

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Архитектурно-строительный институт  
Кафедра «Строительное производство и теория сооружений»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Рецензент:

Заведующий кафедрой:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Г.А. Пикус

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

### ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к выпускной квалификационной работе магистра на тему:

Анализ колебаний надземного газопровода при ветровом резонансе

ЮУрГУ 08.04.01 «Строительство». АСИЗ-393. ПЗ ВКР

Консультант:

Руководитель: д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Потапов А.Н.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Консультант:

Проверка по системе антиплагиат: 68,25%

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Потапов А.Н.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021г.

Нормоконтролер:

Автор ВКР:

\_\_\_\_\_ Потапов А.Н.

\_\_\_\_\_ Амирова Р.Р.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

г. Челябинск - 2021

## АННОТАЦИЯ

Данная выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки и графической части, выполненной в программе Matlab 2017.

Пояснительная записка представлена пятью разделами:

1. Обзор состояния вопроса состоит из обзора литературы по заданной теме, патентного поиска и постановки задач исследования.
2. Методика проведения исследования включает в себя применение теоретических расчетов областей технической механики и высшей математики.
3. Результаты исследования, анализ результатов. Раздел содержит графические данные, полученные в программном комплексе Matlab, и их пояснение.
4. Экономическое обоснование включает в себя мониторинг цен на составляющие рассматриваемого устройства гашения вибраций трубопровода.
5. Разработка рекомендаций по применению научных выводов на практике.

				<i>А С З-393-08. 04. 01-2021-039-ПЗ</i>			
	<i>Фамилия</i>	<i>Подп</i>	<i>Да</i>				
<i>Зав. к</i>	<i>Пикус</i>			<i>Тема работы</i>	<i>Стад</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Н. кон</i>	<i>Байбури</i>				<i>ВК</i>	<i>2</i>	<i>86</i>
<i>Руков</i>	<i>Потапов</i>				<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Консу</i>	<i>Потапов</i>				<i>Кафедра СПТС</i>		
<i>Разра</i>	<i>Амирова</i>						

## СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	2
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Анализ состояния вопроса .....	7
1.1 Литературный обзор .....	7
1.2 Актуальность темы .....	8
1.3 Основные понятия.....	9
1.3.1 Колебания и резонанс .....	9
1.3.2 Назначение и типы трубопроводов .....	13
1.4 Основные требования при проектировании трассы .....	15
1.4.1 Изучение объекта и нормативной базы .....	15
1.4.2 Расчет нагрузок и воздействий на надземный трубопровод .....	17
1.4.3 Расчет трубопровода на прочность .....	18
1.4.4 Оценка устойчивости трубопровода .....	18
1.4.5 Расчет трубопровода на вибрацию.....	19
1.4.6 Расчетная ветровая нагрузка.....	20
1.4.7 Динамическая нагрузка .....	23
1.4.8 Расчет на прочность и устойчивость.....	26
1.5 Существующие программы.....	27
1.6 Недостатки существующих методов гашения колебаний .....	28
2 Описание методики выполнения исследований .....	31
3 Аналитический метод решения задач аэродинамической неустойчивости надземных газопроводов .....	35
3.1 Расчетный алгоритм.....	37
3.2 Численная реализация задачи. Анализ результатов .....	40
3.2.1 Характеристика объекта и района строительства.....	40
3.2.2 Характеристика района строительства .....	41
3.2.3 Исходные данные для расчета: .....	43

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а			2



## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БМ – базовая модель;

МДС – модель с дополнительной связью;

НГ – надземный газопровод;

МГ – магистральный газопровод;

СМР – строительно-монтажные работы;

ППС – примерно пограничный слой;

ОС – односторонняя связь;

МКУ – матричное квадратное уравнение;

ДДС – дискретная диссипативная система.

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
Из	Ли	№ докум.	Подп	Да		4



диаметр трубопровода 150мм, толщина стенки 2мм, длина пролета между двумя соседними опорами 6м

Целью дипломной работы является подобрать эффективное устройство гашения колебаний трубопровода.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- произведен обзор литературы отечественной и иностранной;
- проведен патентный поиск и его анализ, выбран прототип для собственной разработки;
- при помощи программы рассчитаны различные модели колебания трубопроводов;
- выбрано наиболее эффективное устройство для гашения колебаний трубопровода;
- проведена примерная оценка стоимости устройства и всего комплекса;
- определено максимальное число пролетов в модели НГ с симметричной и кососимметричной формой колебаний, для которых удовлетворяются условия:  $u_{\max} \leq [u]$ .
- подсчитано необходимое количество устройств гашения с обоими формами колебаний на 1 км трассы НГ.
- проведено сравнение с вариантом при кососимметричной форме колебаний и подсчитана экономическую эффективность от использования варианта с симметричной формой колебаний.

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Л и
И з	Л и	№. д о к у м.	П о д п	Д а			6

# 1 Анализ состояния вопроса

## 1.1 Литературный обзор

Газопровод – инженерное сооружение, служащее для транспортировки газа от места добычи до конечного потребителя по металлическим или пластиковым трубам под избыточным давлением. Газопроводы подразделяются на две категории: магистральные газопроводы и газораспределяющие трубопроводные системы. Магистральные трубопроводы используются в качестве быстрого способа перемещения продукта (газа) в больших объемах и на значительные расстояния, главной особенностью МГ является высокое давление внутри трубопровода. Газопроводам распределительных сетей предназначены для поставки газа к конечному потребителю, в следствии чего главной составляющей системы является газораспределительная станций, она же станция понижения давления продукта (газа) в трубопроводе.

В процессе эксплуатации трубопроводы вибрируют, так как по ним под большим давлением перекачивается продукт (нефть, газ, дизельное топливо). Такие вибрации крайне нежелательны, они приводят к дефектам стенки и геометрии трубы. Данный вопрос подробно рассмотрен в статье «Piping Vibration: Causes, Limits & Remedies» авторства Рона Френда [3].

В данной же работе рассмотрены колебания надземных трубопроводных систем, возникающие в следствии ветрового резонанса. Такие колебания опасны тем, что надежность и устойчивость трубопровода может быть не рассчитана на рост внутренних и кольцевых напряжения, что может привести к не отслеживаемому появлению дефектов стенки трубы, а в следствии к аварии на трубопроводе.

Для выбора наиболее эффективной конструкции способствующей гашению колебаний надземного трубопровода, виброгасителя, были изучены основные нормативные документы по теме, учебные пособия, патенты и

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№. д о к у м.	П о д п	Д а		7



статьи, а также при помощи программы MATLAB были получены и проанализированы графики перемещений основных сечений трубопровода и графики сил, возникающих в период включения устройства гашения колебаний в работу.

## 1.2 Актуальность темы

На настоящий момент актуален вопрос виброзащиты многопролетных конструкций (трубопроводы, мосты, провода, канаты большого диаметра и т.д.) от изгибных колебаний. Трубопроводы надземной прокладки попадают в широкий диапазон собственных частот. Достаточно низкие значения логарифмических декрементов колебаний ( $0,02 \div 0,05$ ) объясняют легкую возбуждаемость автоколебаний трубопроводов при воздействии ветра, а также при вибрации, вызванные движущимся продуктом.

Были зафиксированы случаи появления повышенных вибраций висячих стальных мостов, а также их аварии, основной причиной которых стало явление вихреобразования и автоколебания. Вопрос вибрации мостов рассмотрен в таких статьях как [4], главкой целью которой было исследования оценки колебательного отклика двухпролетных непрерывных балок, подвергающихся перемещающим нагрузкам, в частности, исследование максимального резонанса и подавления резонансных явлений, и [5], цель которой заключалась в исследовании явления внутреннего резонанса подвесной мостовой конструкции с секционной моделью 6-й степени свободы. Впервые был исследован первичный резонанс второй режима системы при гармоническом возбуждении. На практике же одним из эффективных способов предотвращения и уменьшения амплитуд автоколебаний является повышение демпфирования, а значит применение динамических гасителей для многопролетных конструкций представляет интерес.

Явление ветрового резонанса многопролетных конструкций опасно возникновением интенсивные колебания трубы в вертикальной плоскости при

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Л и
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а		8

малых скоростях ветрового потока. Такие колебания приводят к дополнительным статическим нагрузкам, что в совокупности с остальными нагрузками на трубопровод может вызвать напряжения, близкие к 1-й группе предельных состояний.

Таким образом можно сделать вывод, гашение колебаний балочных конструкций является актуальной задачей, решение которой позволяет безопасно эксплуатировать объекты повышенной опасности и обеспечивать прочность и надежности сооружений на проектном уровне.

### 1.3 Основные понятия

#### 1.3.1 Колебания и резонанс

##### 1.3.1.1 Виды колебаний и их определения

Автоколебания – незатухающие колебания, поддерживаемые в диссипативной системе за счет постоянного внешнего источника энергии, причем свойства этих колебаний определяются самой системой. [6]

Вынужденные колебания – колебания, в процессе которых колеблющаяся система подвергается воздействию внешней и периодически изменяющейся силы, называемой вынуждающей силой. [6]

Автоколебания, поддерживаемые за счёт внешнего источника энергии колебания, параметры которых (амплитуда, частота, спектр колебаний) определяются свойствами самой системы и не зависят от конечного изменения начальных условий. Системы, в которых возникают автоколебания, называются автоколебательными. Автоколебания могут быть периодическими, т. е. точно воспроизводящими себя через период

$$T=1/f, \quad (1)$$

где  $f$  – частота автоколебания,

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Л и
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а		9

или хаотическими, нерегулярными. Спектр частот таких автоколебания сплошной, а их статистические свойства не меняются во времени. [7]

### 1.3.1.2 Понятие резонанса

Резонанс – частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы. Резонанс – явление резкого возрастания амплитуды при совпадении частот вынуждающей силы и собственной частоты вынужденных колебаний.

Резонанс возникает вследствие того, что при равенстве частот внешняя сила, действующая в такт с вынужденными колебаниями все время сонаправлена с вектором скорости колеблющегося тела и при этом совершает положительную работу.

В [8] описаны следующие воздействия ветра, которые необходимо учитывать для зданий и сооружений:

- а) основной тип ветровой нагрузки;
- б) пиковые значения ветровой нагрузки, действующие на конструктивные элементы ограждения и элементы их крепления;
- в) резонансное вихревое возбуждение;
- г) аэродинамически неустойчивые колебания типа галопирования, дивергенции и флаттера.

Резонансное вихревое возбуждение и аэродинамические неустойчивые колебания необходимо учитывать для сооружений, имеющих прямолинейную центральную ось, а также неизменяющиеся или плавно изменяющиеся формы и размеры поперечного сечения. Условия возможности появления аэродинамически неустойчивых колебаний устанавливаются в нормах проектирования СП 42-101-2003. В процессе проектирования многопролетных сооружений, необходимо применять такие конструктивные и архитектурные решения, которые исключают возбуждение аэродинамически неустойчивых колебаний.

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
Из	Ли	№ докум.	Подп	Да			10





### 1.3.2 Назначение и типы трубопроводов

В соответствии с [10] магистральные трубопроводы могут прокладываться наземно, подземно и надземно, схематично представлены на рисунке 2.

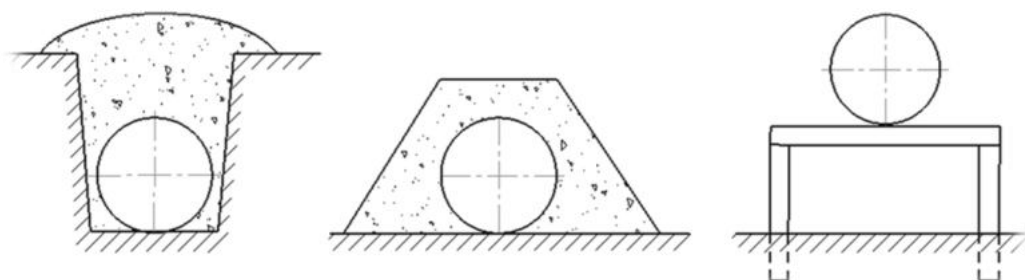


Рисунок 2 – Схемы укладки трубопроводов

Предпочтение отдается подземной прокладке трубопроводов, как более безопасной. Надземная прокладка трубопроводов или отдельного участка допускается в пустынных и горных районах, болотистых местностях, районах горных выработок, оползней и районах распространения многолетнемерзлых грунтов, на неустойчивых грунтах и на переходах через естественные (реки, озера, овраги) и искусственные (автодороги и железнодорожные пути) препятствия. При этом необходимо обеспечить надежную и безопасную эксплуатацию трубопроводов.

Трубопроводы и их сооружения следует проектировать с учетом максимальной индустриализации СМР, используя заводскую изоляцию и качественные сборные конструкции. Принятые в проектной документации решения должны обеспечивать бесперебойную и безопасную эксплуатацию трубопроводов.

Магистральные газопроводы делятся на классы:

В зависимости от:

– *рабочего давления:*

1)  $>2,5$  до  $10,0$  МПа;

2)  $>1,2$  до  $2,5$  МПа. (рассматриваемый)

И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а

– диаметра трубопровода:

- 1) 500 – 700мм;
- 2) 300 – 500мм; (рассматриваемый)
- 3) до 300мм.

Таблица 1 - Коэффициент условий работы трубопровода

Категория трубопровода и его участка	Коэффициент условий работы трубопровода при расчете его на прочность, устойчивость и деформативность
В	0,660
I	0,825
II	0,825
III	0,990
IV	0,990

Таблица 2 – Категории магистральных трубопроводов

Назначение трубопровода	Категория трубопровода при прокладке	
	подземной	наземной и надземной
Для транспортирования природного газа: номинальным диаметром менее 1200мм номинальным диаметром 1200 и более в северной строительно-климатической зоне	IV	III
	III	III
	III	III

Таблица 3 - Категории участков магистральных трубопроводов

Назначение участков трубопроводов	Категория участков при прокладке					
	газопроводов			нефтепроводов и нефтепродуктопроводов		
	под-земной	назем-ной	над-земной	под-земной	назем-ной	над-земной
несудоходные шириной зеркала воды в межень до 25м - в русловой части, оросительные и деривационные каналы	I	-	II	I	-	I





ветра и учитывается в расчете сооружений с периодом собственных колебаний более 0,25с.

Для надземных трубопроводов эстакадного типа выполняется проверочный расчет на резонанс, т.к. частота срыва вихрей с трубопровода может совпадать с собственной частотой его поперечных колебаний.

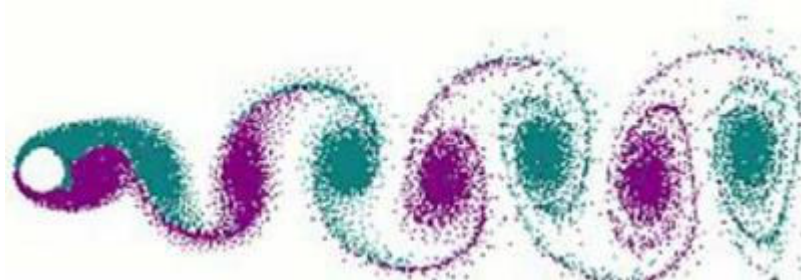


Рисунок 3 – Тепловая дорожка Кармана

Скоростной напор ветра следует определять на основе материалов местных метеостанций и данных изысканий. Величину скоростного напора ветра, полученную по материалам метеостанций, при расчете трубопроводов, расположенных над уровнем земли на высоте до 5 м включительно, разрешается снижать на 25 %. При отсутствии данных метеостанций и изысканий допускается в предварительных расчетах принимать скоростной напор в соответствии с [8].

Все трубопроводы крепятся к статичным объектам (несущие конструкции, земля). Соответственно элементы крепления должны воспринимать вес трубопроводов, предохранять их от возможных перемещений. Надземные трубопроводы эксплуатируются в условиях переменных температур. В результате суточного и сезонного изменения температуры воздуха меняется температура металла, а значит длина трубопровода. Поэтому опоры устанавливаются с возможностью продольного перемещения трубопровода.

Согласно [11] газораспределительная сеть – это система наружных газопроводов от источника до ввода газа потребителям, а также сооружения и технические устройства на них.

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
Из	Ли	№ докум.	Подп	Да			16

Наружный газопровод – в нашем случае, надземный газопровод, проложенный вне зданий.

Территория с особыми условиями использования, которая устанавливается вдоль трасс газопроводов и вокруг других объектов газораспределительной сети с целью обеспечения нормальных условий ее эксплуатации и исключения возможности ее повреждения, называется охранной зоной газопровода.

Согласно п.4.5 [11] Газораспределительные сети должны быть запроектированы и построены так, чтобы при восприятии нагрузок и воздействий в течение предполагаемого срока службы, были обеспечены необходимые по условиям безопасности их прочность, устойчивость и герметичность. Не допускаются температурные и другие деформации газопроводов (в том числе от перемещений грунта), которые могут привести к нарушениям их целостности и герметичности.

Выбор материала крепежных элементов трубопровода, согласно п.4.11 [11], следует производить с учетом давления газа, диаметра и толщины стенки газопровода, расчетной температуры наружного воздуха в районе строительства и температуры стенки трубы при эксплуатации, грунтовых и природных условий, наличия вибрационных нагрузок.

#### 1.4.2 Расчет нагрузок и воздействий на надземный трубопровод

Необходимость в моделировании ветровых нагрузок на трубопровод связана с тем, что в большепролетных сооружениях ветровые нагрузки и динамические ветровые воздействия могут носить определяющий характер при проектировании. Основная часть расчетов в программных комплексах базируется на нормативной базе [8] и математических расчетах.

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№	д о к у м.	П о д п	Д а		17

### 1.4.3 Расчет трубопровода на прочность

Расчет трубопроводов на прочность следует выполнять с учетом нагрузок и воздействий, возникающих при их сооружении, испытании и эксплуатации.

Расчетные нагрузки, воздействия и их возможные сочетания необходимо принимать в соответствии с требованиями СП 20.13330.

Нормативную ветровую нагрузку на единицу длины надземного трубопровода  $q_{вет}$ , действующую перпендикулярно его осевой вертикальной плоскости, следует определять по формуле

$$q_{вет} = (w_{стc} + w_{dyn})(d_b + 2t_i) \quad (4)$$

где статическую  $w_{стc}$  и динамическую  $w_{dyn}$  составляющие ветровой нагрузки следует определять по СП 20.13330, при этом значение  $d_b$  необходимо определять как для сооружения с равномерно распределенной массой и постоянной жесткостью. [10]

В [10] сказано, что трубопроводы балочных, шпренгельных, арочных и висячих систем с воспринимаемым трубопроводом распором должны быть рассчитаны на продольную устойчивость в плоскости наименьшей жесткости системы.

### 1.4.4 Оценка устойчивости трубопровода

Оценка устойчивости трубопровода в продольном направлении должна выполняться по условию (5):

$$S \leq \gamma_c N_{кр}, \quad (5)$$

где продольное критическое усилие  $N_{кр}$  должно определяться с учетом принятого конструктивного решения и в зависимости от условий взаимодействия трубопровода с опорами (трение на опорах, податливость опор и др.). [12]

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№	д о к у м.	П о д п	Д а		18

При скоростях ветра, вызывающих колебание трубопровода с частотой, равной частоте собственных колебаний, необходимо производить поверочный расчет трубопроводов на резонанс.

Расчетные усилия и перемещения трубопровода при резонансе следует определять, как геометрическую сумму резонансных усилий и перемещений, а также усилий и перемещений от других видов нагрузок и воздействий, включая расчетную ветровую нагрузку, соответствующую критическому скоростному напору.

#### 1.4.5 Расчет трубопровода на вибрацию

В работе [13] предусмотрен расчет трубопровода на вибрацию при проектировании, пусконаладочных работах и эксплуатации. Приведены рекомендации по определению амплитуды и частоты пульсаций давления рабочей среды, генерируемых оборудованием, и собственных частот колебаний трубопровода. Сформулированы условия отстройки трубопровода от резонанса. Даны критерии прочности трубопровода при наличии вибрации.

При проектировании учитывается возможность возникновения резонансных акустических колебаний при сближении значений генерируемых и собственных частот гидродинамических колебаний среды. Амплитудно-частотные характеристики акустических колебаний для сложных трубопроводных систем определяются расчетом или в процессе пусконаладочных работ. Примечание. Собственную частоту акустических колебаний трубопровода для прямолинейных участков рекомендуется определять по формулам:

Для трубы с акустически открытыми или закрытыми концами:

$$f_{ip} = \frac{0.5i \cdot C}{L}, \quad (6)$$

									Ли
									19
И з	Л и	№	д о к у м.	П о д п	Д а				

Для трубы с одним акустически открытым концом:

$$f_{ip} = \frac{0.5(2i - 1) \cdot C}{L}, \quad (7)$$

Где  $i = 1, 2, 3, \dots$ ,

$C$  – скорость звука, м/с,

$L$  – длина трубы, м.

Примерно пограничный слой - характерное для данной местности горизонтальное перемещение воздушных масс в слое атмосферы толщиной до 500 м от поверхности земли [14].

Структура (профиль) ППС характеризуется законом изменения среднего скоростного напора  $q(z)$  и параметров естественной турбулентности (пульсаций скорости и воздушных порывов) по вертикальной координате ( $z > 0$ ).

Местность, над которой формируется ППС, различают по климатическим районам и типам шероховатости поверхности. В [11] дана классификация территорий Российской Федерации по разновидностям ветровых районов и типам шероховатости местности, влияющим на профиль ППС.

#### 1.4.6 Расчетная ветровая нагрузка

$$q_{вет} = n_{вет} q_{вет}^H = n_{вет} (q_H^c + q_H^d) D_H 10^{-4} \quad (8)$$

Где  $n_{вет}$  – коэффициент ветровой перегрузки равный 1,2;

$q_H^c$  – нормативное значение статической составляющей кгс/м<sup>2</sup>;

$q_H^d$  – нормативное значение динамической составляющей кгс/м<sup>2</sup>;

Статическая нагрузка состоит из:

$$q_{Hx}^c = q_0 \cdot k(z_e) \cdot c_x, \quad (9)$$

направленной вдоль ветрового потока и действующей перпендикулярно:

$$q_{Hy}^c = q_0 \cdot k(z_e) \cdot c_y, \quad (10)$$

где  $q_0$  - ветровое давление на единицу поверхности (скоростной напор).

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Л и
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а		20

Таблица 4 – Нормативное значение ветрового давления

Ветровые районы (принимаются по рис.10)	Ia	I	II	III	IV	V	VI	VII
$q_0$ , кПа	0,17	0,23	0,30	0,38	0,48	0,60	0,73	0,85

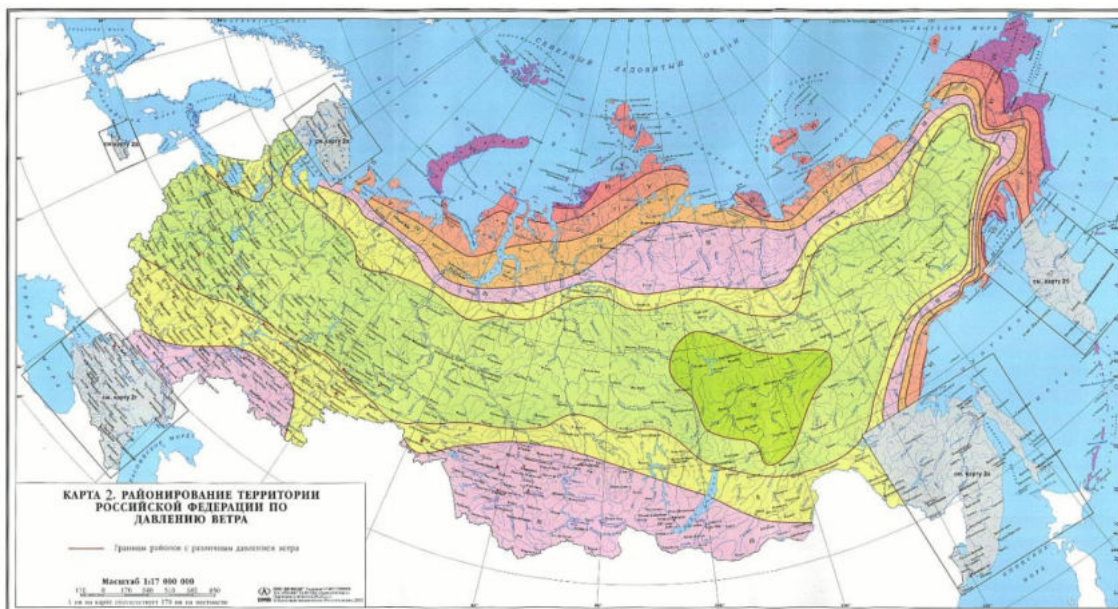


Рисунок 4 – Районирование территории Российской Федерации по давлению ветра

Для высот до 5м включительно коэффициент  $k$ , а также коэффициент  $\zeta$  пульсации давления ветра определяются по таблицам 4 и 5 соответственно.

