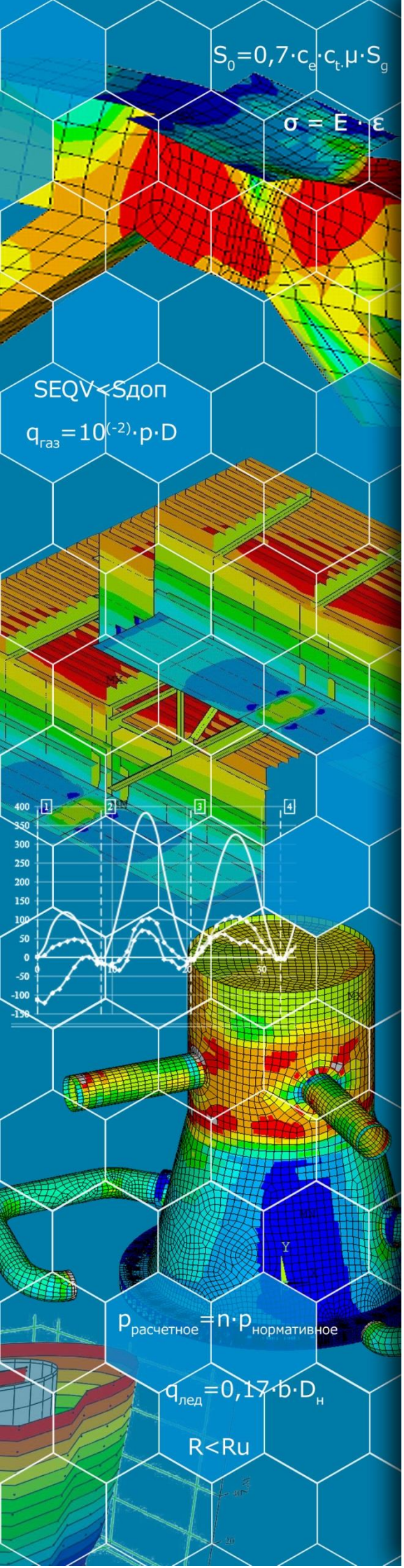


Определение изменения внутреннего давления трубы с помощью экстензометра

Оглавление

1 Список сокращения 3
2 Введение 3
3 Аналитические расчёты 5
3.1 Оценка возможности применения ЭТ 5
3.2 Пересчет показаний ЭТ в изменение рабочего давления трубы 6
4 Испытание ЭТ на стенде 7
4.1 Машинный эксперимент 7
4.2 Модель пересчета на стенде 9
4.3 Натурный эксперимент 9
4.4 Сравнение машинного и натурного эксперимента 12
5 Шарнирные опоры 12
6 Испытание ЭТ на трубе 13
6.1 Машинный эксперимент 13
6.2 Модель пересчета на трубе 15
6.3 Натурный эксперимент 17
6.4 Вывод 30
7 Список литературы 30

1 Список сокращения

ЭТ – экстензометр;
СТ– струнный тензометр;
МКЭ – метод конечных элементов;
НДС – напряженно-деформационное состояние;
КТ – контрольные точки.

2 Введение

В данной работе предложена конструкция ЭТ на основе серийно выпускаемого накладного СТ Спрут 1.01.01 (рис. 2.1).

а

б

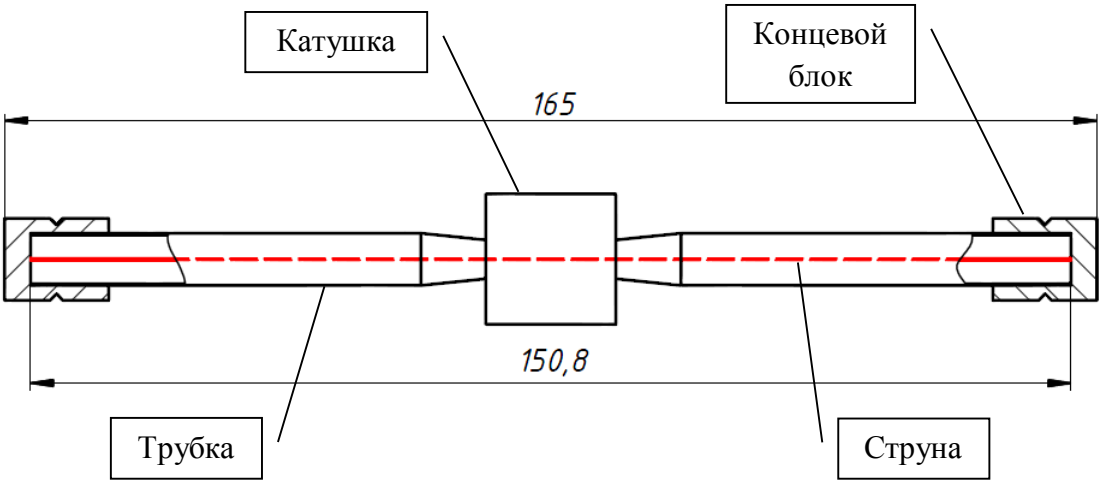


Рис.2.1 СТ:
а – фото, б - схема

В основу работы СТ положен принцип зависимости частоты колебаний струны от степени её натяжения.

Корпус СТ состоит из металлической трубки, в полость которой помещена высокопрочная стальная струна. Струна натянута между двумя концевыми блоками. Посередине корпуса СТ установлена электромагнитная катушка для возбуждения колебаний струны и считывания её частоты. К электромагнитной катушке подключен сигнальный кабель, соединяющий тензометр со считывающим устройством, по которому передаются данные со СТ.

cae-cube.ru

ЭТ состоит из СТ и установочных опор. Общая его конструкция представлена на рис. 2.2.

Концевые блоки СТ жестко закрепляются в опорах. Опоры устанавливаются (привариваются или приклеиваются) на объект контроля и предназначены для передачи нагрузок с измеряемой конструкции. При деформации конструкции, на которой установлен ЭТ, изменяется натяжение струны. Натяжение струны прямо пропорционально деформации.

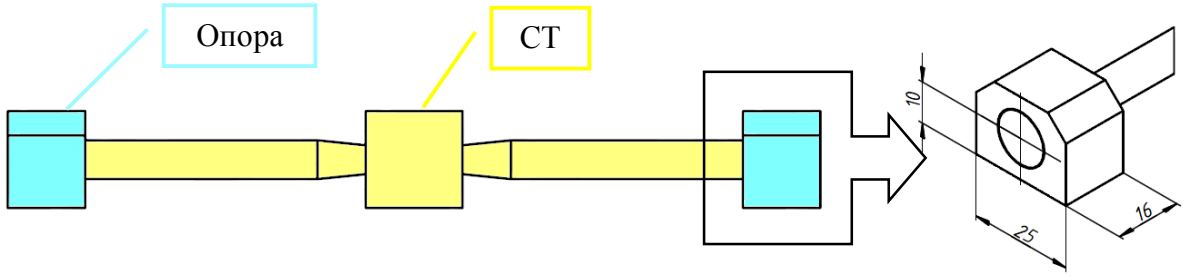


Рис.2.2 Конструкция ЭТ

Основной целью работы было исследование возможности использования ЭТ для фиксации изменения давления в трубе (рис. 2.3).

При этом необходимо чтобы ЭТ демонстрировал:

«повторяемость» – повторение показаний при растягивающих нагрузках,

«возвращаемость» – возвращение в исходное положение при снятии нагрузок.

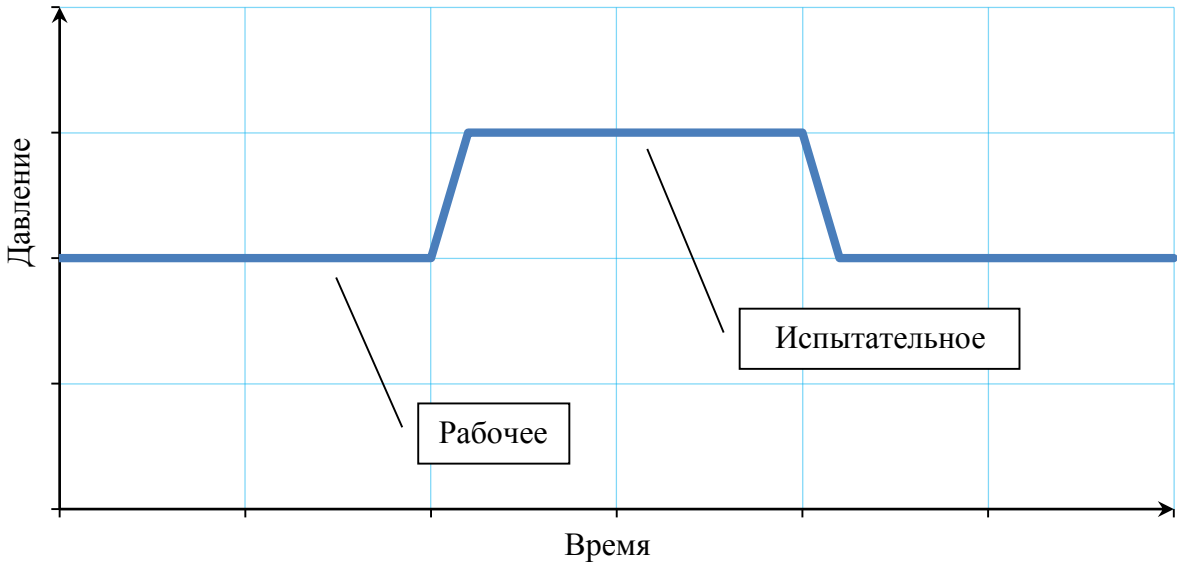


Рис.2.3 Схема изменения давления в трубе

Так как радиальные перемещения точек на поверхности трубы прямо пропорциональны изменению давления в трубе, то фиксируя с помощью ЭТ эти перемещения можно отслеживать изменение давления. Для отслеживания радиальных перемещений точек на поверхности трубы ЭТ устанавливается на трубе перпендикулярно оси трубопровода.

cae-cube.ru

3 Аналитические расчёты

3.1 Оценка возможности применения ЭТ

Оценка возможности применения ЭТ проводилась для трубы 530х8. Исследовалась возможность ЭТ отслеживать требуемые перемещения.

Радиальное перемещение точки на поверхности трубы при отсутствии осевой силы определяется по формуле[1, ф. 9.13]:

$$u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{p \cdot a^2}{b^2 - a^2} \cdot r + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{r} \cdot \frac{p}{b^2 - a^2} \text{ (1), где}$$

μ = 0,3 – коэффициент Пуассона;

E = 2,1·10^5МПа – модуль упругости;

p – изменение рабочего давления трубы;

b = 265 мм –радиус наружной поверхности трубы;

δ = 8 мм – толщина стенки трубы;

a = r – δ = 257 мм – радиус внутренней поверхности трубы;

r = b = 265 мм – радиус трубы;

D = 530 мм –внешний диаметр трубы.

По радиальным перемещениям точки на поверхности трубы определяется удлинение струны ЭТ по формуле (рис. 3.1):

$$\Delta = L \cdot \frac{u}{r+h} \text{ (2), где}$$

L = 150,8 мм – длина струны;

h = 57 мм – высота опор.

