

«Исследование динамики трубопровода ТЭС»

Цель: оценка динамических напряжений трубопровода, вызванных пульсациями давления теплоносителя.

Задачи: разработка математической модели трубопровода;
проведение экспериментальных исследований собственных затухающих колебаний на «холодном» трубопроводе;

проведение экспериментальных исследований вынужденных колебаний в рабочем режиме и давления пульсации теплоносителя;

расчет собственных и вынужденных колебаний на математической модели и сравнение полученных результатов с экспериментом.

Объект исследования: трубопровод тепловой станции, проводящий конденсат из подогревателя высокого давления в деаэратор.

Математическая модель

Параметры материала труб (сталь 20)

Температура, °C	Модуль упругости, Па	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона, μ	Коэффициент температурного расширения, $\alpha \cdot 10^{-5}$
20	$2,13 \cdot 10^{11}$	7859	0,3	—
100	$2,03 \cdot 10^{11}$	7834		1,16
200	$1,99 \cdot 10^{11}$	7803		1,26
300	$1,9 \cdot 10^{11}$	7770		1,31

$\rho = 871.15 \text{ кг/м}^3$ – плотность теплоносителя (насыщенная вода) до регулятора;

$\rho = 50 \text{ кг/м}^3$ – плотность теплоносителя

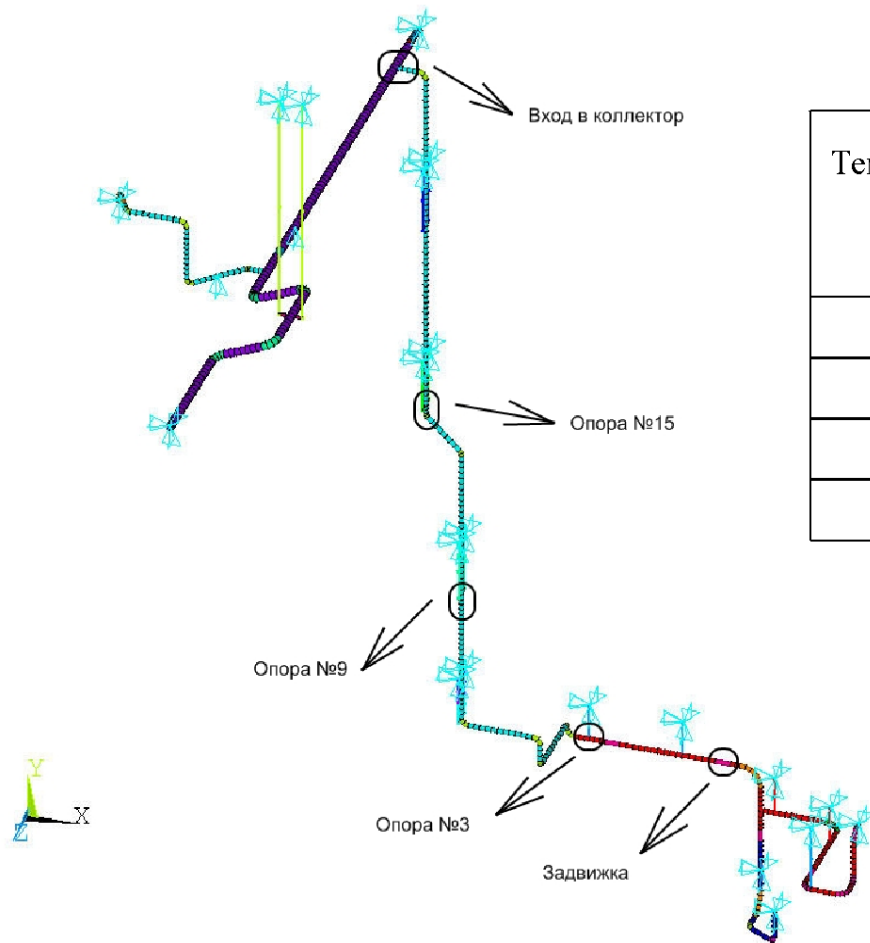


Рис. 1. Конечно-элементная модель

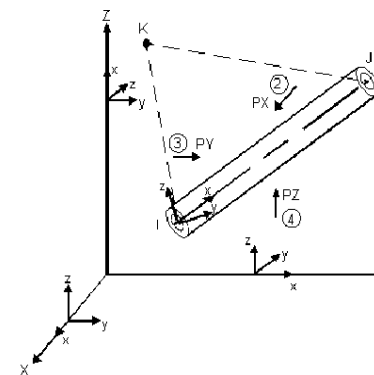


Рис. 2. Геометрия элементов pipe 16 и pipe 18

Математическая модель

Фрагмент стандарта МВН 045-63

Грузо- подъем- ность кГс	Тип 1	Высота 1, м	Тип 2	Высота 2, м	Податливость, мм/кГс		
					1	2	3
97	01	0.242	11	0.126	0.7216	1.4433	2.1649
197	02	0.303	12	0.158	0.3553	0.7107	1.066
292	03	0.322	13	0.168	0.2397	0.4795	0.7192
514	04	0.394	14	0.206	0.1362	0.2724	0.4086
815	05	0.345	15	0.184	0.0859	0.1718	0.2577

