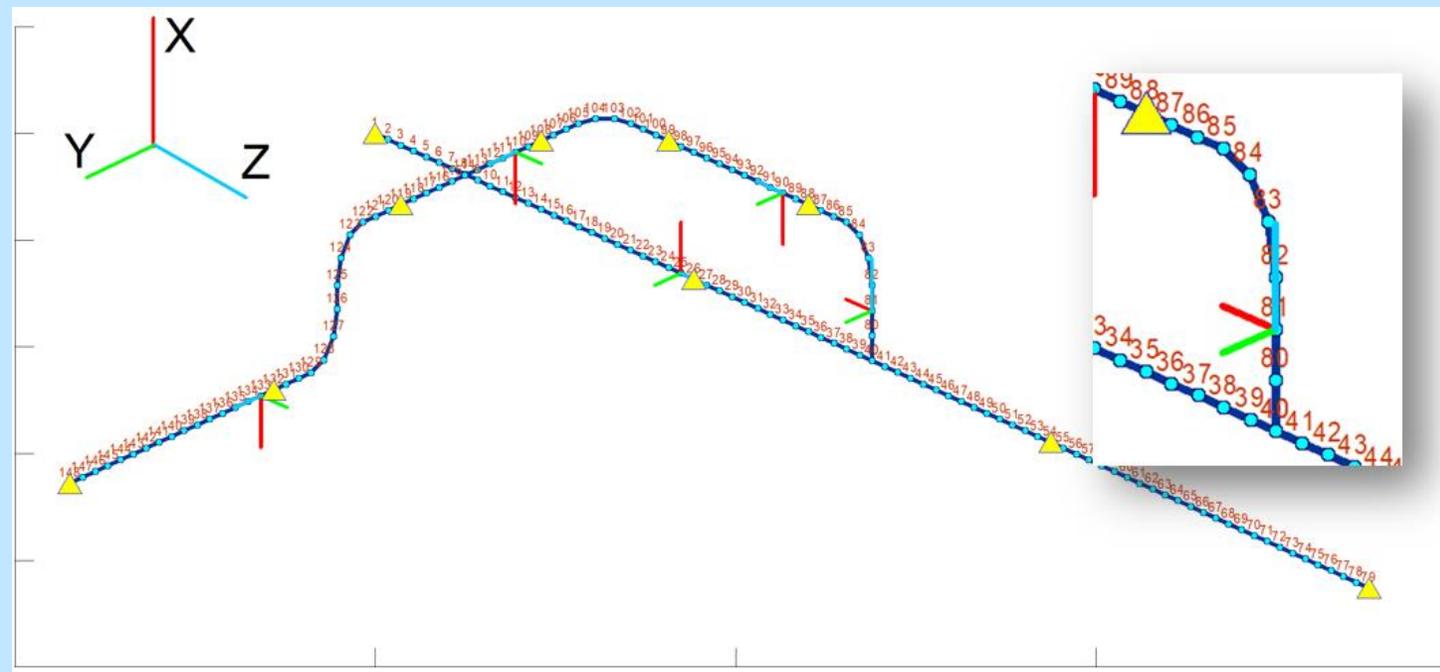


Геометрическая модель



Решаемые задачи:

- Анализ исходных данных и топологии модели
- Построение геометрии обвязки с учетом радиусов поворотов оси
- Разбиение на элементы и автоматическая нумерация элементов, узлов, степеней свободы
- Создание матриц связанности элементов (соответствие локальных и глобальных степеней свободы)
- Создание матриц ориентации элементов (принцип непрерывного поворота осей при движении вдоль элемента)