Таблица 5 – Коэффициент изменения ветрового давления по высоте

Высота $Z_e$ , м	Коэффициент $k$ для типов местности		
	A	B	C
5	0,75	0,5	0,4
10	1,0	0,65	0,4
20	1,25	0,85	0,55
40	1,5	1,1	0,8
60	1,7	1,3	1,0
80	1,85	1,45	1,15
100	2,0	1,6	1,25
150	2,25	1,9	1,55
200	2,45	2,1	1,8
250	2,65	2,3	2,0
300	2,75	2,5	2,2



#### 1.4.7 Динамическая нагрузка

$$q_H^D = q_H^C \kappa \nu_K \xi_1 m_H, \quad (12)$$

Где,  $\kappa$  – коэффициент формы собственных колебаний трубопровода и изменения коэффициента пульсации по высоте;

$\nu_K$  – коэффициент пространственной корреляции пульсации скорости ветра по высоте и фронту трубопровода;

$m_H$  – коэффициент пульсации скоростного напора, зависящий от типа местности и высоты трубопровода над уровнем земли;

$\xi_1$  – коэффициент динамичности;

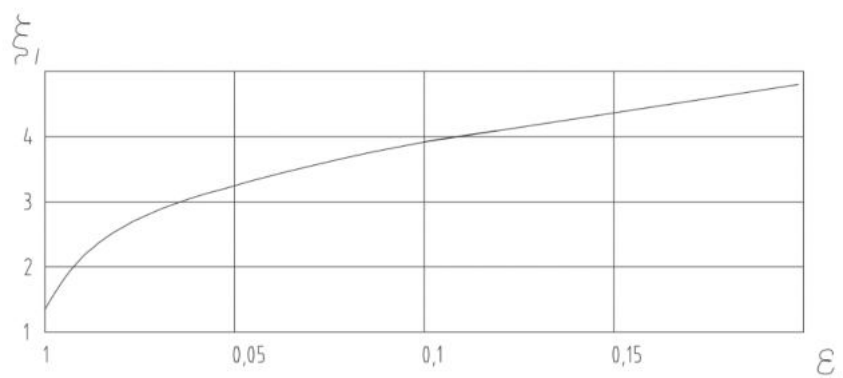


Рисунок 6 – График зависимости коэффициента динамичности от собственных колебаний трубопровода

$$\varepsilon_1 = \frac{T_1 \cdot v_{\text{вет}}}{1200}; \quad (13)$$

$$v_{\text{вет}} = 4 \sqrt{n_{\text{вет}} \cdot q_0}; \quad (14)$$

Период первой формы собственных колебаний:

$$T_1 = \frac{2\pi \cdot l_{\text{пр}}^2}{\alpha_1^2} \sqrt{\frac{m_{\text{т.п}}}{EI}}, \quad (15)$$

Где  $\alpha_1$  – коэффициент условий закрепления участка трубы для 1 формы собственных колебаний;

$m_{\text{т.п}} = \frac{q_{\text{т.п}}}{g}$  – масса погонного метра трубы с продуктом.

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
Из	Ли	№ докум.	Подп	Да			23



Таблица 6 – Зависимость частоты колебания от условий закрепления


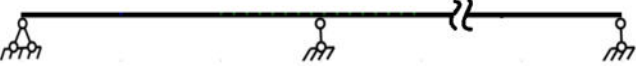
Условия закрепления	Число равных пролетов	Низшая частота $\alpha_{1Н}^2/2\pi$	Высшая частота $\alpha_{1В}^2/2\pi$
Шарнирное опирание концов:	1	1,57	1,57
Однопролетная схема	2		2,46
 Многопролетная схема	3		2,94
	4		3,17
	5		3,30
	6		3,37
	$\infty$		3,56
			

Таблица 7 – Коэффициент пульсаций давления ветра по высоте

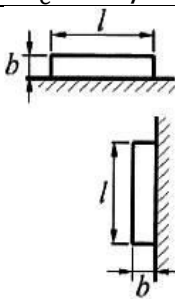
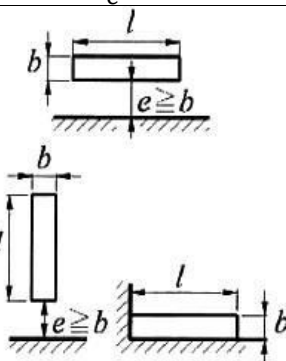
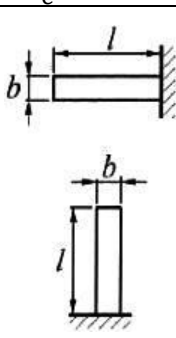
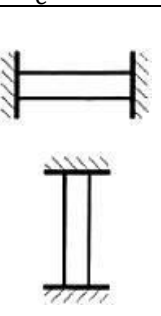
Высота $z_e$ , м	Коэффициент пульсаций давления ветра $\zeta$ для типов местности		
	А	В	С
5	0,85	1,22	1,78
10	0,76	1,06	1,78
20	0,69	0,92	1,50
40	0,62	0,80	1,26
60	0,58	0,74	1,14
80	0,56	0,70	1,06
100	0,54	0,67	1,00
150	0,51	0,62	0,90
200	0,49	0,58	0,84
250	0,47	0,56	0,80
300	0,46	0,54	0,76

Расчетную нагрузку мы сравниваем с максимальными внутренними усилиями конструкции, которые превышать она не должна.

Аналогично проходит расчет на резонансное вихревое возбуждение:

Для трубопроводов, удовлетворяющих условию  $\lambda_e > 20$ , необходимо проводить их поверочный расчет на резонансное вихревое возбуждение; где относительное удлинение элемента  $\lambda = l/b$ .

Таблица 8 – Эквивалентная гибкость элемента

$\lambda_e = \lambda/2$	$\lambda_e = \lambda$	$\lambda_e = 2\lambda$	$\lambda_e = \infty$
			
Примечание – l, b- соответственно максимальный и минимальный размеры сооружения или его элементов плоскости, перпендикулярной направлению ветра.			

Критические скорости ветра  $v_{cr,i}$ , при которых происходит резонансное вихревое возбуждение по i-й собственной форме колебаний, определяются по формуле

$$v_{cr,i} = \frac{k_v f_i d}{St}, \text{ м/с} \quad (16)$$

Где  $f_i$ , Гц, - собственная частота колебаний по i-й изгибной собственной форме;

$d$ , м, - поперечный размер сооружения;

$St$  - число Струхала поперечного сечения, искомое опытным путем или по справочнику; для круглых поперечных сечений  $St=0,2$ .

Значение коэффициента  $k_v$ , учитывающего эффект захвата собственной частоты колебаний, выбирается из диапазона  $0,9 < k_v < 1,1$  из условия реализации наихудшего варианта нагружения.

Резонансное вихревое возбуждение не возникает в том случае, если

$$v_{cr,i} > v_{\max}(z_{\text{ЭК}}), \quad (17)$$

где  $v_{\max}(z_{\text{ЭК}})$  - максимальная скорость ветра на уровне  $z_{\text{ЭК}}$ , определяемая по формуле

$$v_{\max}(z_{\text{ЭК}}) = 1,5 \sqrt{k(z_{\text{ЭК}}) \cdot q_0} \quad (18)$$

где  $q_0$  определяется по таблице 4;

$k(z_{\text{ЭК}}) = k(z_e)$  по таблице 7.

									Л и
									25
И з	Л и	№	д о к у м.	П о д п	Д а				

#### 1.4.8 Расчет на прочность и устойчивость

Согласно [10] нормативные сопротивления растяжению (сжатию) металла труб и сварных соединений  $R_1^H$  и  $R_2^H$  принимают равными соответственно минимальным значениям временного сопротивления и предела текучести, принимаемым по стандартам на трубы.

Расчетные сопротивления растяжению (сжатию) следует определять по формулам:

$$R_1 = \frac{R_1^H \cdot m}{k_1 k_H}, \quad (19)$$

$$R_2 = \frac{R_2^H \cdot m}{k_2 k_H}, \quad (20)$$

Где  $m$  – коэффициент условий работы трубопровода;

$k_1, k_2$  – коэффициенты надежности по материалу;

$k_H$  – коэффициент надежности по ответственности трубопровода.

Надземные трубопроводы по [10] проверяют на прочность, продольную устойчивость и выносливость (колебание трубопровода в ветровом потоке).

В п.12.5 [] проверка трубопровода на прочность определяется наличием или отсутствием резонансных колебаний трубопровода в ветровом потоке. Так, в случае наличия резонансных колебаний расчет трубопровода на прочность ведется по формуле (21):

$$|\sigma_{пр}| \leq \psi_2 \cdot R_2, \quad (21)$$

Где  $\sigma_{пр}$  - максимальные продольные напряжения в трубопроводе от расчетных нагрузок и воздействий, МПа;

$\psi_2$  - коэффициент, учитывающий двусное напряженное состояние металла труб.

Авторы статьи [15] обратили внимание на то, что традиционные методы расчёта надежности многопролетных конструкций недостаточно эффективны и предложили свой вычислительный метод, основанный на теории объемных

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а			26

соотношении. В статье же [16] предложен новый способ лабораторных испытаний труб на усталость при резонансном циклическом изгибе с частотой, близкой к первой собственной частоте испытываемого образца. Авторами статьи [17] предложен усовершенствованный резонансный анализ надежности трубопроводов, с помощью модели активного обучения Киринга, в ходе своих исследований они нашли новый метод анализа резонансной надежности, что позволило им дать рекомендации для оптимального проектирования многопролетных конструкций.

### 1.5 Существующие программы

В 2003 году на виртуальном рынке появился украинский программный комплекс Selena для расчета и проектирования строительных конструкций. В комплексе можно составить расчетную схему любой степени сложности, произвести расчет на прочность и устойчивость, подобрать оптимальные параметры системы. Программа производит расчеты устойчивости стержней и оболочек, а также динамические расчеты: гармонические вынужденные колебания, произвольные динамические и стационарные воздействия, меняющиеся по заданному закону, температурные перепады, ветровые и сейсмические воздействия.

Многие расчетные программные комплексы позволяют загружать анализируемые модели из системы автоматизированного проектирования (САПР). Геометрию стержневой системы можно формировать во всем известной САПР AutoCAD, модель экспортировать в графический препроцессор SOFiSTiK (1987г., Германия, МКЭ), задавая характеристики поперечных сечений с использованием нормативных документов, действующих на территории РФ, а затем производить расчет, например, в продуктах Autodesk. Расчет таких ВМ будет максимально автоматизирован за счет работы с базами данных СП. Однако, в случае с аэродинамическим

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№	д о к у м.	П о д п	Д а		27

резонансом трубопровода мы вынуждены прибегнуть к манипуляциям со специально написанной программой в MatLAB.

Система MatLAB создана фирмой MathWork Inc. (США, г. Нейтик, штат Массачусетс). Активно применяться она начала в конце 80-х за счет возможности оформления результатов расчетов в наглядном виде.

Система MatLAB (сокращение от MATrix LABoratory - матричная лаборатория) представляет собой интерактивную компьютерную систему для выполнения инженерных и научных расчетов, ориентированную на работу с массивами данных. Программа для расчета может быть написана на языках FORTRAN, С и С++.

Система поддерживает выполнение операций с векторами, матрицами и массивами данных, поддерживает решение нелинейных уравнений, построение разнообразных видов графиков и трехмерных поверхностей.

В базовый набор слов системы входят: спецзнаки; знаки арифметических и логических операций; арифметические, тригонометрические и некоторые специальные математические функции; векторные и матричные функции; операторы построения графиков в декартовой и полярной системах координат, трехмерных поверхностей и т.п. То есть MatLAB предоставляет пользователю большой набор готовых средств (более половины из них – внешние расширения).

Поздние версии MatLAB позволяют интегрировать ее с текстовым редактором Word. MatLAB, например, оформлять инженерные и научные отчеты и статьи с включением в них сложных расчетов и выводом графиков.

## 1.6 Недостатки существующих методов гашения колебаний

Существуют *пассивные системы* гашения колебаний, в которых гаситель эффективен в узкой полосе частот, а механизма, регулирующего эти характеристики, нет. *Активные системы* виброгашения же имеют чувствительные, управляющие и исполнительные элементы, которые

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
Из	Ли	№ докум.	Подп	Да			28









(рисунок 10). Моделируется она гармоническим законом. Гармонические колебания характеризуются частотой и амплитудой. То есть нагрузка имеет синусоидальный или косинусоидальный вид.

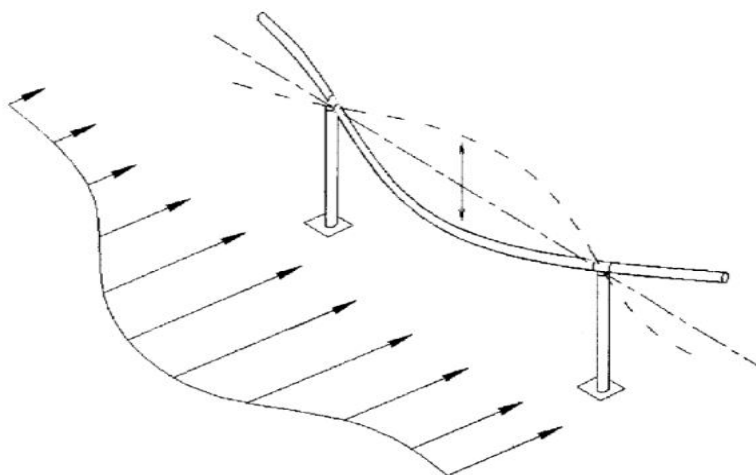


Рисунок 10 – Схема деформации трубопровода при воздействии ветрового потока

В патенте [20] представлена изучаемая полезная модель гасителя аэродинамических колебаний. Если в пролете между опорами трубопровода установить заявленное устройство гашения колебаний (свободно натянутый трос между муфтой на трубопроводе и фундаментным блоком), то оно не будет препятствовать перемещению трубы вниз, и трубопровод деформируется с волновым прогибом между опорами, как на рисунке 9 (низшая собственная форма колебаний).

При аэродинамическом воздействии, направленном вверх, трубопровод натягивает трос, который начинает работать с фундаментным блоком как дополнительная опорная связь. Что приводит к скачкообразному изменению расчетной схемы трубопровода и собственной формы колебаний трубопровода.

В каждом цикле колебаний устройство то выключается из работы, то включается, как односторонняя связь. При этом, также циклически, должна происходить смена форм колебаний трубопровода.

Аспирантом ЮУрГУ Тазеевым Н.Т. был проведен эксперимент, в котором гибкая балка подвергалась вибрационной нагрузке от легкого

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
Из	Ли	№ докум.	Подп	Да			32

электродвигателя, с помощью которого моделировалось аэродинамическое воздействие. Параметры расчетной динамической модели: сечение - 50×4 мм, длина 2 м, односторонняя связь в виде троса, в рамках эксперимента принимаемого нерастяжимым. Масса двигателя – 0,36 кг, угловая частота двигателя, вызывающая резонанс  $\theta = 9$  рад/с, амплитуда активной составляющей вертикальной центробежной силы  $P_0 = 5,3$  кг. Целью эксперимента было определить форму колебания деформированной оси балки в момент включения в работу ОС (троса); показать, что форма собственных колебаний модели в состоянии МДС является симметричной вследствие отсутствия поворотов центрального сечения в точке крепления ОС к балке.

Основная предпосылка эксперимента заключалась в том, что переходной режим балки при включении ОС в работу (трос находится в натянутом состоянии), длится очень короткий промежуток времени (сотые или тысячные доли секунды), что во много раз меньше, чем пребывание расчетной модели в состоянии БМ, когда ОС отключена. Поскольку в состоянии БМ собственная форма колебаний оси балки является симметричной, то при переходе в состояние МДС собственная форма колебаний из-за кратковременности пребывания модели также останется симметричной. Иначе говоря, вследствие инерции движения балки в новом состоянии система не успевает сменить тип симметрии формы колебаний.

Для того, чтобы такой переход от симметричной к кососимметричной форме состоялся необходимо длительное пребывание балки в состоянии МДС, которое по времени может соответствовать нескольким периодам (или даже десяткам периодов) собственных колебаний системы. Только в этом случае, когда система из переходного режима перейдет в установившийся режим, станет возможным переход к кососимметричной форме колебаний, которая в энергетическом плане является более оптимальной, так как соответствует основному тону колебаний расчетной модели балки в состоянии МДС.

На рисунке 11 дано фото экспериментальной установки в момент натяжения ОС (рисунок 11 а) и выключения из работы (рисунок 11 б). На

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№	д о к у м.	П о д п	Д а		33

обоих рисунках видно, что упругая линия балки в точке крепления троса сохраняет свою симметрию относительно вертикальной оси, а центральное сечение балки не поворачивается относительно горизонтали. На рисунке 12 представлены частотные характеристики колебаний БМ (рисунок 12 а) и МДС (рисунок 12 б), фиксируемые при помощи специального приложения Vibration analysis. Частота колебаний БМ составляет 1,62 Гц, максимальное значение амплитуды виброперемещений 62,94 мм, ускорений – 6,06 мм/с<sup>2</sup>. Частота колебаний МДС – 4,94 Гц, Амплитуда виброперемещений 2,27 мм, ускорений – 23,59 мм/с<sup>2</sup>.

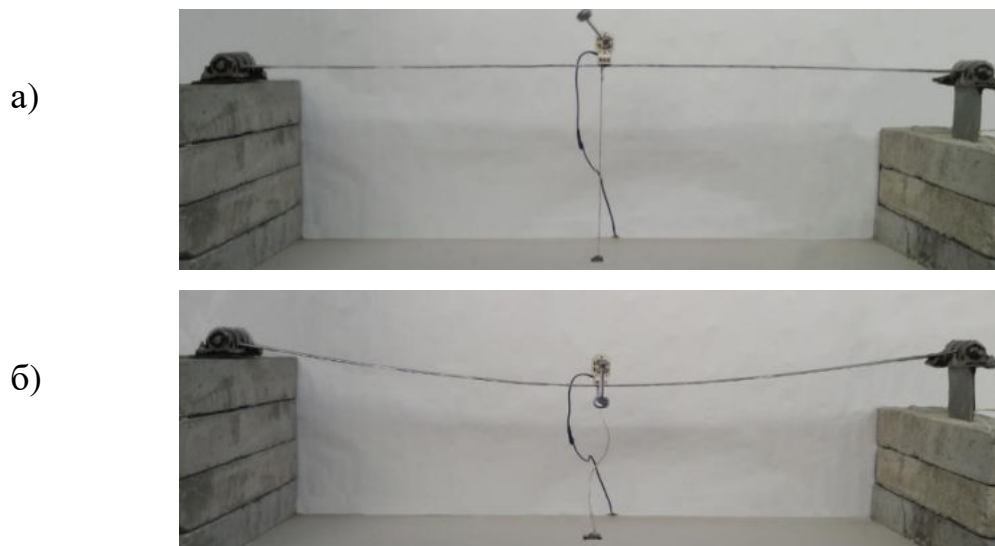
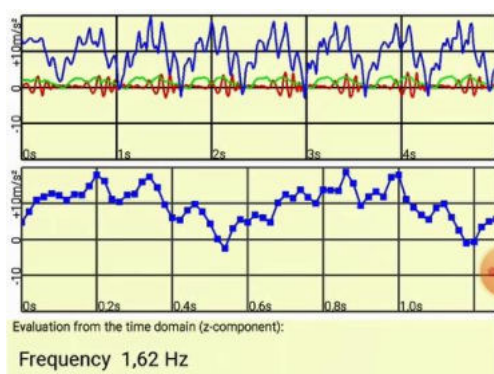


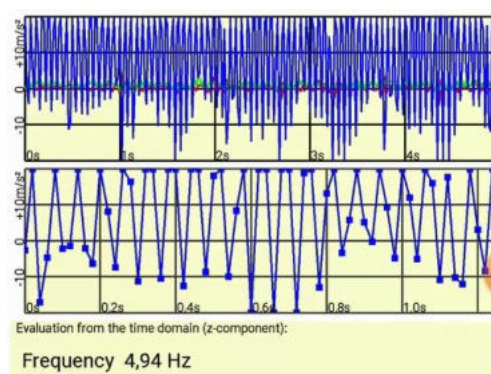
Рисунок 11 – Расчетная модель балки:

а – в состоянии натяжения троса;

б – в состоянии выключенного троса



а)



б)

Рисунок 12 – Характеристики колебаний установки: а) БМ; б) МДС

									Л и
									34
И з	Л и	№	д о к у м.	П о д п	Д а				



отметить, что в состояниях БМ и МДС расчетная модель будет иметь различные матрицы жесткости, так как это обусловлено различием расчетных схем.

Данные эксперимента, описанного в разделе 2, позволяют сделать вывод, что центральная часть пролета балки в момент натяжения троса имеет конфигурацию, изображенную на рисунке 13 в. Это означает, что центральное сечение балки в процессе колебаний перемещается поступательно без поворота. При этом участок i-k на расчетной схеме имеет вид балки с опорным закреплением по схеме «шарнир – заделка» (рисунок 13 д). Если учитывать податливость троса, то сечение k будет превышать уровень горизонтального пунктира и тогда заделка на данном участке становится скользящей в вертикальном направлении.

Так как жесткость балки на рисунке 13 д при симметричной форме колебаний выше жесткости шарнирной балки (рисунок 13 г) при кососимметричной форме колебаний, то перемещения в первой балке будут ниже, чем в шарнирной балке.

Поэтому устройство гашения колебаний при ветровом резонансе по симметричной форме колебаний в состоянии МДС будет более эффективным: уменьшатся прогибы не только в центральном пролете, где установлена ОС, но и в соседних пролетах расчетной модели газопровода. Это, в свою очередь, позволит увеличить (оптимизировать) шаг расстановки устройств гашения колебаний по сравнению с вариантом расчета при кососимметричной форме колебаний.

Для того, чтобы переход от симметричной к кососимметричной форме состоялся необходимо длительное пребывание балки в состоянии МДС, которое по времени может соответствовать нескольким периодам (или даже десяткам периодов) собственных колебаний системы. Только в этом случае, когда система из переходного режима перейдет в установившийся режим, станет возможным переход к кососимметричной форме колебаний, которая в

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Ли	№ д о к у м.	П о д п	Д а			36

энергетическом плане является более оптимальной, так как соответствует основному тону колебаний расчетной модели балки в состоянии МДС.

По результатам проведенных исследований была подготовлена в соавторстве с Потаповым А.Н., Тазеевым Н.Т., и Орловой О.Г. статья (УДК 624.04:539.3:534 «Анализ колебаний надземного газопровода при ветровом резонансе»). Статья направлена для публикации в журнал «Вестник ЮУрГУ» и приведена в приложении 4.

### 3.1 Расчетный алгоритм

Математическое моделирование процесса вынужденных колебаний расчетной динамической модели надземного газопровода выполнялось методом временного анализа, разработанного для конечномерной системы с учетом внутреннего трения, называемую далее дискретной диссипативной системой (ДДС) [14]. Уравнение движения упругой ДДС в рамках линейной модели вязкого сопротивления (22) и начальные условия (23) имеют вид:

$$M\ddot{Y}(t) + C\dot{Y}(t) + KY(t) = P(t), \quad (22)$$

$$Y_0 = Y(t_i), \dot{Y}_0 = \dot{Y}(t_i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots), \quad (23)$$

где  $M = \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$ ,  $C = C^T$ ,  $K = K^T$  – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости;

$Y(t)$ ,  $P(t)$  – векторы перемещений и внешней нагрузки; индекс  $n$  означает число степеней свободы расчетной модели.

Аэродинамическое действие ветровой нагрузки принято по закону синуса:

$$P(t) = P_0 \cdot \sin(\theta t), \quad (24)$$

где:  $P_0$  – вектор амплитуд периодической нагрузки;

$\theta$  – число вихрей, сбегających с цилиндрической поверхности трубы за  $\pi$  секунд (круговая частота возмущающей нагрузки).

Характеристическое уравнение, соответствующее однородному дифференциальному уравнению (22), представляет собой по физическому

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№	д о к у м.	П о д п	Д а		37

смыслу уравнение движения собственных форм колебаний и имеет вид матричного квадратного уравнения (МКУ):

$$MS^2 + CS + K = 0 \quad (25)$$

В уравнении (25) искомая матрица  $S$  является матрицей внутренних (спектральных) динамических характеристик ДДС. Переход от однородного уравнения, соответствующего (22), к характеристическому МКУ (25) выполняется с помощью матричной экспоненциальной функции  $\Phi(t) = e^{St}$ . Матрица  $\Phi(t)$  является фундаментальной, если  $S$  удовлетворяет МКУ (21).

Решение МКУ в аналитической форме записи представляется в виде корневой пары:

$$S_{1,2} = M^{-1}(-C + V \pm U)/2, \quad (26)$$

где  $V = -V^T$ ,  $U = U^T$  – кососимметрическая и симметрическая матрицы, связанные между собой системой матричных соотношений.

Эти соотношения реализованы в программе по решению уравнения (25) в системе Matlab (текст программы приведен в приложении 2). Поскольку колебания конструктивно нелинейной ДДС с учетом работы ОС представляют упругий процесс, то элементы матрицы  $V$  всегда вещественные, а элементы  $U$  – мнимые. По этой причине матричные корни в (26) являются комплексно-сопряженными [21]:  $S_1 = S$ ,  $S_2 = \bar{S}$ .