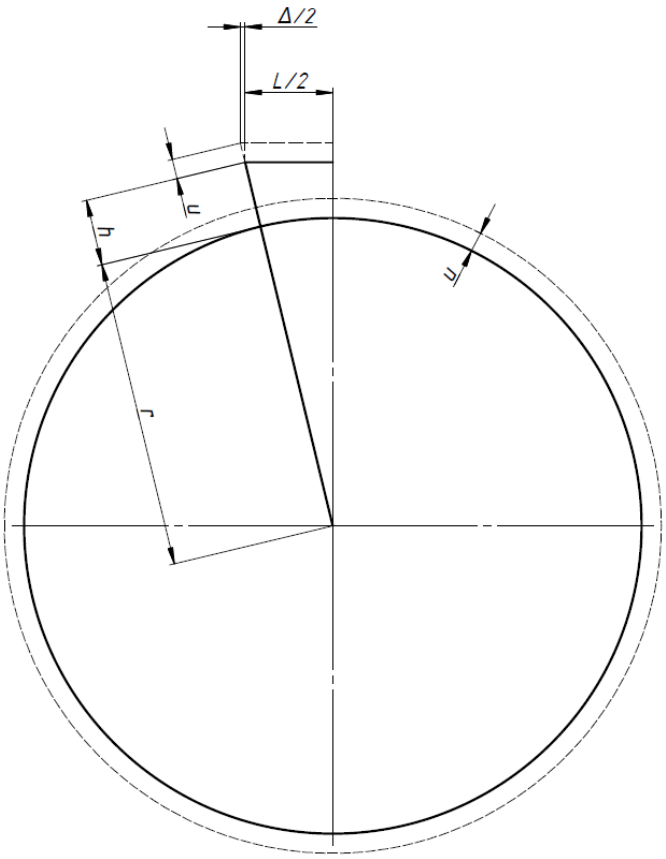


Рис.3.1 Геометрия ЭТ на трубе

cae-cube.ru

ЭТ имеет погрешность измерения удлинения струны П, которая определяется по формуле:

$$П = \frac{Т}{\Delta} \cdot 100\% \text{ (3), где}$$

Т = ±2,3 мкм – точность ЭТ [2, стр. 6].

Зависимости Δ, u, П от p представлены на рис. 3.2.

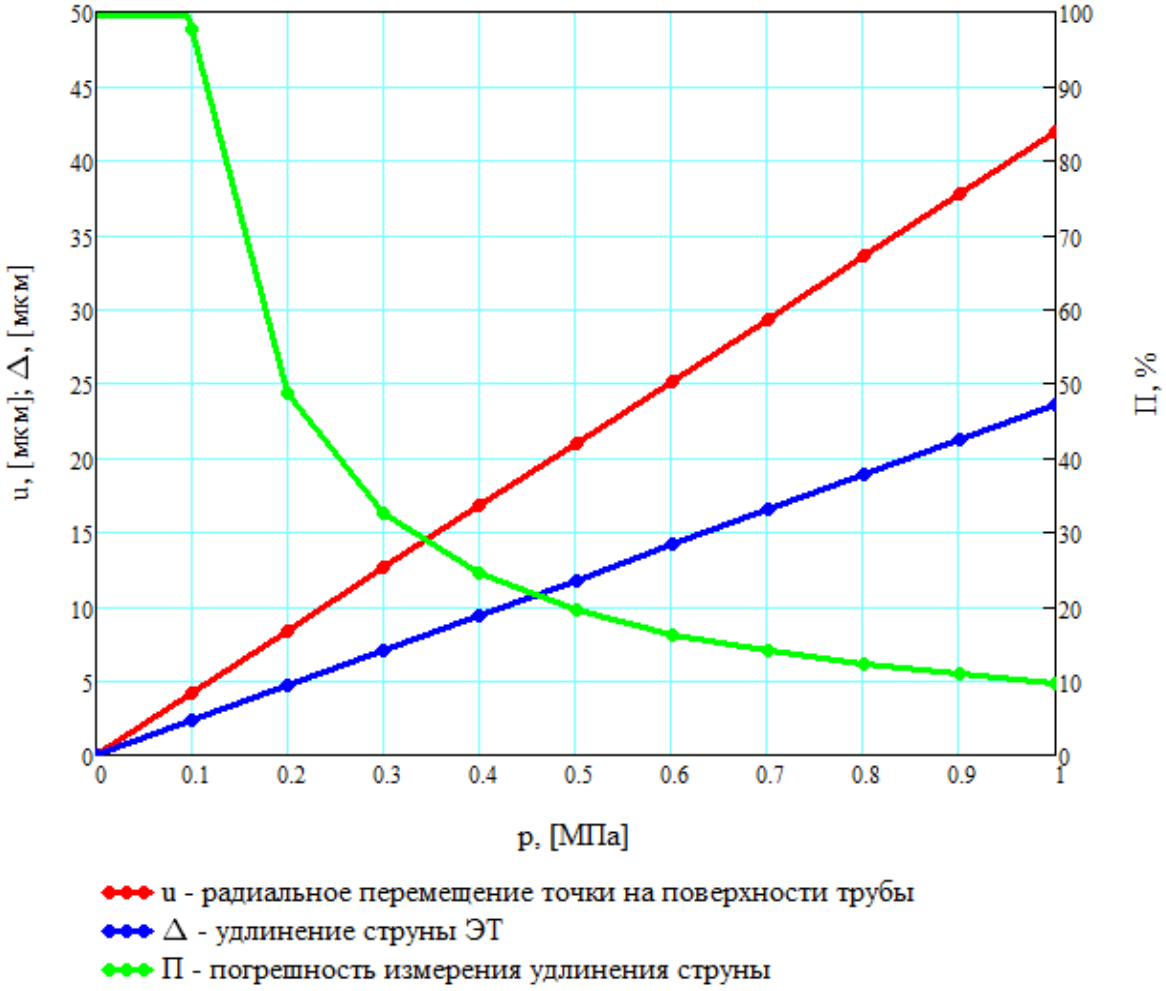


Рис.3.2 Графики зависимости Δ, u, П от p

Вывод: ЭТ может фиксировать изменение рабочего давления трубы p, однако погрешность измерения удлинения струны П сильно зависит от величины p. При p = 1 МПа (~10 атм.) П ~ 10 %.

3.2 Пересчет показаний ЭТ в изменение рабочего давления трубы

Показания ЭТ для нахождения удлинения струны Δ пересчитываются по формуле[2]:

$$\Delta = \Delta\mu\varepsilon \cdot L \text{ (4), где}$$

Δμε - относительная деформация струны (показание ЭТ).

Приравниваем и преобразовываем (2) и (4):

$$u = \Delta\mu\varepsilon \cdot (r + h) \text{ (5)}$$

Приравниваем и преобразовываем (1) и (5):

$$p = \Delta\mu\varepsilon \cdot K\text{т (6), где}$$

cae-cube.ru

$K_т$ – коэффициент пересчета показаний ЭТ Δμєв изменение давления р.

$$Kт = \frac{E\cdot(b^2-a^2)}{a^2}\cdot\frac{(r+h)}{(1-\mu)\cdot r+(1+\mu)\cdot b} \quad (7)$$

Для трубы 530х8:

$$Kт = \frac{E\cdot(b^2-a^2)}{a^2}\cdot\frac{(r+h)}{(1-\mu)\cdot r+(1+\mu)\cdot b}$$

$$= \frac{2\cdot 10^5\cdot \text{МПа}\cdot(265^2-257^2)}{257^2}\cdot\frac{(265+57)}{(1-0{,}3)\cdot 265+(1+0{,}3)\cdot 265}$$

$$= 7683\ \text{МПа}$$

Вывод: изменение давления в трубе р можно определить по показаниям ЭТ Δμε, зная r и δ.

4 Испытание ЭТ на стенде

4.1 Машинный эксперимент

Предварительно работа ЭТ была испытана на стенде (рис. 4.6).

Была создана модель стенда (рис. 4.1), после чего с помощью МКЭ было рассчитано его НДС (рис. 4.2). Расчет проводился в программном комплексе ANSYS 14.0.

Для создания НДС к модели были приложены нагрузки:

- перемещение КТ «А» и «Б» вдоль оси OX на 10 мм друг к другу (суммарное перемещение 20 мм);
- закрепление линий «Л1» и «Л2» вдоль осей OY и OZ.

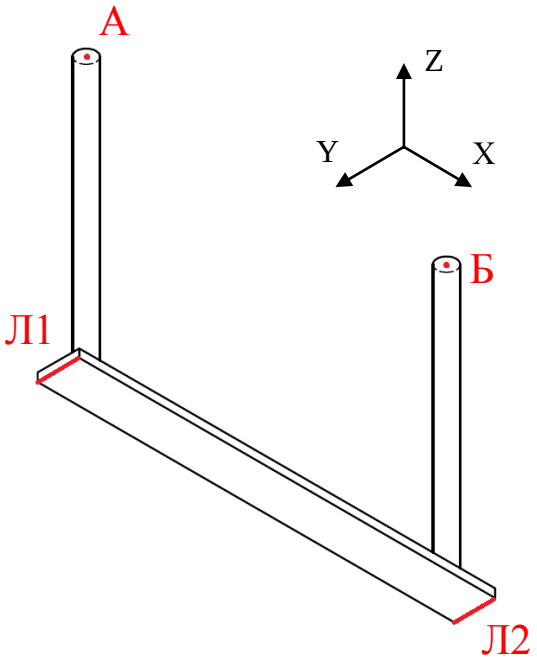


Рис.4.1 Модель стенда

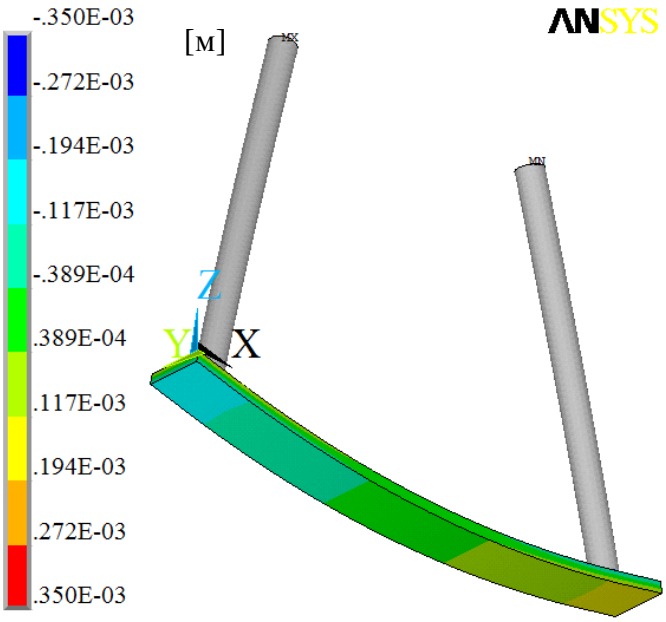


Рис.4.2 Карта распределения X-составляющей перемещения для модели стенда (масштабный коэффициент деформации = 5)

Затем, с учетом анализа конструкции ЭТ (рис. 2.2),на основе модели стенда была создана модель стенда с опорами (рис. 4.3) и рассчитано его НДС (рис. 4.4).

