

А

переслать
22.11.2017

А

С.Ф.М.

На правах рукописи

Фоменко Серафим Александрович

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ
ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
(НА ПРИМЕРЕ ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКИ ОТКРЫТЫХ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ)**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2017

Работа выполнена на кафедре теоретической и прикладной механики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мущанов Владимир Филиппович,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры», проректор по
научной работе, заведующий кафедрой
теоретической и прикладной механики.

Официальные оппоненты: **Улитин Геннадий Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», заведующий
кафедрой высшей математики;

Чернышев Дмитрий Давидович
кандидат технических наук, ПАО «Самарский
институт по проектированию предприятий
нефтеперерабатывающей и нефтехимической
промышленности», инженер 1-ой категории
строительного отдела.

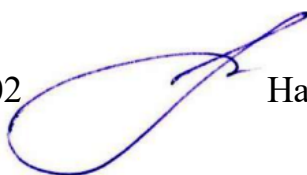
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», г. Воронеж.

Защита состоится «26» января 2018 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38 (0623) 22-77-19, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.006.02



Назим Ярослав Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время достаточно остро стоят вопросы виброзащиты балочных протяженных конструкций (трубопроводы, мосты, провода, канаты большого диаметра и т.д.) при изгибных колебаниях.

Надземные магистральные трубопроводы обладают достаточно густым спектром собственных частот. Весьма низкие показатели логарифмических декрементов колебаний ($0,02 \div 0,05$) обуславливают легкую возбуждаемость автоколебаний трубопроводов при действии ветра, а также при пульсациях скорости движущегося жидкого или газообразного продукта.

Известны случаи появления повышенных вибраций висячих стальных мостов, а также их аварии, которые объяснялись в основном явлением вихреобразования и автоколебаниями. Одним из эффективных способов предотвращения и уменьшения амплитуд автоколебаний является повышение демпфирования и в этой связи применение динамических гасителей колебаний для висячих мостов представляет интерес.

Отметим, что действие ветра является основной причиной колебаний проводов, канатов и других подобных конструкций. Для проводов с большим диаметром, а также для связки проводов вероятность возникновения галопирования и амплитуда колебаний выше, чем для проводов с малым диаметром. Известно, что колебания оттяжек мачт могут возникать из-за устойчивых периодических колебаний ствола мачты при действии ветра.

В открытых распределительных устройствах (ОРУ) напряжением 110 кВ и выше до недавнего времени в основном использовалась гибкая ошиновка, выполненная одиночными или расщепленными сталеалюминиевыми проводами. Вместе с тем еще в 30-х годах в СССР успешно применялись конструкции с жесткими трубчатыми шинами. В 50-х годах жесткая ошиновка (ЖО) была успешно внедрена в закрытые распределительные устройства (ЗРУ) напряжением 110-220 кВ, а с 60-х годов она все шире стала использоваться в ОРУ 110 кВ, а затем в ОРУ более высоких напряжений. Сегодня в странах СНГ жесткую ошиновку массово используют при новом строительстве распределительных подстанций напряжением от 35 до 750 кВ, а за рубежом – до 1150 кВ. Главные преимущества жесткой ошиновки (ЖО) – это компактность, высокая заводская готовность и минимальные затраты при эксплуатации.

Одним из основных вопросов при проектировании конструкции жесткой ошиновки в ОРУ является вопрос стабилизации конструкции под действием различных динамических нагрузок. Реализация конструкций ЖО с большими пролетами труб-шин показали реальную опасность возникновения ветрового резонанса цилиндрических конструкций труб-шин (аэроупругие автоколебания). Это явление опасно тем, что при малых скоростях ветрового потока происходят интенсивные колебания трубы в вертикальной плоскости, добавляя к статическим нагрузкам существенную динамическую составляющую. Уровень ее сопоставим с нагрузками от собственного веса конструкций и может в совокупности с остальными нагрузками вызывать напряжения, близкие к предельным по 1-й группе предельных состояний. Поэтому гашение колебаний кон-

струкций ЖО является актуальной задачей, так как эксплуатация конструкций из алюминиевых сплавов на объектах с динамическими нагрузками вообще не рекомендуется из условий обеспечения прочности и эксплуатационной надежности сооружений.