Уравнение реакции расчетной модели записывается в виде интеграла Дюамеля ( $t \geq t_i$ ) [22]:

$$Y(t) = 2Re\{\Phi(t - t_i)U^{-1}M[-\bar{S}Y_0 + \dot{Y}_0] + U^{-1}I(t)P_0\}, \quad (27)$$

где

$$I(t) = \int_{t_i}^t \Phi(t - \tau)^T \sin(\theta\tau) d\tau \quad (28)$$

– интеграл с переменным верхним пределом; нижний предел интегрирования  $t_i$  соответствует времени включения / выключения ОС.

Первое слагаемое в уравнении реакции (27) содержит реакцию при свободных колебаниях, вызываемую векторами начальных условий (23),

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а		38





Третье, в уравнениях (27) и (30) проводится замена индексов  $(i-1)$  на  $i$ , что соответствует колебаниям модели на интервале  $t \in [t_i, t_{i+1}]$ .

И, наконец, четвертое, проводится смена начальных условий в уравнении реакции при свободных колебаниях (27): т.е. в качестве векторов начальных условий (23) принимаются векторы перемещений и скоростей, значения которых вычисляются по реакции системы в конце предыдущего интервала времени  $t \in [t_{i-1}, t_i]$ . В целом, реакция конструктивно нелинейной модели имеет квазипериодический характер и сопровождается включением/выключением ОС при соответствующих критических временных точках  $t_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ).

### 3.2 Численная реализация задачи. Анализ результатов

Расчетная схема (рисунок 13) газопровода имеет вид многопролетной неразрезной балки с. При построении РДМ каждый пролет разбивался на 4 элементарных участка длиной  $a = l / 4$  с расположением точечных масс в узловых сечениях (рисунок 14), число степеней свободы системы  $n = 75$ .

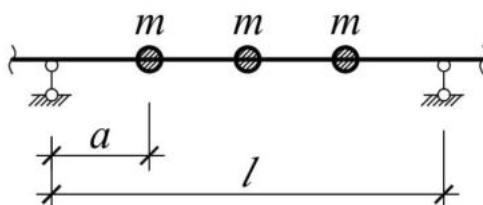


Рисунок 14 – Пролет расчетной модели с тремя точечными массами

#### 3.2.1 Характеристика объекта и района строительства

В качестве изучаемого объекта выбран газопровод с наружным диаметром 150 мм рассчитан на рабочее давление 5,0 МПа. Протяженность участка трассы газопровода составляет 3 км, в том числе переход через автодорогу на пути к селу Вознесенка Челябинской области.

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а		40











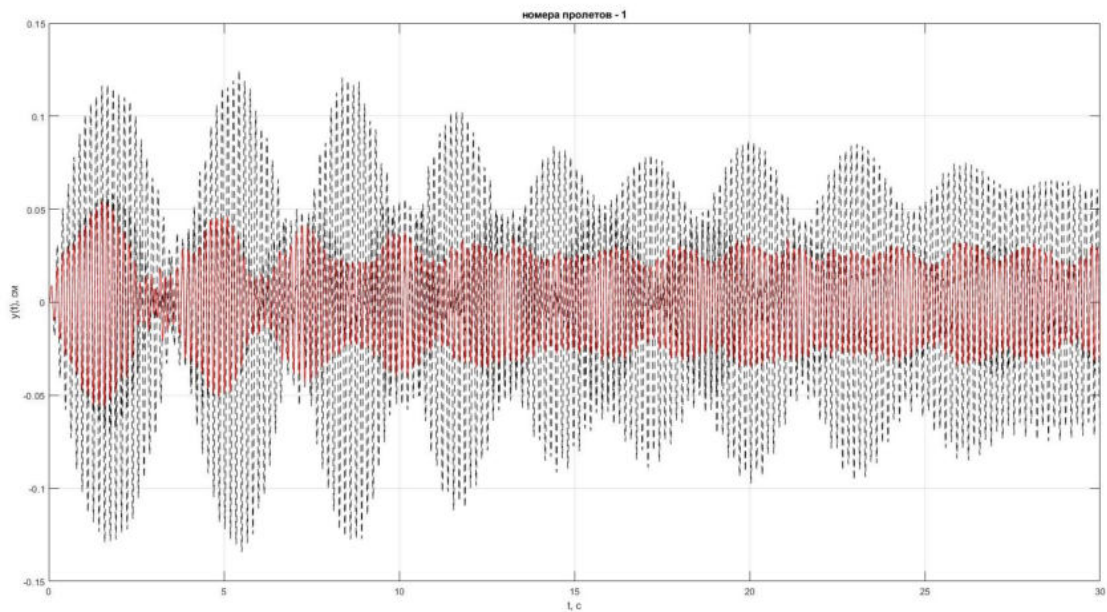


Рисунок 18 – Осциллограмма перемещений средних сечений первого и последнего пролетов расчетной модели на интервале 30 с:  
красная кривая – по симметричной форме; пунктир – по кососимметричной форме

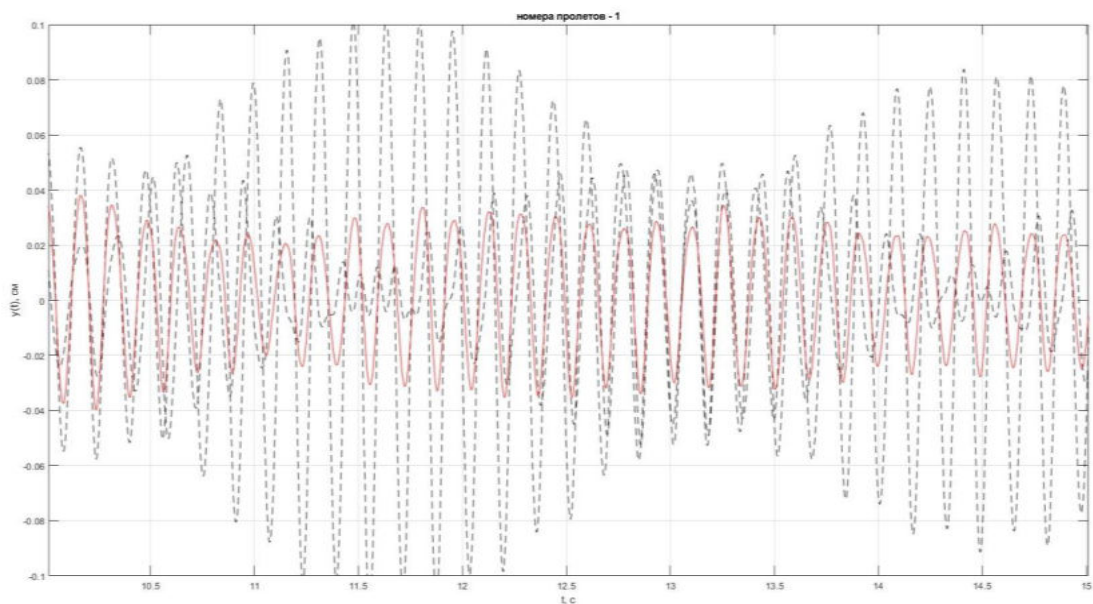


Рисунок 19 – Фрагмент осциллограммы перемещений средних сечений первого и последнего пролетов расчетной модели:  
красная кривая – по симметричной форме; пунктир – по кососимметричной форме









#### 4 Определение эффективности устройства

Для решения задачи поставленной в начале выпускной квалификационной работы необходимо определить число устройств гашения на одном километре трассы газопровода. Для этого необходимо определить радиус действия  $R$  одного устройства (рисунок 24).

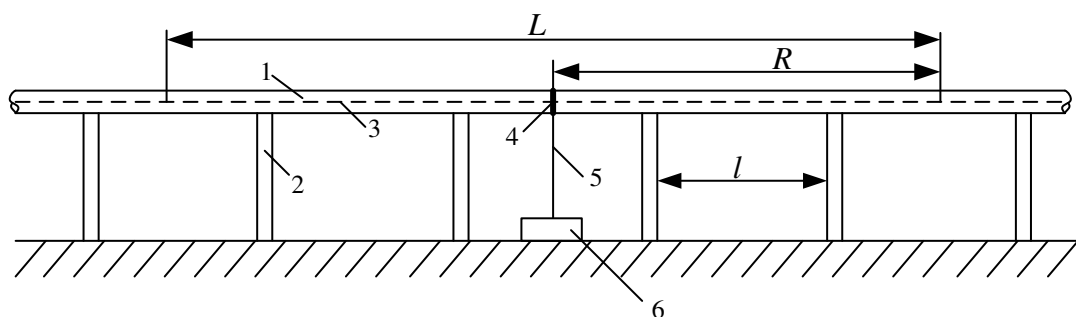


Рисунок 24 – Зона действия одного устройства гашения колебаний трубопровода:

1 – трубопровод; 2 – опора; 3 - ось трубопровода; 4 – хомут; 5 – трос; 6 – блок бетонный;  $l$  – расстояние между опорами;  $R$  – радиус действия одного устройства;  $L$  – рабочий диапазон эффективного гашения колебаний

При помощи программы построим таблицу максимальных перемещений средних сечений  $Y$  (таблица 11) в зависимости от количества пролетов газопровода, для определения наибольшего числа пролётов с предельно допустимыми значениями прогибов.

Таблица 11 – Максимальные перемещения средних сечений газопровода

Число пролетов	Максимальные перемещения, см	
	Симметричная форма	Кососимметричная форма
$m = 3$	0.021	0.007
$m = 5$	0.028	0.065
$m = 7$	0.054	0.148
$m = 9$	0.061	0.156
$m = 11$	0.138	0.281

m = 13	0.151	0.398
m = 15	0.219	0.492
m = 17	0.202	0.583
m = 19	0.308	0.698
m = 21	0.235	0.778
m = 23	0.311	0.792
m = 25	0.369	0.981

Допустимые значения перемещений рассчитаем по формуле:

$$[Y] = \frac{1}{1500} \cdot l, \quad (28)$$

где  $l$  – длина пролета между опорами трубопровода.

$$[Y] = \frac{1}{1500} \cdot 600 = 0,4 \text{ см}$$

Соответственно допустимые значения перемещений средних сечений газопровода диаметром 150 мм и длиной пролета между опорами 6 м составляют 0,4 см. Данное максимальное значение перемещений достигается при  $m = 25$  (симметричная форма деформирования оси трубопровода) и  $m = 13$  (кососимметричная форма деформирования оси трубопровода).

Рассчитаем длину, в пределах которой максимальные амплитуды не будут превышать допустимых значений перемещений:

$$L = l \cdot m; \quad (29)$$

$$L_{\text{сим}} = 6 \cdot 25 = 150 \text{ м};$$

$$L_{\text{к/с}} = 6 \cdot 13 = 78 \text{ м}$$

Можем сделать вывод, что при симметричной форме колебаний одно устройство работает в пределах 150 м, его радиус действия равен 75 м, при кососимметричной форме колебаний одно устройство работает в пределах 78 м, а радиус его действия равен 39 м.

Теперь можем рассчитать необходимое количество устройств гашения колебаний для эффективной работы системы.

$$q = \frac{1000}{L}; \quad (30)$$

$$q_{\text{сим}} = \frac{1000}{150} = 6,6 \approx 7 \text{ шт};$$

$$q_{\text{к/с}} = \frac{1000}{78} = 12,8 \approx 13 \text{ шт}$$

Для симметричной формы деформирования оси трубопровода на 1 км трубопровода необходимо 7 устройств для гашения колебаний. Для кососимметричной формы деформирования оси трубопровода на 1 км трубопровода необходимо 13 устройств для гашения колебаний.

### 5 Расчет экономической эффективности – на 1 км трассы газопровода

Рассмотренное в выпускной квалификационной работе устройство гашения колебаний состоит из бетонного блока 40х40х40 см, троса - 1,5 м, хомута толщиной 5 мм и размером 710 мм. Для определения экономической эффективности предлагаемого устройства проведем расчет стоимости установки одного виброгасителя.

Установка рабочей установки состоит из следующих видов работ:

1. Установить на земле опалубку –  $(0,64\text{м}^2) \times 7 = 4,48\text{м}^2$ ;
2. Согнуть из арматурного стержня (7 штук по  $l=2,8\text{м}$   $d=10\text{мм}$ ) петлю для крепления троса к блоку и установить в опалубку;
3. Залить бетонный блок (семь кубов  $0,4 \times 0,4 \times 0,4\text{м}$  по  $0,064\text{м}^3$ ) бетоном класса В25 –  $0,448\text{м}^3$ ;
4. В стальной полосе  $150 \times 750 \times 5\text{мм}$  просверлить 6 отверстий согласно схеме:

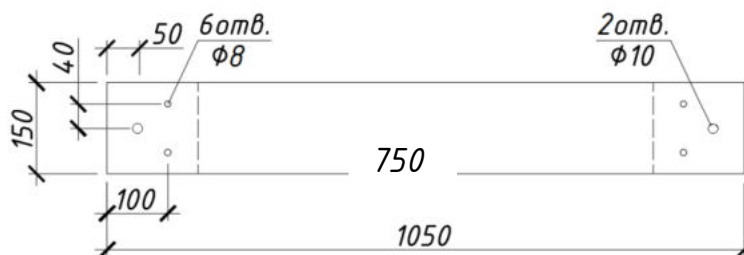


Рисунок 25 – Лист стальной для изготовления хомута

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
Из	Ли	№ докум.	Подп	Да		52

5. Согнуть из стальной полосы хомут в центре пролета трубопровода диаметром гйба 155мм. Стянуть болтами

6. Стальной канатный трос  $l=2,8\text{м}$   $d=7,6\text{мм}$  закрепить между хомутом и петлей блока без натяжения. Для чего свить петли на концах троса.

Составим ведомости из расчета выполнения работ бригадой из двух работников и доставки бетонной смеси миксером минимального объема.

Таблица 12 – Ведомость объемов работ для 1го устройства

Наименование	Объем	Стоимость
Транспортирование бетона	1 миксер	584р
Монтаж/демонтаж опалубки	2 человека	500р
Гибка/установка петли для бетонного блока		
Сверление отверстий в стальном листе		
Гибка хомута из стальной полосы		
Закрепление троса петлями		
Итого: 1 084р		

Таблица 13 – Ведомость материалов для 1го устройства

Наименование	Объем	Стоимость
Бетон класса В25	0,064м <sup>3</sup>	230р
Арматурные стержни $L=2800\text{мм}$ $d=10\text{мм}$	1шт.	250р
Лист $\frac{\text{Б } 5 \times 50 \text{ ГОСТ } 19903-2015}{\text{С245иГОСТ } 27772-2015} L=750\text{мм}$	1шт.	1070р
Стальной канат 2800х7,6мм	1,5м	100р
Деревянная опалубка	0,64м <sup>2</sup>	350р
Метизы(2 болта с гайками и упаковка гвоздей)	-	500р
Итого: 2500р		

Таким образом стоимость установки 7ми устройств гашения колебаний газового трубопровода 150х2 по симметричной форме на 1км трассы составит 25 088р, а стоимость 13ти устройств гашения колебаний газового трубопровода 150х2 по кососимметричной форме на 1км трассы – 46 592р.

## ВЫВОД

Экспериментальным путем показано, что для модели «балка – трос», находящейся под действием вибрационной нагрузки, при натяжении троса упругая линия балки сохраняет симметричную форму колебания. На основании экспериментальных исследований предложена более совершенная математическая модель колебаний конструктивно-нелинейной системы «надземный газопровод – односторонняя связь». Согласно этой модели, динамическая реакция системы определялась для симметричной формы деформирования оси надземного газопровода во всех состояниях системы. Причем в выключенном состоянии ОС форма деформирования принималась по форме собственных колебаний, соответствующей основному тону БМ, а в состоянии включения ОС в работу системы форма деформирования принималась по собственной форме, соответствующей первому обертому МДС. Эффективность предложенной математической модели иллюстрируется на рассмотренном численном примере. Так на 1 км трубопровода диаметром 150мм и толщиной стенки 2мм понадобится 7 устройств для гашения колебаний по симметричной форме и 13 устройств для гашения по кососимметричной форме.

**Выводы:** 1. Предложенная математическая модель колебаний обеспечивает более эффективную работу конструктивно-нелинейной системы «надземный газопровод – односторонняя связь», по сравнению с моделью, основанной на кососимметричной форме колебаний.

2. По оценкам прогибов, показано, что последние уменьшаются не только в центральном пролете, где установлена ОС, но и в соседних пролетах расчетной модели газопровода. Это позволяет для допустимого уровня предельных перемещений расширить границы протяженности расчетной модели за счет увеличения числа ее пролетов.

3. Открывается возможность для увеличения (оптимизации) шага расстановки устройств гашения колебаний по сравнению с вариантом расчета

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Л и
И з	Л и	№. д о к у м.	П о д п	Д а		54

при кососимметричной форме колебаний, сокращению числа устройств на один километр трассы надземного газопровода и соответствующей экономии материалов и затрат, идущих на изготовление одного устройства гашения.

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Л и
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а		55



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бисплингхофф, Р.Л. Аэроупругость: монография / Р.Л. Бисплингхофф, Х. Эшли, Р.Л. Халфман. – М.: ИЛ, 1958. – 799 с.;
- 2 Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – М.: Изд-во Наука, 1967. – 420 с.;
- 3 Ron Frend Piping Vibration: Causes – Head of Facilities Training, 2020. 5p.;
- 4 Resonance and cancellation phenomena in two-span continuous beams and its application to railway bridges / M. D. Martínez-Rodrigoa, A. Anderssonb, C. Pacostebc, R. Karoumib – Engineering Structures Volume 222, 1 November 2020, 111103;
- 5 Analysis on two types of internal resonance of a suspended bridge structure with inclined main cables based on its sectional model / Yi Huiac Hou, Jun Kangb Siu, Seong Lawa Zheng, Qing Chenc – European Journal of Mechanics - A/Solids Volume 72, November–December 2018, Pages 135-147;
- 6 Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы / П. С. Ланда. - Изд. 2-е. - Москва : URSS, 2010. - 359 с.;
- 7 Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс] – [URL:] <https://bigenc.ru/physics/text/1799358>;
- 8 СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия – Введ. 2017-06-04. - М.: Стандартинформ, 2018. – 95с.;
- 9 Three-dimensional parametric resonance of fluid-conveying pipes in the pre-buckling and post-buckling states / Qian Li Wei, Liu Kuan Lu, ZhufengYue – International Journal of Pressure Vessels and Piping Available online 30 December 2020, 104287;
- 10 СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы – Введ. 1986-01-01. - М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 63с.;
- 11 СП 62.13330.2011 Газораспределительные системы – Введ. 2003-07-01. - М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 70с.;

					АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а		56

- 12 СП 33.13330.2012 Расчет на прочность стальных трубопроводов – Введ. 2013-01-01. – М.: ФГУП ЦПП, 2011. – 28с.;
- 13 СА 03-003-07 Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов / Российская ассоциация экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности – Москва, 2007. – 71с.;
- 14 ГОСТ 24346-80 Вибрация. Термины и определения – Введ. 1981-01-01. - М.: Стандартиформ, 2010. – 26с.;
- 15 Ruixing Wang, Xiaojun Wang, Lei Wang, Xianjia Chen / Efficient Computational Method for the Non-Probabilistic Reliability of Linear Structural Systems – Acta Mechanica Solida Sinica Volume 29, Issue 3, June 2016, Pages 284-299;
- 16 Fatigue Testing of Large-Scale Steel Structures in Resonance with Directional Loading Control / Jeroen Van Wittenberghe, Alexis Coste – Procedia Structural Integrity Volume 19, 2019, Pages 41-48;
- 17 Improved resonance reliability and global sensitivity analysis of multi-span pipes conveying fluid based on active learning Kriging model / Qing Guoa, Yongshou Liua, Yuzhen Zhaoa, Baohui Lib, Qin Yaoa – International Journal of Pressure Vessels and Piping Volume 170, February 2019, Pages 92-101;
- 18 Перельмутер А.В. Элементы теории систем с односторонними связями // Обзоры по вопросам проектирования металлических конструкций. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1969. – Вып. 3. – 127 с.;
- 19 Потапов, А.Н., Анализ колебаний надземного газопровода при ветровом резонансе / А.Н. Потапов, Тазеев Н.Т., Амирова Р.Р., Орлова О.Г. // Вестник ЮУрГУ. Серия Строительство и архитектура. – (в печати);
- 20 Патент РФ №2007109081/12.03.2007 Устройство для гашения резонансных колебаний трубопровода // Патент России №66000.2019. Бюл. № 25. / Потапов А.Н., Дегтярева Н.В. [и др.];

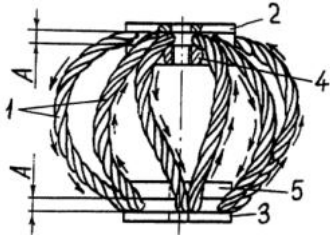
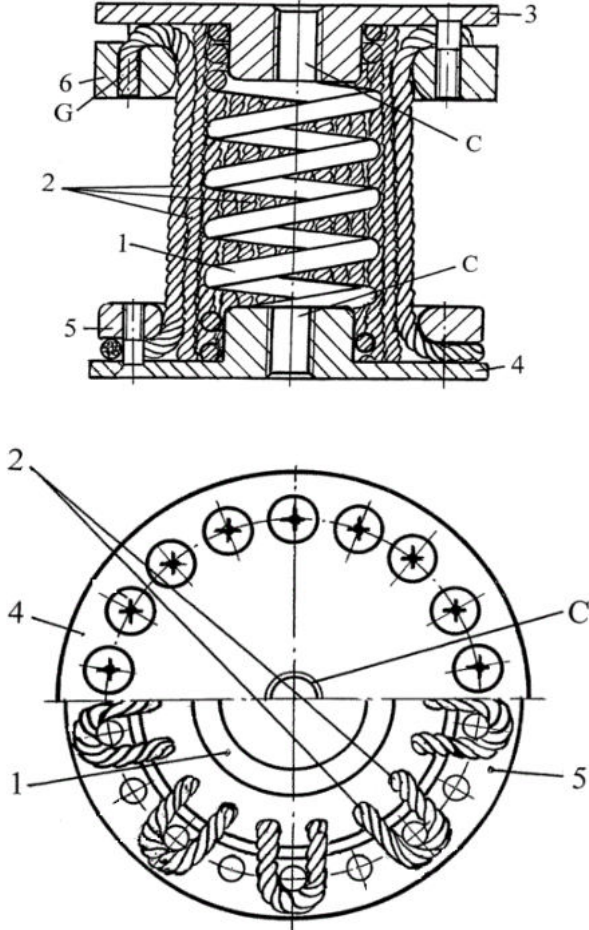
						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№	д о к у м.	П о д п	Д а		57

- 21 Потапов, А. Н. Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных воздействиях / А.Н. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 167 с.;
- 22 Патент РФ №2013128975/07, 26.06.2013 Гаситель вибрации // Патент России №2533657.2014. Бюл. № 32 / Антимонов В.А., Жуков Б.М. [и др.] ;
- 23 ГОСТ Р ИСО 2017-1-2011 Вибрация и удар. Упругие системы крепления. Часть 1. Технические данные для применения систем виброизоляции. [Текст]. – Введ. 2011-11-16. - Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019. – 20с.;
- 24 ГОСТ 26568-85 Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация [Текст]. – Введ. 1987-01-01. - М.: Издательство стандартов, 1987. – 17с.;
- 25 ГОСТ 24346-80 Вибрация. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1981-01-01. - М.: Стандартинформ, 2010. – 26с.;
- 26 ГОСТ 32388-2013 Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия [Текст]. – Введ. 2014-08-01. - Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2016. – 114с.;
- 27 СП 42-101-2003 Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб [Текст]. – Введ. 2003-07-08. - М.: ЗАО "Полимергаз", ГУП ЦПП, 2003. – 182с.;
- 28 Бабин Л.А., Быков Л.И., Волохов В.Я. Типовые расчеты по сооружению трубопроводов. М.: Издательство Недр, 1979. – 176 с.;
- 29 Безделев В.В., Трутаев С.Ю. Оптимизация демпфирующих свойств опорных конструкций при разработке мероприятий по снижению вибрации трубопроводов насоснокомпрессорного оборудования // Материалы V Международного симпозиума по трибофатике ISTF-2005: сб. докл. Иркутск: изд-во ИрГУПС, 2005. Т. 3.С. 65-70.;
- 30 Вибрации в технике. Справочник в 6-ти т. Том 6 - Защита от вибрации и ударов. М.: Машиностроение, 1981, 456 с. - С. 326-365.;