Характеристики пружинных подвесок

№ набора материальных констант	Название элемента	№ подвески и чертежа	Грузоподъем- ность Р, Кгс	Высота пружины в свободном состоянии Н _{св} , мм	Жесткость пружины, Н/м ²
20	Combine 14	1 17284-Т	514	206	72026
21	Combine 14	4 16452-Т	292	168	40926
22	Combine 14	2 16452-Т	292	322	20459
23	Combine 14	1 16452-Т	292	168 322	13640
25	Combine 14	12 Д-1279262сб	400	184	57101
26	Combine 14	13 Д-1279263сб	400	184	57101
28	Combine 14	3 16452-Т	292	322	20459

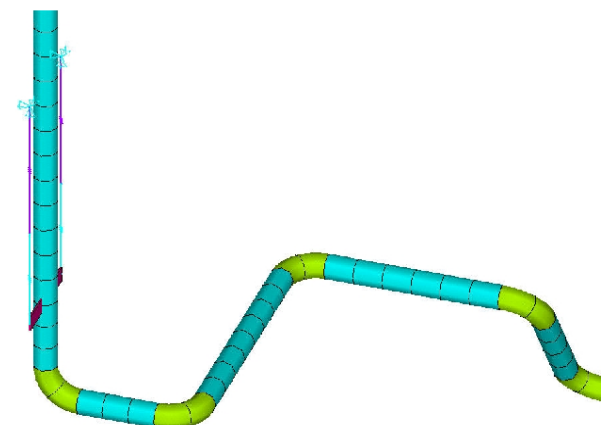


Рис.3. Фрагмент конечно-элементной модели трубопровода (по монтажным чертежам)

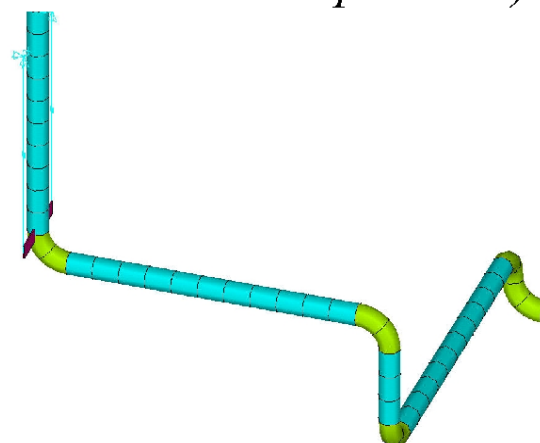


Рис.4. Фрагмент конечно-элементной модели трубопровода (фактическая конфигурация)

Оборудование для экспериментальных исследований

Схема расположения оборудования

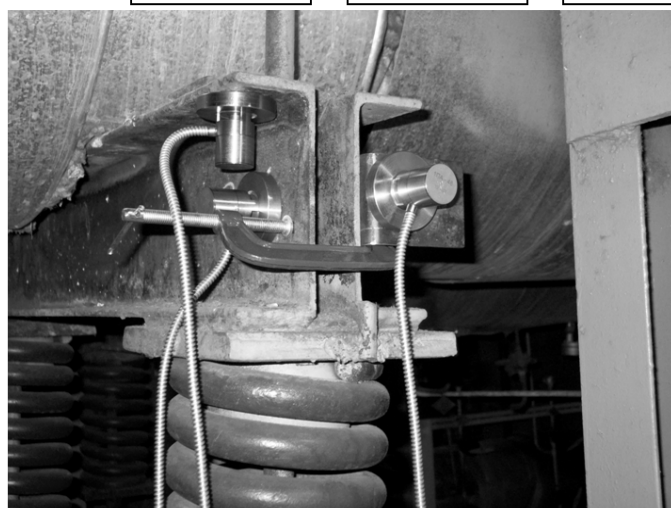
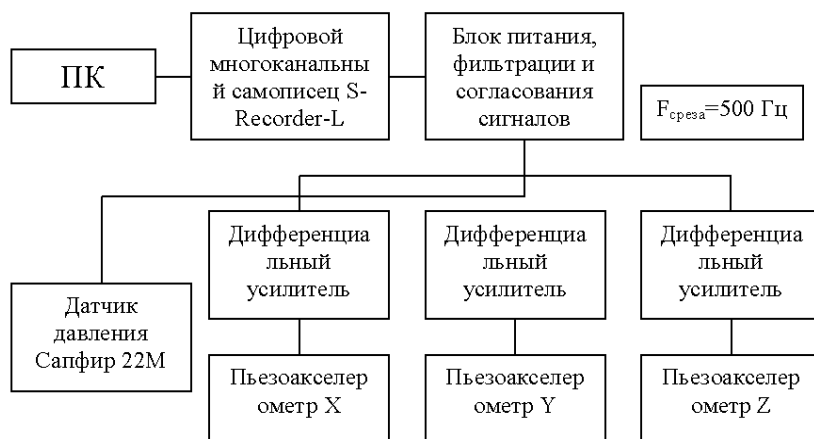


Рис. 5. Датчики вибрации, установленные на пружинную опору трубопровода для измерения виброускорений в трех направлениях

Рабочие характеристики датчиков серии 1ПА-48

Коэффициент преобразования, пКл/мс ⁻²	Диапазон рабочих частот, Гц	Динамический диапазон, мс ⁻²	Резонансная частота, кГц	Рабочая температура, °С
110	0,1-700	0,1-100	2	-40..+300

Основные технические характеристики цифровой многоканальный самописец S-Recorder-L