Степень разработанности темы исследования. В работах Э. Симиу, Р. Сканплана, Кучеренко В.А., Савицкого Г.А., Пичугина С.Ф., Горохова Е.В., Казакевича М.И., Назима Я.В., Кузнецова С.Г., Махинько А.В. исследованы процессы обтекания ветровым потоком зданий и сооружений. В работах Коренева Б.Г., Рабиновича И.М., Резникова И.М., Ден-Гартога Дж.П., Пановко Я.Г., Бабицкого В.И. рассмотрены различные способы гашения колебаний протяженных конструкций. В работах Долина А.П., Егоровой Л.Е., Кулябко В.В., Денисова Е.В. рассмотрены существующие и новые способы гашения колебаний конструкций ЖО, однако, как в научной, так и в нормативной литературе отсутствуют единые подходы к выбору того или иного способа или демпфирующего устройства и их рациональных параметров.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы Д-2-02-11 «Разработка комплексных моделей обеспечения надежности уникальных сооружений на основании учета характерных особенностей проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации» (2011-2012 гг., гос. рег. №0111 U 001804), а также кафедральной темы К-2-07-11 «Усовершенствование аналитических и численных методов расчета строительных конструкций, их элементов и соединений на действие статических и динамических нагрузок с учетом влияния служебного термина и факторов эксплуатационного износа» (2011-2016 гг., гос.рег. №0111 U 008169).

Целью исследования является усовершенствование существующих и создание новых рациональных демпфирующих устройств и способов гашения изгибных колебаний балочных конструкций (на примере жесткой ошиновки открытых распределительных устройств) в ветровом потоке.

Задачи исследования:

1. Обоснование выбора существующих и новых способов гашения колебаний балочных конструкций для исследования;
2. Создание математических моделей совместной работы системы «балочная конструкция-демпфирующее устройство»;
3. Создание методики расчета основных параметров гасителя при колебаниях системы «балочная конструкция ЖО-демпфирующее устройство» в воздушном потоке;
4. Определение рациональных параметров и схемы конструкций ЖО с демпфирующими устройствами;
5. Проведение экспериментальных исследований демпфирующих устройств разных типов в лабораторных условиях и при натурных испытаниях;
6. Разработка новых рекомендаций по методике расчета основных параметров рациональных способов гашения колебаний балочных конструкций ЖО.

Объект исследования – балочные конструкции, находящиеся в ветровом потоке (в т.ч. жесткая ошиновка открытых распределительных устройств).

Предмет исследования – существующие и новые способы гашения изгибных колебаний балочных конструкций (в т.ч. жесткой ошиновки), вызванных вихревым возбуждением ветра.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Впервые разработана математическая модель совместной работы системы «балочная конструкция-«гаситель на нити», учитывающая как одну, так и две установленные массы на нити;
2. Впервые для системы «ЖО-«гаситель на нити» установлены основные зависимости напряженно-деформированного состояния, позволившие обосновать рациональные параметры «гасителя на нити» для гашения изгибных колебаний конструкций жесткой ошиновки;
3. Для системы «ЖО-«пружинный гаситель» установлены основные динамические характеристики, позволившие обосновать рациональные параметры «пружинного гасителя» для существенного (практически до нуля) снижения амплитуды изгибных колебаний конструкций жесткой ошиновки;
4. Данные экспериментальных натурных и лабораторных динамических испытаний совместной работы новых демпфирующих устройств и балочной конструкции, позволившие усовершенствовать методику их расчета и проектирования.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- предложена, теоретически и экспериментально обоснована новая конструктивная форма динамического гасителя («пружинный гаситель»), позволяющего эффективно гасить изгибные колебания балочной конструкции при установке одного или нескольких демпфирующих элементов в пролете как внутри, так и снаружи конструкции;
- теоретически и экспериментально обоснованы рациональные параметры «гасителя на нити», «гасителя в виде жесткой вставки» и «пружинного гасителя» для конструкций балочного типа;
- разработан новый способ гашения изгибных колебаний конструкций жесткой ошиновки – «гаситель на нити». Такой гаситель минимизирует затраты труда и средств, так как его настройка осуществляется без демонтажа трубы-шины как при первичной установке, так и при последующей эксплуатации;
- на основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана схема гашения колебаний консольной конструкции балочного типа, расположенной над главным входом ДП КСКЦ ПАО «Концерн СТИРОЛ» г. Горловка (2013 г., экономический эффект 72,202 тыс. грн.).
- разработана инженерная методика расчета основных параметров «гасителя на нити» и «пружинного гасителя» для гашения колебаний конструкций ЖО.

Методология и методы исследования. В основу теоретических исследований положены методы строительной механики, рассмотренных на основе дифференциальных уравнений. При обработке данных динамических испытаний балочных конструкций ЖО при помощи вибрационной машины применялся метод Фурье (получение амплитудно-частотных характеристик колебаний) и t-критерий Стьюдента (статистическая обработка данных).

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели совместной работы системы «балочная конструкция-гаситель» новых способов гашения колебаний конструкций;
2. Рациональные параметры новых способов гашения колебаний ЖО;
3. Результаты теоретических исследований и экспериментальные данные динамических испытаний совместной работы балочных конструкций (в т.ч. ЖО) и новых демпфирующих устройств;
4. Методика расчета основных параметров новых гасителей для гашения колебаний конструкций ЖО.