						АСЗ-393-08.04.01-2021-039-ПЗ	Ли
И з	Л и	№ д о к у м.	П о д п	Д а			58

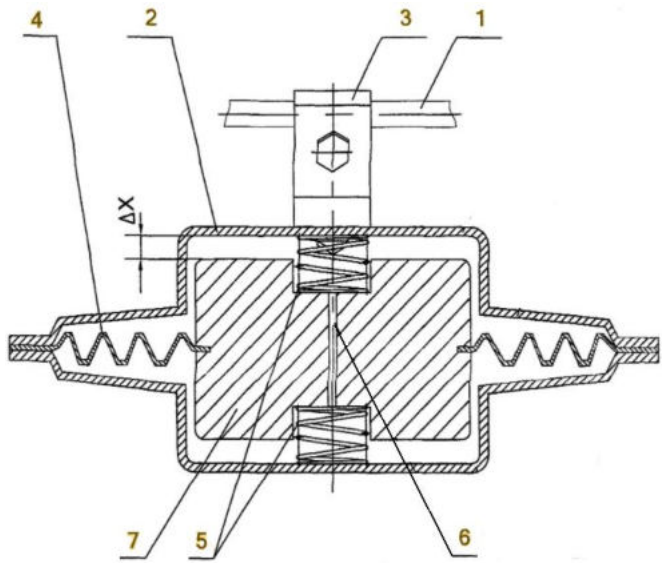
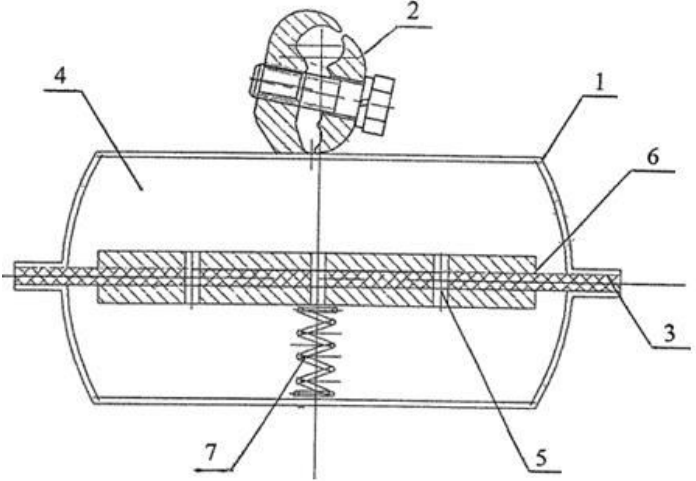


**Патент №2550583**

<p>Структурная прототипа</p> <p>схема</p>	<p>Виброизолирующее устройство (ПМ №55061, кл. F16F 7/14, 2004.05)</p>  <p>1-стальной канат; 2,3-опорные диски; 4,5-прижимные кольца.</p>
<p>Введенное изменение</p>	<p>Трос предварительно не натягивается, разбит на части, концы кусков фиксируются не внутри, а снаружи амортизатора, добавлена пружина.</p>
<p>Результат изменения. Разрешенное противоречие</p>	

	Долговечность и компактность повышены.
Использованный прием решения проблемы	Использован принцип дробления: трос разбит на части для простоты сборки и замены.
Новый закон развития технической системы	Закон увеличения степени идеальности системы (уменьшение объема, увеличение срока службы)
Уровень технического решения по Альтшуллеру	3 (изменена исх. задача, изменено известное решение)
Строительные нормы, связанные с решением по патенту	ГОСТ Р ИСО 2017-1-2011 Вибрация и удар. Упругие системы крепления. Часть 1. Технические данные для применения систем виброизоляции
Собственная оценка решения по патенту	По сути, большую часть главных функций на себя берет пружина - ударовиброзащитноизолирующую и функцию гашения колебаний

**Патент №2533657**

<p>Структурная прототипа</p> <p>схема</p>	<p>Гаситель колебаний (№2412511, H02G 7/14, 20.02.2011 г.)</p>  <p>1-кабель; 2-корпус, заполненный газом; 3-зажим; 4-диафрагма; 5-пружины сжатия и растяжения; 6-сквозное дросселирующее отверстие; 7-груз.</p>
<p>Введенное изменение</p>	<p>Упрощены формы корпуса, диафрагмы, груза, увеличено количество дросселирующих отверстий</p>
<p>Результат изменения. Разрешенное противоречие</p>	 <p>1-полый корпус, 2-зажим, 3-мембраны (пластины), 4-камеры, 5-дросселирующие отверстия; 6-грузы, 7-металлическая витая пружина.</p>

	демпферный узел, обеспечивающий работу гасителя по предотвращению вибрации на воздушных линиях Решены проблемы конструктивной сложности
Использованный прием решения проблемы	Метод, снижающий передачу вибрации использованием дополнительных устройств (пассивного виброгашения)
Новый закон развития технической системы	Закон увеличения степени идеальности системы (уменьшение массы и объема при сохранении функций)
Уровень технического решения по Альтшуллеру	2 – 1 из нескольких задач, 1 решение из нескольких
Строительные нормы, связанные с решением по патенту	ГОСТ 26568-85 Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация
Собственная оценка решения по патенту	Решение найдено ненаучным путем перебора всевозможных вариантов. Конструкция упрощена, но отсутствует сравнение с тем же кирпичом на веревке.

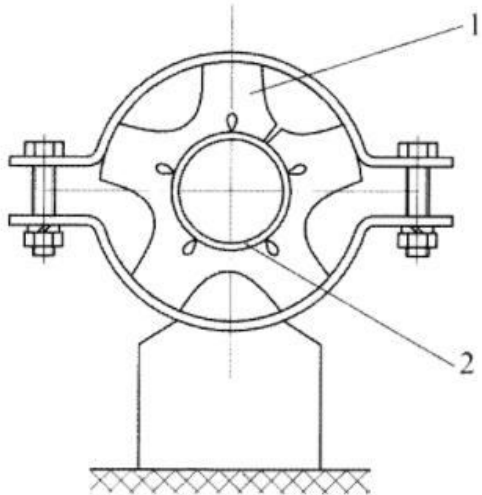
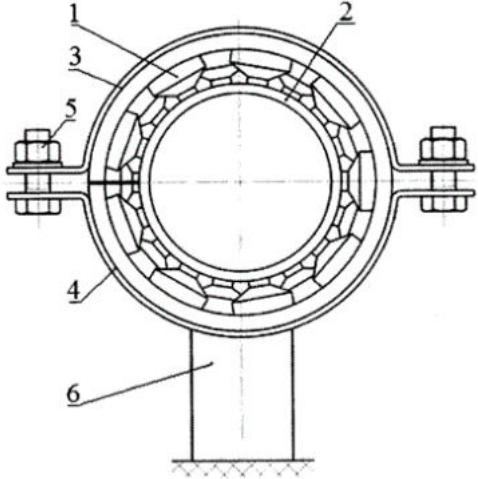


**Патент №101851448**

<p>Структурная схема прототипа</p>	<p>Не описана заявителем. Изобретение направлено на снижение вибрационного воздействия от объекта патента US4458721A</p>
<p>Введенное изменение</p>	<p>Для ограничения перемещений в трех плоскостях введены жесткие опорные элементы</p>
<p>Результат изменения. Разрешенное противоречие</p>	<div data-bbox="762 533 1444 1191" data-label="Image"> </div> <p>200-трубопровод, 100-Устройство стабилизации продольной вибрации с трубой, 111-вертикальный болт, 112,114,118,122-соединительные части, 120,126-труба, 116,122,300,302-опорные элементы.</p> <p>Устранена проблема продольных и вертикальных колебаний трубопровода от гидравлического удара при замене старого участка трубы.</p>
<p>Использованный прием решения проблемы</p>	<p>Использован принцип дробления: система состоит из легко монтируемых частей.</p>
<p>Новый закон развития технической системы</p>	<p>Закон увеличения степени идеальности системы</p>
<p>Уровень технического решения по</p>	<p>2 (старая задача, старое решение) введение треугольника как основы статичности системы</p>

Альтшуллеру	
Строительные нормы, связанные с решением по патенту	ОСТ 24.125.100-01 «Подвески трубопроводов ТЭС и АЭС. Типы»
Собственная оценка решения по патенту	<p>В патенте представлено несколько вариантов крепления трубы, но они являются просто конструктивно сложными дополнительными опорами, которым, необходимо дополнительное устройство гашения колебаний.</p> <p>Большое количество болтовых соединений. Если бы элементы 120 и 126 представляли из себя какую-то упругую систему, колеблющуюся в противофазе внешнему возбуждению, сложность конструкции могла быть оправдана.</p>

**Патент №2669981**

<p>Структурная схема прототипа</p>	<p>Виброизолирующая подвеска трубопровода (№140226, F16L 3/00 (2006.01))</p>  <p>1-резиновая вставка, 2-труба</p>
<p>Введенное изменение</p>	<p>Снижена частота собственных колебаний резиновой виброизоляции</p>
<p>Результат изменения. Разрешенное противоречие</p>	 <p>1-резиновая лента из цилиндрических элементов разного диаметра, соединенных усеченными коническими элементами, 2-трубопровод, 3,4-полухомут, 5-стяжной болт, 6-опора.</p> <p>Виброизоляция теперь работает в низких диапазонах частот.</p>

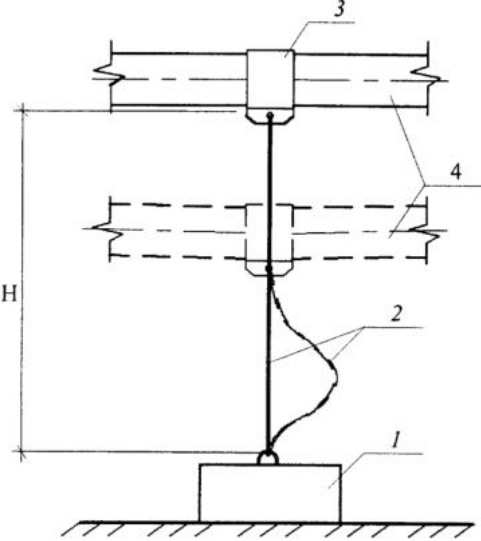
Использованный прием решения проблемы	Принцип использования пористых материалов
Новый закон развития технической системы	Закон согласования ритмики всех частей системы
Уровень технического решения по Альтшуллеру	2 – 1 из нескольких задач, 1 решение из нескольких
Строительные нормы, связанные с решением по патенту	«Расчет параметров резинометаллических амортизаторов при заданной деформации» Поздеев Л.В., Целищев Г.П.
Собственная оценка решения по патенту	Решение более экономично и эффективно.

**Патент №2686957**

<p>Структурная прототипа</p> <p>схема</p>	<p>Система подвески трубопровода (УДК 629.12.002.75</p> <p>n f i n n o v a</p>  <p>Радиально расположенные винты, УДЭ (упругодеформируемые элементы), хомут, стойка</p>
<p>Введенное изменение</p>	<p>Использование лопастного компенсатора, установленного на поворотном штативе, закрепленном на трубопроводе, и емкости с жидкостью</p>
<p>Результат изменения.</p> <p>Разрешенное противоречие</p>	<p>Гасится вибрация не только от транспортировки продукта, но и от внешних воздействий.</p> <p>Компенсированы осевые вибрации.</p> 

	<p>1 - трубопровод; 2 - хомут; 3 - поворотный штатив;  - лопастной компенсатор; 5 - горизонтальная лопасть;  6 - разновеликие лопасти; 7 - емкость; 8 - жидкость; 9  - успокоитель жидкости.</p>
Использованный прием решения проблемы	Принцип «посредника» или принцип использования гидроконструкций.
Новый закон развития технической системы	Закон согласования ритмики частей системы (устранение эффекта резонанса ветровых и собственных колебаний трубопровода)
Уровень технического решения по Альтшуллеру	3 (изменена исх. задача, изменено известное решение)
Строительные нормы, связанные с решением по патенту	ГОСТ Р 57278-2016 «Ограждения защитные. Классификация. Общие положения.»
Собственная оценка решения по патенту	В зависимости от рабочих частот выбирается подходящая плотность жидкости и размеры элементов устройства.

Патент №66000

<p>Структурная схема прототипа</p>	<p>Устройство для гашения колебаний трубопровода (№2220357, F16L 55/033, 3/00 (2006.01))</p>  <p>1-фундамент, 2,-короб, 3-трубопровод, 4-патрубок, 5крышка, 6-болт, 7,8-упругие щелевые накладки по торцам устройства, 9-упругие шарообразные тела</p>
<p>Введенное изменение</p>	<p>Демпфер выключается из работы при перемещении трубопровода вниз</p>
<p>Результат изменения. Разрешенное противоречие</p>	 <p>1-ж/б блок, 2-трос, 3-хомут, 4-трубопровод. Конструкция виброизолятора сильно упрощена.</p>
<p>Использованный прием решения проблемы</p>	<p>Принцип заранее подложенной подушки (трос включается в работу при возникновении колебаний)</p>
<p>Новый закон развития</p>	<p>Закон увеличения степени идеальности системы</p>

технической системы	(снижены вес и объем устройства)
Уровень технического решения по Альтшуллеру	3 (изменена исх. задача, изменено известное решение)
Строительные нормы, связанные с решением по патенту	СП 86.13330.2011 «Магистральные трубопроводы»
Собственная оценка решения по патенту	Прототип изобретения следует использовать на наземном трубопроводе, само изобретение – для надземного.



**Патент №206572062**

Структурная схема прототипа	Схема прототипа не представлена, описано грубое крепление без демпферов
Введенное изменение	Между хомутом и трубопроводом установлена виброизоляционная прокладка из резины и пружин
Результат изменения. Разрешенное противоречие	 <p>1-основание, 2-хомут, 3-пружина, 4-резиновые прокладки, 5-болтовое соединение.</p> <p>Виброизоляция теперь работает в низких диапазонах частот.</p>
Использованный прием решения проблемы	Принцип сфероидальности
Новый закон развития технической системы	Закон согласования ритмики всех частей системы
Уровень технического решения по Альтшуллеру	2 – 1 из нескольких задач, 1 решение из нескольких
Строительные нормы, связанные с решением	СП 86.13330.2011 «Магистральные трубопроводы»

по патенту	
Собственная оценка решения по патенту	Конструкция имеет массивное основание для устойчивости при сильных стихийных бедствиях, большое количество элементов несет увеличение вероятности выхода части элементов из строя.

## Приложение 2 – Программа расчета (MATLAB)

- clear,home

```
delete(get(0,'children'));
disp('*****')
disp('*ВРЕМЕННОЙ          АНАЛИЗ          АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ*')
disp('*****          НАДЗЕМНОГО          ГАЗОПРОВОДА          *****')
disp('*****')
pause(2),home
% mosta.m: m - model, os - one-sided (односторонний), t - temporal, a - analysis
%Работа файла mosta_news.m с 9 мая 2007 года
% Программа скорректирована 23.11.2020. Учитывается жесткость ОС.
% Дифференциальное уравнение движения дискретной диссипативной
системы (ДДС):
%
%  $MY''(t) + CY'(t) + KY(t) = Pi(t)$ , (1)
%
% где:  $M = \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$ , C, K - соответств.матрицы масс, демпфирования,
жесткости;
%  $Y(t)$ ,  $Y'(t)$ ,  $Y''(t)$ ,  $P(t)$  - векторы перем., скоростей, ускорений и внешн.
нагрузки;
% Интегрирование(1) связано с решением матричного квадратного ур.(МКУ,
см.процед. msqe.m):
%
%  $M*s^2 + C*s + K = 0$ . (2)
%
% Структура решения s:
%  $s = \text{inv}(M)*[-C + V + U]/2$ , (3)
```

%  
% где  $V$  - кососимметрическая, вещественная,  $U = M*s + s.*M + C$  -  
симметрическая, мнимая  
% матрицы ( $s.'$  - операция транспонирования матрицы  $s$ )  
% Аэродинамическое действие ветровой нагрузки - по закону синуса:  
%  
%  $P(t) = \text{diag}(\sin(Te*t + f0))*P0, \quad (4)$   
%  
% где  $Te = \text{ones}(n, 1)*2*\pi*f$ ,  $f0$  - векторы частот и начальных фаз  
возмущающей силы (1/с);  
%  $f = 0.2v/d$  - число вихрей, сбегаящих за сек (1/с);  $v$  - скорость  
ветров.потока(м/с);  
%  $d$  - диаметр трубы (м);  $P0$  - вектор амплит.значений ветр.напора (кН);  
% Полная реакция упругой системы от аэродинам.воздейств.(векторы  
перем.искор.узловДДС):  
%  
%  $Y(t) = 2*\text{Re}[Z(t)], V(t) = 2*\text{Re}[s*Z(t)], \quad (5)$   
%  $Z(t) = \Phi(t-ti)*U0*M*[-\text{conj}(s)*Y0 + V0] + I(t)*P0, \quad (6)$   
%  
% где:  $U0 = \text{inv}(U)$ : матрица  $I(t)$  вычисляется из уравнения Сильвестра  
%  
%  $(s^2)*I(t) + I(t)*(diag(Te))^2 = H(t). \quad (7)$   
%  
% Правая часть (7) - известная матричная функция  
%  
%  $H(t) = \{s*[\Phi(t-ti)*Si - SL] + [\Phi(t-ti)*Ci - CL]*Th\}*U0, \quad (8)$   
%  
% где:  $SL = \text{diag}(\sin(Te*t + f0)); Si = \text{diag}(\sin(Te*ti + f0));$  диаг.матрицы  $CL, Ci$   
получаются из матр. $SL, Si$  заменой  $\sin$  на  $\cos$ ;  $\Phi(t-ti) = \exp(s*(t-ti))$  -  
фундаментальная

% матрица;  $T_h = \text{diag}(T_e)$ ;  $t_i$  - время перехода РДМ газопровода через критическую точку из одного состояния в другое, т.е. либо из базовой модели (БМ) в модель с дополнительной связью (МДС), либо в обратном порядке.

% РДМ газопровода состоит из неразрезной балки и устройства гашения колеб., расположенного в центральном пролете модели. Устройство гашения содержит трос, работающий по принципу односторонней связи (ОС). При колебаниях РДМ газопровода возможны два состояния:

% колебания БМ, когда ОС выключена из работы (трос не натянут) и колебания МДС, когда ОС

% включена в работу, что происходит при натяжении троса и эквивалентно появлению дополнительной связи в центральном пролете РДМ.

% В программе определяется динамическая реакция системы при аэродинамическом ветровом воздействии методом временного анализа. В процессе реакции системы вычисляются критические

% временные точки  $t_i$  по переходу РДМ из одного состояния в другое, на каждом шаге определяется усилие в тросе в моменты его натяжения. В расчете учитывается податливость троса (ОС).

% В программе используются две процедуры: `msqe`, `flem3`. Процедура `msqe` дает решение МКУ(2)

% в виде матричных корней  $s_1, s_2$  по заданным матрицам  $M, C, K$ . Процедура `flem3` определяет матрицу податливости РДМ (либо БМ, либо МОС в зависимости от признака 0 или 1) и массив

% изгиб. моментов  $M_b$ , полученный последоват-ми загружен-ми сечений РДМ един.силой  $F_k = 1$ .

%-----

% Единицы измерения: перемещение - 'м', скорость - 'м/с', ускорение - 'м/с<sup>2</sup>'

% Инерционные, диссипативные и восстанавливающие силы (I, F, R) - 'кН'

%-----

disp('АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДА')

```
disp('-----')
```

```
%@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@  
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@  
%@@ Геометрические размеры и физические характеристики трубы газопровода @@  
%@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@  
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@g
```

```
global r, format short e
```

```
%0.15; % Вознесенка: d - диаметр трубы газопровода 150x2.0 ГОСТ 10704-91, м
```

```
%0.209; % d1 - внутренний диаметр трубы, м
```

```
d = .15; d1 = .146; l1 = 6;
```

```
E = 2.1*10^8; % модуль упругости E = 2.1*10^8 кН/м2.
```

```
% Весовая нагрузка единицы трубопровода F1 = 0.264 кН/м;
```

```
% Весовая нагрузка транспортируемой среды (газа) F2 = 0.00199 кН/м;
```

```
% Погонная масса трубопровода с газом mrog = (F1 + F2)/g, где g = 9.81 м/с2.
```

```
F1 = 0.264; F2 = 0.00199; g = 9.81; mrog = (F1 + F2)/g; % кН*с2/м2
```

```
disp(['Погонная масса (труба+газ) кН*с2/м2: m_rog = ' sprintf('%.5g', mrog)])
```

```
dec = .07; % dec - логарифмический декремент колебаний
```

```
disp('Геометрические размеры и физические')
```

```
disp('характеристики трубы газопровода')
```

```
disp(['Диаметр трубы 219x5.0 ГОСТ 10704-91 (в м): d = ' sprintf('%.5g', d)])
```

```
% площадь кольца A = 33,6 см2; момент инерции J = 1926 см4;
```

```
J = pi*d^4/64*(1-(d1/d)^4); % м4
```

```
EJ = E*J; % Изгибная жесткость трубы, кН*м2
```

```
ro = 1.21e-3; % плотность воздуха в кН*с2/м4
```

```
disp(['момент инерции кольцевого сечения (в м4): J = ' sprintf('%.5g', J)])
```

```
disp(['модуль упругости (кН/м2) E = ' sprintf('%.5g', E)])
```

```
disp('ВЕТРОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ')
```

```

disp('скорость ветра в интервале: v = 2 - 20 м/с')
disp(['плотность воздуха (кН*с2/м4): ro = ' sprintf('%.5g', ro)])
m = 7; q = 4; n = m*(q-1);
%m = 11; q = 6; n = m*(q-1); % n - число степеней свободы БМ
L = ones(1, m)*11; % L - вектор длин пролетов газопровода; 11 - длина
пролета l = L/q; mk = mrog*l(1); % масса элементарного участка кН*с2/м
del = .0005; del0 = del*EJ; % истинная и условная податл.упругой связи м/кН
(1/del -жест.св)
disp('-----')
% Вычисление матриц податливости D, Ds для моделей: базовой (БМ) и с
дополнит.связью (МДС)
[D, Mi] = flem3(L, q, 1e10); D = D/EJ; % м/кН
[Ds, Mis] = flem3(L, q, del0); Ds = Ds/EJ; % индекс s от supplementary
(дополнительный)
%*****
%***** Ф О Р М И Р О В А Н И Е И С Х О Д Н Ы Х М А Т Р И Ц *****
%*****
% Размерности элементов матриц инерции M, жесткости K и
демпфирования C
% (M ~ [кН*с2/м], K ~ [кН/м], C ~ [кН*с/м])
% Матрица жесткости РДМ газопровода строится путем обращения
матрицы податливости
disp('Характеристики базовой РДМ газопровода (исходные матрицы)')
disp('Матрица жесткости K'), K = inv(D); % кН/м
disp('Матрица масс M'), M = mk*eye(n); % кН*с2/м
disp('Модель непропорционального демпфирования: C = (K*T+T*K)/2,')
disp('где: T = diag(t1, ..., tn); ti = (dec/pi)*[M(i,i)/K(i,i)]^0.5;')
disp(['логарифм-й декремент колебаний dec = ' sprintf('%.4g', dec)])
T = dec/pi*diag(sqrt(diag(M)./diag(K))); C = (K*T+T*K)/2; % кН*с/м
[s1, s2] = msqe(M, C, K); s = s1;

```

```

disp('Характеристики РДМ газопровода с дополнительной опорой')
disp('Матрица жесткости Ks'), Ks = inv(Ds);
o = (r - 1)*(q - 1) + q/2; % номера сеч. в точке крепления ОС к трубе:
oo = (r - 1)*q + q/2 + 1; l = l(1); % o - базовая, oo - глобальная нумерация
T = dec/pi*diag(sqrt(diag(M)./diag(Ks))); Cs = (Ks*T+T*Ks)/2;
[s1, s2] = msqe(M, Cs, Ks); ss = s1;

```

```

disp(' I. СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ РДМ ГАЗОПРОВОДА
(НЕРАЗРЕЗНОЙ БАЛКИ)')

```

```

disp('МОДЕЛЬ ДЕМПФИРОВАНИЯ: (K*T+T*K)/2')

```

```

disp('собственные значения матрицы S внутр. динамичimag. характеристик
трубы')

```

```

disp('разложение S в базисе собств-х векторов: S = Q * Lambda * inv(Q)')

```

```

[Q, Lambda] = eig(s); G = -real(diag(Lambda)); W = imag(diag(Lambda));

```

```

[Qs, Las] = eig(ss); Gs = -real(diag(Las)); Ws = imag(diag(Las));

```

```

disp('коэффициенты демпфирования (вектор G = -Re Lambda)'), G;

```

```

disp('собственные частоты (вектор W = Im Lambda)'), W;

```

```

disp('матрица форм собственных колебаний Q'), Q;

```

```

disp('коэфф. демпфирования (dempf = G) и собственные частоты ДДС (freq =
W)')

```

```

disp('расположены в столбцах [dempf freq]:')

```

```

dempf = G; freq = W; dempf_freq = [G W Gs Ws]

```

```

% Перемещения и скорости 1-й собственной формы: Qsy, Qsv

```

```

[frs, qm] = min(Ws); % Min частота (frs) и ее порядк.номер (qm) в Ws

```

```

Qsy = real(Qs(:,qm)); Qsv = real(Qs(:,qm)*Las(qm,qm));

```

```

disp('*****')
*****')

```

```

disp('II. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ РДМ: АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ
ВОЗДЕЙСТВИЕ')