Каналов аналогового ввода (мультиплексируемых)	С общим проводом	32
	Дифференциальных	16
Разрешение АЦП		12 бит
Входное сопротивление		Не менее 10 МОм
Полоса пропускания (-3дБ)		Не менее 30 кГц
Максимальная частота опроса в одноканальном режиме		100 кГц
Диапазоны входного сигнала биполярного, по напряжению		+10В;+1В;+0,1В;+0,05В

Исследование собственных частот и форм колебаний

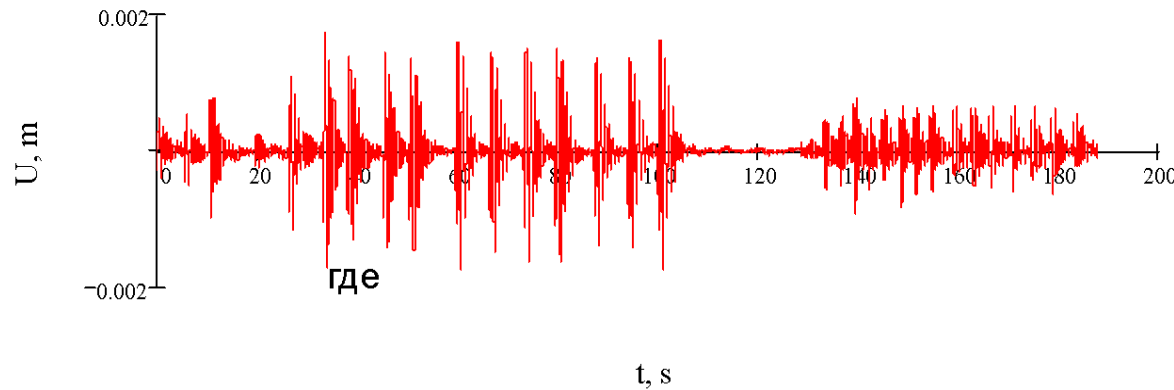


Рис. 6. Виброперемещение точки трубопровода №15 в горизонтальном направлении Z

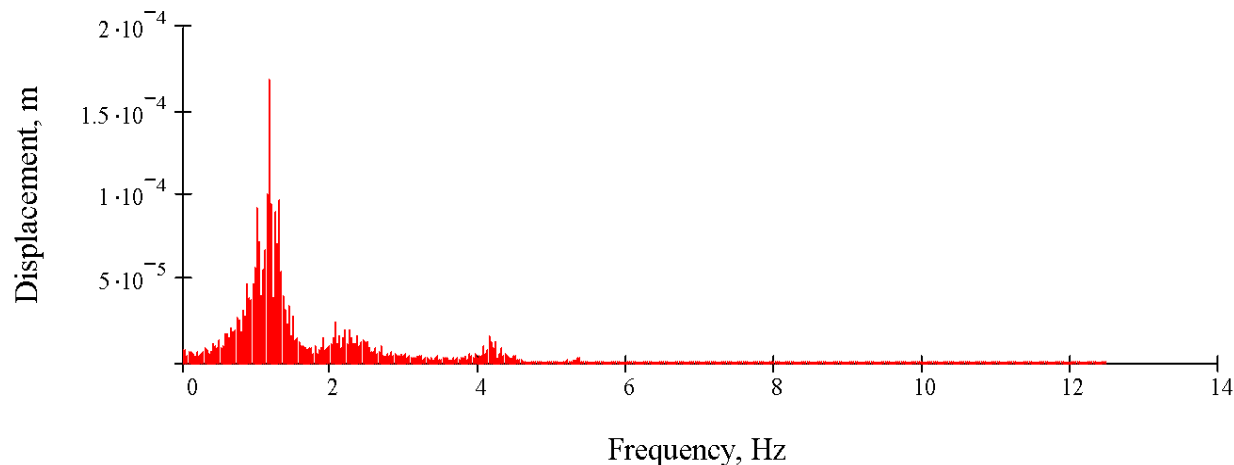


Рис. 7. Спектр виброперемещения точки трубопровода №15 в горизонтальном направлении Z

Формулы
численного
интегрирования по
методу трапеций:

$$v_k = v_{k-1} + \left(\frac{a_k + a_{k-1}}{2} \right) \cdot \Delta T$$

$$u_k = u_{k-1} + \left(\frac{v_k + v_{k-1}}{2} \right) \cdot \Delta T$$

a_k , v_k , u_k - соответственно
виброускорение,
виброскорость,
виброперемещение в

k -ый момент времени,

ΔT - период
дискретизации
временного
сигнала.

Исследование собственных частот и форм колебаний

Первые 30
теоретических
собственных частот:

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9	ω_{10}
0,438	0,6631	0,94625	1,2074	1,348	2,3941	2,4504	2,7876	2,9141	3,0538
ω_{11}	ω_{12}	ω_{13}	ω_{14}	ω_{15}	ω_{16}	ω_{17}	ω_{18}	ω_{19}	ω_{20}
3,1814	3,3388	3,5231	4,0198	4,4121	4,5709	4,8713	5,1036	5,4346	6,0641
ω_{21}	ω_{22}	ω_{23}	ω_{24}	ω_{25}	ω_{26}	ω_{27}	ω_{28}	ω_{29}	ω_{30}
6,1189	7,1877	7,4629	8,9511	9,3179	9,8049	10,084	10,494	11,319	11,669