cae-cube.ru

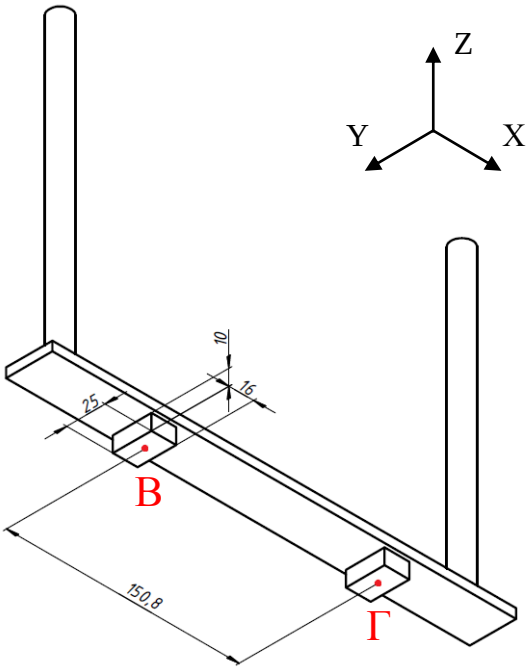


Рис.4.3 Модель стенда с опорами ЭТ

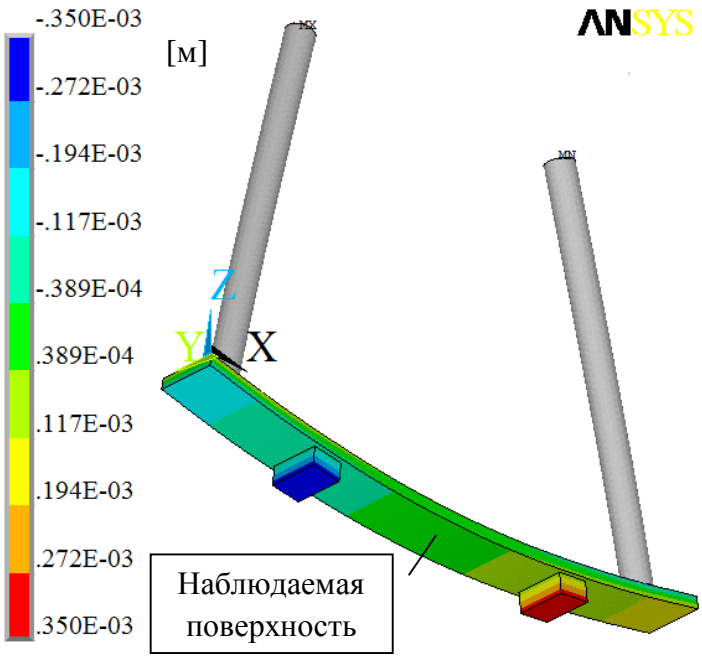


Рис.4.4 Карта распределения X-составляющей перемещения для модели стенда с опорами ЭТ (масштабный коэффициент деформации = 5)

Сравнивая карту распределения X-составляющей деформаций для модели стенда без опор и с опорами (рис. 4.2 и рис. 4.4) был сделан вывод, что опоры ЭТ никак не влияют на X-составляющую деформации, наблюдаемой поверхности балки.

Затем сравнивались удлинение струны и наблюдаемой поверхности балки. Удлинение струны Δ в модели определялось по перемещению точек «В» и «Г» вдоль оси OX. Данные точки моделируют перемещение концов струны. Удлинение наблюдаемой поверхности $\Delta_п$ в модели определялось по перемещениям точек «$В_п$» и «$Г_п$» (проекций точек «В» и «Г» на наблюдаемую поверхность балки) вдоль оси OX.

Сравнение зависимостей удлинения струны ЭТ Δ и удлинения наблюдаемой поверхности $\Delta_п$ от перемещения КТ представлено на графике (рис. 4.5).

cae-cube.ru

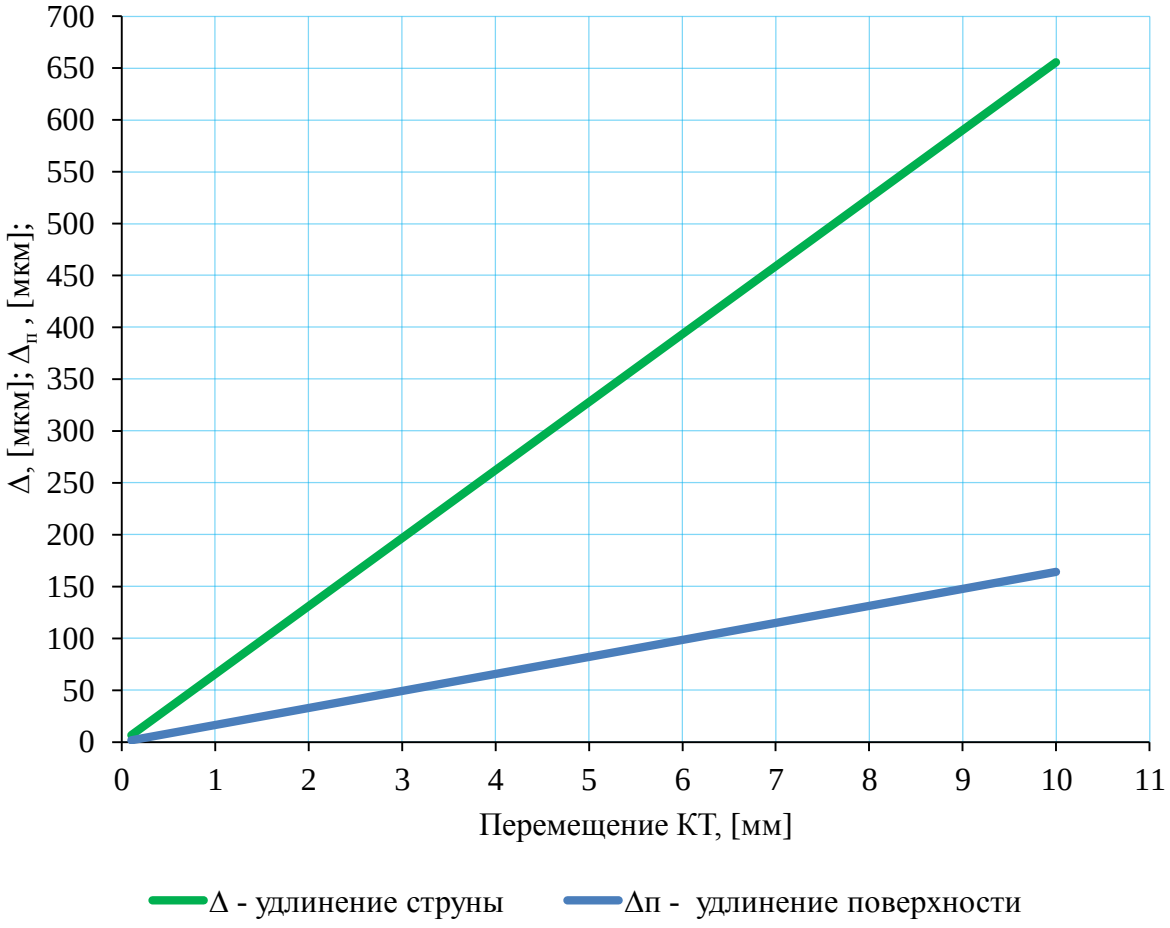


Рис.4.5 График зависимости удлинения струныΔ и удлинения поверхности $\Delta_п$от перемещения КТ (машинный эксперимент)

4.2 Модель пересчета на стенде

В сводной таблице (табл. 4.1) устанавливается коэффициент пересчёта K между удлинением струны Δ и удлинением поверхности $\Delta_п$.

Таблица 4.1

Перемещение КТ [мм]	Δ, [мкм]	$\Delta_п$, [мкм]	$K=\Delta/\Delta_п$
2	133	33	4
4	266	66	
6	400	100	
8	532	132	
10	665	166	

Вывод: при установке ЭТ на балке удлинение струны Δ в 4 раза больше удлинения поверхности балки, на которой установлен ЭТ.

4.3 Натурный эксперимент

Натурный эксперимент проводился на стенде (рис. 4.6).Стенд состоит из следующих компонентов:

cae-cube.ru

- нагружаемый объект – балка;
- два стержня, прикрепленных к балке болтами и передающие усилие на балку;
- нагружающее устройство – талреп.

С помощью талрепа прикладывались перемещения к КТ, создавая напряжения в балке. По перемещению кольца талрепа по резьбе определялись перемещения КТ.

Для определения деформаций в балке на неё был приклеен ЭТ (рис. 4.7).

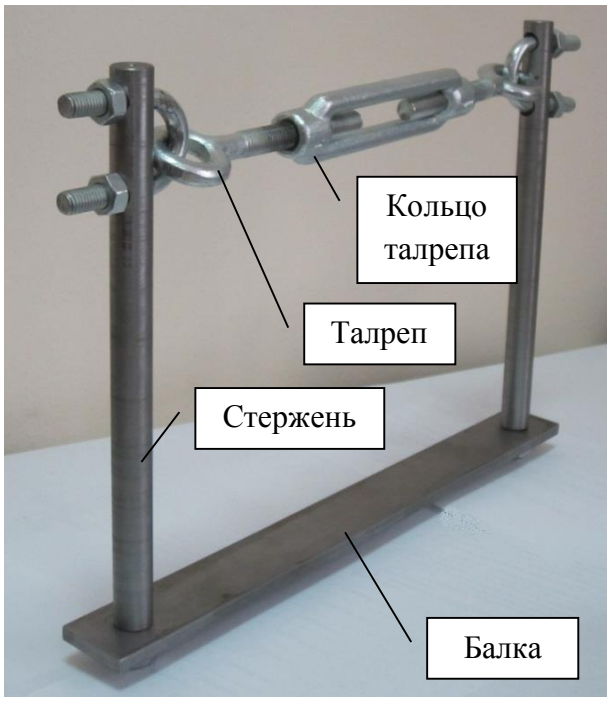


Рис.4.6 Фото стенда

Рис.4.7 Фото стенда с ЭТ

Показания ЭТ для нахождения удлинения струны Δ пересчитывались по формуле(4):

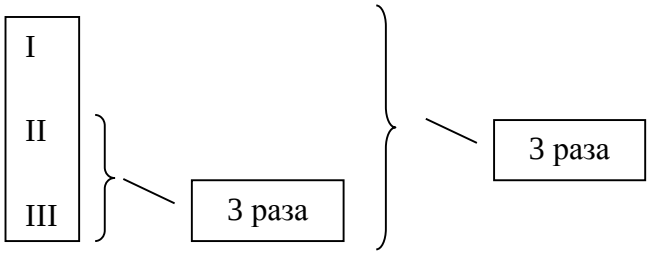
$$\Delta = \Delta\mu\varepsilon \cdot L$$

Эксперимент состоял из следующих этапов:

I. Приклеивание ЭТ на балку стенда;
II. Приложение пошагового перемещения (шаг = 0,75 мм) КТ в направлении – друг к другу (0-6 мм*) и фиксация показаний ЭТ при каждом шаге;
III. Возвращение пошагово КТ в исходное положение и фиксация показаний ЭТ при каждом шаге

**** при перемещении КТ> 6 мм происходило отклеивание опор датчика, вследствие изгиба балки.***

Эксперимент был проведен в следующей последовательности:



Погрешность показаний $П_п$ определяется по формуле:

$$Пп = 1 - \frac{\Delta\mu\varepsilon min}{\Delta\mu\varepsilon max} \text{ (8), где}$$

cae-cube.ru

$\Delta\mu\varepsilon_{min}$ – минимальное показание ЭТ при i-шаге;
$\Delta\mu\varepsilon_{max}$ – максимальное показание ЭТ при i-шаге.

$П_п$ не превышала 10% при 1-м шаге и 2% при 8-м шаге.

По результатам эксперимента был построен график зависимости удлинения струны Δ от перемещения КТ (рис. 4.8).