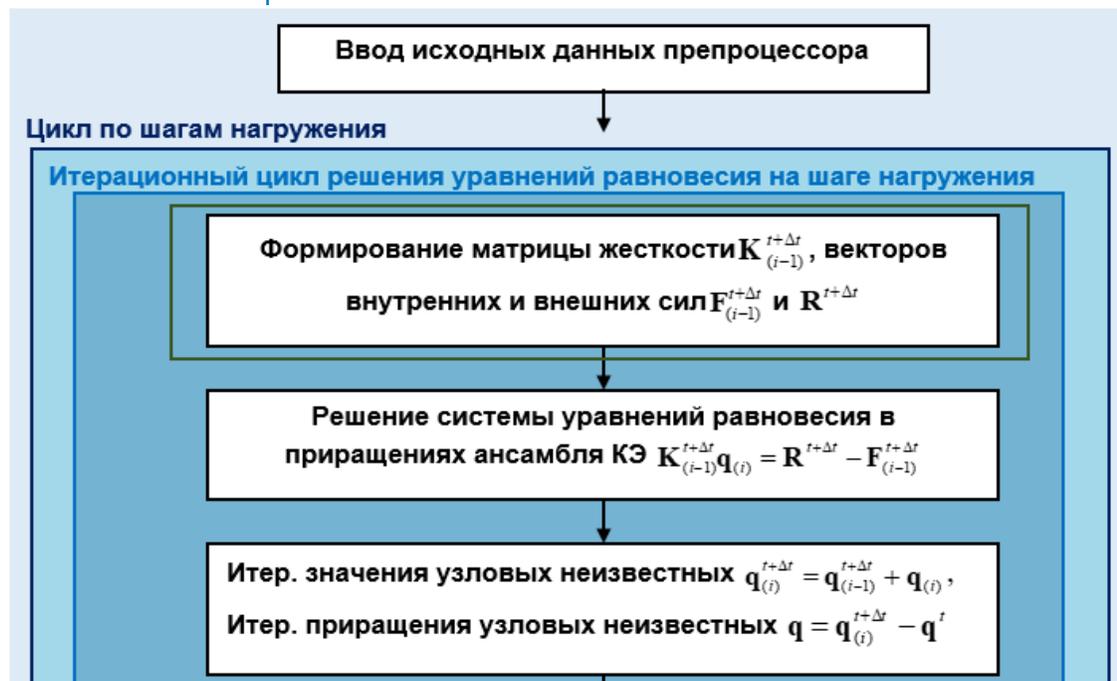


Конечноэлементная модель с глобальной нумерацией узлов, расположением опор и отображением ориентации локальных систем координат элементов

Реализованные функции:

- Расчет трубопроводной системы как пространственной балочной конструкции с учетом поперечных сдвигов (модель С.П. Тимошенко)
- Учет больших перемещений и деформаций в рамках подхода Лагранжа
- Учет пластических деформаций в рамках модели теории пластического течения с критерием текучести Мизеса
- Учет упрочнения материала на основе заданной диаграммы деформирования трубной стали
- Элементы с повышенной жесткостью (краны)
- Учет нелинейного взаимодействия с грунтом на основе распределенных нелинейных связей
- Нагрузки: давление, температура, распределенные силы, сосредоточенные силы и моменты, заданные перемещения грунта, заданные перемещения точек (участков) трубопроводной системы
- Односторонние связи (контактные поверхности), нелинейные силовые связи

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЯДРА



Система состоит из двух участков трубопровода (компонента 1 ABCDE, компонента 2 CFGHIJKLMNO). Параметры трубопроводов приведены в таблицах 1 и 2. Характеристики материала труб одинаковы для компонент 1 и 2.

Таблица 1 – Характеристики участка трубопровода

Компонент	Диаметр наружный, D, мм	Толщина стенки, мм	Глубина прокладки (от верха трубы) h, м
ABCDE	1420	32.0	–
CFGHIJKLMN O	1020	22.0	–

Таблица 2 – Характеристики материала трубы

Класс прочности стали	Условный предел текучести R_2^H , МПа	Предел прочности R_1^H , МПа	Равномерное удлинение δ_D , не менее, %
K60	480	590	8

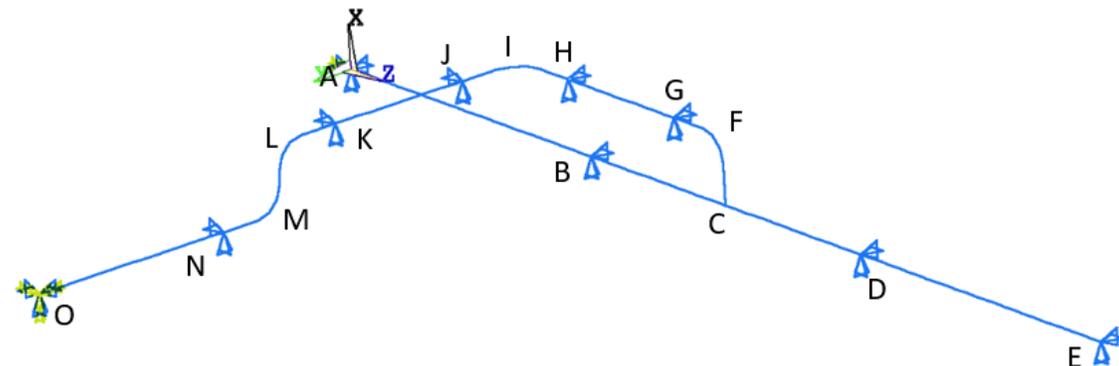


Таблица 3 – Действующие нагрузки

Рабочее давление, p, МПа	Температурный перепад, ΔT , °C
9,8	40

Граничные условия (записанные относительно глобальных осей XYZ):