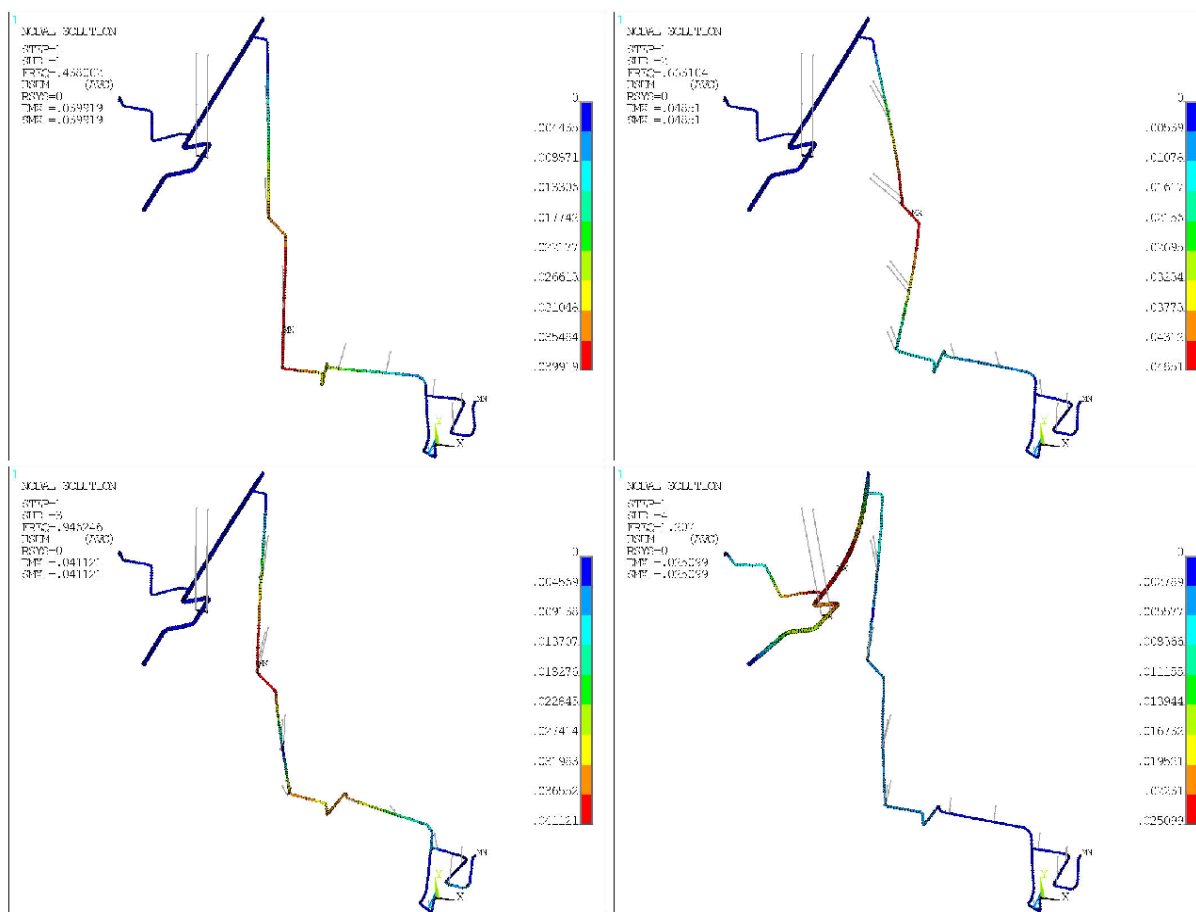


Рис. 8. Формы колебаний на первой, второй, третьей и четвертой собственных частотах

Определение коэффициентов демпфирования

$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ - матрица демпфирования;

$$a = a_1 \cdot e^{-\varepsilon_1 t} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) + a_2 \cdot e^{-\varepsilon_2 t} \cdot \cos(\omega_2 \cdot t + \varphi_2)$$

- аппроксимирующая функция;

$\omega_i = 2 \cdot \pi \cdot f_i$ - циклическая частота;

$\delta_i = \varepsilon_i \cdot T_i = \frac{\varepsilon_i}{f_i}$ - логарифмический декремент затухания;

$\eta_i = \frac{\delta_i}{\sqrt{(2 \cdot \pi)^2 + \delta_i^2}}$ - коэффициент демпфирования.