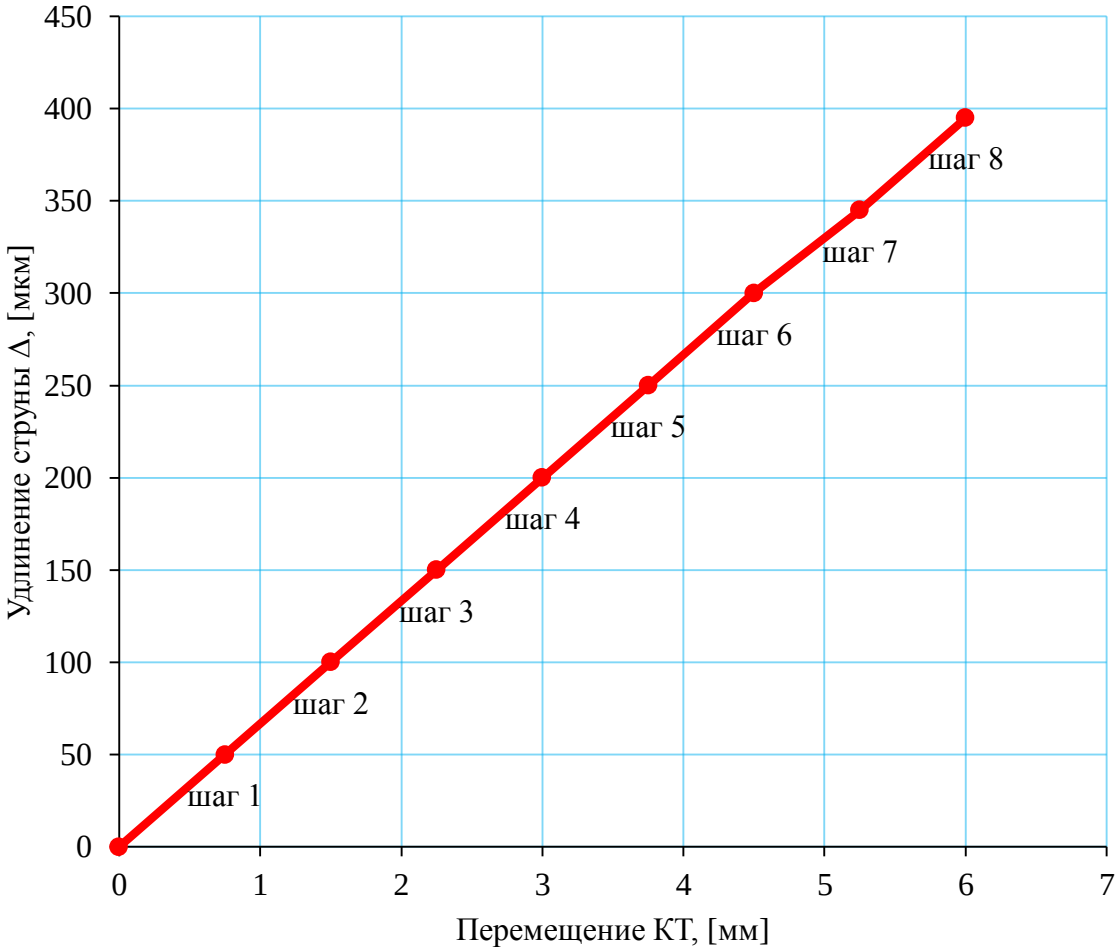


Рис.4.8 График зависимости удлинения струны Δ от перемещения КТ (натурный эксперимент)

Вывод: ЭТ показал высокую «повторяемость» и «возвращаемость» результатов.

cae-cube.ru

4.4 Сравнение машинного и натурного эксперимента

Результаты натурного и машинного эксперимента при перемещении КТ от 0 до 6 мм совпадают (рис. 4.9).

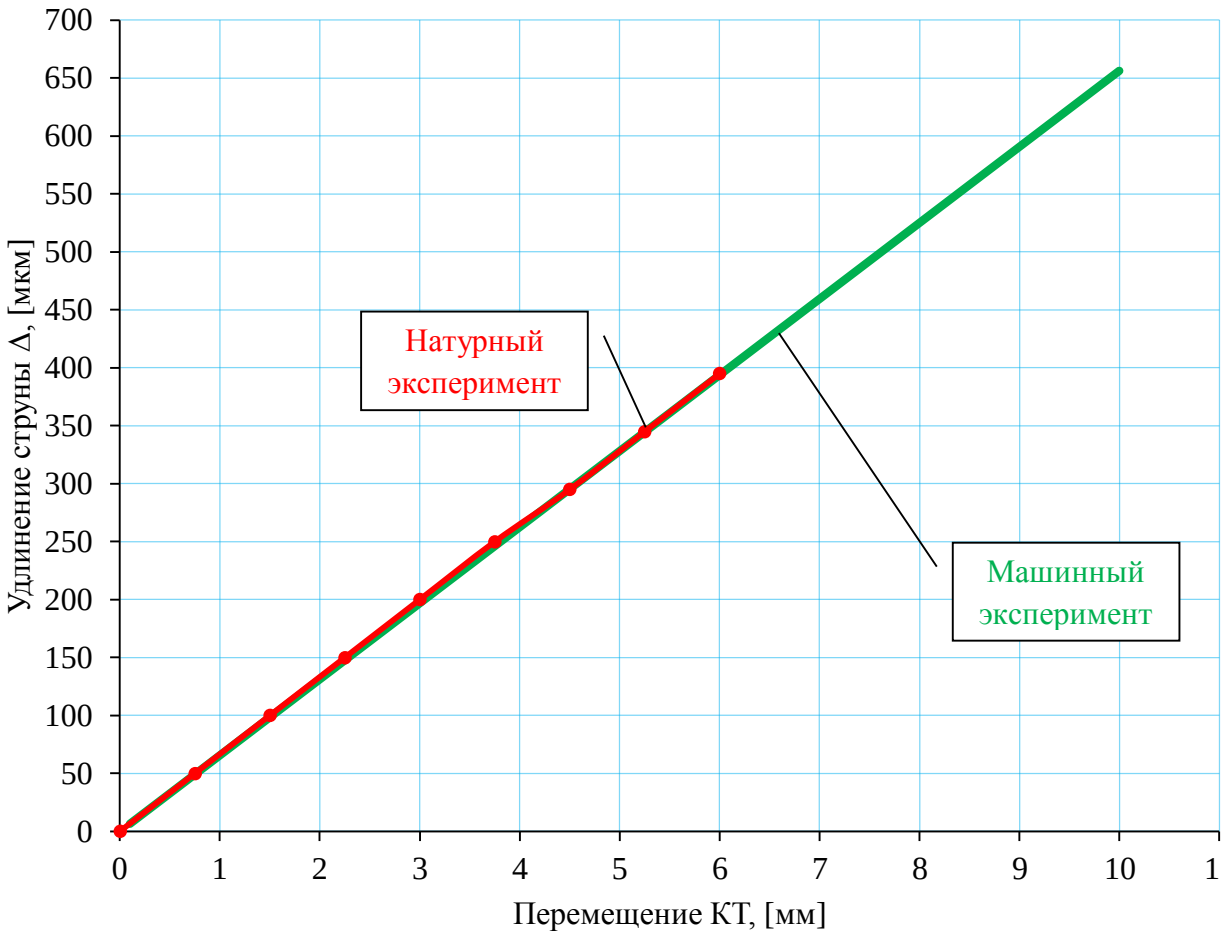


Рис.4.9 Наложение графиков натурного и машинного эксперимента

5 Шарнирные опоры

Так как ЭТ планируется применять на трубах различной номенклатуры диаметров и толщин, то необходимо универсальное крепление СТ на стенку трубы. Предлагается установить СТ на шарнирные опоры. Общая конструкция шарнирных опор представлена на рис. 5.1.

cae-cube.ru

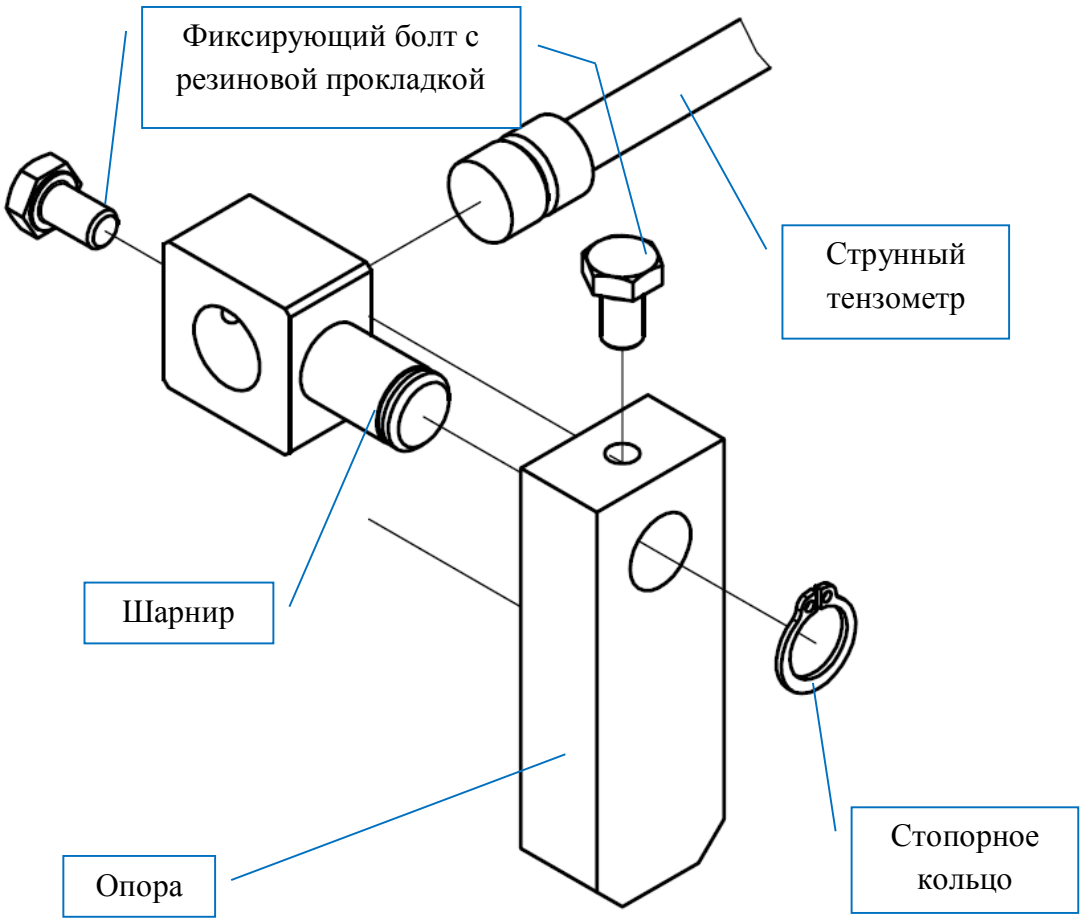


Рис.5.1 Схема шарнирных опор

6 Испытание ЭТ на трубе

6.1 Машинный эксперимент

Эксперимент проводился на стенде ЗАО "ДИГАЗ". Стенд НДС представляет собой участок трубопровода длиной 11,5 м, диаметром 530 мм и толщиной стенки 8 мм, изготовленный из стали 17Г1С. Трубопровод заполнен машинным маслом. На стенде НДС реализовано шарнирное закрепление по концам трубы. Давление в трубопроводе создается с помощью нагнетания машинного масла в трубу.

Для моделирования работы ЭТ на трубе была построена расчетная модель (рис. 6.1), затем с помощью МКЭ было рассчитано её НДС (рис. 6.2).

К модели были приложены нагрузки:

- закрепление линии «Л»;
- давление к внутренней поверхности трубы.