Степень достоверности результатов подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненных с применением современных методов, приборов и оборудования в лабораторных и в производственных условиях; адекватностью математической модели работы балочной конструкции ЖО с гасителями колебаний в резонансном режиме; соответствием результатов эксперимента теоретическим предпосылкам.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы доложены на: Международной научно-практической конференции «Строительство-2011» (Россия, Ростов-на-Дону, 2011 г.); семинаре преподавателей вузов «Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки» в рамках Международной олимпиады по теоретической механике (Беларусь, Гомель, 2014 г.); XVIII Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Россия, Москва, 2015 г.); V, IX-X, XII-XIII Международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий» (Украина, г. Макеевка, 2006, 2010-2011, 2013-2014 гг.); I Международном строительном форуме «Строительство и архитектура – 2017» (ДНР, г. Макеевка, 2017 г.); конференции «Энергоэффективность и устойчивое развитие в гражданском строительстве» (SPbEES-2017, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 29-30 августа 2017 г.).

В полном объеме законченная диссертационная работа докладывалась на расширенном заседании кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (октябрь 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, отражающих ее основное содержание, в том числе: 6 статей в специализированных научных изданиях (5 публикаций – в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины, 1 – в рецензируемых научных изданиях, утвержденных перечнем ВАК МОН ДНР), 2 – в других изданиях, 4 доклада на международных научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка литературы из 124 наименований и 5 приложений.

Общий объем работы 163 страницы, в том числе: 110 страниц основного текста, 18 полных страницы с рисунками и таблицами, 14 страниц списка литературы, 21 страница приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** изложена общая характеристика работы, приведено обоснование актуальности темы. Определена цель, задачи исследования, дана характеристика объекта и предмета исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В **первом разделе** анализируется состояние вопроса. Приводятся общие исторические этапы и предпосылки изучения вопроса гашения колебаний конструкций ЖО под действием вихревого возбуждения ветра. Рассматриваются основные конструктивные решения конструкций жесткой ошиновки. Выполнен обзор существующих демпфирующих устройств и способов гашения колебаний конструкций ЖО. Проведен сравнительный анализ отечественной, а также зарубежной нормативной документации и литературы в области расчета конструкций жесткой ошиновки на вихревое возбуждение ветра.

Сделан вывод о том, что в нормативных документах по проектированию ЖО отсутствуют четкие рекомендации по расчетам параметров демпфирующих устройств для конструкций ЖО, а также их применению для разных параметров трубы-шины, в частности, балочного типа.

На основе выполненного критического анализа сформулированы цель, методы и задачи исследования.

Во **втором разделе** рассмотрены математические модели новых способов гашения колебаний конструкций жесткой ошиновки.

В соответствии с современными инженерными представлениями любой физический процесс или явление может быть представлен в виде некоторой упрощенной модели (схемы), принципы действия которой достаточно близко отражают характеристики реального процесса или явления. Так, при моделировании процесса колебания упругих систем, как правило, используются модели, содержащие конечное или бесконечное количество степеней свободы.

Новые способы гашения колебаний представлены следующими видами:

- 1) «Гаситель на нити» с одной массой (рисунок 1);

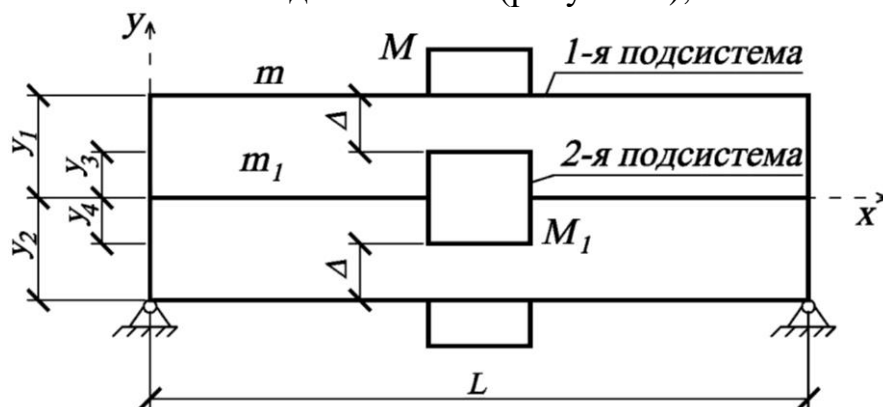


Рисунок 1. Схема совместной работы «гасителя на нити» с трубой-шиной: m – погонная масса трубы; m_1 – погонная масса нити; y_1 , y_2 – координаты перемещений верхних и нижних точек трубы-шины; y_3 , y_4 – координаты перемещений верхних и нижних точек гасителя; Δ – зазор между массой и стенкой трубы; M_1 – масса гасителя.