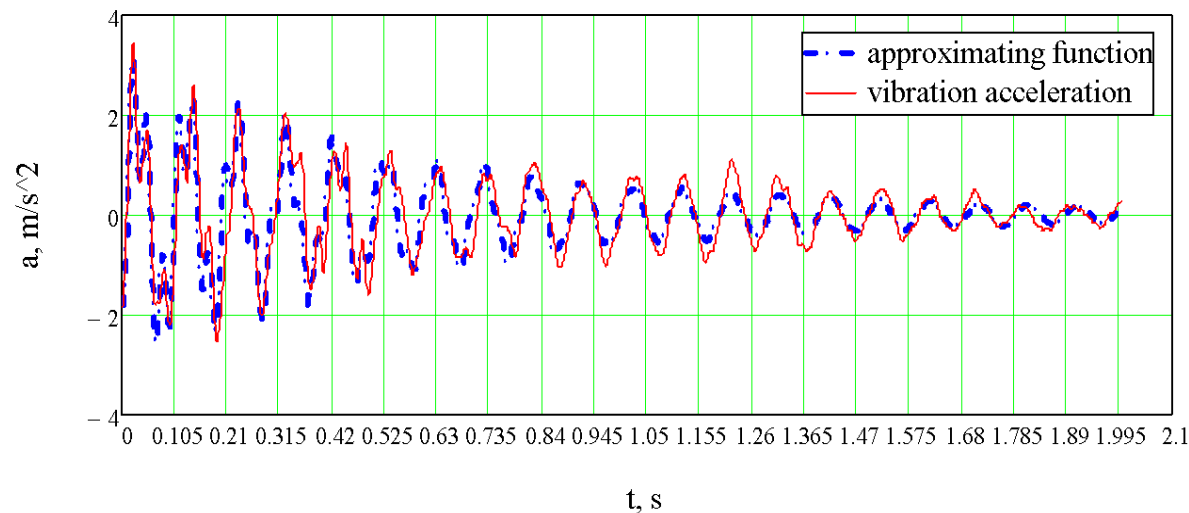


Рис.9. Сигнал виброускорения и аппроксимирующая функция

$$\varepsilon_1 = 1,3 \quad \varepsilon_2 = 2,9$$

- коэффициенты затухания первой и второй гармоник;

$$f_1 = 10,1 \text{ Гц} \quad f_2 = 32,6 \text{ Гц}$$

- соответствующие частоты колебаний.

$$\eta_i = \frac{\alpha}{2 \cdot \omega_i} + \frac{\beta \cdot \omega_i}{2}$$

$$0,0205 = \frac{\alpha}{2 \cdot 63,46} + \frac{\beta \cdot 63,46}{2}$$

$$0,014 = \frac{\alpha}{2 \cdot 204,832} + \frac{\beta \cdot 204,832}{2}$$

$$\alpha = 2,256 \frac{1}{\text{с}}$$

$$\beta = 0,000084 \text{ с}$$

Исследование вынужденных колебаний трубопровода

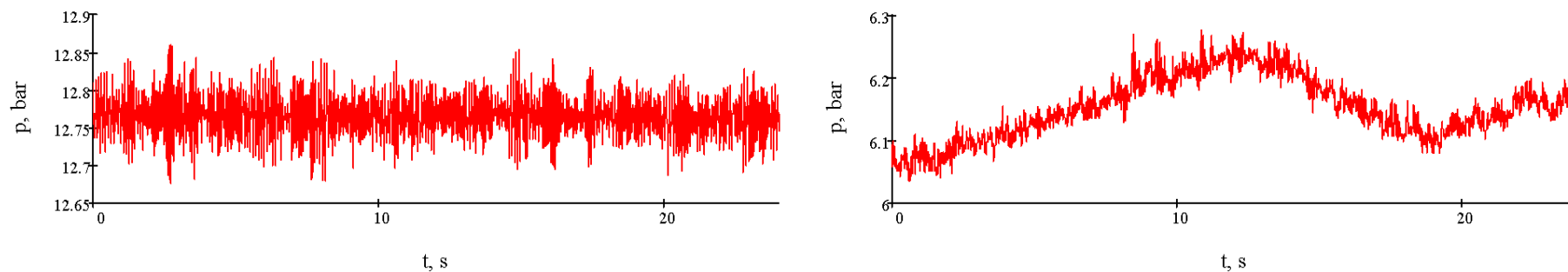


Рис.10. Временной сигнал давления до (насыщенная вода) и после (пароводяная смесь) регулятора

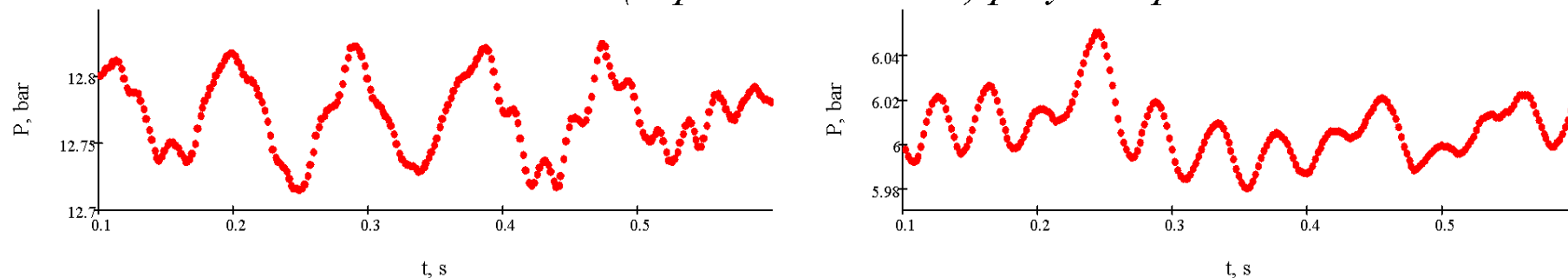


Рис.11. Масштабный временной сигнал давления до (насыщенная вода) и после (пароводяная смесь) регулятора на отрезке 0,5 секунд