В точках «В» и «Г», моделирующих концы струны, определялись перемещения вдоль оси X.

cae-cube.ru

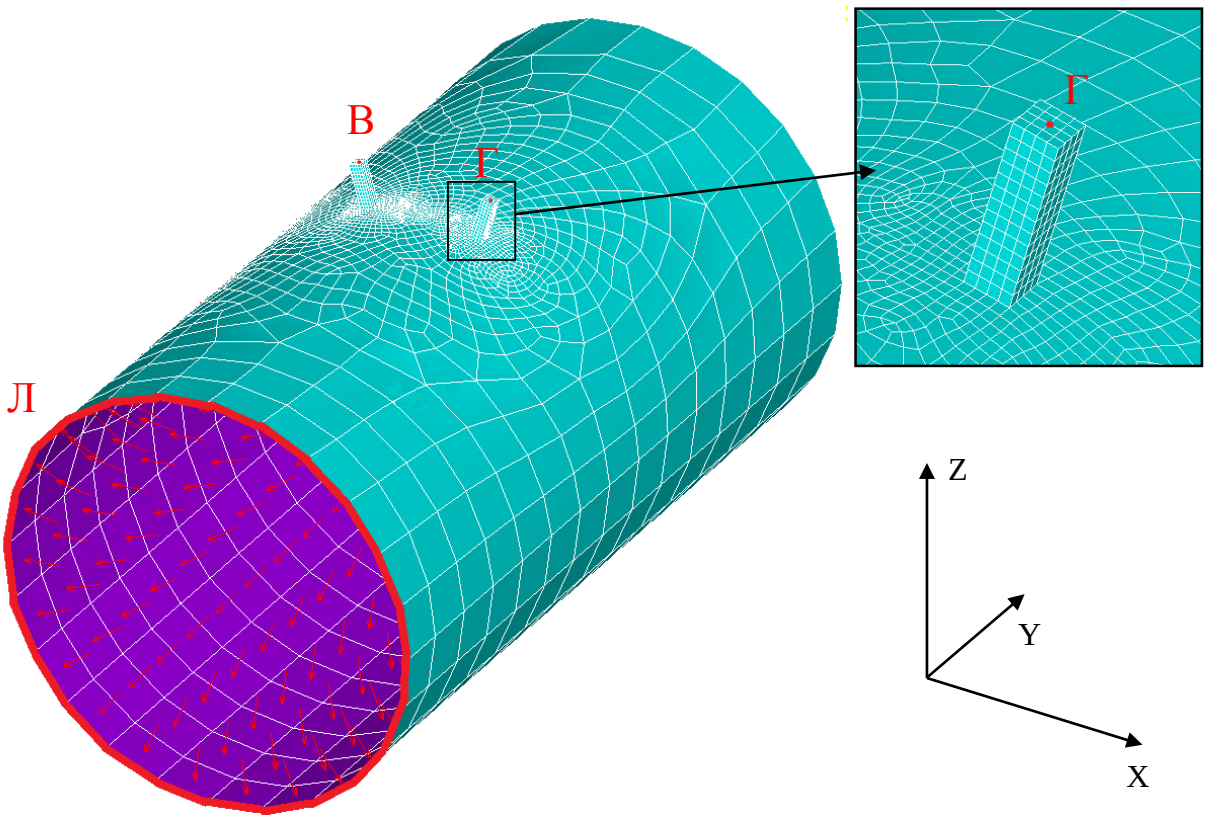
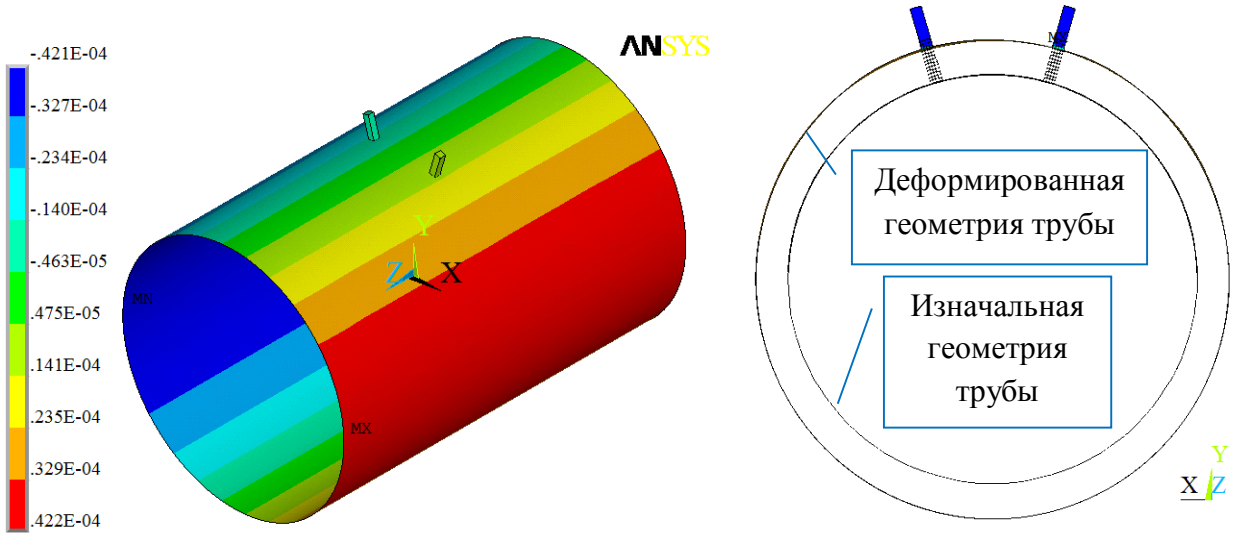


Рис.6.1 Модель ЭТ на трубе



а б

Рис.6.2 Карта распределения X-составляющей перемещения
(масштабный коэффициент деформации = 1000):
а – изометрический вид, б – фронтальный вид

cae-cube.ru

По результатам расчета был получен график зависимости удлинения струны Δот изменения внутреннего давления в трубе p(рис. 6.3).

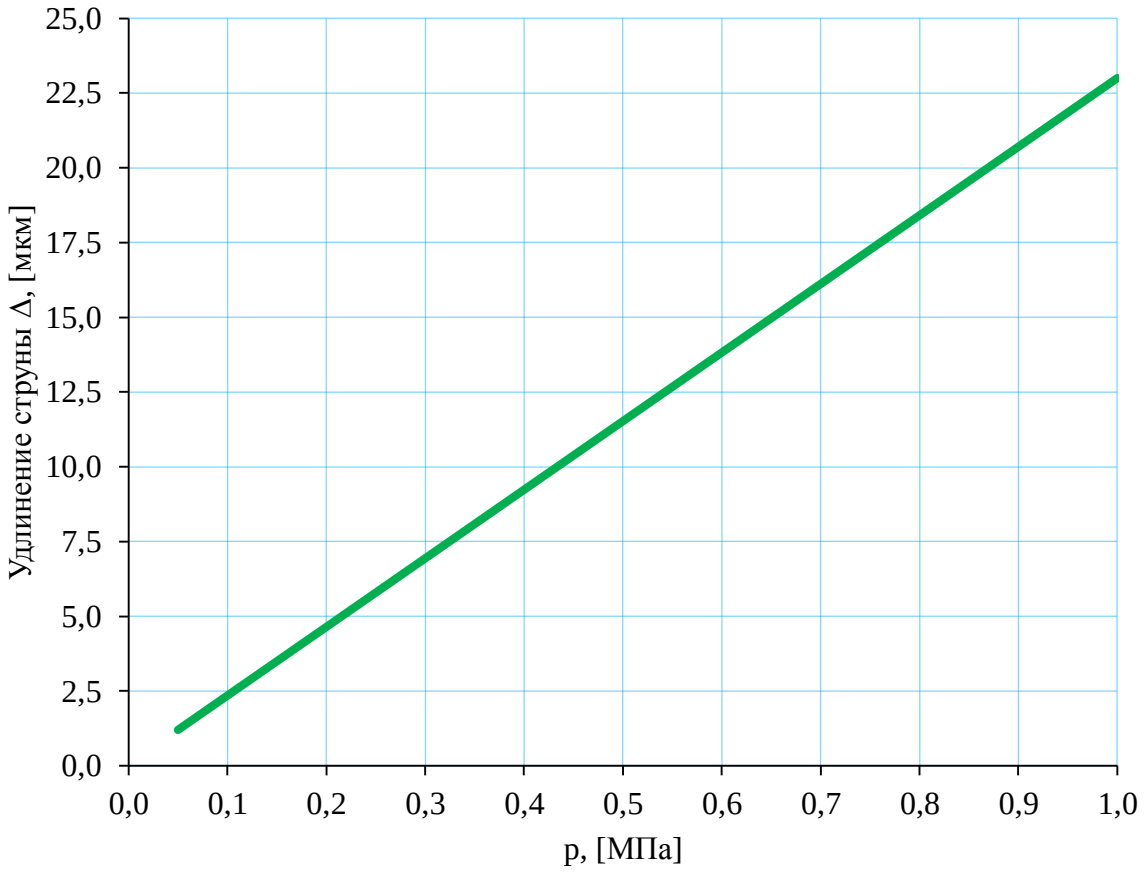


Рис.6.3 График зависимости удлинения струны Δ
от изменения внутреннего давления в трубе p
(машинный эксперимент)

Графики, полученные машинным экспериментом (рис. 6.3) и аналитическим расчетом (рис. 3.2) полностью совпадают.

6.2 Модель пересчета на трубе

В сводной таблице 6.1 устанавливается коэффициент пересчёта $K_т$ показаний ЭТΔμε для определения изменения внутреннего давления p.

Таблица 6.1

p, [МПа]	Δ, [мкм]	Δμε = Δ/L, [10^{-6}]	$K_т$= p/Δμε, [МПа]
0,2	4,6	31	~ 6500
0,4	9,2	61	
0,6	13,8	92	
0,8	18,4	122	
1,0	23	153	

cae-cube.ru

Коэффициент пересчёта $K_т$, полученный машинным (п. 6.2) и аналитическим расчетом (п. 3) совпадают (разница < 18%).

Вывод: изменение рабочего давления трубы p можно определять, пересчитывая показания ЭТ по формуле (6):

$$p = \Delta\mu\varepsilon \cdot K\text{т}, \text{ где}$$

$$K\text{т} = \frac{E \cdot (b^2 - a^2)}{a^2} \cdot \frac{(r + h)}{(1 - \mu) \cdot r + (1 + \mu) \cdot b}$$

Погрешность определения p при этом рассчитывается по формуле (3):

$$\Pi = \frac{\text{т}}{\Delta} \cdot 100\%, \text{ где}$$

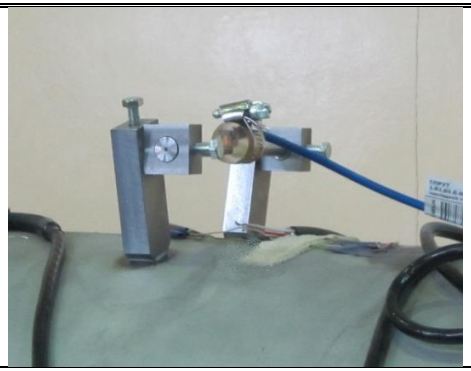
$\Delta = \Delta\mu\varepsilon \cdot L$

6.3 Натурный эксперимент

Было проведено 5 экспериментов (табл. 6.2). В зависимости от места установки ЭТ на трубе и изменения давления р (показания манометра) фиксировались показания ЭТ и тензометра.

Тензометр приклеен к нижней образующей трубы.