$$A: u_x = u_y = u_z = \varphi_z = 0$$

$$B, D, E, G, H: u_x = u_y = 0$$

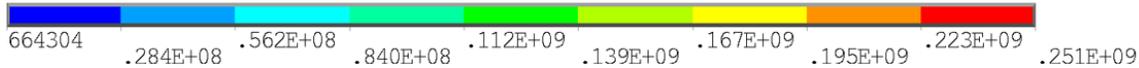
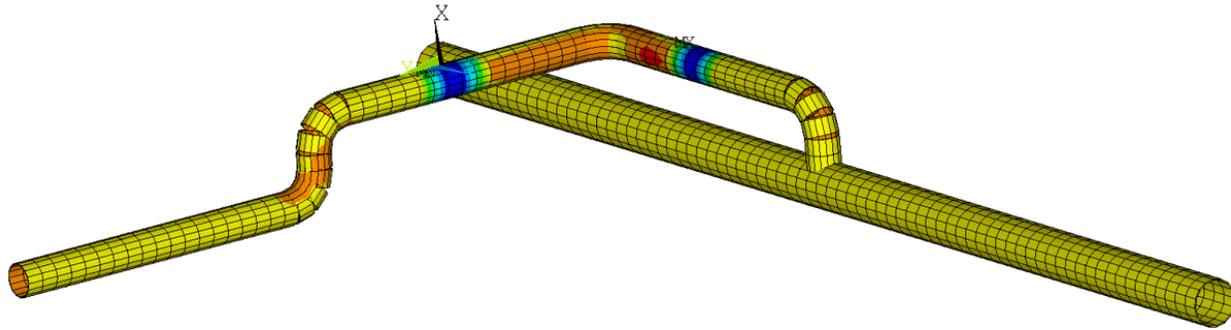
$$J, K, N: u_x = u_z = 0$$

$$O: u_x = u_y = u_z = \varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$$

Таблица 4 – Параметры конечно-элементной модели

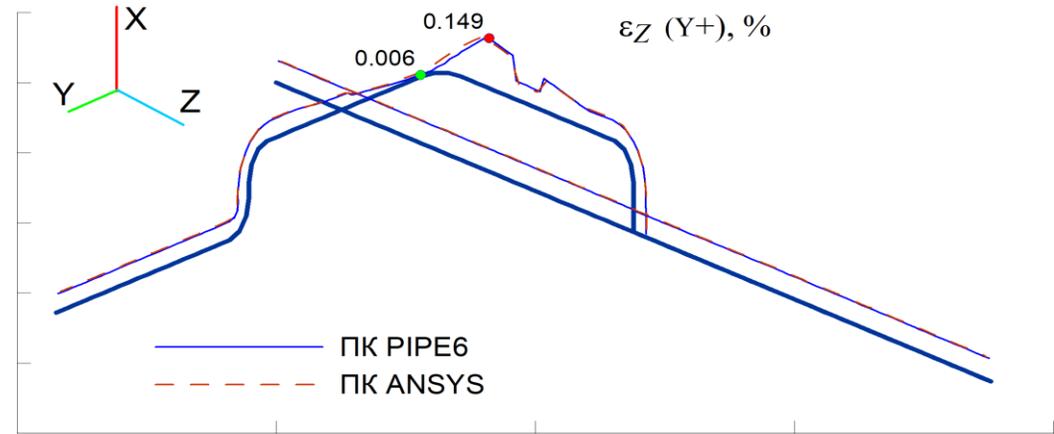
Число узлов	Число элементов	Число наложенных связей	Число степеней свободы	Максимальная/средняя длина элемента, м
148	147	26	1744	0.5