```



% Вычисление реакции ДДС от аэродинамического воздействия ветра

[W1, I] = sort(W); [Ws1, Is1] = sort(Ws); % W1, Ws1 - отсортированные векторы собств.

for k = 1:n % частот в БМ и МДС (в возрастающем порядке)

G(:, k) = real(Q(:, I(k))); % Массив G: сортировка собств. векторов БМ

Gs(:, k) = real(Qs(:, Is1(k))); % Массив Gs: сортировка собств. векторов МДС

end

if Gs(o-1, :) == Gs(o+1, :), A = Gs(:, 1); Gs(:, 1:2) = [Gs(:, 2), A]; end

if Gs(o, 2) > 0, Gs(:, 2) = -Gs(:, 2); end

Tw = 2\*pi./W1; Tws = 2\*pi./Ws1; % Tw, Tws - периоды собств.колебан.БМ и МДС

Spektr = [W1(1:5), Tw(1:5), Ws1(1:5), Tws(1:5)]

T1 = Spektr(1,2)/2; Ts1 = Spektr(1,4)/2; % T1, Ts1 - половины периодов по осн. тону

v1 = W1(1:4)\*d/0.4/pi; % Скор.ветра(м/с), вызывающие резон.на первых 4-х частотах

i = 1; % i - номер собств. частоты и формы колебаний БМ газопров.

v = v1(i);

%@@

@@

%@@ Ветровые характеристики территории пролегания газопровода @@@

%@@

@@f

= 0.2\*v/d; % число вихрей, сбегаящих в сек (1/с)

q0 = ro\*v^2\*d/2; % Амплитуда погонной распределенной нагрузки (кН/м),

% действующей перпендикулярно направлению потока ветра

disp('-----')

disp('ВЕТРОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ')

```

disp(['Скорость ветра (м/с): v = ' sprintf('%.5g', v)])
disp(['Число вихрей, сбегаящих в сек, при задан.скор.напоре: f = '
sprintf('%.5g', f)])
disp(['Амплитуда погонной распределенной нагрузки (кН/м): q0 = '
sprintf('%.6g', q0)])
disp('ПАРАМЕТРЫ НАГРУЗОК В УЗЛОВЫХ СЕЧЕНИЯХ БАЗОВОЙ
МОДЕЛИ ГАЗОПРОВОДА')
disp('Вектор возмущающих сил P(t) в верт. пл-ти (форм. (4)): P(t) =
sin(Te*t+f0)*P0')
disp('Вектор амплитуд ветров. нагрузки P0 (кН)')
% При колебаниях БМ по i-й собств.форме вектор амплитуд P0 =
sign(G(:,i))*q0*1;
% Вектор sign(G(:, i)) содержит "скелетную" характеристику i-й собств.
формы
P0 = sign(G(:, i))*q0*1; % Движение по i-й собствен. форме БМ
% Векторы круговых частот Te (1/с) и начальных фаз f0 возмущающей силы
Te = ones(n, 1)*2*pi*f; Th = diag(Te); f0 = zeros(n, 1);
disp('Круговая частота Te (1/с) возмущающей нагрузки'), Theta = Te(1)
%Ps0 = P0; for k = 1:n, if k > 0, Ps0(k) = -P0(k); end, end, Ps0(0) = 0;
%m0 = (m + 1)/2;
for kk = 1:2 % Цикл for kk - для сравн.результатов по к/с (kk=1) и
симм.(kk=2) формам
Ps0 = sign(Gs(:, kk))*q0*1; % Движение по осн.тону (kk=1) и 1-му обертому
(kk=2) МДС
%Ps0 = (-1)^m0*sign(Gs(:, kk))*q0*1; % Движение по осн.тону (kk=1) и 1-му
обертому (kk=2) МДС
disp('ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСЧЕТНЫХ
МОДЕЛЕЙ')
disp(['Время работы базовой модели за один цикл колебаний (с): '
sprintf('%.5g', T1)])

```

```

disp(['Время работы модели с ОС за один цикл колебаний (с): ' sprintf('%0.5g',
Ts1)])
disp('*****
*****')
% Вычисления вспомогательных величин:
U = M*s + s.*M + C; U0 = inv(U); T = inv(s*s + Th*Th); M1 = inv(M);
U = M*ss + ss.*M + Cs; Us0 = inv(U); Ts = inv(ss*ss + Th*Th);
% P0 = M*D*P0; Ps0 = M*Ds*Ps0;
% Исходн.данные врем.анализа: tstep - шаг; t0, Tend - начало и конец
временного участка
tstep = 0.001; t0 = 0; Tend = 30; tcr = []; % tcr - время перехода БМ в МДС и
наоборот
tcr1 = 1; tcr0 = 0; Tend1 = Tend; ts = tstep; ti = 0; t = 0;
% Y0, V0, Ys0, Vs0 - векторы начальных условий БМ и МДС; Y00, V00 -
массивы нач.условий
Y0 = zeros(n,1); V0 = Y0; Ys0 = zeros(n,1); Vs0 = Ys0; Y00 = []; V00 = [];
disp(sprintf('Время действия вибрационной нагр. (в с): Tend = %0.4g', Tend))
disp(sprintf('Шаг вычисления динамич. реакции (в с): tstep = %0.4g', tstep))
disp('-----')
% Y,V,A,R,F,J,P - массивы перем.,скоростей, ускорений,
восстан.,диссип.,инерц.и внешн.сил
Y = []; V = []; A = []; R = []; F = []; J = []; P = [];
Yb = []; Vb = []; Ab = []; Rb = []; Fb = []; Jb = []; Pb = []; Rio = [];
qi = 0; c1 = 0; % qi - признак перехода из БМ в МДС и наоб.; c1 - счетчик
кол-ва переходов
c2 = 0; % c2 = 1 - признак: в пределах одного шага tstep как минимум две
критических точки
c3 = 0; % c3 = 1 - признак: опред-е параметров реакции при tcr1
(форм.векторов нач.услов.)
YR = []; % Массив (3хк) перем.(2-я стр.) и усилий (3-я стр.) в сеч.'о'; 1-я

```

строка - время

No = []; % усилие в тросе (сечение 'o') равно 0 при qi = 0 (БМ) либо > 0 при qi = 1 (МДС)

Yo = []; % Yo - рабочий массив, в кот. хранятся парам. реакции при всех шагах врем. анализа

eps = 1e-7; % Погрешность вычисления реакции системы;

format long

%\*\*\*\*\*

% WHILE I - Начало цикла по интервалам времени [ti, tj] (j = i + 1; i = 1, ... , r)

dbstop if error

while(t <= Tend), c1 = c1 + 1;

tc = []; b0 = 0; % вектор tc содержит все tcr1, найденные в цикле WHILE 2

while(abs(tcr1 - tcr0) > eps) % WHILE 2 - начало цикла по поиску

критических точек ti

qu = 0; qr = 0; c0 = 0;

b0 = b0 + 1; a0 = 0; % b0 - счетчик в WHILE 2; a0 - признак вых. из цикла (при a0=1)

for t = t0:tstep:Tend1 % Цикл по t внутри интервала [ti, tj]

% Lt, Li, Lb - Матр. аргументы ф-ции нагрузки; H, Hs, Hb - матр. правой части ур-я (7)

%-----

Lt = Te\*t + f0; Li = Te\*ti + f0; % Te, f0 - векторы частот и нач. фаз

SL = diag(sin(Lt)); Si = diag(sin(Li)); % диаг. матрицы синусов и косинусов от

CL = diag(cos(Lt)); Ci = diag(cos(Li)); % аргументов (Te\*t+f0) и (Te\*ti+f0)

Fi = expm(s\*(t-ti)); Fis = expm(ss\*(t-ti)); % Fi, Fis - Фундаментальные матрицы;

H = (s\*(Fi\*Si - SL) + (Fi\*Ci - CL)\*Th)\*U0; % Для БМ

Hs = (ss\*(Fis\*Si - SL) + (Fis\*Ci - CL)\*Th)\*Us0; % Для МДС

% Усл. оператор if-else-end: решение ур-я (7)- построение матрицы I -

интегр.Дюамеля

if Te == Theta\*ones(n, 1) % Все элементы вектора Te одинаковы

I = T\*H; Is = Ts\*Hs;

else I = []; Is = []; % элементы Te могут быть различными

for k = 1:n

a = s^2 + Te(k)^2\*eye(n); b = ss^2 + Te(k)^2\*eye(n);

I = [I a\H(:, k)]; Is = [Is b\Hs(:, k)];

end

end

if qi == 0, qy = qy + 1; % qi = 0: вычисление реакции в БМ

Z = 2\*Fi\*U0\*M\*(-conj(s)\*Y0 + V0); Zp = 2\*I\*P0; % Z, Zp - при своб.и

вын.колеб

Z0 = Z + Zp; Y1 = real(Z0); V1 = real(s\*Z0); P1 = P0\*sin(Theta\*t);

A1 = real(s\*s\*Z0) + M1\*P1;

R1 = K\*Y1; F1 = C\*V1; J1 = -M\*A1; % векторы восстан.,диссипат.,инерц.сил

Yo = [Yo [Y1(o); 0; qy; tstep; t; t0; Tend1]];

if c3 == 1, break, end

if qy == 1 & Y1(o) < 0, c0 = 1; c2 = 1; break, end % c0=1 - признак

уменьшен.шага

if b0 == 1, YR = [YR [t; Y1(o); R1(o)]]; No = [No [t; 0]];

Y = [Y Y1]; V = [V V1]; A = [A A1]; Rio = [Rio [t; 0]];

R = [R R1]; F = [F F1]; J = [J J1]; P = [P P1];

end

if Y1(o) < 0 % b, a - перемещения узла 'o' РДМ на предыд.и текущем шагах  
времени

if b0 == 1, t1 = t; end

a0 = 1; a = Y1(o); c = size(Yo, 2); b = Yo(1, c-1);

tcr1 = t - tstep\*a/(a - b); tc = [tc tcr1];

end

else qr = qr + 1; Ps1 = Ps0\*sin(Theta\*t); % qi = 1: вычисление реакции в МДС

```

Z = 2*Fis*Us0*M*(-conj(ss)*Ys0 + Vs0); Zsp = 2*Is*Ps0;
Z0 = Z + Zsp; Ys1 = real(Z0); Vs1 = real(ss*Z0);
As1 = real(ss*ss*Z0) + M1*Ps1; Rs1 = Ks*Ys1; Fs1 = Cs*Vs1; Js1 = -M*As1;
Ri = -Ys1(o)/del; Yo = [Yo [Ri;1;qr;tstep;t;t0;Tend1]]; % Ri - реакция в тросе
if c3 == 1, break, end
if qr == 1 & Ri < 0, c0 = 1; c2 = 1; break, end % c0=1 - признак уменьшения
шага
if b0 == 1, YR = [YR [t; Ys1(o); Rs1(o)]]; No = [No [t; Ri]];
Y = [Y Ys1]; V = [V Vs1]; A = [A As1]; Rio = [Rio [t; (Ri + Rs1(o))]];
R = [R Rs1]; F = [F Fs1]; J = [J Js1]; P = [P Ps1];
end
if Ri < 0
if b0 == 1, t1 = t; end
a0 = 1; a = Ri; c = size(Yo, 2); b = Yo(1, c-1);
tcr1 = t - tstep*a/(a - b); tc = [tc tcr1];
end
end % Конец усл. оператора if-else-end
for i = 1:30
if size(Yo, 2) == i*5000
if i == 1
disp('Промежут. информация о шаговом процессе (выдается через 1000
шагов)')
disp('Общее число шагов. Число столб. массива Y. Время t текущего шага')
disp('-----')
end
c = size(Y, 2); i_c = [i*5000 c], t
disp('-----')
end
end
if a0 == 1, break, end % tcr1 найдена: треб.выход из цикла для измен.его

```

```

параметров
end % Конец цикла for t
if c3 == 1, c3 = 0; break, end
%-----
% Блок сужения интервала поиска крит. временных точек tcr1 в цикле по
времени for t
%-----
k1 = length(tc); % Признак: k1 = 0 крит. точка tcr1 не обнаружена, k1 > 0 -
обнаружена
if c0 == 0 % Признак: c0 = 0 - на длине шага не более одной крит. точки
if k1 > 0, c = tstep;
t0 = t - c; Tend1 = Tend; % Назначение новых параметров цикла по t
tstep = c/10;
if k1 > 1, tcr0 = tc(k1-1); end
else break % k1 = 0 - tcr1 не обнаруж. Выход из цикла for на один уровень
выше
end
else c = tstep; tstep = c/10; % c0 = 1 - на длине шага как минимум две крит.
точки
t0 = ti + tstep; Tend1 = Tend; % Назначение новых параметров цикла по t
if k1 > 1, tcr0 = tc(k1-1); end
end
if b0 > 20
disp('Параметры интервала сужения:'), t_t0_tstep_Tend1 = [t, t0, tstep, Tend1]
error('В Н И М А Н И Е! Число шагов оператора WHILE: b0 > 20')
end
if (abs(tcr1 - tcr0) <= eps), tcr0 = 0; c3 = 1; t0 = tcr1; end
end % Конец цикла WHILE 2
%-----
% Блок формирования новых параметров цикла WHILE 2 для последующего

```

интервала

```
%-----  
if k1 > 0, c = size(Y, 2) + c2; YR(:, c) = [tcr1; 0; R1(o)];  
Rio(:, c) = [tcr1; 0]; No(:, c) = [tcr1; 0];  
if qi == 0, qi = 1;  
Ys0 = Y1; Vs0 = V1; P(:, c) = P1;  
Y(:, c) = Y1; V(:, c) = V1; A(:, c) = A1;  
R(:, c) = R1; F(:, c) = F1; J(:, c) = J1;  
Y00 = [Y00 Y1]; V00 = [V00 V1];  
else qi = 0; YR(:, c) = [tcr1; 0; Rs1(o)]; No(:, c) = [tcr1; Ri];  
Y0 = Ys1; V0 = Vs1; P(:, c) = Ps1;  
Y(:, c) = Y0; V(:, c) = V0; A(:, c) = As1;  
R(:, c) = Rs1; F(:, c) = Fs1; J(:, c) = Js1;  
Y00 = [Y00 Y0]; V00 = [V00 V0];  
end  
ti = tcr1; tcr = [tcr tcr1];  
tcr0 = 0; t0 = t1; tstep = ts; Tend1 = Tend; c2 = 0;  
else break % При k1 = 0 крит. точка tcr1 не обнаружен  
end  
end % Конец цикла WHILE I  
RFI = -J + F + R - P; % Невязка ДУ движения с учетом работы ОС  
%-----  
x = sort([0:ts:Tend], tcr); c0 = length(x);  
if c0 == (size(Y,2)+1), x(c0) = []; c0 = c0-1; end  
for i = 1:c0, t = x(i); % Блок формирования параметров реакции  
Lb = Te*t + f0; Fb = expm(s*t); % БМ газопровода - массивы перем., скор.,  
SL = diag(sin(Lb)); S0 = diag(sin(f0)); % ускор., восст., диссип.и инерц. сил:  
CL = diag(cos(Lb)); C0 = diag(cos(f0)); % Yb, Vb, Ab, Rb, Fb, Jb  
Hb = (s*(Fb*S0 - SL) + (Fb*C0 - CL)*Th)*U0;  
if Te == Theta*ones(n, 1) % Все элементы вектора Te одинаковы
```



```

Ib = T*Hb;;
else Ib = []; % элементы Te могут быть различными
for k = 1:n
a = s^2 + Te(k)^2*eye(n);
Ib = [Ib a\Hb(:, k)];
end
end
Zb = 2*Ib*P0; Pb0 = P0*sin(Theta*t);
Y2 = real(Zb); V2 = real(s*Zb); A2 = real(s*s*Zb) + M1*Pb0;
Yb = [Yb Y2]; Vb = [Vb V2]; Ab = [Ab A2]; Pb = [Pb Pb0];
end, Rb = K*Yb; Fb = C*Vb; Jb = -M*Ab;
Yb = Yb*100; Vb = Vb*100; Ab = Ab*100; % Перевод ед.изм. в: см, см/с,
см/с2
YR(2, :) = -YR(2, :)*100; Y1 = -Y'*100; V1 = V'*100; A1 = A'*100;
RFIb = -Jb + Fb + Rb - Pb; % Невязка ДУ движения с учетом работы ОС
%-----
disp('-----')
disp(sprintf('Число переходов от одной расчетной модели к другой: c1 =
%.6g', c1))
disp('-----')
disp('Время перехода модели газопровода в новое состояние в ходе
врем.анализа (массив tcr)')
format short, t_cr = tcr, format long
disp('III. Г Р А Ф И Ч Е С К А я О Б Р А Б О Т К А Р Е З У Л Ь Т А Т О В П Р
И ')
disp(' А Э Р О Д И Н А М И Ч Е С К О Й Н Е У С Т О Й Ч И В О С Т И
Г А З О П Р О В О Д А ')
%-----
if kk == 1, c = '--k'; a3 = '--b'; a4 = '--r'; a5 = '-k'; a6 = '--b';
else c = '-k'; a3 = '-b'; a4 = '-r'; a5 = a4; a6 = '-b'; end

```

```

a = ' Автоколебания расчетной модели '; a0 = ' Перемещения средних
сечений в пролетах ';
a1 = 'надземного газопровода'; a2 = 'расчетной модели'; x2 = [];
for i = 1:r % i - номера пролетов модели (от 1-го до среднего r)
% j, j1 - номера центральных сечений для пары пролетов, равноотстоящих
% слева и справа от среднего пролета БМ газопровода
j = i*(q-1) - (q/2 - 1); j1 = 2*o - j; x0 = [j, j1]; x2 = [x2 j];
if kk == 1, figure(i), plot(x, Y1(:, x0), c), grid
set(gcf, 'name', [a0, ' ', a2]), xlabel('t, c')
if i < r, title(sprintf('номера пролетов - %i', i)),
else title(sprintf('центральный пролет - %i', r)), end
else figure(i), hold on, plot(x, Y1(:, x0), '-r')
end, ylabel('y(t), см')
end

% Осциллограмма перемещений точки крепления троса
figure(r+1), hold on, plot(x, YR(2, :), a5),
ylabel('Перемещения сеч. "о", см')
b = 'Перемещения сечения в т. крепл. трубы и троса'; title(b)

% Осциллограмма реакции в тросе
figure(r+2), hold on, plot(x, No(2, :), a5),
ylabel('Реакция в тросе, кН')
b = 'Усилие в тросе при колебаниях модели, кН'; title(b)

% Осциллограмма восстанавливающей силы в т. крепления троса
figure(r+3), hold on, plot(x, R(o, :), a5),
ylabel('Восст.силы в сеч."о" (кН)')

% Осциллограмма перемещ., восст.сил и усилия в тросе

```

```
figure(r+4), hold on, plot(x, YR(2, :), c, x, YR(3, :), a3, x, No(2, :), a4)
ylabel('Перем.(см), восст.силы, усилия в тросе (кН)')
```

```
% Осцилл-мы перемещений трубы газопровода в пролете, где установлена
ОС
```

```
if kk == 1, figure(r+6), plot(x, Y1(:, o), a5, x, Yb(o, :), c),
ylabel('Перемещения точки крепления троса, см')
b = 'Сравнение с базовой моделью (пунктир)'; title(b)
else figure (12), hold on, plot(x, Y1(:, o), '-r'), end
```

```
% Осциллограммы скоростей узловых сечений РДМ газопровода
figure(r+7), hold on, plot(x, V1(:, o), a5),
ylabel('Скорости узловых сечений, см/с')
title('Осциллограммы скоростей узловых сечений РДМ газопровода')
```

```
% Осциллограммы скоростей узловых сечений РДМ газопровода
figure(r+8), hold on, plot(x, A1(:, o), a5),
ylabel('Ускорения узловых сечений, см/с2')
title('Осциллограммы ускорений узловых сечений РДМ газопровода')
```

```
% Осциллограммы диссипативных сил, действующих в узловых сечениях
РДМ газопровода
figure(r+9), hold on, plot(x, F(o, :), a6),
ylabel('Диссипат. силы, кН')
title('Осциллогр. диссипат. сил в узловых сечениях РДМ газопровода')
```

```
% Осциллограммы невязок сил ДУ движения, действующих в БМ
газопровода
figure(r+10), hold on, plot(x, RF1b(o, :), c, x, RFI(o, :), a4),
ylabel('RF1b, кН')
```

```
title('Базовая модель')
```

```
% Осциллограммы невязок сил ДУ движения, действующих в РДМ  
газопровода с учетом ОС
```

```
figure(r+11), hold on, plot(x, RFI([2, o], :), a5), grid
```

```
ylabel('RFI, кН')
```

```
title('Модель с ОС')
```

```
end
```

```
% Осциллограмма восстан. и инерционных сил в точке крепления троса (БМ  
газопровода)
```

```
figure(r+5), plot(x, Rb(o, :), a5, x, Jb(o, :), a6), %grid
```

```
ylabel('Восстан.и инерцион.силы, кН')
```

```
title('Восстан.(черный),инерц.(голуб.) силы в т.крепл.троса БМ')
```

```
for j = r+1:r+11
```

```
figure(j), grid, set(gcf, 'name', [a, ' ', a1]), xlabel('t, с')
```

```
end
```

```
j = size(Y1, 1); j1 = round(j/3); j2 = round(2*j/3); j3 = []; j4 = []; j5=[];
```

```
for i = 1:r, k = max(Y1(1:j1,x2(i)))/max(Y1(j1:j2,x2(i)));
```

```
k1 = max(Y1(j1:j2,x2(i)))/max(Y1(j2:j,x2(i))); j3 = [j3; [k k1]];
```

```
k2 = min(Y1(1:j1,x2(i)))/min(Y1(j1:j2,x2(i)));
```

```
k3 = min(Y1(j1:j2,x2(i)))/min(Y1(j2:j,x2(i))); j4 = [j4; [k2 k3]];
```

```
k4 = max(abs(Y1(:, x2(i))))); j5 = [j5 k4];
```

```
end
```

```
disp('Мах перем-Я средних сечений каждого пролета в БМ и МДС (первые  
два столбца)')
```

```
disp('3-й столбец: отношение перемещений БМ/МДС)')
```

```
disp('4-й столбец: время достижения max перемещения в каждом пролете')
```

```
disp('для модели с ДС в процессе ветрового резонанса')
```

$A = [1./j3 \ 1./j4]$

`disp('Мах перем-Я средних сечений пролетов РДМ газопровода'), Amax = j5'`

`disp('конец задачи')`

Приложение 3 – Графики, полученные при анализе трубопровода Ду150 при количестве пролетов – 7шт