Таблица 6.2

№ эксперимента	Место установки ЭТ на трубе	Фото ЭТ на трубе	№ приклеивания	Диапазон нагрузки, [МПа]	Шаг нагрузки, [МПа]	Примечание
1	верхняя образующая		1	0-5-0	0,25	-
2				0-2,5		повторный эксперимент при малых давлениях
3			2	2,3-5-0		эксперимент на предварительно нагруженной трубе

cae-cube.ru

№ эксперимента	Место установки ЭТ на трубе	Фото ЭТ на трубе	№ приклеивания	Диапазон нагрузки, [МПа]	Шаг нагрузки, [МПа]	Примечание
4	боковая образующая		3	0-5-0	0,5	-
5	нижняя образующая		4	0-5-0	0,5	-

Ниже представлены результаты экспериментов в табличной и графической форме, где

t – время измерения в условных единицах (у.е.), у.е. ~ 4-5минуты;

$\Delta\mu\varepsilon_{в}$– показания ЭТ при повышении давления;

$\Delta\mu\varepsilon_{н}$– показания ЭТ при понижении давления;

$Т_в$ – показания тензометра при повышении давления;
$Т_н$ – показания тензометра при понижении давления;
$П_в$– погрешность измерения при повышении давления; $П_в = |100\% – Д_в|$;
$П_н$– погрешность измерения при понижении давления; $П_н = |100\% – Д_н|$;
$Д_{эт}$ – процентное соотношение измеренного и расчетного приращения показания ЭТ за шаг;
$Д_{эт} = (|\Delta\mu\varepsilon_t – \Delta\mu\varepsilon_{t-1}|/\Delta\mu\varepsilon_{расч})\ 100\%$;
$\Delta\mu\varepsilon_{расч}$ – расчетное приращение показаний ЭТ (рассчитывается по ф. 6);
$\Delta\mu\varepsilon_{расч} = 32{,}5\cdot10^{-6}$ при р = 0,25МПа и $\Delta\mu\varepsilon_{расч} = 65\cdot10^{-6}$ при р = 0,5МПа.
$Д_т$ – процентное соотношение измеренного и среднеарифметического приращения показания тензометра за шаг;
$Д_т = (|T_t – T_{t-1}|/T_{ср.ариф})\ 100\%$;
Д – процентное соотношение $Д_{эт}$ и $Д_т$ за шаг;
$Д = (Д_{эт}/Д_т)\ 100\%$;

cae-cube.ru

Эксперимент №1

При ЭТ, наклеенном на верхнюю образующую трубы, проводилось нагружение от 0,0-5,0-0,0 МПа с шагом 0,25 МПа.

Таблица 6.3 Результаты эксперимента №1

P, [МПа]	Пошаговое повышение давления					Пошаговое понижение давления				
	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_в$, [10^{-6}]	$Д_{эт_в}$	$T_в$, [мкВ]	Д	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_н$, [10^{-6}]	$Д_{эт_н}$	$T_н$, [мкВ]	Д
0	1	0	-	7310		41	-20	-	7330	
0,25	2	-*	-	-*		40	-44	-	7391	
0,5	3	-50	-	7596		39	-52	-	7513	
0,75	4	-*	-	-*		38	-51	-	7637	
1,0	5	-52	-	7742		37	-47	-	7747	
1,25	6	-*	-	-*		36	-38	-	7848	
1,5	7	-30	-	7972		35	-20	-	7970	
1,75	8	-8	67.69%	8090	59.71%	34	1	89.23%	8086	73.34%
2,0	9	18	80.00%	8218	65.05%	33	30	83.08%	8213	77.43%
2,25	10	46	86.15%	8327	82.26%	32	57	76.92%	8325	89.22%
2,5	11	78	98.46%	8442	89.11%	31	82	104.62%	8415	94.96%
2,75	12	107	89.23%	8535	99.86%	30	116	92.31%	8530	96.36%
3,0	13	146	120.00%	8664	96.82%	29	146	116.92%	8630	103.43%
3,25	14	177	95.38%	8750	115.43%	28	184	86.15%	8748	109.67%
3,5	15	212	107.69%	8860	101.89%	27	212	101.54%	8830	99.99%
3,75	16	236	73.85%	8931	108.25%	26	245	116.92%	8936	117.36%
4,0	17	20	135.38%	9052	116.45%	25	283	123.08%	9040	107.06%
4,25	18	311	95.38%	9140	112.81%	24	323	98.46%	9160	118.14%
4,5	19	345	104.62%	9240	108.88%	23	355	126.15%	9247	121.93%
4,75	20	380	107.69%	9330	124.54%	22	396	80.00%	9355	94.90%
5,0	21	422	129.23%	9443	119.03%					

*замеры не фиксировались

cae-cube.ru

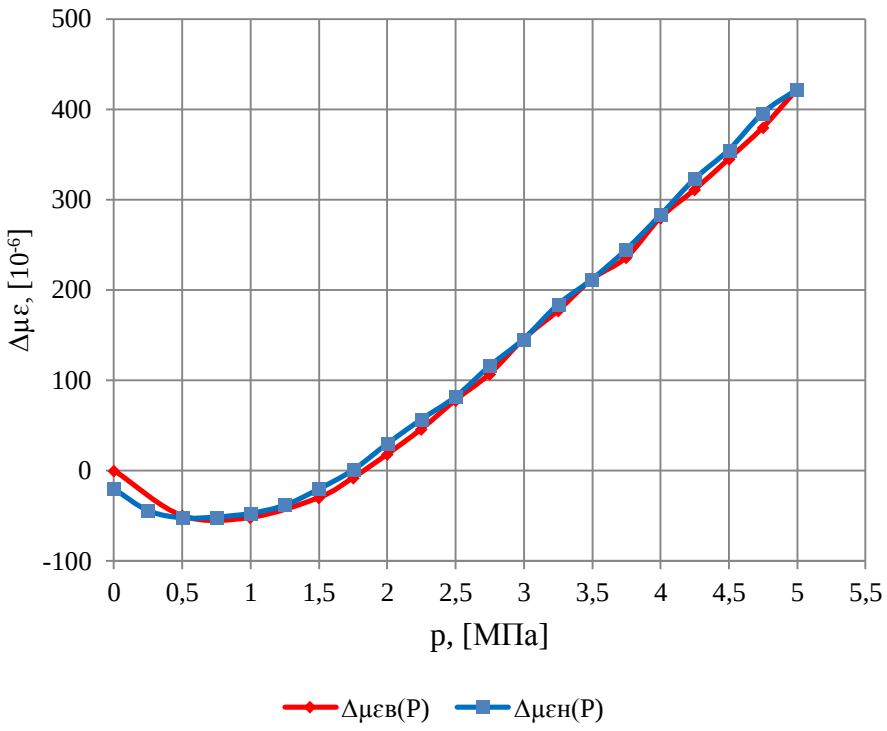


Рис.6.4 Показания ЭТ эксперимента №1

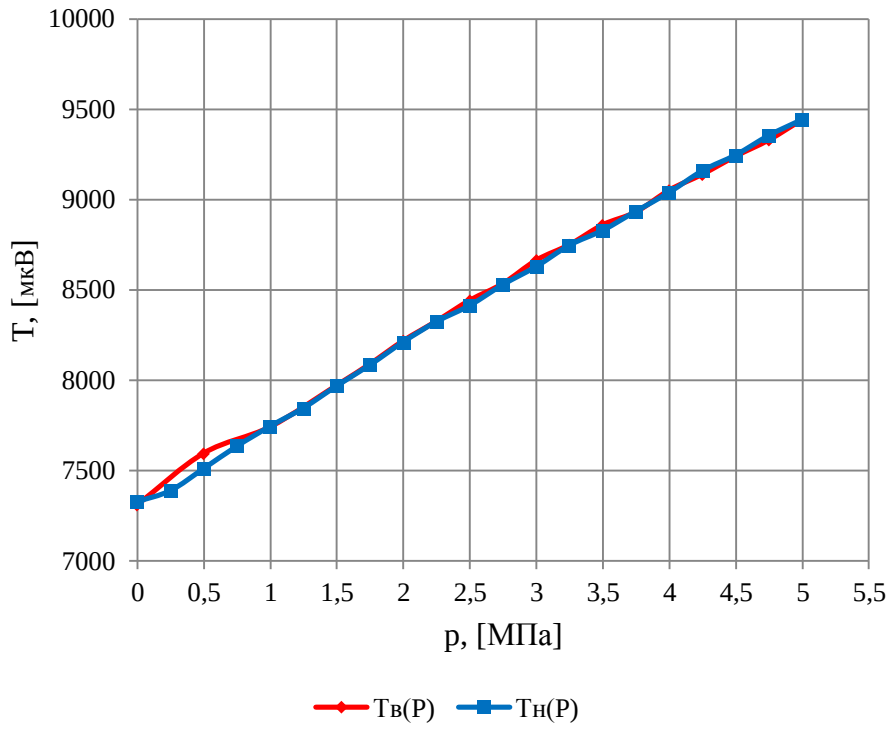


Рис.6.5 Показания тензометра эксперимента №1

Среднеарифметическое $Д_{эт}$ при нагрузке 2,0-5,0 и 5,0-2,0 МПа равно 102% и 103% соответственно. Следовательно, погрешность измерения ЭТ равна 2 - 3%. Среднеарифметическое Д при нагрузке 2,0-5,0-2,0 МПа равно 103%. По показаниям ЭТ при нагрузке 0,0-2,0 и 2,0-0,0 МПа нельзя определить изменение рабочего давления трубы р.

Плохие показания ЭТ при нагрузке 0-2,0 и 2,0-0 МПа могли быть связаны:

- неравномерность расширения трубы при малом изменении давления р из-за неустраненных люфтов в опорах закрепления трубы;
- приработка ЭТ;
- влиянием веса рабочего продукта (масла) в трубе.

cae-cube.ru

Эксперимент №2

При ЭТ, наклеенном на верхнюю образующую трубы, проводилось повторное нагружение от 0,0 – 2,5 МПа с шагом 0,25 МПа.

Таблица 6.4 Результаты эксперимента №2

P, [МПа]	Пошаговое повышение давления				Пошаговое понижение давления		
	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_в$, [10^{-6}]	Д	$T_в$	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_н$, [10^{-6}]	$T_н$
0	1	-17	-	7330	-	-	-
0,25	2	-23	-	7382	-	-	-
0,5	3	-40	-	7500	-	-	-
0,75	4	-47	-	7647	-	-	-
1,0	5	-47	-	7762	-	-	-
1,25	6	-39	-	7877	-	-	-
1,5	7	-24	-	7986	-	-	-
1,75	8	-6	-	8093	-	-	-
2,0	9	19	76.92%	8205	-	-	-
2,25	10	48	89.23%	8321	-	-	-
2,5	11	75	83.08%	8413	-	-	-