Конечно-элементная модель ПК ANSYS

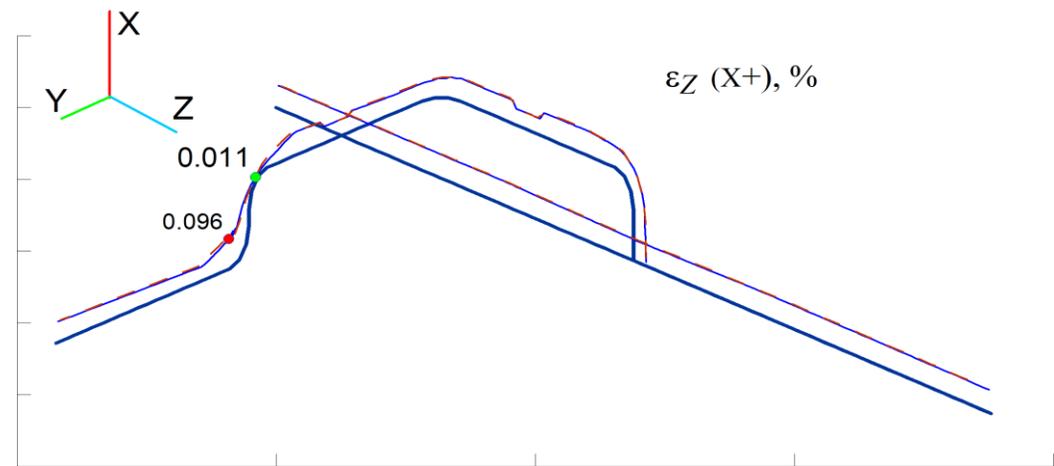


Эквивалентные напряжения по расчету на ПК ANSYS, МПа

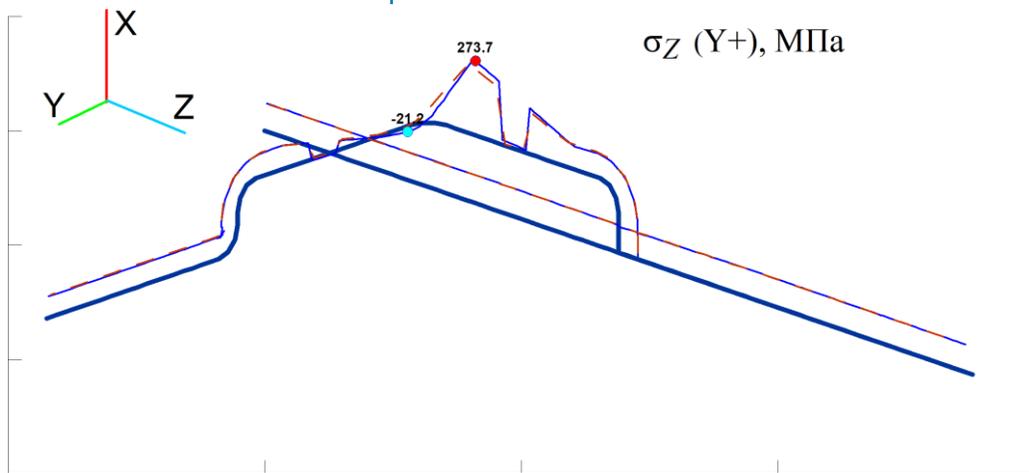
Сопоставление результатов расчета с ПК ANSYS по наиболее характерным параметрам приведены на рисунках в виде эпюр, построенных на начальной геометрии системы. Сплошные кривые – ПК PIPE6, пунктирные кривые – ПК ANSYS.