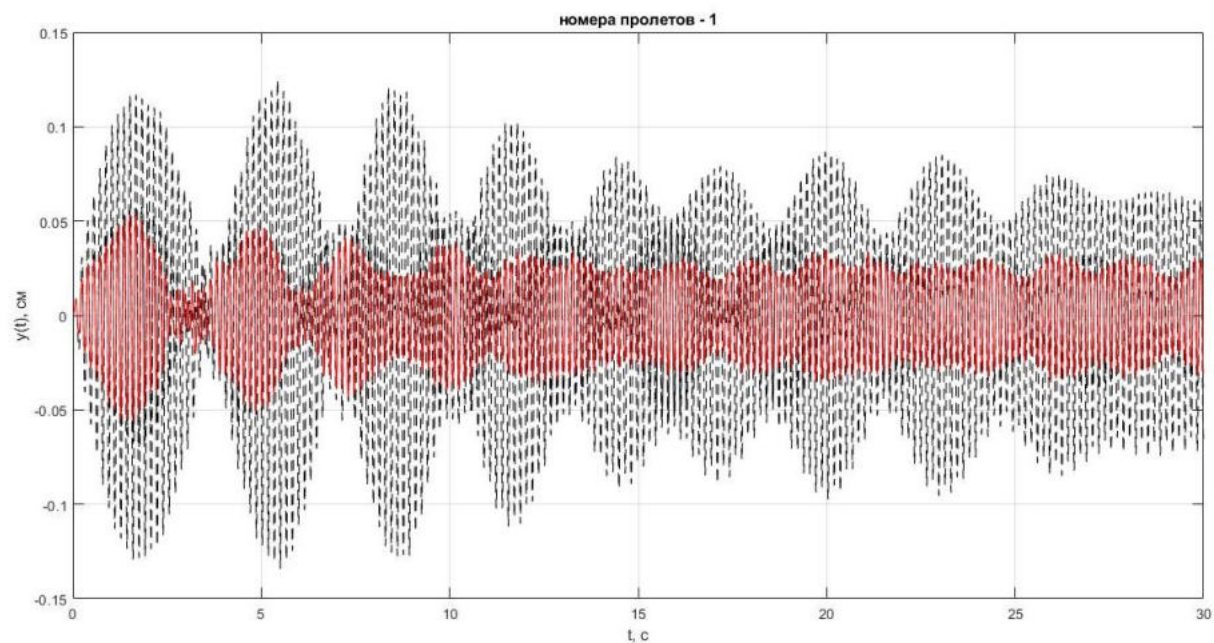


Рисунок П.1 – Пролеты 1,7

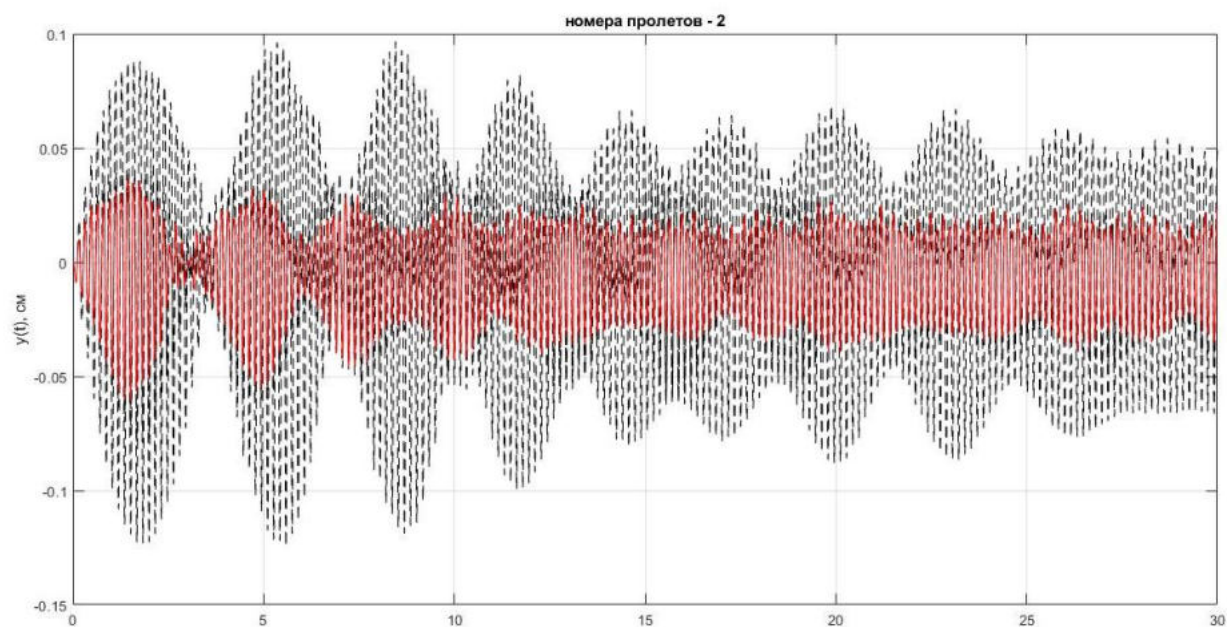


Рисунок П.2 – Пролеты 2,6

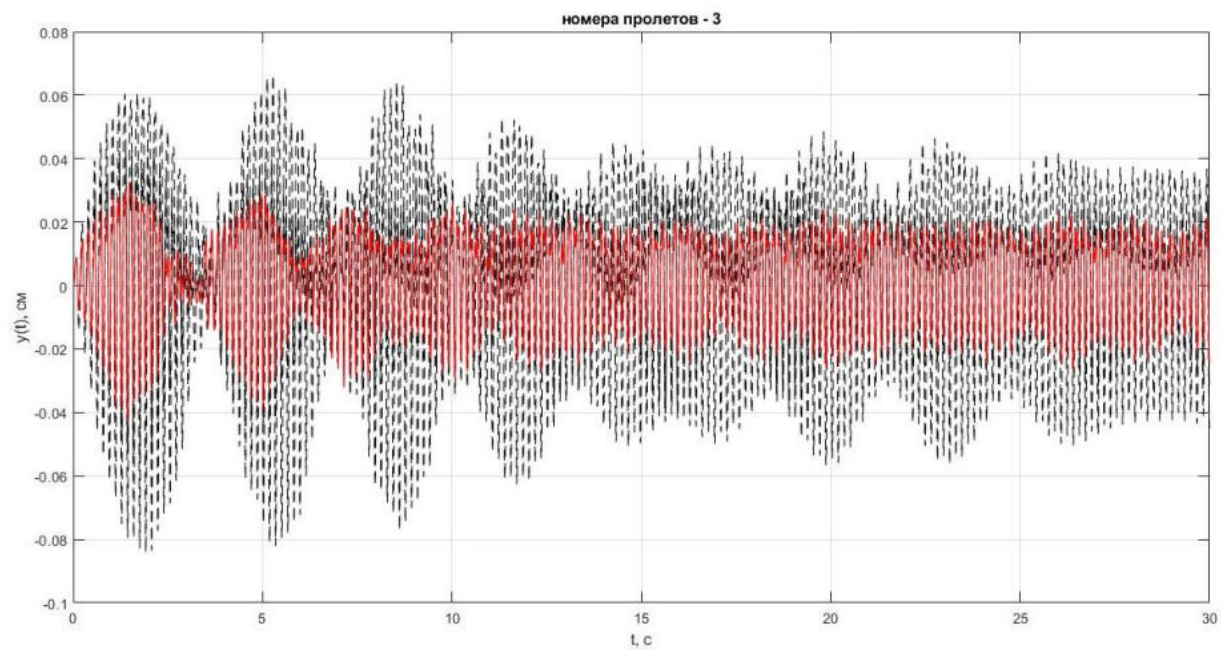


Рисунок П.3 – Пролеты 3,5

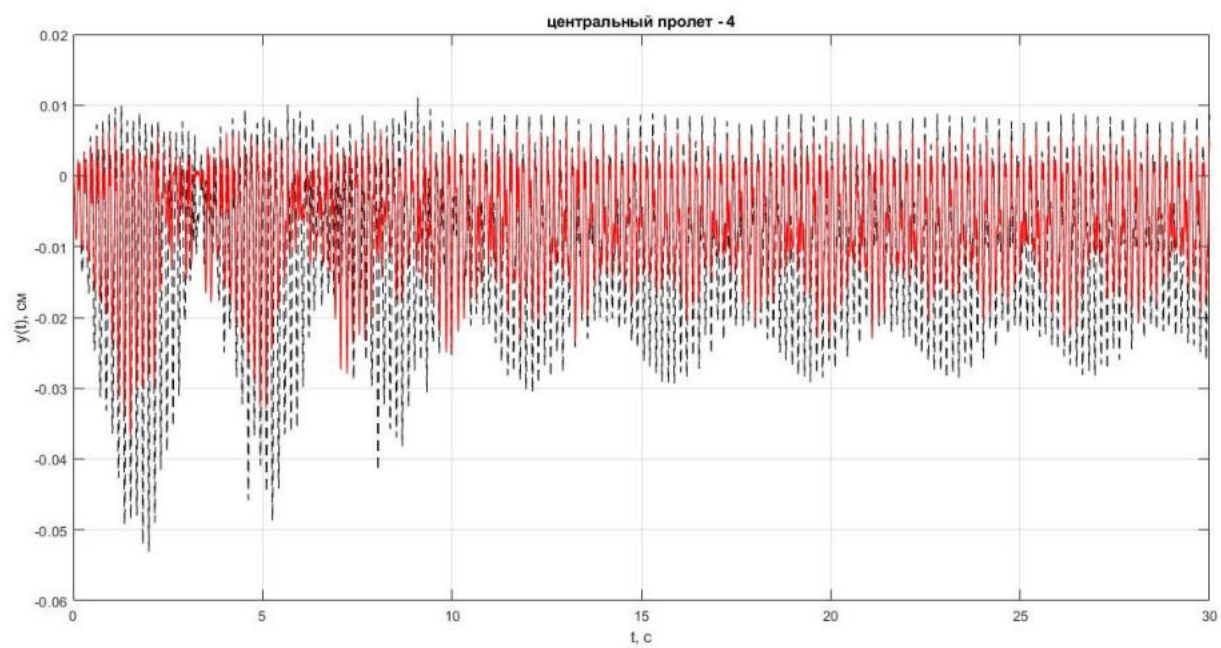


Рисунок П.4 – Центральный пролет

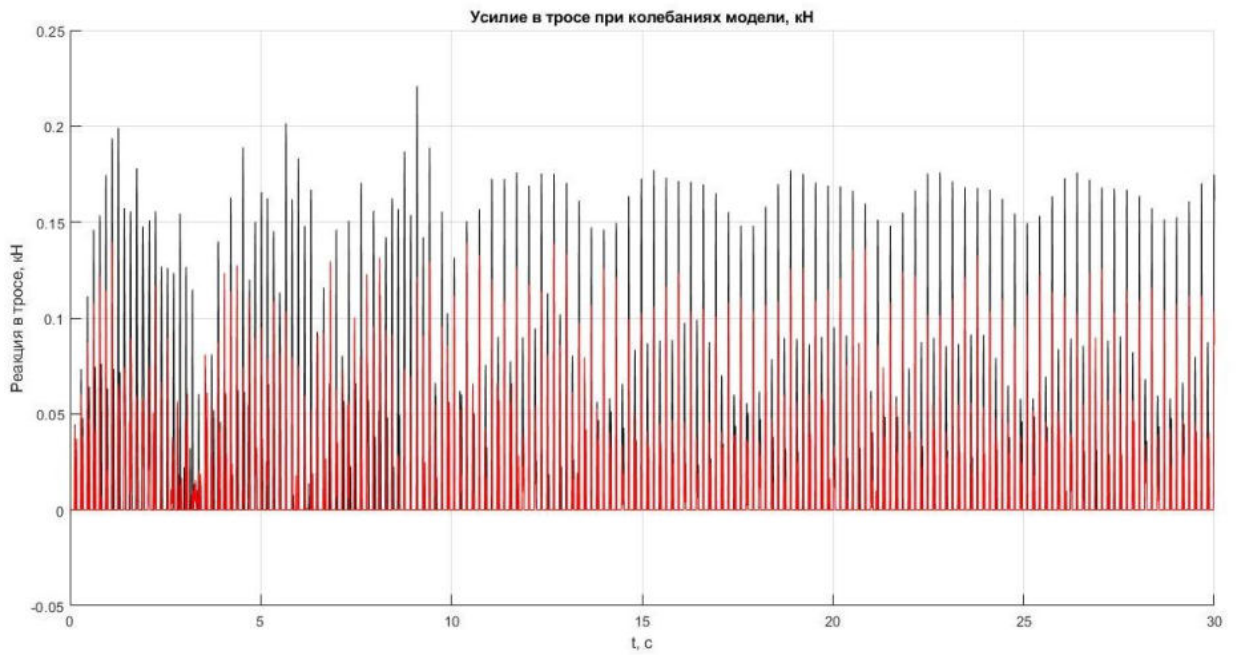


Рисунок П.5 – Усилия в тросе при колебаниях модели

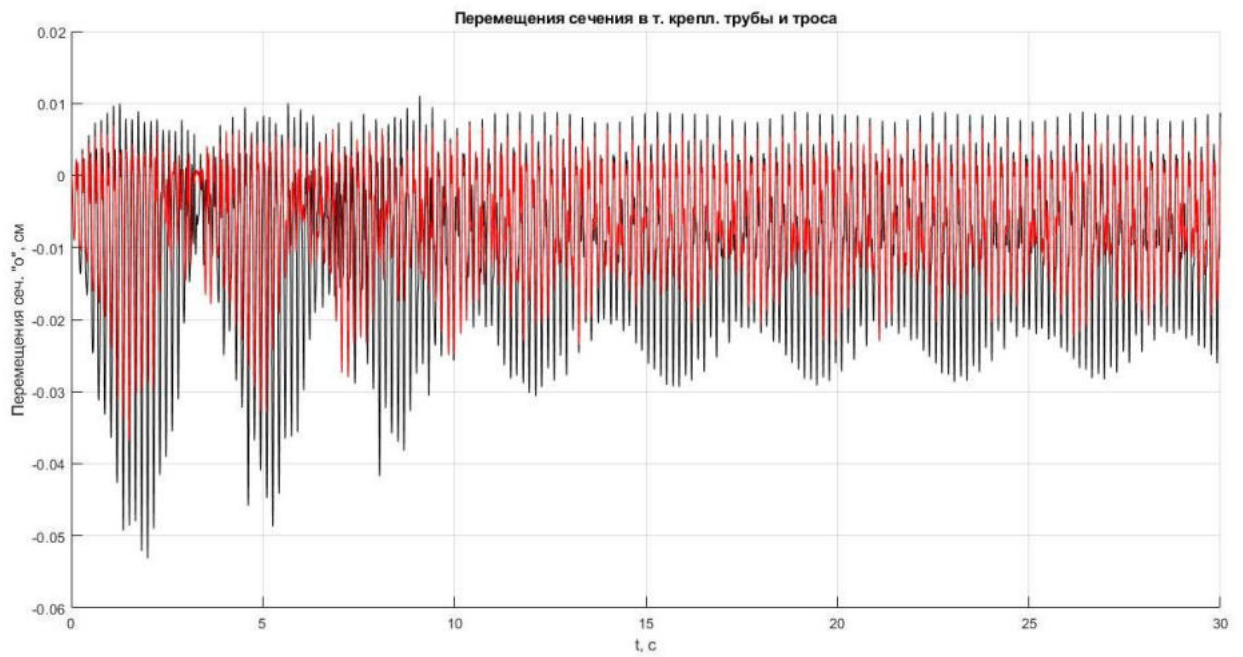


Рисунок П.6 – Перемещения центрального сечения в точке крепления троса к трубопроводу