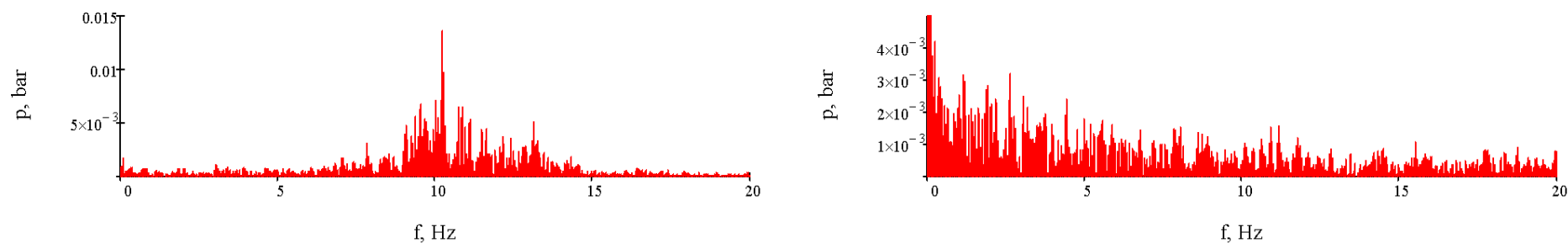
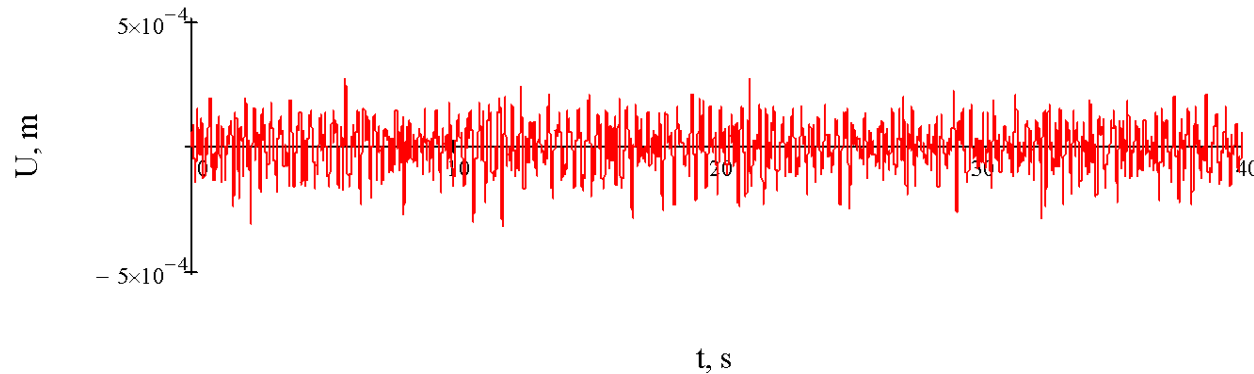
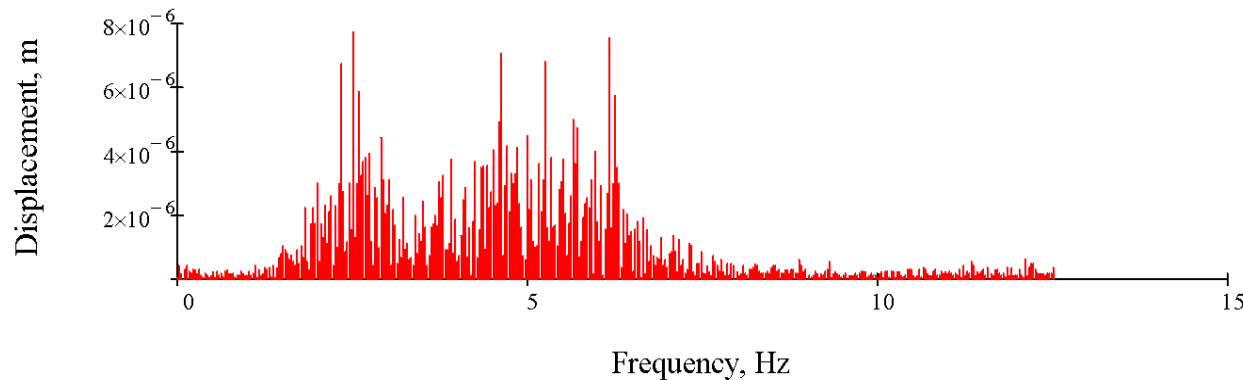


Рис.12. Спектр давления до (насыщенная вода) и после (пароводяная смесь) регулятора

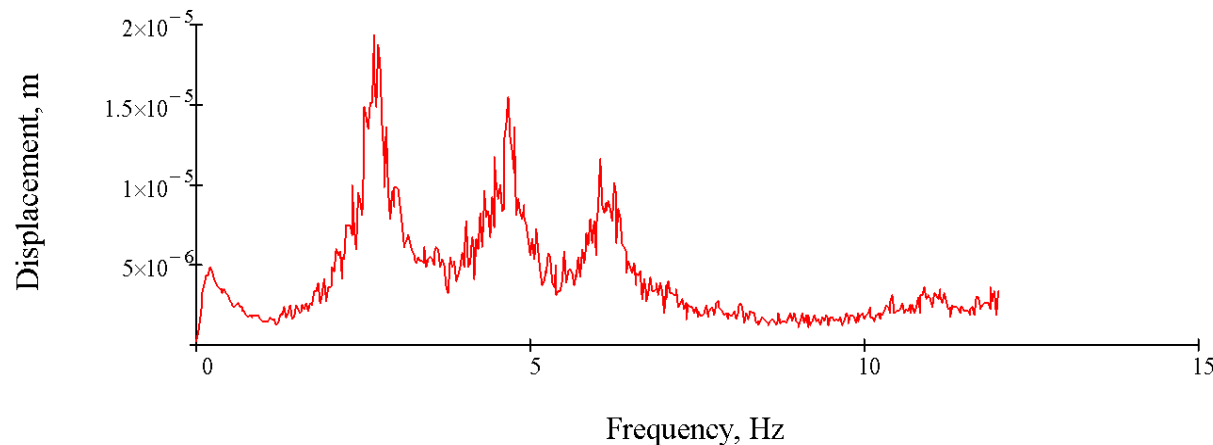
Исследование вынужденных колебаний трубопровода