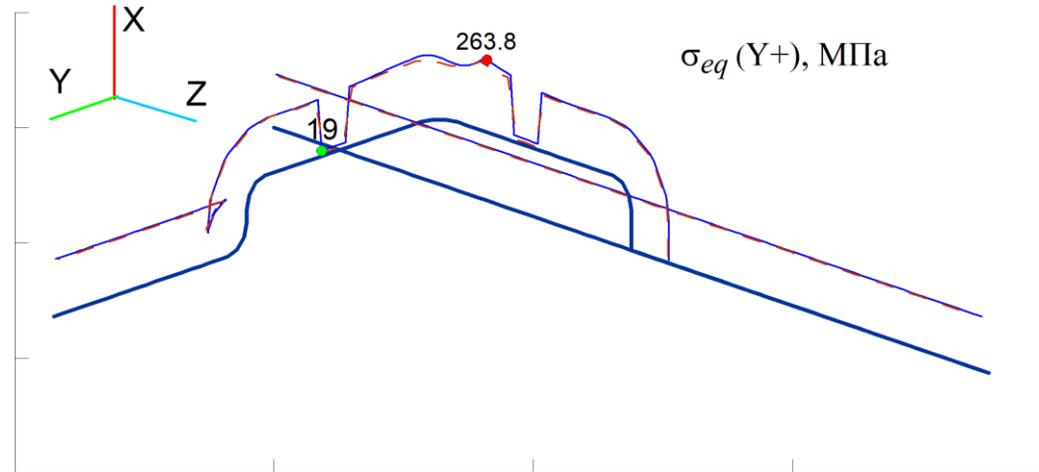
Продольная деформация на диаметре Y+, %



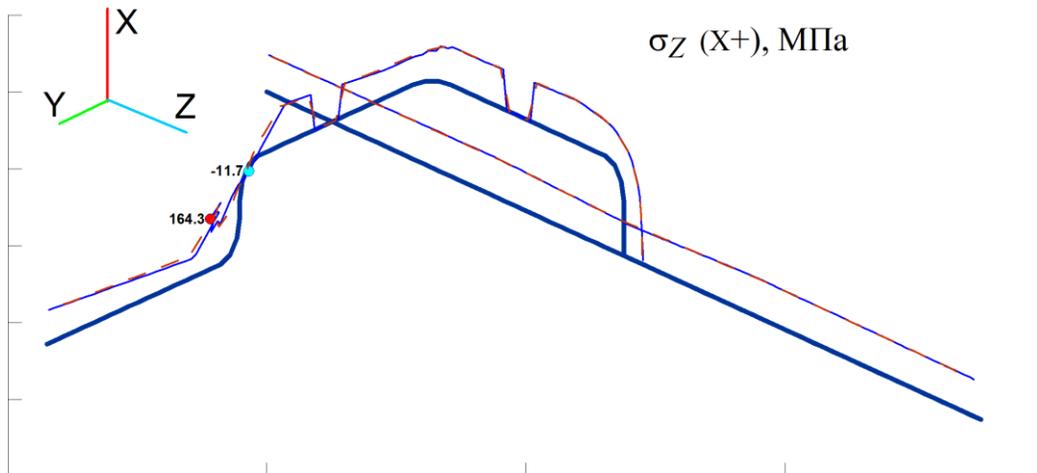
Продольная деформация на диаметре X+, %



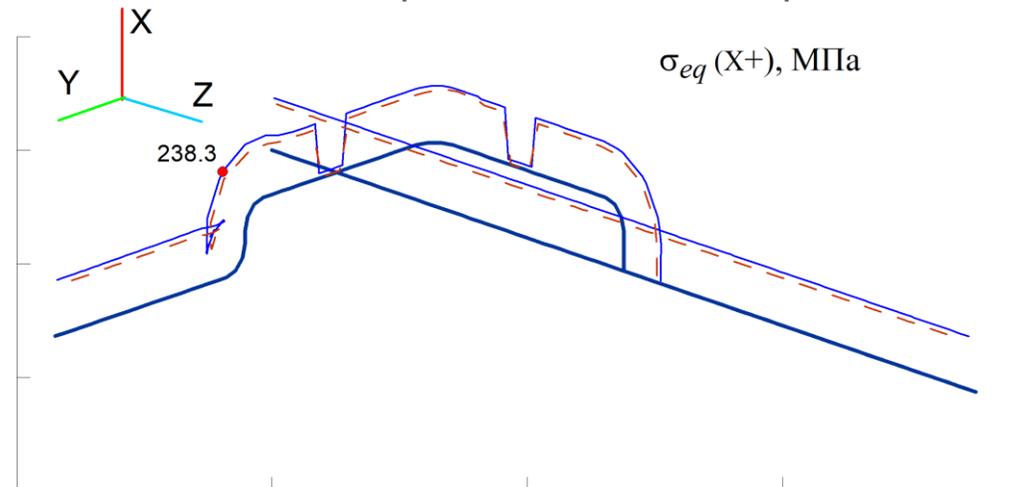
Продольные напряжения на диаметре Y+, МПа



Эквивалентные напряжения на диаметре Y+, МПа



Продольные напряжения на диаметре X+, МПа



Эквивалентные напряжения на диаметре X+, МПа

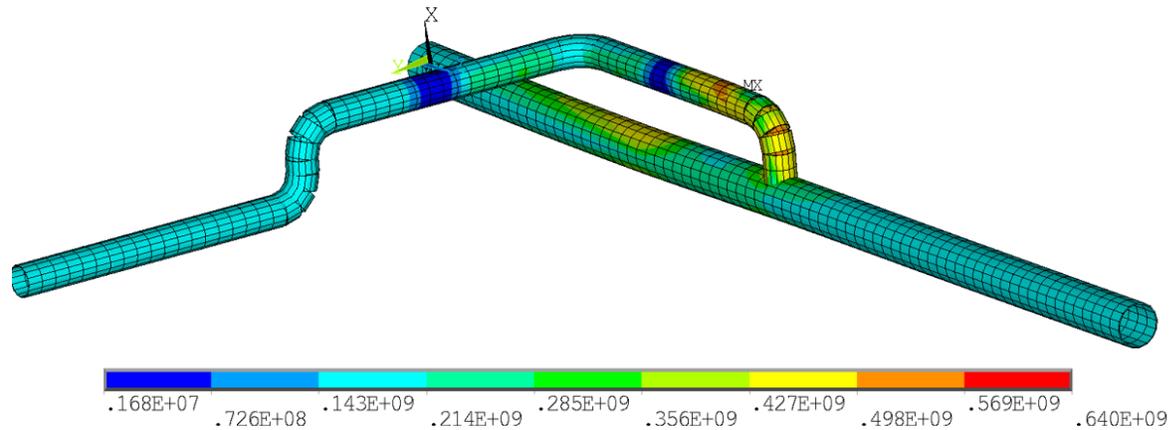
Результаты расчета, показанные на рисунках, иллюстрируют хорошее соответствие программных комплексов. Количественное сопоставление экстремальных (максимальных и минимальных) значений параметров НДС, полученных с применением ПК PIPE6 и ПК ANSYS, приведено в Таблице 5.