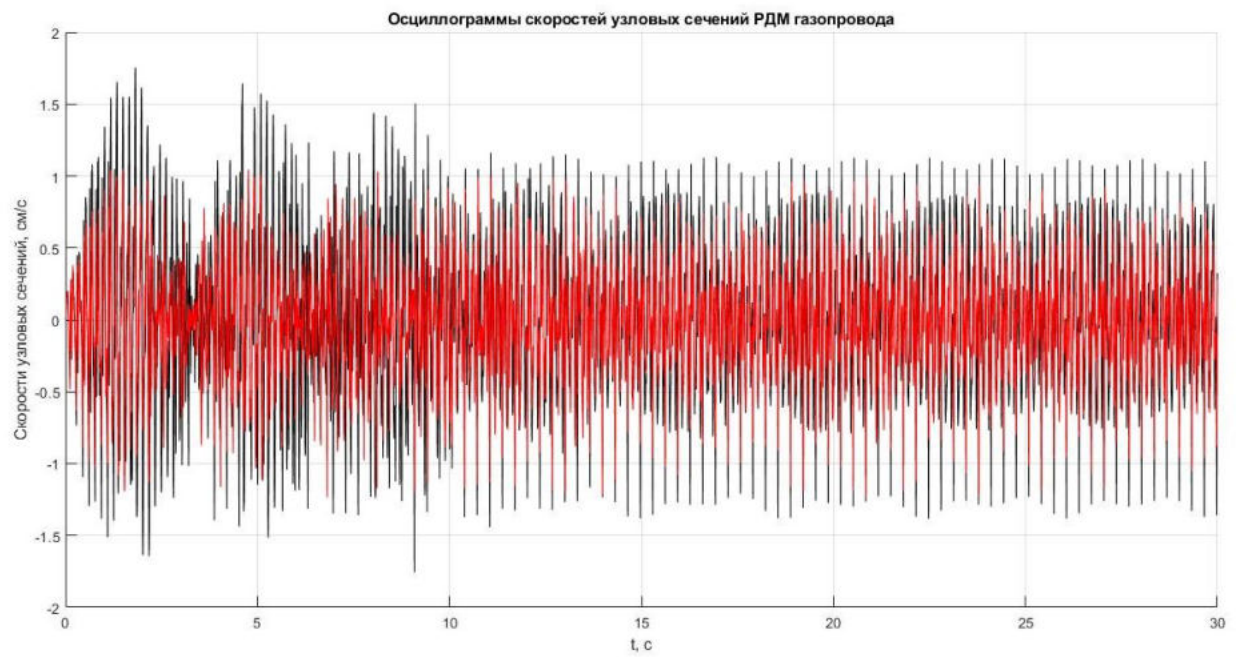


Рисунок П.7 – Осциллограммы скоростей узловых сечений РДМ газопровода

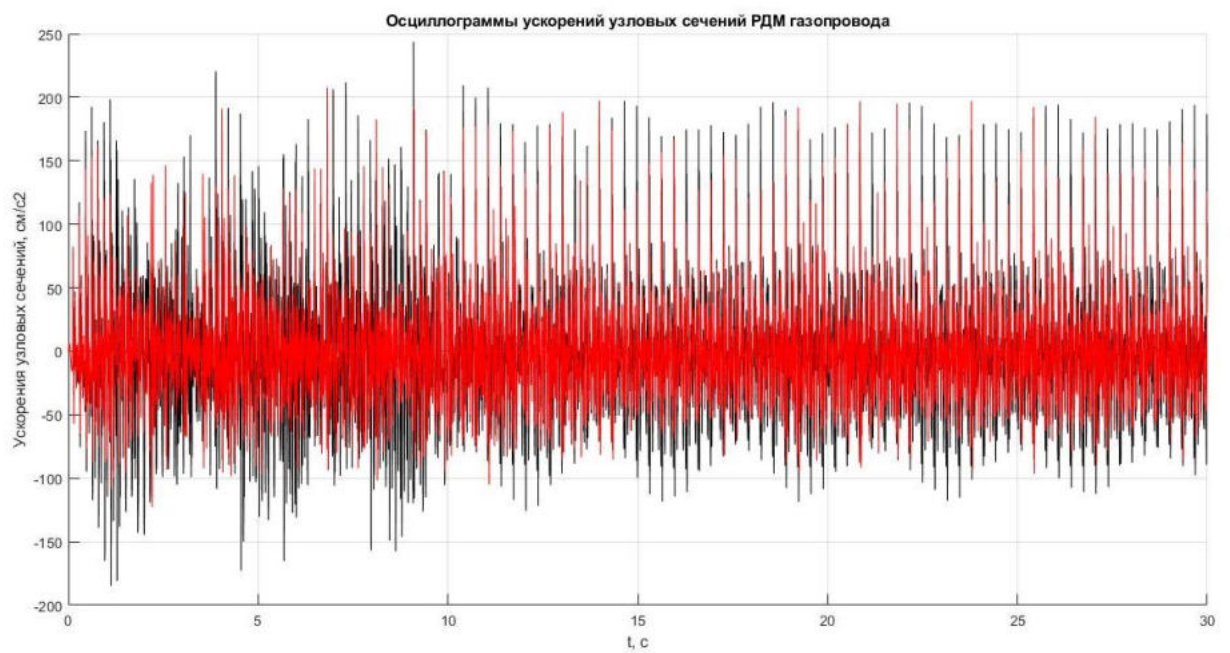


Рисунок П.8 – Осциллограммы ускорений узловых сечений РДМ газопровода

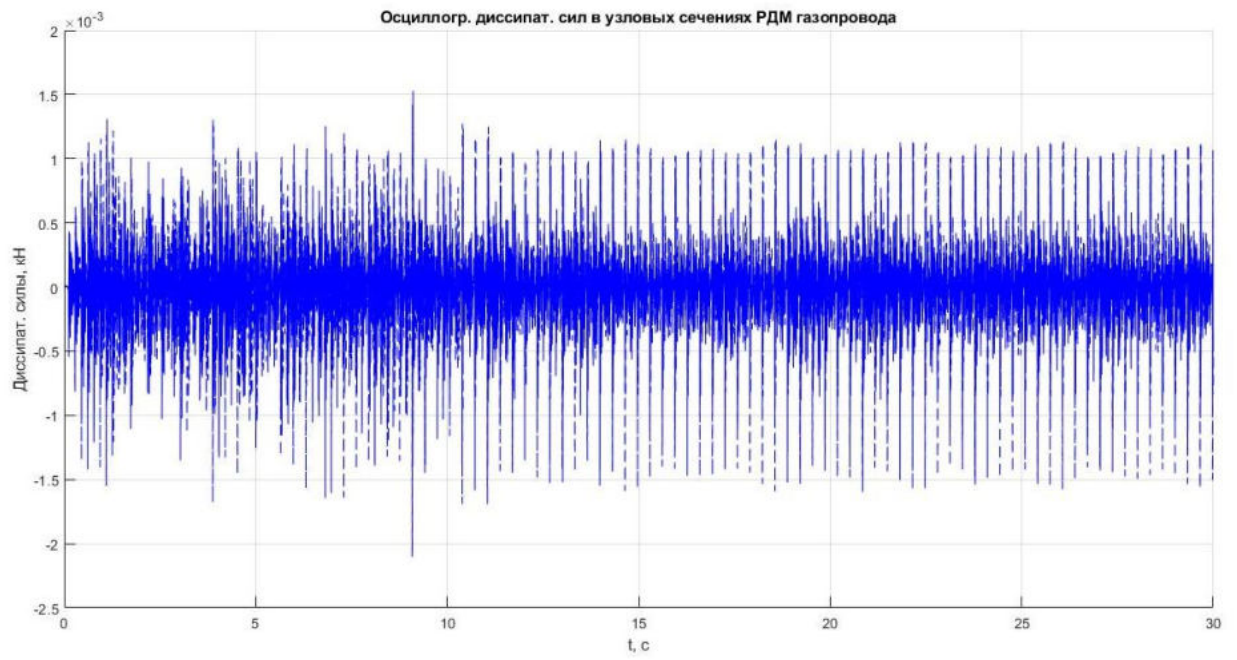


Рисунок П.9 – Оциллограммы диссипативных сил в узловых сечениях РДМ газопровода

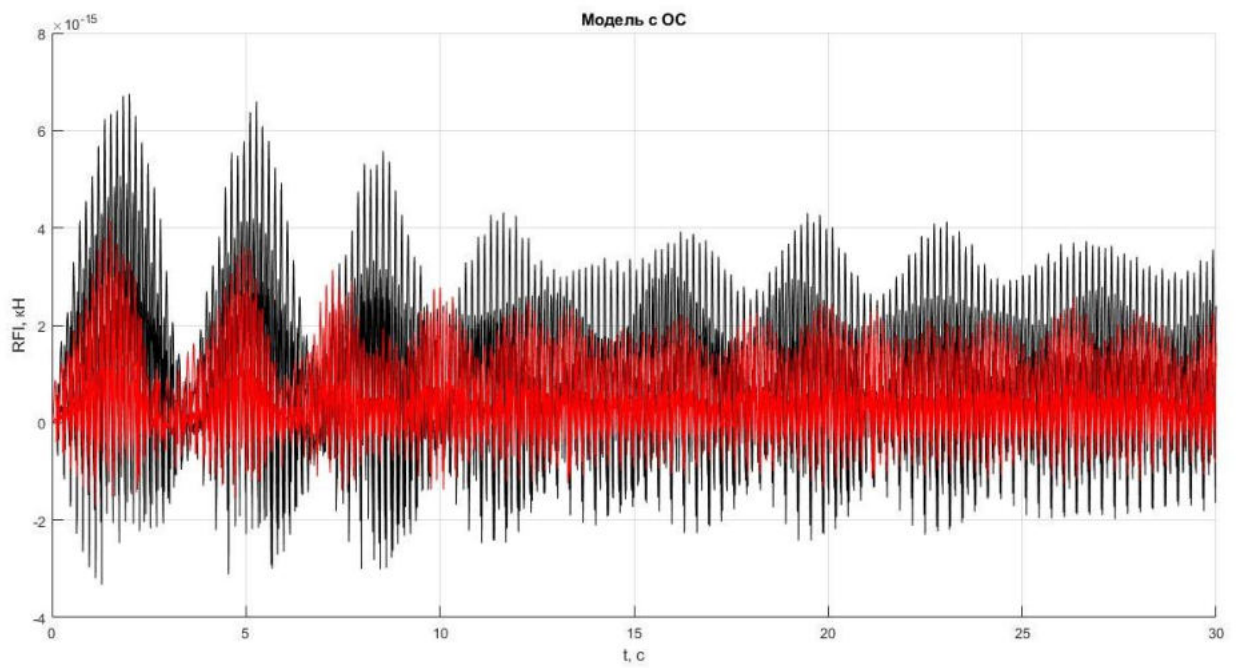


Рисунок П.10 – Модель с ОС

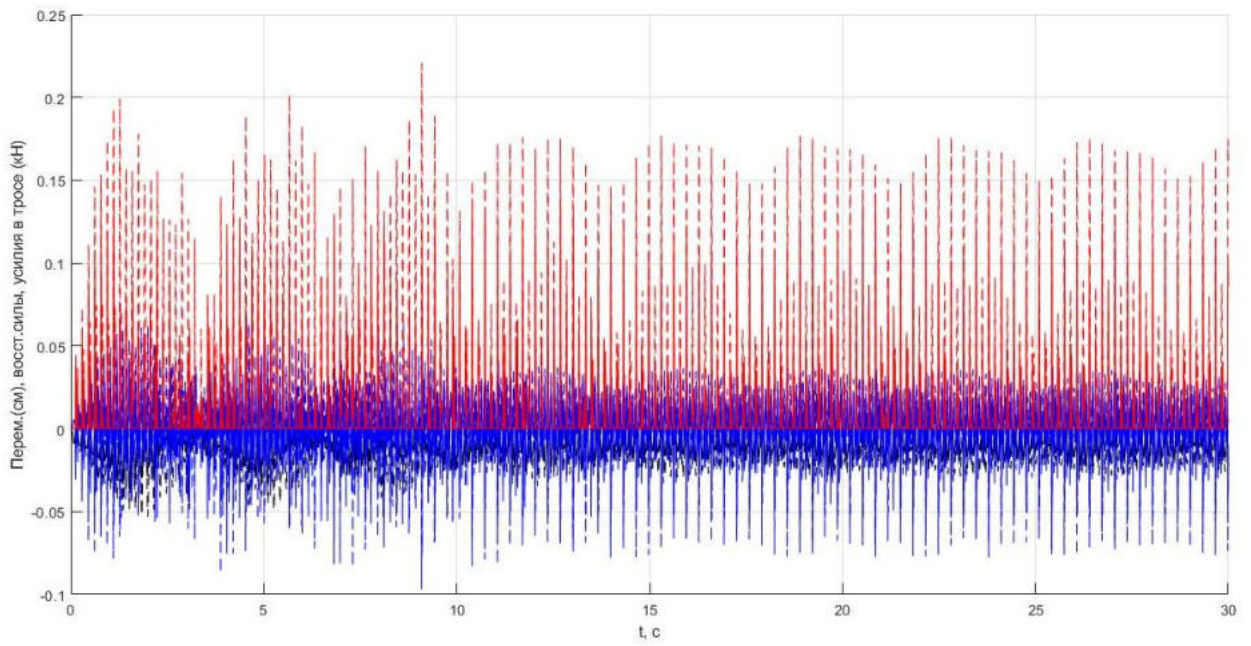


Рисунок П.11 – Силы, действующие на трос

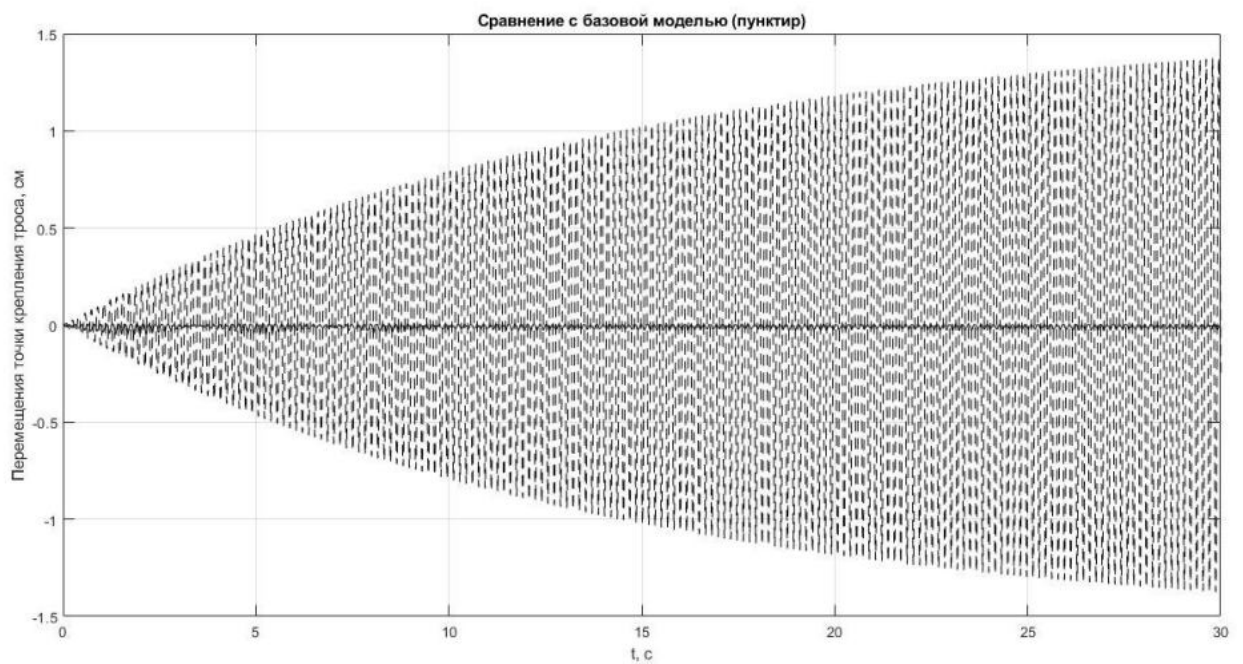


Рисунок П.12 – Сравнение перемещений при использовании виброгасителя и базовой модели

Приложение 4 – Статья в журнале «Вестник ЮУрГУ» (в печати)

**УДК 624.04:539.3:534**

## **Анализ колебаний надземного газопровода при ветровом резонансе**

*Потапов А.Н., Тазеев Н.Т., Амирова Р.Р., Орлова О.Г.*

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Рассмотрен активный способ гашения ветровых автоколебаний модели надземного газопровода, позволяющий отстраивать систему от резонансной частоты путем изменения ее расчетной схемы. Способ заключается в установке в одном из пролетов расчетной модели устройства гашения колебаний, работающего по принципу односторонней связи (ОС). Предложена новая математическая модель колебаний с симметричной формой деформирования оси надземного газопровода. Реализация нестационарного динамического процесса выполнена в рамках теории временного анализа. Интегрирование уравнения движения проведено в матричной форме для системы с конечным числом степеней свободы и учетом внутреннего трения. На численном примере дано сравнение расчетных моделей с симметричной и кососимметричной собственной формой колебания и показана эффективность предложенного подхода с симметричной формой.

*Ключевые слова: надземный газопровод, автоколебания, устройство гашения колебаний, односторонняя связь, форма собственных колебаний, матрица жесткости, перемещение.*

### **Введение**

При колебаниях гибких сооружений типа надземных газопроводов часто происходят явления аэродинамической неустойчивости, обусловленные ветровым резонансом. Надземный газопровод совершает колебания в вертикальной плоскости, т.е. в направлении перпендикулярном ветровому потоку. Само явление аэродинамической неустойчивости в гибких системах при обтекании цилиндрической поверхности ветровым потоком достаточно хорошо описано в классической литературе [1, 2].

Для решения практических вопросов гашения колебаний используются различные подходы, направленные либо на изменение характера обтекания сооружения или характера колебательного процесса [3-10] (активные способы гашения), либо на конструктивное ограничение уровня колебаний путем изменения частоты собственных колебаний [11-13] (пассивные способы). При этом большинство исследований ориентированы, главным образом, на численное моделирование аэродинамической задачи с применением упрощенных моделей демпфирования.

Отдельное место занимает аналитический метод решения задач аэродинамической неустойчивости надземных газопроводов, проводимый в рамках теории временного анализа [14]. В работах [15, 16] для гашения колебаний газопровода используется устройство, выполненное в виде односторонней связи в результате чего, аэродинамическая задача становится конструктивно нелинейной, так как в процессе колебаний расчетной модели газопровода происходит изменение ее расчетной схемы (рис. 1).

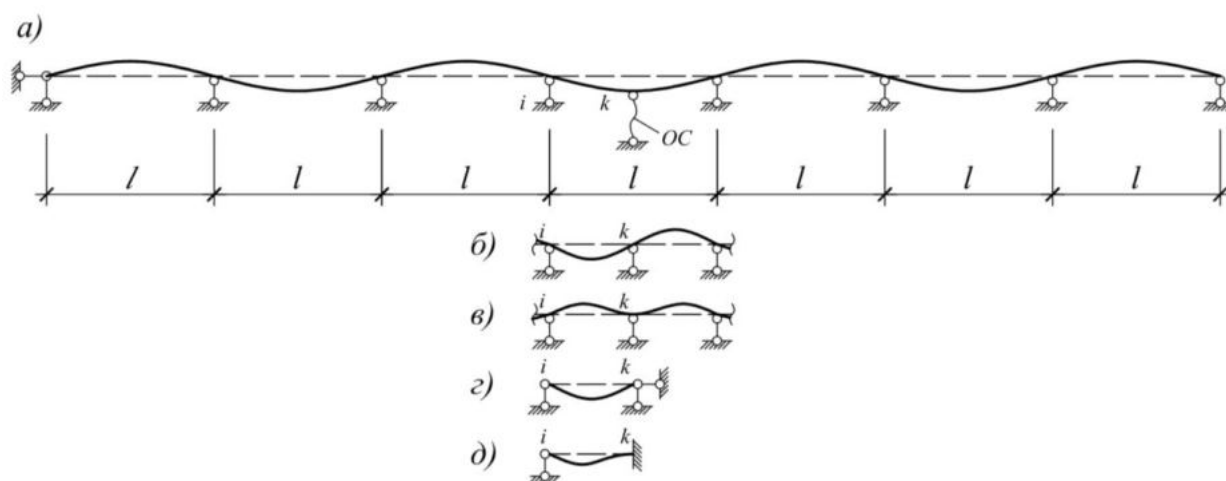


Рис. 1. Расчетная модель надземного газопровода: а – модель с устройством гашения колебаний в центральном пролете; б, в – кососимметричная (б) и симметричная (в) формы колебаний при натяжении троса; г, д – расчетные схемы балок на участке  $i-k$  соответственно при кососимметричной и симметричной формах колебаний

При нестационарном циклическом процессе колебаний происходит поочередный переход от базовой модели (БМ), когда ОС выключена из работы (рис. 1 а), к модели с дополнительной связью (МДС), когда ОС включена в работу (рис. 1 б). Включение ОС (троса) в работу эквивалентно появлению дополнительной связи в виде опорного стержня. При этом следует отметить, что в состояниях БМ и МДС расчетная модель будет иметь различные матрицы жесткости, так как это обусловлено различием расчетных схем.

В настоящей статье дается критический анализ математической модели газопровода с кососимметричной формой колебаний (рис. 1 б), возникающей в новом состоянии расчетной

модели при ее переходе от БМ к МДС [15, 16]. Эта форма собственных колебаний соответствует основному тону модели в состоянии МДС. Также рассматривается более совершенная математическая модель колебаний, основу которой составляет симметричная форма колебаний оси газопровода, представляющая форму собственных колебаний для первого обертона модели в состоянии МДС (рис. 1 в).

### **1. Экспериментальные исследования модели «балка – трос»**

Одним из соавторов статьи (Тазеев Н.Т.) был проведен эксперимент, в котором гибкая балка подвергалась вибрационной нагрузке от легкого электродвигателя, с помощью которого моделировалось аэродинамическое воздействие. Параметры расчетной динамической модели: сечение -  $50 \times 4$  мм, длина 2 м, односторонняя связь в виде троса, в рамках эксперимента принимаемого нерастяжимым. Масса двигателя – 0,36 кг, угловая частота двигателя, вызывающая резонанс  $\theta = 9$  рад/с, амплитуда активной составляющей вертикальной центробежной силы  $P_0 = 5,3$  кг. Цель эксперимента: определить форму колебания деформированной оси балки в момент включения в работу ОС (троса); показать, что форма собственных колебаний модели в состоянии МДС является симметричной вследствие отсутствия поворотов центрального сечения в точке крепления ОС к балке.

Основная предпосылка заключалась в том, что переходной режим балки при включении ОС в работу (трос находится в натянутом состоянии), длится очень короткий промежуток времени (сотые или тысячные доли секунды), что во много раз меньше, чем пребывание расчетной модели в состоянии БМ, когда ОС отключена. Поскольку в состоянии БМ собственная форма колебаний оси балки является симметричной, то при переходе в состояние МДС собственная форма колебаний из-за кратковременности пребывания модели также останется симметричной. Иначе говоря, вследствие инерции движения балки в новом состоянии система не успевает сменить тип симметрии формы колебаний.

Для того, чтобы такой переход от симметричной к кососимметричной форме состоялся необходимо длительное пребывание балки в состоянии МДС, которое по времени может соответствовать нескольким периодам (или даже десяткам периодов) собственных колебаний системы. Только в этом случае, когда система из переходного режима перейдет в установившийся режим, станет возможным переход к кососимметричной форме колебаний, которая в энергетическом плане является более оптимальной, так как соответствует основному тону колебаний расчетной модели балки в состоянии МДС.

На рис. 2 дано фото экспериментальной установки в момент натяжения ОС (а) и выключения из работы (б). На обоих рисунках видно, что упругая линия балки в точке крепления троса сохраняет свою симметрию относительно вертикальной оси, а центральное сечение балки не поворачивается относительно горизонтали. На рисунке 3 представлены частотные характеристики колебаний БМ (рис. 3а) и МДС (рис. 3б), фиксируемые при помощи специального приложения Vibration analysis. Частота колебаний БМ составляет 1,62 Гц, максимальное значение амплитуды виброперемещений 62,94 мм, ускорений – 6,06 мм/с<sup>2</sup>. Частота колебаний МДС – 4,94 Гц, Амплитуда виброперемещений 2,27 мм, ускорений – 23,59 мм/с<sup>2</sup>.

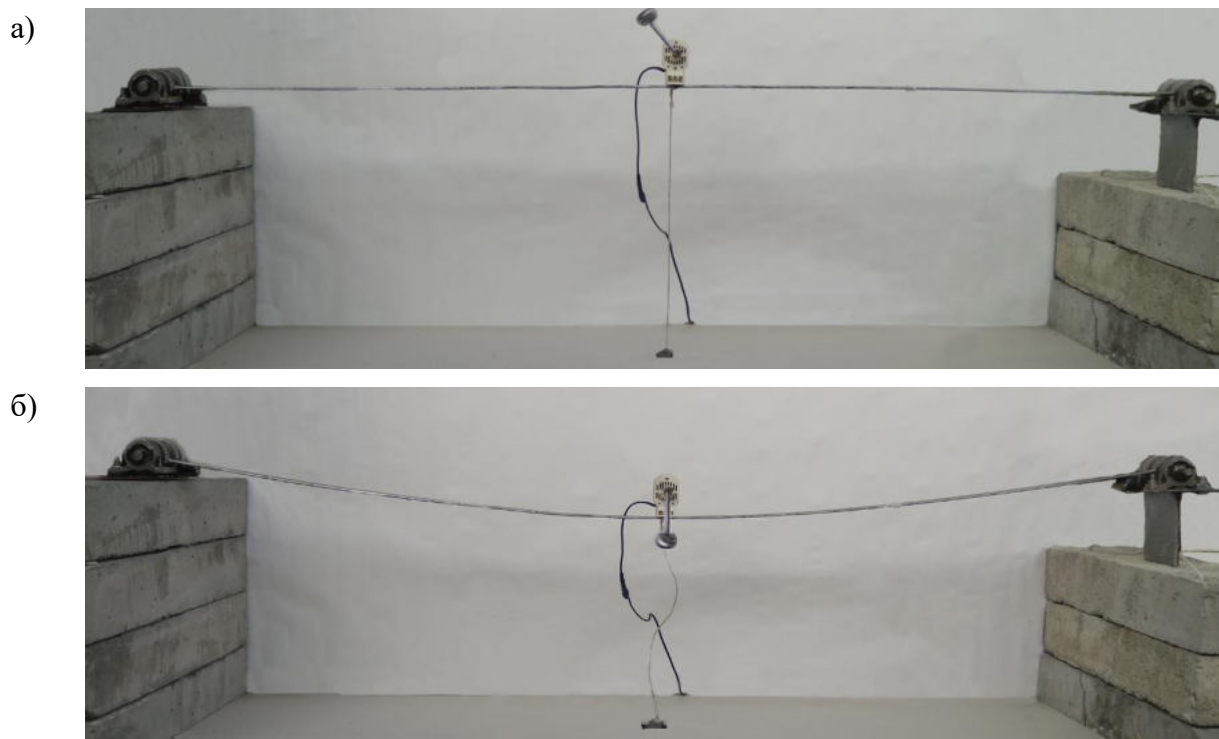
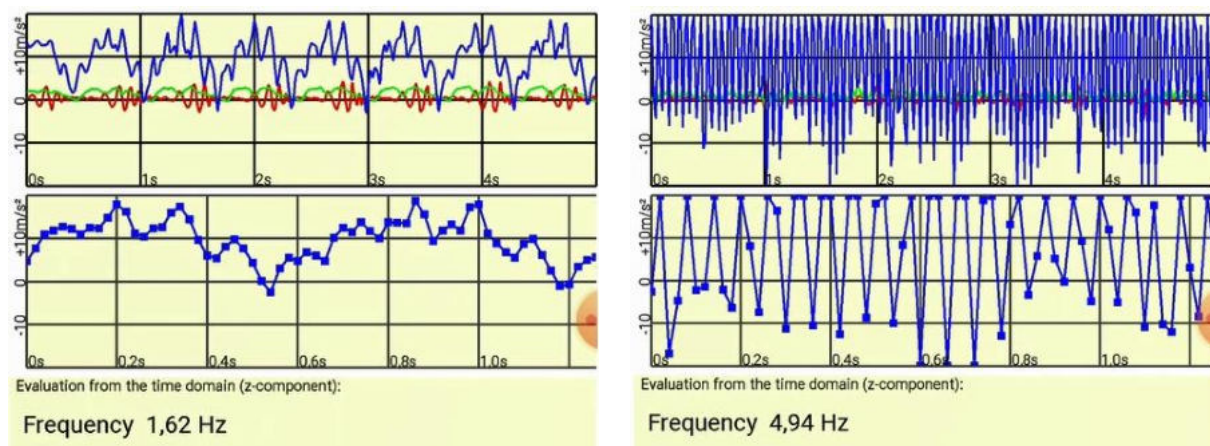


Рис. 2. Расчетная модель балки: а – в состоянии натяжения троса;  
б – в состоянии выключенного троса



а)

б)

Рис. 3. Характеристики колебаний установки: а) БМ; б) МДС

Данные эксперимента подтверждают сделанные выше рассуждения о том, что центральная часть пролета расчетной модели балки (рис.1) в момент натяжения троса имеет конфигурацию, изображенную на рис 1 в. Это означает, что центральное сечение  $k$  в процессе колебаний перемещается поступательно без поворота. При этом участок  $i-k$  на расчетной схеме имеет вид балки с опорным закреплением по схеме «шарнир – заделка» (рис. 1 д). Если учитывать податливость троса, то сечение  $k$  будет превышать уровень горизонтального пунктира и тогда заделка на данном участке становится скользящей в вертикальном направлении.

Так как жесткость балки на рис. 1 д при симметричной форме колебаний выше жесткости шарнирной балки (рис. 1 г) при кососимметричной форме колебаний, то перемещения в первой балке будут ниже, чем в шарнирной балке.

Поэтому устройство гашения колебаний при ветровом резонансе по симметричной форме колебаний в состоянии МДС будет более эффективным: уменьшатся прогибы не только в центральном пролете, где установлена ОС, но и в соседних пролетах расчетной модели газопровода. Это, в свою очередь, позволит увеличить (оптимизировать) шаг расстановки устройств гашения колебаний по сравнению с вариантом расчета при кососимметричной форме колебаний.

## 2. Расчетный алгоритм

Математическое моделирование процесса вынужденных колебаний расчетной динамической модели надземного газопровода выполнялось методом временного анализа, разработанного для конечномерной системы с учетом внутреннего трения, называемую далее дискретной диссипативной системой (ДДС) [14]. Уравнение движения упругой ДДС в рамках линейной модели вязкого сопротивления (1) и начальные условия (2) имеют вид:



$$M\ddot{Y}(t) + C\dot{Y}(t) + KY(t) = P(t), \quad (1)$$

$$Y_0 = Y(t_i), \dot{Y}_0 = \dot{Y}(t_i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots), \quad (2)$$

где  $M = \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$ ,  $C = C^T$ ,  $K = K^T$  – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости;  $Y(t)$ ,  $P(t)$  – векторы перемещений и внешней нагрузки; индекс  $n$  означает число степеней свободы расчетной модели.

Аэродинамическое действие ветровой нагрузки принято по закону синуса:

$$P(t) = P_0 \cdot \sin(\theta t), \quad (3)$$

где:  $P_0$  – вектор амплитуд периодической нагрузки;  $\theta$  – число вихрей, сбегających с цилиндрической поверхности трубы за  $\pi$  секунд (круговая частота возмущающей нагрузки).

Характеристическое уравнение, соответствующее однородному дифференциальному уравнению (1), представляет собой по физическому смыслу уравнение движения собственных форм колебаний и имеет вид матричного квадратного уравнения (МКУ):

$$MS^2 + CS + K = 0 \quad (4)$$

В уравнении (4) искомая матрица  $S$  является матрицей внутренних (спектральных) динамических характеристик ДДС. Переход от однородного уравнения, соответствующего (1), к характеристическому МКУ (4) выполняется с помощью матричной экспоненциальной функции  $\Phi(t) = e^{St}$ . Матрица  $\Phi(t)$  является фундаментальной, если  $S$  удовлетворяет МКУ (4).

Решение МКУ в аналитической форме записи представляется в виде корневой пары:

$$S_{1,2} = M^{-1}(-C + V \pm U)/2, \quad (5)$$

где  $V = -V^T$ ,  $U = U^T$  – кососимметрическая и симметрическая матрицы, связанные между собой системой матричных соотношений. Эти соотношения реализованы в программе по решению уравнения (4) (в системе Matlab). Поскольку колебания конструктивно нелинейной ДДС с учетом работы ОС представляют упругий процесс, то элементы матрицы  $V$  всегда вещественные, а элементы  $U$  – мнимые. По этой причине матричные корни в (5) являются комплексно-сопряженными [14]:  $S_1 = S$ ,  $S_2 = \bar{S}$ .

Уравнение реакции расчетной модели записывается в виде интеграла Дюамеля ( $t \geq t_i$ ) [8]:

$$Y(t) = 2\text{Re}\{\Phi(t - t_i)U^{-1}M[-\bar{S}Y_0 + \dot{Y}_0] + U^{-1}I(t)P_0\}, \quad (6)$$

где

$$I(t) = \int_{t_i}^t \Phi(t - \tau)^T \sin(\theta\tau) d\tau \quad (7)$$

– интеграл с переменным верхним пределом; нижний предел интегрирования  $t_i$  соответствует времени включения / выключения ОС.

Первое слагаемое в уравнении реакции (6) содержит реакцию при свободных колебаниях, вызываемую векторами начальных условий (2), второе – реакцию при вынужденных колебаниях от внешнего воздействия (3).

При постоянном скоростном напоре, когда частота срывов  $\vartheta$  одинакова для всех участков расчетной модели, выражение (7) преобразуется к виду:

$$I(t) = [(S^T)^2 + \theta^2]^{-1}F(t), \quad (8)$$

где матричная функция  $F(t)$  записывается так ( $E$  – единичная матрица) :

$$F(t) = S^t[\Phi(t - t_i)^T \sin(\theta t_i) - E \cdot \sin(\theta t_i)] + [\Phi(t - t_i)^T \cos(\theta t_i) - E \cdot \cos(\theta t_i)]\theta. \quad (9)$$

Как уже отмечено выше, в переходных состояниях расчетной модели (БМ / МДС), соответствующих критическим временным точкам  $t_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ), происходят изменения элементов матрицы жесткости  $K$ . Одновременно с изменением элементов матрицы  $K$  происходит изменение элементов матрицы демпфирования  $C$ , так как построение модели демпфирования, как правило, зависит от характеристик жесткости системы. Так как весь процесс колебаний состоит из переходов расчетной модели из одного состояния в другое (включение / выключение ОС), то реакция конструктивно нелинейной системы во времени разбивается на последовательные интервалы:  $t \in [t_i, t_{i+1}]$  ( $i = 0, 1, \dots$ ), внутри которых параметры расчетной модели (элементы матриц жесткости и демпфирования) постоянны.

Таким образом, при вычислении реакции системы в момент перехода через критическую временную точку  $t_i$  в уравнениях (4), (6), (8), (9) происходят следующие изменения и корректировки. Первое, осуществляется смена внешних динамических параметров расчетной модели (матрицы  $C$  и  $K$  в предыдущем состоянии модели заменяются на аналогичные матрицы в новом состоянии). Второе, осуществляется изменение (смена) внутренних динамических параметров модели, а именно, из решения МКУ (4) отыскиваются новые значения матричных

корней:  $S, \bar{S}$ , с соответствующим значением матрицы  $U$  в (5). Параллельно с этим корректируется фундаментальная матрица  $\Phi(t-t_i) = e^{S(t-t_i)}$ . Третье, в уравнениях (6) и (9) проводится замена индексов  $(i-1)$  на  $i$ , что соответствует колебаниям модели на интервале  $t \in [t_i, t_{i+1}]$ . И, наконец, четвертое, проводится смена начальных условий в уравнении реакции при свободных колебаниях (6): т.е. в качестве векторов начальных условий (2) принимаются векторы перемещений и скоростей, значения которых вычисляются по реакции системы в конце предыдущего интервала времени  $t \in [t_{i-1}, t_i]$ . В целом, реакция конструктивно нелинейной модели имеет квазипериодический характер и сопровождается включением/выключением ОС при соответствующих критических временных точках  $t_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ).

### 3. Численная реализация задачи. Анализ результатов

Расчетная схема (рис. 1) газопровода имеет вид многопролетной неразрезной балки с равными длинами пролетов  $l = 15$  м и числом пролетов 11. При построении РДМ каждый пролет разбивался на 4 элементарных участка длиной  $a = l / 4$  с расположением точечных масс в узловых сечениях (рис. 4), число степеней свободы системы  $n = 33$ .