*Рис.13.
Виброперемещение точки
трубопровода №9 в
горизонтальном
направлении X*



*Рис. 14. Спектр
виброперемещения
точки трубопровода
№3 в горизонтальном
направлении X*



*Рис.15. Усредненный
спектр
виброперемещения
точки трубопровода №9
в горизонтальном
направлении X по 12
реализациям*

Исследование вынужденных колебаний трубопровода

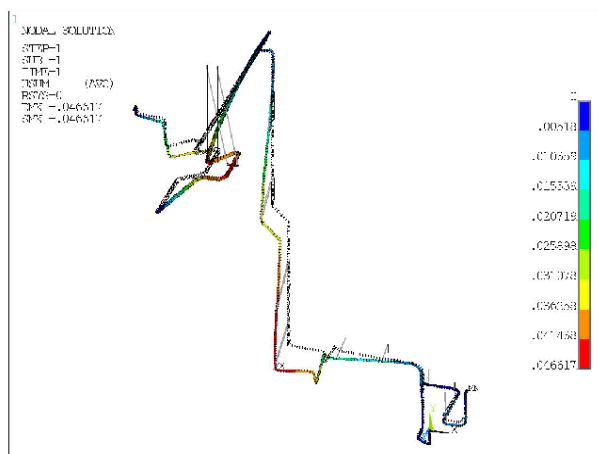


Рис.16. Распределение статических суммарных перемещений



Рис.17. Распределение статических эквивалентных напряжений по Мизесу

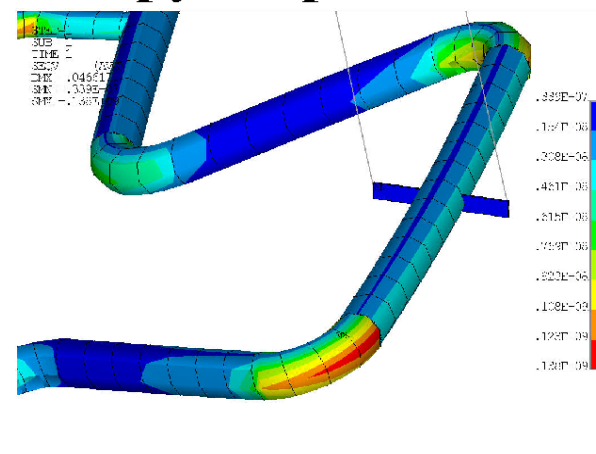


Рис.18. Распределение статических эквивалентных напряжений по Мизесу в гире на компенсаторе коллектора

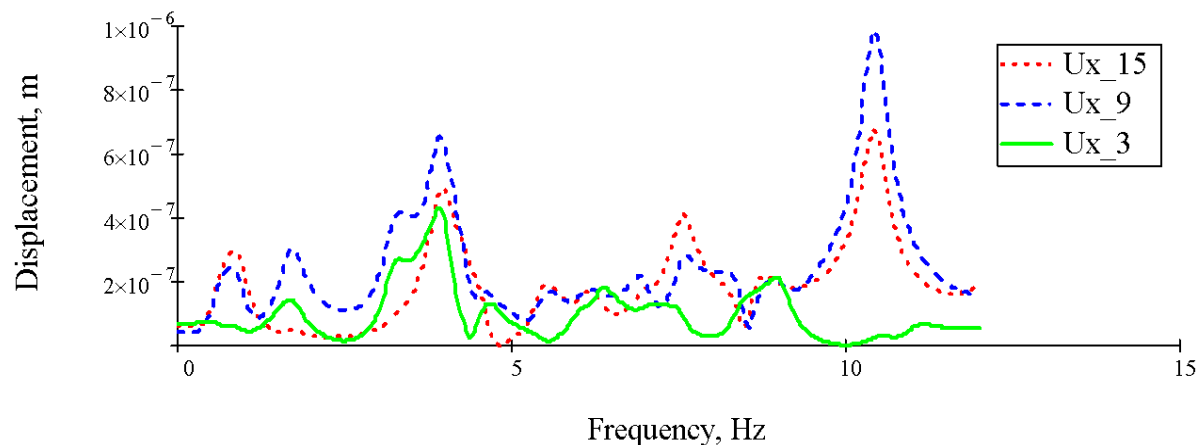


Рис.19. Амплитудно-частотная характеристика исследуемых узлов трубопровода в горизонтальном направлении X