Таблица 5 – Количественное сопоставление экстремальных значений параметров НДС для варианта расчета с учетом жесткости кранов

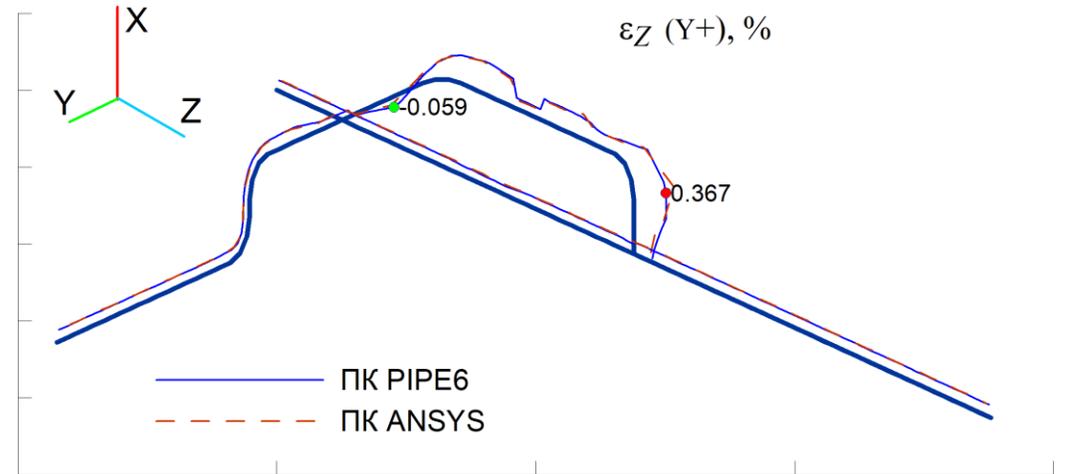
Параметр	Значение ПК PIPE6	Значение ПК ANSYS	Относительная погрешность, %
Максимальная продольная деформация, %	0.149	0.147	1,3
Максимальное продольное напряжение, МПа	273.7	260.0	5,0
Максимальное эквивалентное напряжение, МПа	263.8	251.0	4,9

Таблица 6 – Действующие нагрузки

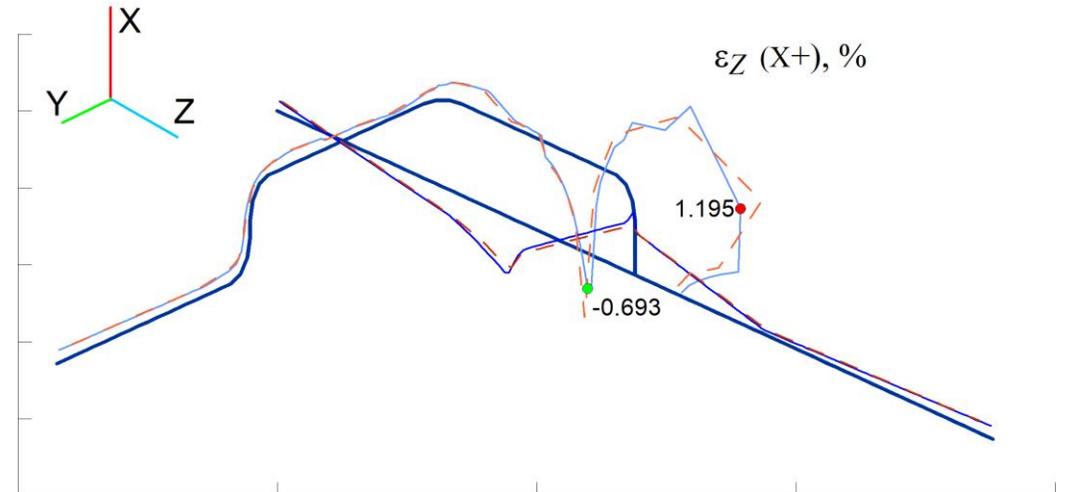
Рабочее давление, p , МПа	Температурный перепад, ΔT , °C	Заданные перемещения опор, u_x , м
9,8	40	B: -0.15 D: -0.05