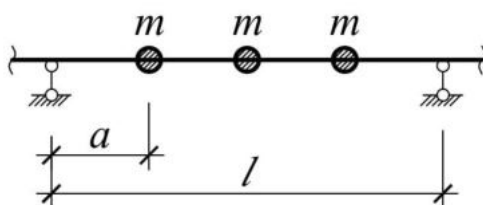


Рис. 4. Пролет расчетной модели с тремя точечными массами

Исходные данные для расчета: внешний и внутренний диаметры сечения трубы соответственно  $D = 219$  мм,  $d = 209$  мм, модуль упругости  $E = 2,1 \times 10^8$  кН/м<sup>2</sup>, логарифмический декремент колебаний стальной трубы  $\delta = 0,07$ . Податливость троса на растяжение принимает значения в диапазоне от 0,001 до 0,1 м/кН.

Погонная масса трубопровода с газом  $m_{\text{пор}} = 0,027$  кН·с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>, точечная масса в  $i$ -м узле составляет:  $m_i = m_{\text{пор}} \cdot a = 0,1017$  кН·с<sup>2</sup>/м. Скорость ветра, вызывающая резонанс данной модели, составляет  $v = 2,951$  м/с. Амплитудное значение узловой возмущающей нагрузки  $p_{0i} = 0,0043$  кН.

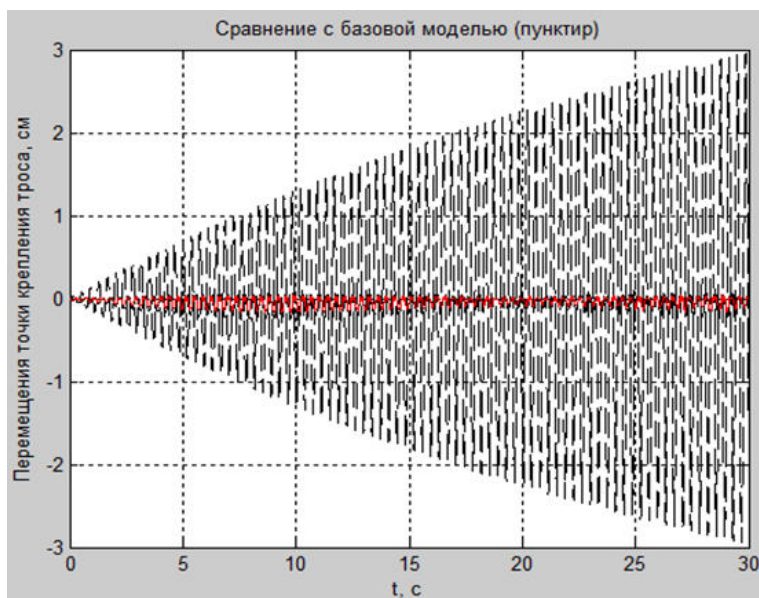
Матрица демпфирования  $C$  принималась в соответствии с моделью непропорционального демпфирования по формуле [14]:

$$C = (KT + TK)/2, \quad (9)$$

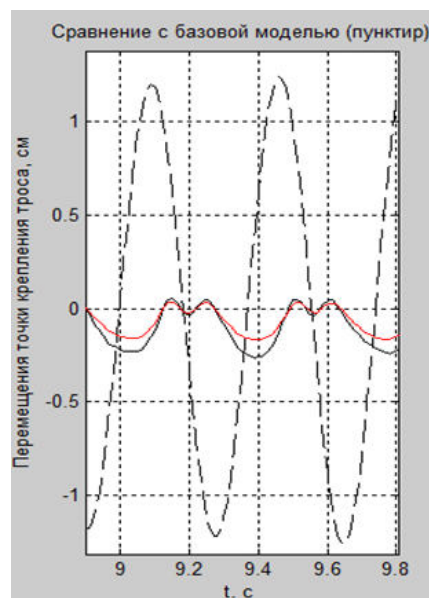
где:  $T = \text{diag}(t_1, \dots, t_n)$ ,  $t_i = \delta/\pi \cdot \sqrt{\frac{m_i}{r_{ii}}}$ ,  $r_{ii}$  – диагональный элемент матрицы жесткости  $K$ .

Анализ колебаний расчетной модели проводился для варианта деформирования оси многопролетной балки по кососимметричной (рис. 1 б) и симметричной (рис. 1 в) формам.

На рис. 5 показана осциллограмма перемещений среднего сечения центрального пролета расчетной модели газопровода в точке крепления троса к трубе (точка  $k$ , рис 1). Осциллограмма перемещений точки  $k$  при симметричной форме деформирования оси балки приведена на фрагменте (рис. 5 б, красная кривая). Видно, что вариант с кососимметричной формой деформирования оси (рис. 5 б, черная кривая) приводит к большим перемещениям по сравнению с перемещениями сечения при симметричной форме. Для сравнения пунктирной линией приведена осциллограмма перемещений сечения  $k$  БМ (без учета устройства гашения колебаний).



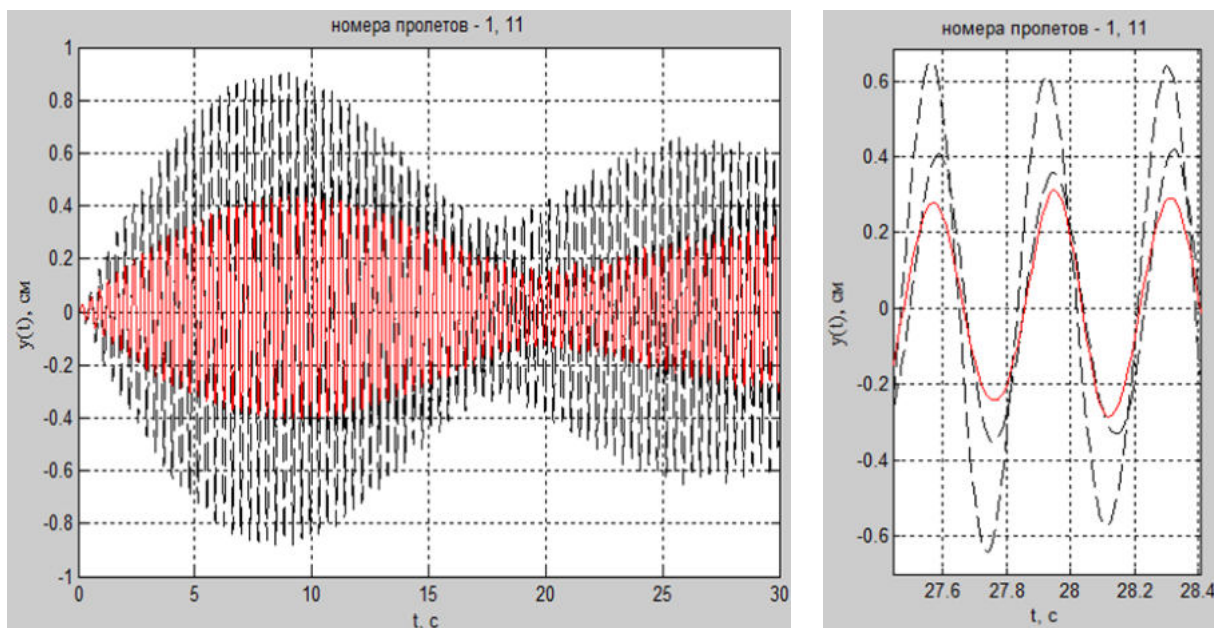
а)



б)

Рис. 5. Осциллограмма перемещений точки крепления троса в середине центрального пролета: а – перемещения точки крепления троса на интервале 30 с; б – фрагмент осциллограммы перемещений (пунктир – БМ; красная кривая – по симметричной форме; сплошная черная кривая – по кососимметричной)

На рис. 6 даны осциллограммы перемещений средних сечений в первом и последнем (11-м) пролетах расчетной модели. Особенностью этих осциллограмм является то, что для варианта с кососимметричной формой деформирования перемещения средних сечений в крайних пролетах (цифры пунктирных кривых – номера пролетов, рис. 6 б) значительно отличаются между собой, в то время как для симметричной формы деформирования перемещения средних сечений совпадают.



а)

б)

Рис. 6. Осциллограмма перемещений средних сечений первого и последнего пролетов расчетной модели: а – перемещения на интервале 30 с; б – фрагмент осциллограммы (красная кривая – по симметричной форме; пунктир – по кососимметричной форме)

Следует также отметить, что амплитуды перемещений, полученные по симметричной форме деформирования оси балки (красная кривая), меньше соответствующих амплитуд по кососимметричной форме деформирования. Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что взятая за основу расчета симметричная форма собственных колебаний является наиболее эффективной при построении динамической реакции конструктивно нелинейной системы.

Результаты, представленные на рис. 7 для центрального сечения  $k$  в точке крепления трубы и троса, в целом повторяют выводы, сделанные по рис. 6. Для отдельных участков осциллограммы (фрагмент 2, рис. 7 в) амплитуды перемещений красной кривой в 2 с небольшим раза меньше соответствующих амплитуд пунктирных кривых.

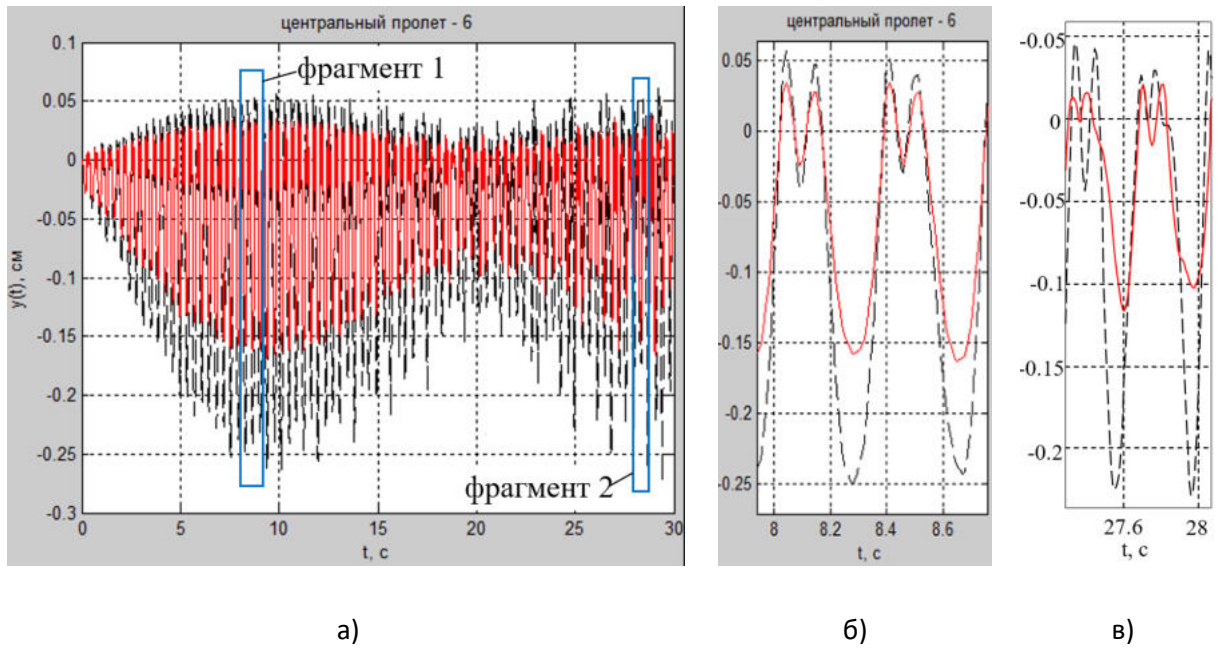


Рис. 7. Осциллограмма перемещений точки крепления троса в середине центрального пролета: *а* – перемещения на интервале 30 с; *б, в* – фрагмент 1 и 2 (красная кривая соответствует симметричной форме; пунктир – кососимметричной форме)

Аналогичная картина наблюдается в тросе в моменты его натяжения, когда расчетная модель находится в состоянии МДС (рис. 8). Амплитуды растягивающих усилий в тросе, вычисленные для варианта с симметричной формой деформирования оси балки (красная кривая), значительно меньше соответствующих амплитуд растягивающих усилий, полученных по кососимметричной форме деформирования оси расчетной модели.

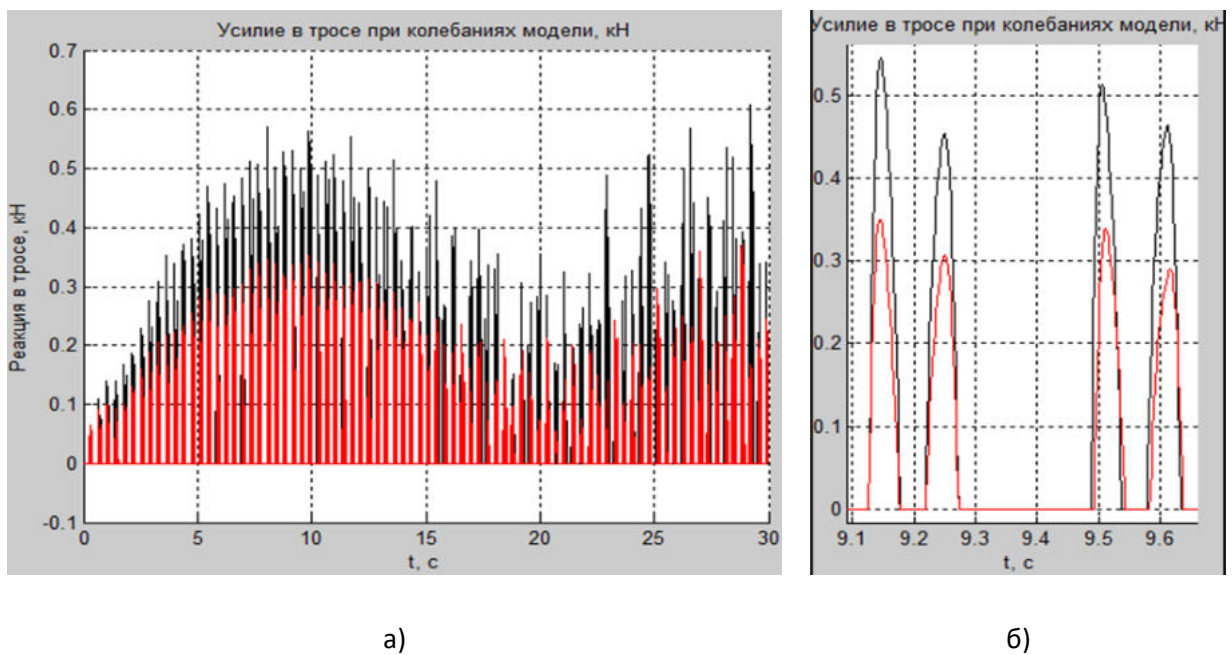


Рис. 8. Осциллограмма усилий в тросе расчетной модели: *а* – на интервале 30 с; *б* – фрагмент осциллограммы (красная кривая – по симметричной форме; черная кривая – по кососимметричной форме)

## **Заключение**

Экспериментальным путем показано, что для модели «балка – трос», находящейся под действием вибрационной нагрузки, при натяжении троса упругая линия балки сохраняет симметричную форму колебания. На основании экспериментальных исследований предложена более совершенная математическая модель колебаний конструктивно-нелинейной системы «надземный газопровод – односторонняя связь». Согласно этой модели, динамическая реакция системы определялась для симметричной формы деформирования оси надземного газопровода во всех состояниях системы. Причем в выключенном состоянии ОС форма деформирования принималась по форме собственных колебаний, соответствующей основному тону БМ, а в состоянии включения ОС в работу системы форма деформирования принималась по собственной форме, соответствующей первому обертону МДС. Эффективность предложенной математической модели иллюстрируется на рассмотренном численном примере.

**Выводы:** 1. Предложенная математическая модель колебаний обеспечивает более эффективную работу конструктивно-нелинейной системы «надземный газопровод – односторонняя связь», по сравнению с моделью, основанной на кососимметричной форме колебаний.

2. По оценкам прогибов, показано, что последние уменьшаются не только в центральном пролете, где установлена ОС, но и в соседних пролетах расчетной модели газопровода. Это позволяет для допустимого уровня предельных перемещений расширить границы протяженности расчетной модели за счет увеличения числа ее пролетов.

3. Открывается возможность для увеличения (оптимизации) шага расстановки устройств гашения колебаний по сравнению с вариантом расчета при кососимметричной форме колебаний, сокращению числа устройств на один километр трассы надземного газопровода и соответствующей экономии материалов и затрат, идущих на изготовление одного устройства гашения.

## Список литературы

1. Бисплингхофф, Р.Л. Аэроупругость: монография / Р.Л. Бисплингхофф, Х. Эшли, Р.Л. Халфман. – М.: ИЛ, 1958. – 799 с.
2. Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – М.: Изд-во Наука, 1967. – 420 с.
3. Wen-Li Chen, Guan-Bin Chen, Feng Xu, Ye-wei Huang, Dong-Lai Gao, Hui Li. Suppression of vortex-induced vibration of a circular cylinder by a passive-jet flow control // Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. – 2020. – Vol. 199. P. – 1-13.
4. Wang L., Jiang T.L., Dai H.L., Ni Q. Three-dimensional vortex-induced vibrations of supported pipes conveying fluid based on wake oscillator models // Journal of Sound and Vibration. – 2018. – Vol. 422. – P. 590-612.
5. Патент РФ №2007109081/12.03.2007 Устройство для гашения резонансных колебаний трубопровода // Патент России №66000.2019. Бюл. № 25. / Потапов А.Н., Дегтярева Н.В. [и др.].
6. Патент РФ №2018127117, 23.07.2018 Устройство подавления вибрации // Патент России №2699300.2019. Бюл. № 25. / Ткаченко И.Г., Шабля С.Г. [и др.].
7. Патент РФ №2014100557/11, 09.01.2014 Амортизатор // Патент России №2550583.2015. Бюл. № 13 / Минасян М.А., Минасян А.М.
8. Патент РФ №2013128975/07, 26.06.2013 Гаситель вибрации // Патент России №2533657.2014. Бюл. № 32 / Антимонов В.А., Жуков Б.М. [и др.].
9. Патент РФ №2017137455, 25.10.2017 Виброизолирующая подвеска трубопровода // Патент России №2669981.2018. Бюл. № 29 / Акопян Л.А., Бескровный А.Ю., [и др.].
10. Патент РФ №2018104385, 05.02.2018 Устройство подавления вибрации // Патент России №2686957.2007. Бюл. № 24 / Ткаченко И.Г., Шабля С.Г. [и др.].
11. Динамический расчет зданий и сооружений / М.Ф. Бернштейн, В.А. Ильичев, Б.Г. Коренев [и др.]; под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.
12. Gabbai, R. D., Venaroya, N. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – Vol. 282. – P. 575–616.
13. Казакевич, М.И. Аэродинамическая устойчивость надземных и висячих трубопроводов / М.И. Казакевич. – М.: «Недра», 1977. – 200 с.
14. Потапов, А. Н. Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных воздействиях / А.Н. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУр-ГУ, 2003. – 167 с.
15. Дегтярева, Н.В. Построение аэродинамически устойчивой расчетной модели надземного газопровода с односторонней связью / Н.В. Дегтярева // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2009. – №16 (149) – С. 23-28.
16. Потапов, А.Н. Временной анализ модели надземного газопровода с односторонними связями при аэродинамической неустойчивости / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2009. – №16 (149) – С. 23-28.



**Потапов Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), potapov.alni@gmail.com.

**Тазеев Наиль Тимурович**, аспирант кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tazeev.nail@gmail.com.

**Амирова Регина Расимовна**, магистрант кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), dgrayman@mail.ru.

**Орлова Ольга Геннадьевна**, магистрант кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), helga11294@mail.ru.

## **Analysis of vibrations of an overground gas pipeline at wind resonance**

*A.N. Potapov, N.T. Tazeev, R.R. Amirova, O.G. Orlova*

South Ural State University, Chelyabinsk

An active method for damping wind self-oscillations of an overground gas pipeline model is considered, which allows the system to be tuned from the resonant frequency by changing its design scheme. The method consists in installing a vibration damping device in one of the spans of the design model, operating on the principle of one-way connection. A new mathematical model of vibrations with a symmetric deformation of the axis of the overground gas pipeline is proposed. The non-stationary dynamic process is realized within the framework of the theory of time analysis. Integration of the equation of motion is carried out in matrix form for a system with a finite number of degrees of freedom and taking into account internal friction. A numerical example is used to compare computational models with a symmetric and skew-symmetric natural mode of vibration and show the effectiveness of the proposed approach with a symmetric shape.

*Keywords: overground gas pipeline, self-oscillations, vibration damping device, one-way connection, natural vibration form, stiffness matrix, displacement.*

### **References**

1. Bisplinghoff, R.L. Aeroelasticity: monograph [Aerouprugost': monografiya] / R.L. Bisplinghoff, H. Eshli, R.L. Halfman. – Moscow.: IL, 1958. 799 p.

2. Panovko, Ya.G. Stability and vibrations of elastic systems [Ustojchivost' i kolebaniya uprugih system] / Ya.G. Panovko, I.I. Gubanova. – Moscow.: Nauka Publ, 1967. 420 p.
3. Wen-Li Chen, Guan-Bin Chen, Feng Xu, Ye-wei Huang, Dong-Lai Gao, Hui Li. Suppression of vortex-induced vibration of a circular cylinder by a passive-jet flow control // Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. – 2020. – Vol. 199. P. – 1-13.
4. Wang L., Jiang T.L., Dai H.L., Ni Q. Three-dimensional vortex-induced vibrations of supported pipes conveying fluid based on wake oscillator models // Journal of Sound and Vibration. – 2018. – Vol. 422. – P. 590-612.
5. Patent RF №2007109081/12.03.2007 Pipeline resonance damping device [Ustrojstvo dlya gasheniya rezonansnyh kolebanij truboprovoda] // Patent, Russia №66000.2019. Bulletin № 25. / Potapov A.N., Degtyareva N.V. [et al.].
6. Patent RF №2018127117, 23.07.2018 Vibration suppression device [Ustrojstvo podavleniya vibracii] // Patent, Russia №2699300.2019. Bulletin № 25. / Tkachenko I.G., Shablya S.G. [et al.].
7. Patent RF №2014100557/11, 09.01.2014 Damper [Amortizator] // Patent, Russia №2550583.2015. Bulletin № 13 / Minasyan M.A., Minasyan A.M.
8. Patent RF №2013128975/07, 26.06.2013 Vibration damper [Gasitel' vibracii] // Patent, Russia №2533657.2014. Bulletin № 32 / Antimonov V.A., Zhukov B.M. [et al.]
9. Patent RF №2017137455, 25.10.2017 Vibration-isolating pipeline suspension [Vibroizoliruyushchaya podveska truboprovoda] // Patent, Russia №2669981.2018. Bulletin № 29 / Akopyan L.A., Beskrovnyj A.Yu., [et al.]
10. Patent RF №2018104385, 05.02.2018 Vibration suppression device [Ustrojstvo podavleniya vibracii] // Patent, Russia №2686957.2007. Bulletin № 24 / Tkachenko I.G., Shablya S.G. [et al.].
11. Dynamic calculation of buildings and structures [Dinamicheskij raschet zdaniy i sooruzhenij] / M.F. Bernshtejn, V.A. Il'ichev, B.G. Korenev [et al.]; edited by B.G. Korenev, I.M. Rabinovich. – 2-nd edition revised and enlarged – Moscow.: Strojizdat, 1984. – 303 p.
12. Gabbai, R. D., Benaroya, H. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – Vol. 282. – P. 575–616.
13. Kazakevich, M.I. Aerodynamic stability of overhead and overhead pipelines [Aerodinamicheskaya ustojchivost' nadzemnyh i visyachih truboprovodov] / M.I. Kazakevich. – Moscow.: «Nedra» Publ., 1977. 200 p.

14. Potapov A.N. Dynamic analysis of discrete dissipative systems under nonstationary influences [Dinamicheskij analiz diskretnyh dissipativnyh sistem pri nestacionarnyh vozdeystviyah] / A.N. Potapov. – Chelyabinsk: SUSU Publ., 2003. 167 p.

15. Degtyareva, N.V. Construction of an aerodynamically stable computational model of an elevated gas pipeline with a one-way connection [Postroenie aerodinamicheski ustojchivoj raschetnoj modeli nadzemnogo gazoprovoda s odnostoronnej svyaz'yu] / N.V. Degtyareva // Bulletin of SUSU. Series: Construction and architecture. 2009. – №16 (149) pp. 23-28.

16. Potapov, A.N. Time analysis of a model of an elevated gas pipeline with one-way connections in case of aerodynamic instability [Vremennoj analiz modeli nadzemnogo gazoprovoda s odnostoronnimi svyazyami pri aerodinamicheskoj neustojchivosti] / A.N. Potapov, N.V. Degtyareva // Bulletin of SUSU. Series: Construction and architecture. 2009. – №16 (149) pp. 23-28.