Гипотеза энергии
изменения формы:

$$\sigma_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Масштабный коэффициент:

$$k_i = \frac{A_{meopi}}{A_{экснi}}$$

Исследование вынужденных колебаний трубопровода

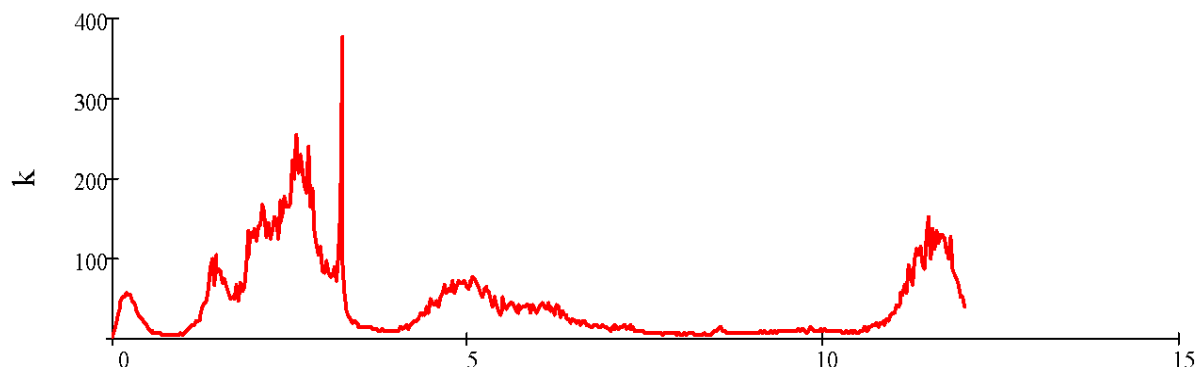


Рис.20. Зависимость усредненного масштабного коэффициента точки №9 трубопровода от частоты вынуждающей силы

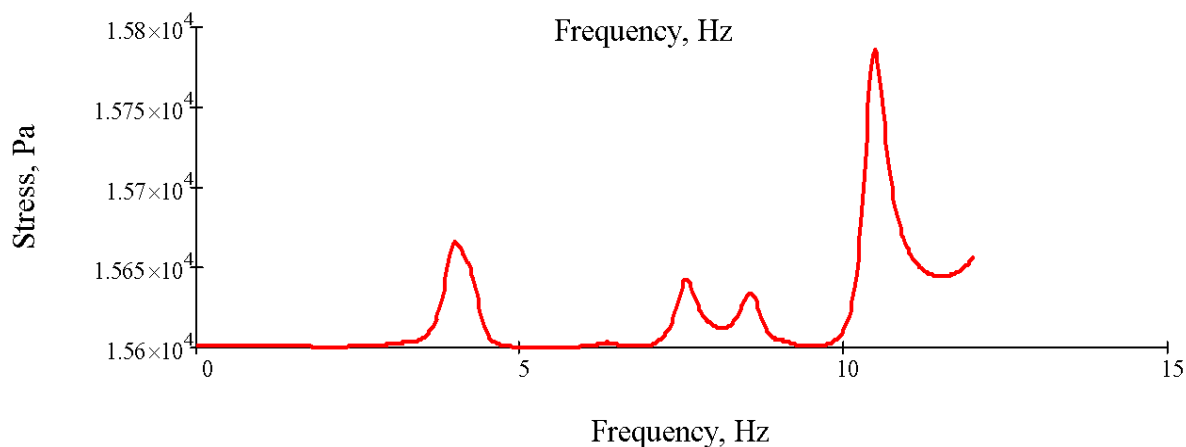


Рис.21. Амплитудно-частотная характеристика эквивалентных (по Мизесу) напряжений в гире компенсатора коллектора
Эквивалентное динамическое напряжение:

$$\sigma_{\text{экв}}(t) = \sum_{i=1}^N k_i \cdot \sigma_{\text{экв},i} \cdot |\cos(2 \cdot \pi \cdot \theta_i \cdot t + \varphi_i)|$$

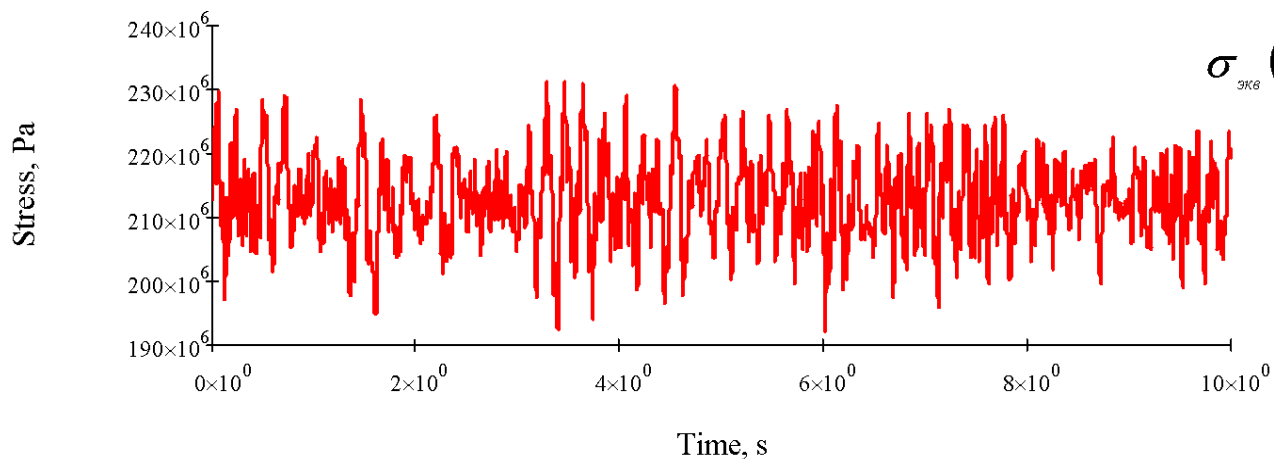


Рис.22. Временной сигнал расчётных эквивалентных напряжений в гире на компенсаторе коллектора