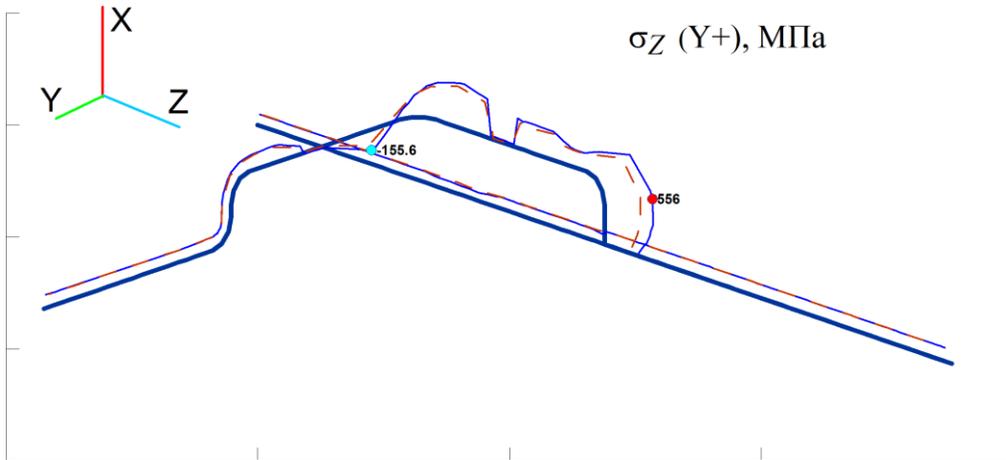
Эквивалентные напряжения по расчету на ПК ANSYS, МПа