cae-cube.ru

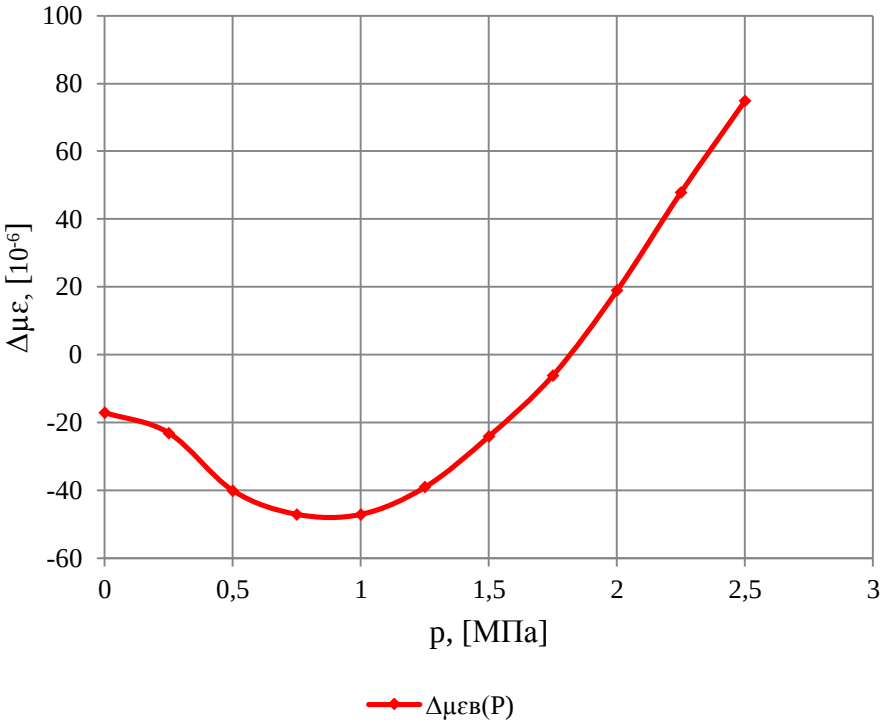


Рис.6.6 Показания ЭТ эксперимента №2

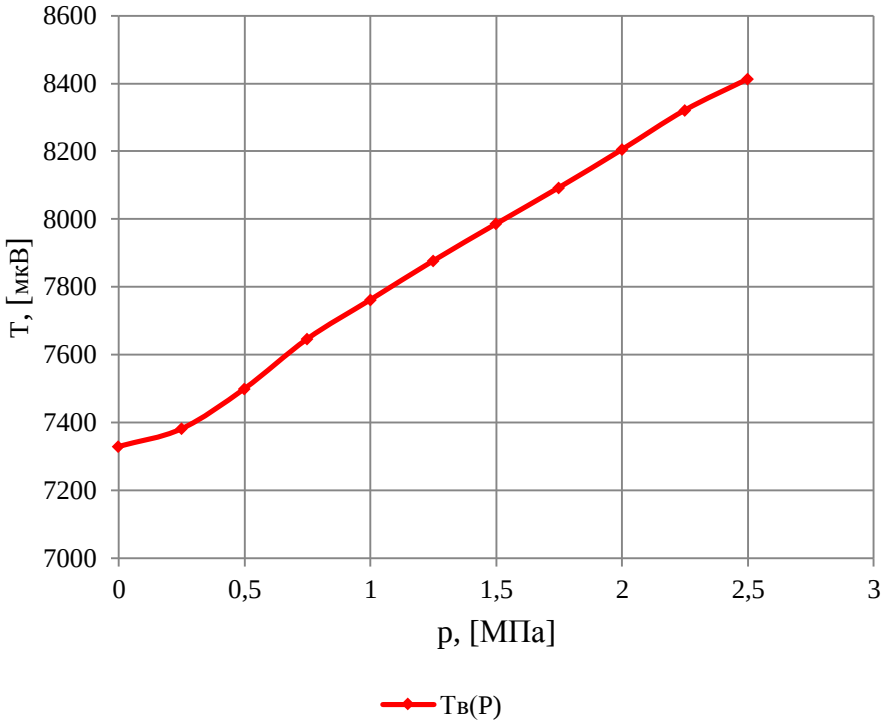


Рис.6.7 Показания тензометра эксперимента №2

При повторном эксперименте при малых давлениях (0,0 - 2,0 МПа) показания ЭТ также были неудовлетворительные.

cae-cube.ru

Эксперимент №3

При ЭТ, наклеенном на верхнюю образующую трубы, проводилось нагружение предварительно нагруженной трубы от 2,3-5,0-0,0 МПа с шагом 0,25 МПа.

Таблица 6.5 Результаты эксперимента №3

P, [МПа]	Пошаговое повышение давления					Пошаговое понижение давления				
	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_в$, [10^{-6}]	$Д_{эт_в}$	$T_в$, [мкВ]	Д	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_н$, [10^{-6}]	$Д_{эт_н}$	$T_н$, [мкВ]	Д
0	1	-	-	-		41	-84	-	7420	
0,25	2	-	-	-		40	-94	-	7480	
0,5	3	-	-	-		39	-105	-	7590	
0,75	4	-	-	-		38	-108	-	7700	
1,0	5	-	-	-		37	-103	-	7820	
1,25	6	-	-	-		36	-94	-	7923	
1,5	7	-	-	-		35	-75	-	8040	
1,75	8	-	-	-		34	-56	76.92%	8140	63.46%
2,0	9	-	-	-		33	-31	86.15%	8260	82.81%
2,25	10	0	-	8335		32	-3	86.15%	8363	87.93%
2,5	11	22	67.69%	8420	81.87%	31	25	89.23%	8460	92.99%
2,75	12	56	104.62%	8533	95.17%	30	54	101.54%	8555	95.74%
3,0	13	89	101.54%	8638	99.41%	29	87	104.62%	8660	115.08%
3,25	14	118	89.23%	8730	99.71%	28	121	98.46%	8750	104.81%
3,5	15	152	104.62%	8835	102.42%	27	153	98.46%	8843	104.81%
3,75	16	181	89.23%	8931	95.55%	26	185	126.15%	8936	109.55%
4,0	17	219	116.92%	9030	121.41%	25	226	110.77%	9050	102.49%
4,25	18	255	110.77%	9138	105.44%	24	262	98.46%	9157	110.77%
4,5	19	290	107.69%	9240	108.54%	23	294	126.15%	9245	108.60%
4,75	20	326	110.77%	9335	119.86%	22	335	92.31%	9360	103.85%
5,0	21	365	120.00%	9448	109.17%					

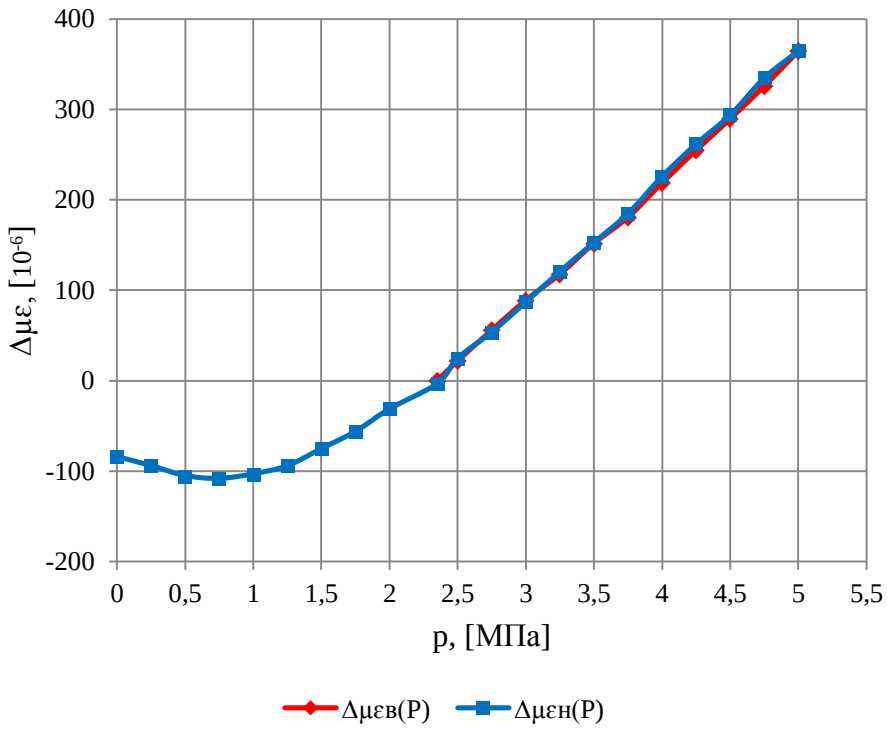


Рис.6.8 Показания ЭТ эксперимента №3

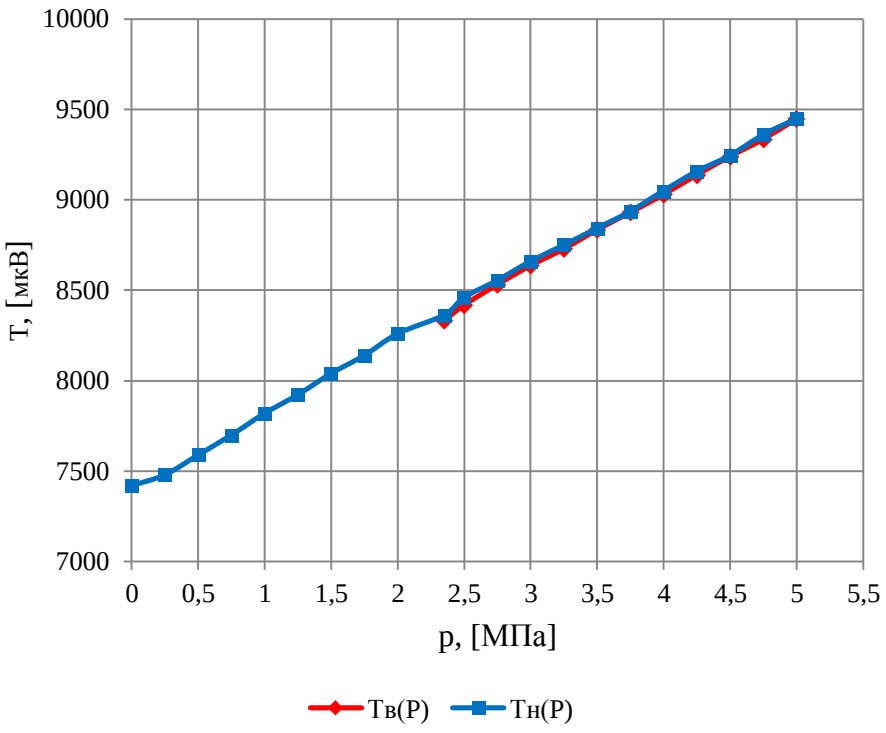


Рис.6.9 Показания тензометра эксперимента №3

Среднеарифметическое $Д_{эт}$ при нагрузке 2,0-5,0-2,0 МПа равно 102%. Следовательно, погрешность измерения ЭТ равна 2%. Среднеарифметическое Д при нагрузке 2,0-5,0 и разгрузке 5,0-2,0 МПа равно 104% и 102% соответственно. По показаниям ЭТ при нагрузке 0,0-2,0 и 2,0-0,0 МПа нельзя определить изменение рабочего давления трубы р.

cae-cube.ru

Эксперимент №4

При ЭТ, наклеенном на боковую образующую трубы, проводилось нагружение трубы от 0,0-5,0-0,0 МПа с шагом 0,5 МПа.

Таблица 6.6 Результаты эксперимента №4

P, [МПа]	Пошаговое повышение давления					Пошаговое понижение давления				
	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_в$, [10^{-6}]	$Д_{эт_в}$	$T_в$, [мкВ]	Д	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_н$, [10^{-6}]	$Д_{эт_н}$	$T_н$, [мкВ]	Д
0	1	0		7390		21	-57	333.85%	7390	29.06%
0,5	2	178	273.85%	7550	27.90%	20	160	353.85%	7567	31.79%
1,0	3	404	347.69%	7765	29.53%	19	390	330.77%	7786	34.74%
1,5	4	616	326.15%	8000	34.41%	18	605	300.00%	8010	37.80%
2,0	5	814	304.62%	8230	36.06%	17	800	270.77%	8232	40.12%
2,5	6	976	249.23%	8454	42.92%	16	976	273.85%	8450	44.34%
3,0	7	1121	223.08%	8665	45.17%	15	1154	196.92%	8684	44.15%
3,5	8	1265	221.54%	8875	45.27%	14	1282	216.92%	8870	51.35%
4,0	9	1390	192.31%	9062	46.44%	13	1423	193.85%	9074	66.40%
4,5	10	1525	207.69%	9286	51.51%	12	1549	140.00%	9286	29.06%
5,0	11	1640	176.92%	9484	53.44%					

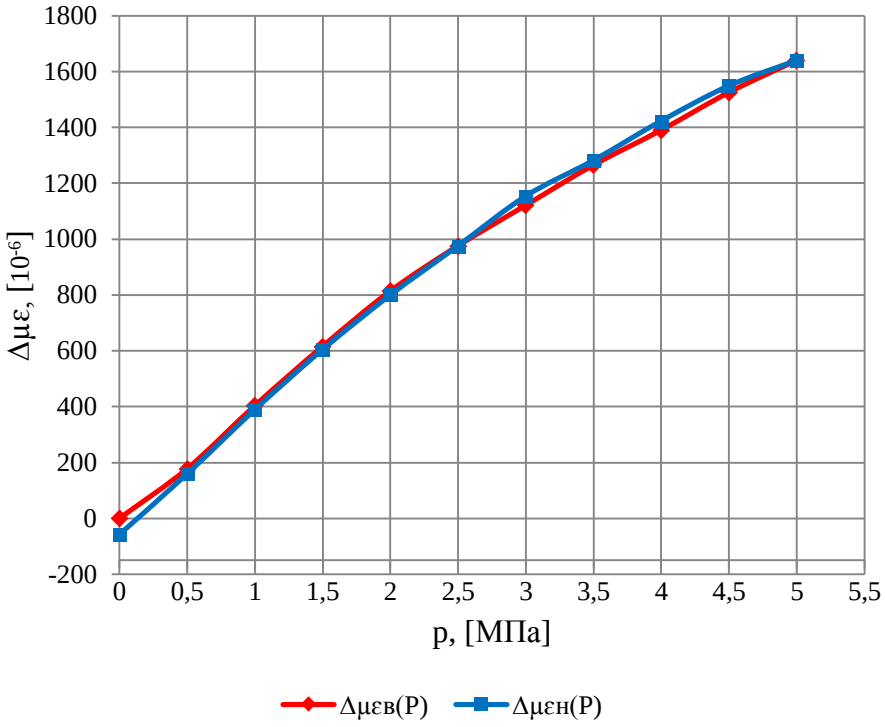


Рис.6.10 Показания ЭТ эксперимента №4

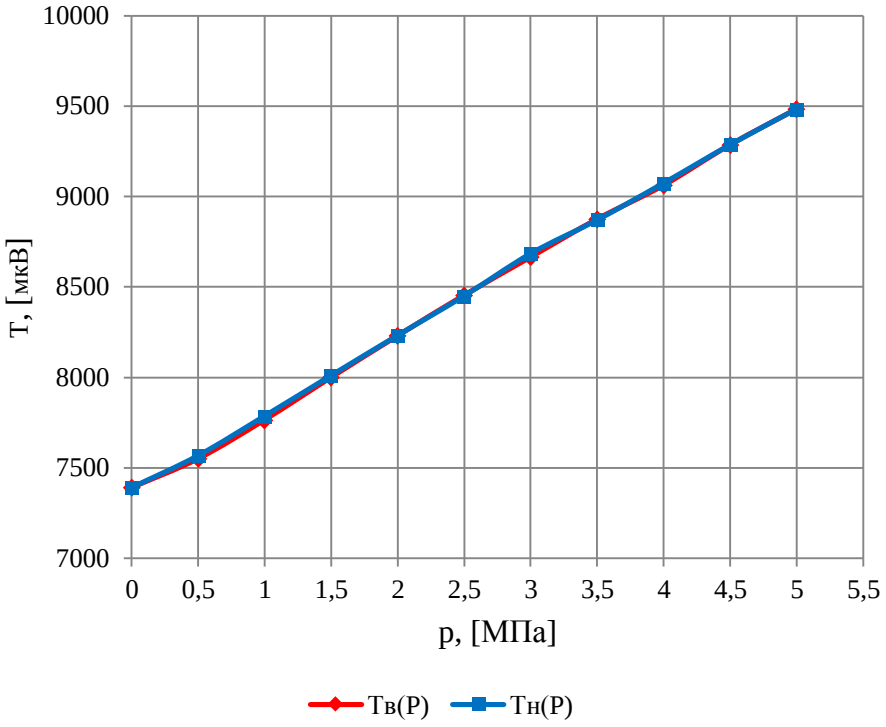


Рис.6.11 Показания тензометра эксперимента №4

Показания ЭТ имели неприемлемый уровень погрешности.

cae-cube.ru

Эксперимент №5

При ЭТ, наклеенном на нижнюю образующую трубы, проводилось нагружение трубы от 0,0-5,0-0,0 МПа с шагом 0,5 МПа.

Таблица 6.7 Результаты эксперимента №5

P, [МПа]	Пошаговое повышение давления					Пошаговое понижение давления				
	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_в$, [10^{-6}]	$Д_{эт_в}$	$T_в$, [мкВ]	Д	t, [у.е.]	$\Delta\mu\varepsilon_н$, [10^{-6}]	$Д_{эт_н}$	$T_н$, [мкВ]	Д
0	1	0		7510		21	0	166.15%	7530	242.90%
0,5	2	160	246.15%	7620	446.62%	20	108	443.08%	7670	431.82%
1,0	3	440	430.77%	7850	373.80%	19	396	353.85%	7880	433.66%
1,5	4	687	380.00%	8078	332.64%	18	626	406.15%	8047	293.73%
2,0	5	915	350.77%	8300 (8620)*	315.35%	17	890	372.31%	8574 (8330)*	331.30%
2,5	6	1120	315.38%	8828	302.62%	16	1132	336.92%	8804	312.02%
3,0	7	1335	330.77%	9032	323.61%	15	1351	306.15%	9025	305.66%
3,5	8	1507	264.62%	9220	280.92%	14	1550	276.92%	9230	269.89%
4,0	9	1680	266.15%	9406	285.59%	13	1730	250.77%	9440	268.71%
4,5	10	1872	295.38%	9636	256.32%	12	1893	200.00%	9631	205.70%
5,0	11	2023	232.31%	9830	238.99%					

*нестабильность из-за задевания провода тензометра

cae-cube.ru

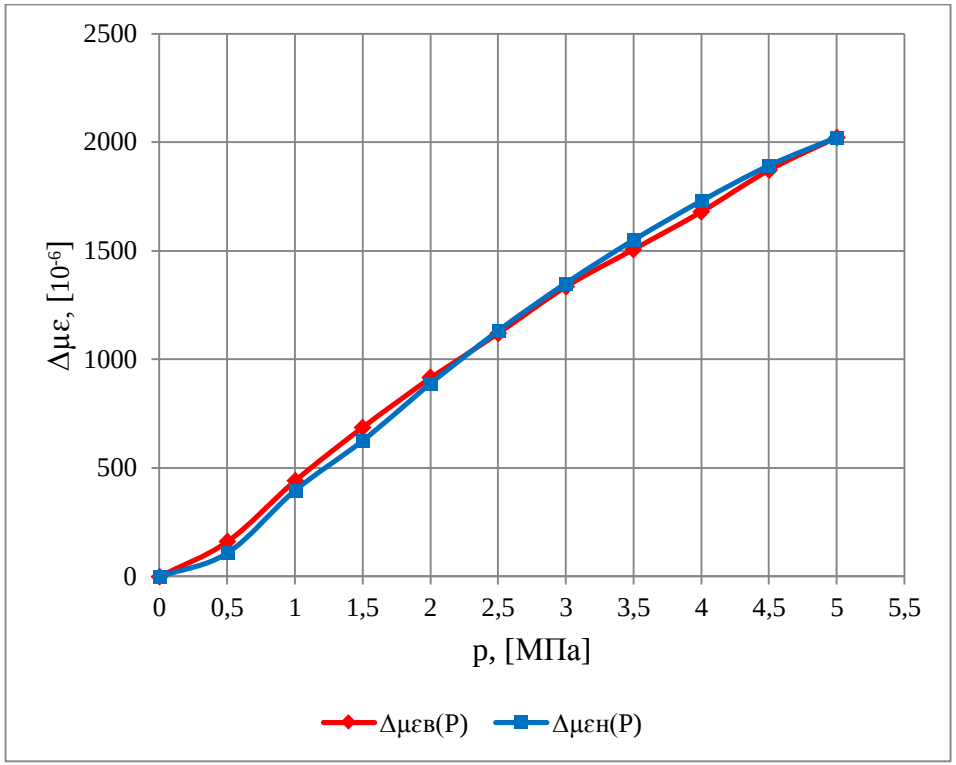


Рис.6.12 Показания ЭТ эксперимента №5

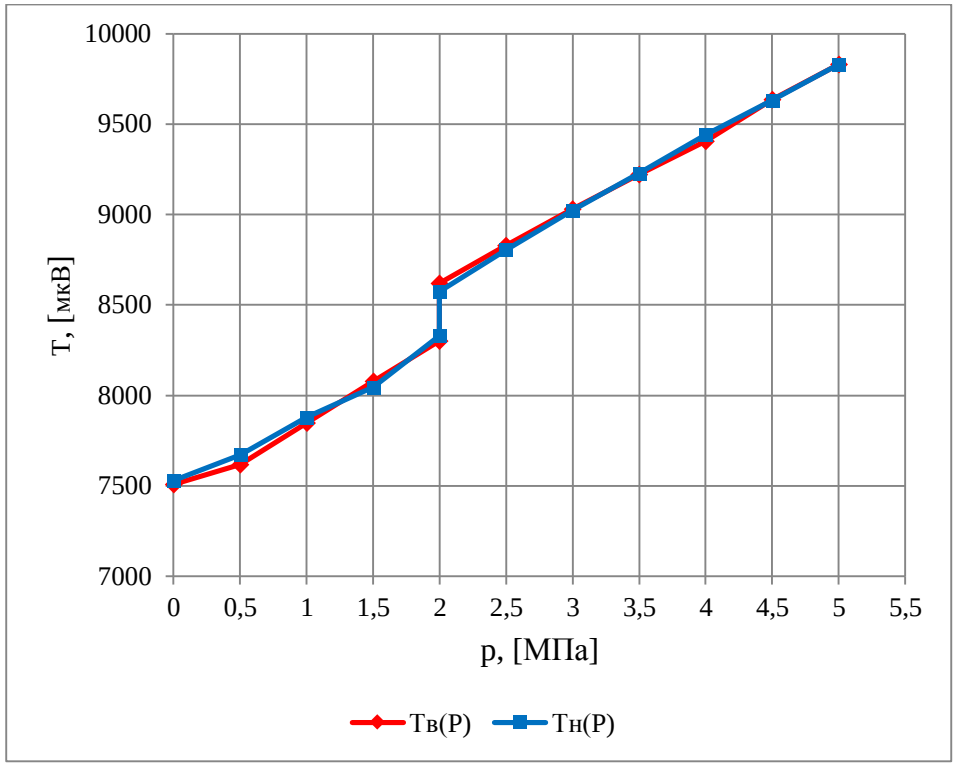


Рис.6.13 Показания тензометра эксперимента №5

Показания ЭТ имели неприемлемый уровень погрешности.

cae-cube.ru

6.4 Вывод

С помощью ЭТ можно определять изменение внутреннего давления в трубе с погрешностью ~ 2% по формуле (6):

$$p = K\text{т} \cdot \Delta\mu\varepsilon, \text{ где}$$

$$K\text{т} = \frac{E \cdot (b^2 - a^2)}{a^2} \cdot \frac{(r + h)}{(1 - \mu) \cdot r + (1 + \mu) \cdot b}$$

При этом должны выполняться условия:

- ЭТ устанавливается на верхнюю образующую трубы,

- внутреннее давление трубы превышает 2 МПа.

В дальнейшем возможно:

1) провести натурный эксперимент на газовой трубе;

2) рассчитать и построить диаграмму, отображающую для каких мануфактур труб (диаметр, толщина стенки, изменение давления) возможно использование ЭТ;

7 Список литературы

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
2. 10101-М-2-2.12.2011_Накладной струнный тензометр.