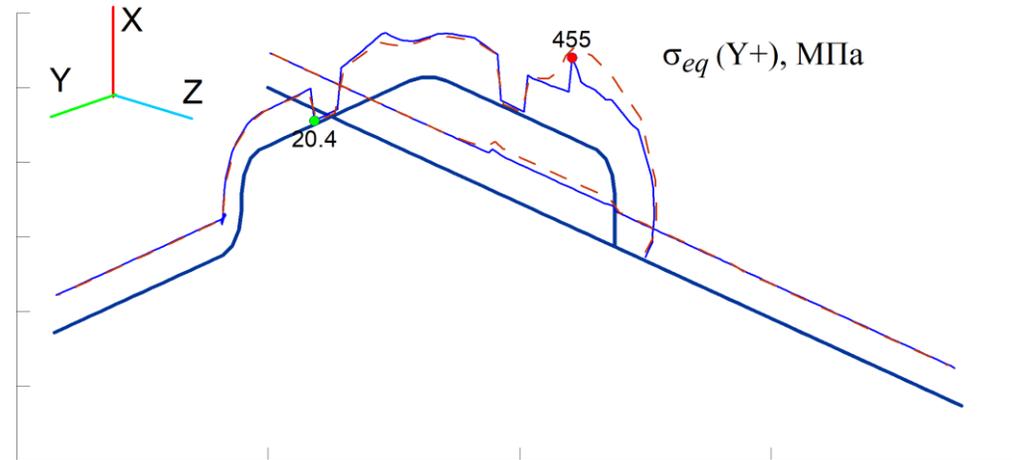
Продольная деформация на диаметре Y+, %



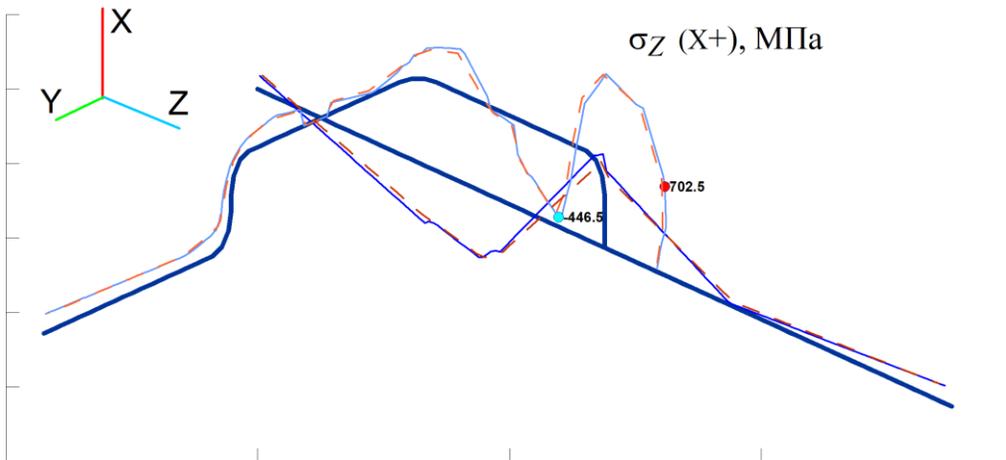
Продольная деформация на диаметре X+, %



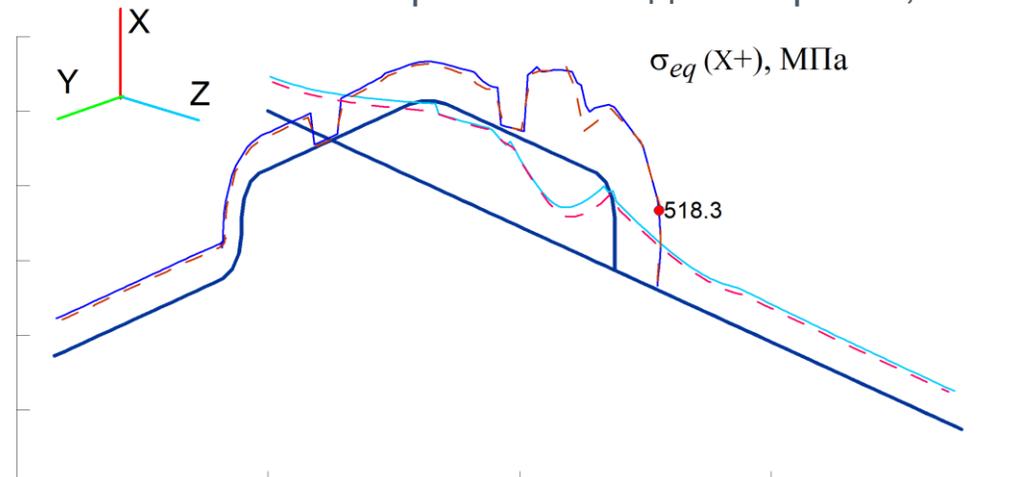
Продольные напряжения на диаметре Y+, МПа



Эквивалентные напряжения на диаметре Y+, МПа



Продольные напряжения на диаметре X+, МПа



Эквивалентные напряжения на диаметре X+, МПа

Количественное сопоставление экстремальных (максимальных и минимальных) значений параметров НДС, полученных с применением ПК PIPE6 и ПК ANSYS, приведено в Таблице

Параметр	Значение ПК PIPE6	Значение ПК ANSYS	Относительная погрешность, %
Максимальная продольная деформация, %	1.195	1.390	14
Максимальное продольное напряжение, МПа	702.5	680.0	3,1
Максимальное эквивалентное напряжение, МПа	518.3	569.0	9,0

Результаты расчета позволяют сделать вывод о приемлемом соответствии результатов расчета в обоих программных комплексах в условиях больших пластических деформаций.

- Рассмотрен опыт применения систем мониторинга газопроводов для получения данных об НДС и пространственном положении трубопроводных конструкций
- Рассмотрена структура программно-аппаратных комплексов контроля НДС, цели и задачи применения на примере КРМ «Умная труба»
- Показана структура и принципы формирования исходных данных программного комплекса расчета напряжений и деформаций
- Рассмотрены функции и алгоритмы вычислительного ядра программного комплекса
- Приведен пример расчета фрагмента обвязки КС с применением разработанного программного комплекса в сопоставлении с результатами применения ПК ANSYS
- Реализация разработанного программного комплекса в рамках интеллектуальной системы, выполняющей комплексирование данных диагностики и мониторинга газопровода, позволит:
 - оптимизировать объёмы контроля ЛЧ МГ в шурфах с учетом ограничений;
 - повысить точность планирования ремонта и диагностирования ЛЧ МГ с учетом фактического НДС труб в кольцевом и продольном направлениях

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Трифонов Олег Владимирович, д.т.н.,
начальник лаборатории научно-методического
и нормативного обеспечения проектирования газопроводов
ООО "Газпром ВНИИГАЗ"
+7(498) 657-43-00
O_Trifonov@vniigaz.gazprom.ru