2) «Гаситель на нити» с двумя массами (рисунок 2);

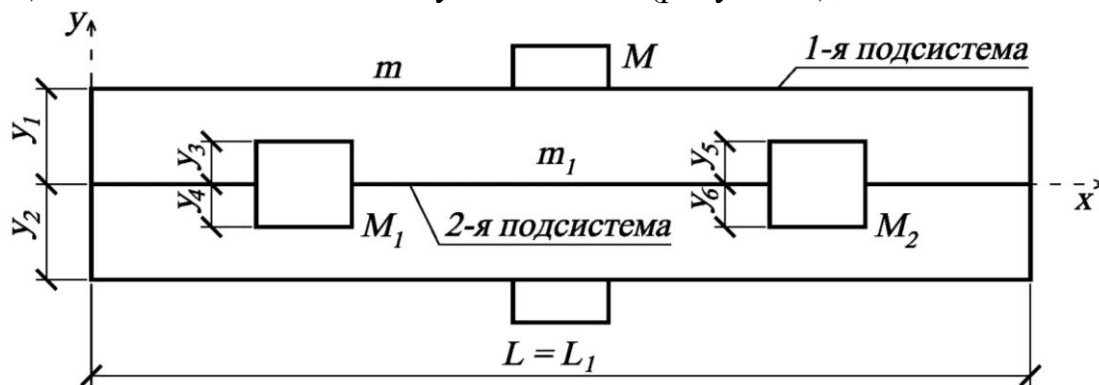


Рисунок 2. Схема совместной работы

«гасителя на нити» с двумя массами с трубой-шиной:

y_1, y_2 – координаты перемещений верхних и нижних точек трубы-шины; y_3, y_4, y_5, y_6 – координаты перемещений верхних и нижних точек гасителя; M_1, M_2 – массы гасителя; m – погонная масса трубы; m_1 – погонная масса нити; M – масса установленной вибромашины.

3) «Пружинный гаситель» (рисунок 3);

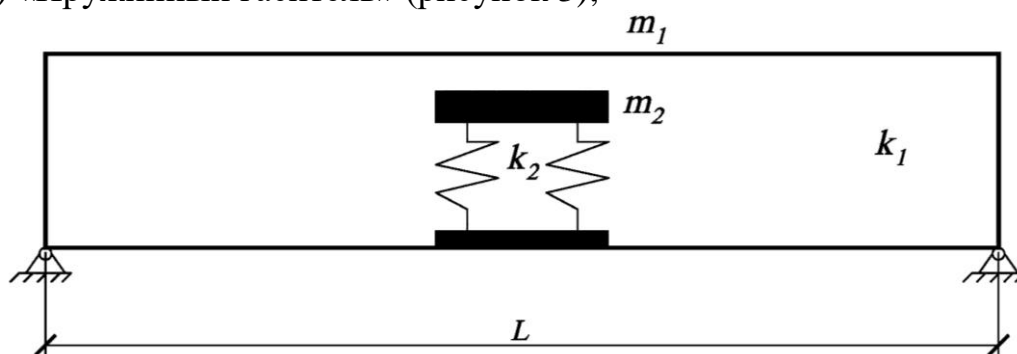


Рисунок 3. Схема совместной работы «пружинного гасителя» и трубы:

m_1, m_2 – массы трубы и гасителя; k_1, k_2 – жесткости трубы и гасителя.

4) Гаситель в виде жесткой вставки (рисунок 4).

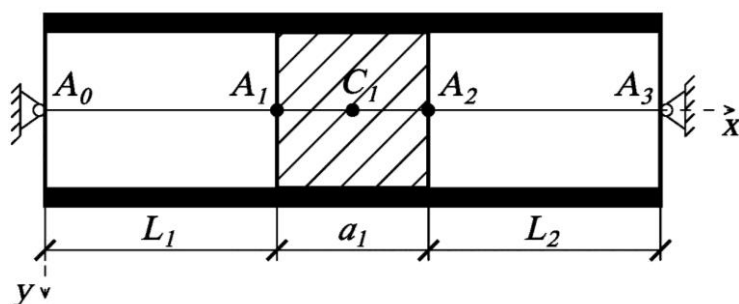


Рисунок 4. Схема совместной работы

гасителя в виде жесткой вставки и трубы-шины:

L_1, L_2 – длина части трубы-шины; a_1 – длина жесткой вставки.

Будем рассматривать стержневую конструкцию на упругих опорах, внутри которой установлено демпфирующее устройство, что вызывает продольные усилия в ней. Величина как линейной, так и угловой жесткости опорных связей должна соответствовать принципу эквивалентности перемещений упругой связи.

В работе рассмотрены свободные затухающие поперечные колебания стержня круглого сечения с погонной массой m (трубы-шины), изгибной жесткостью EI , нагруженного продольной силой T , на упругих опорах (рисунок 5).

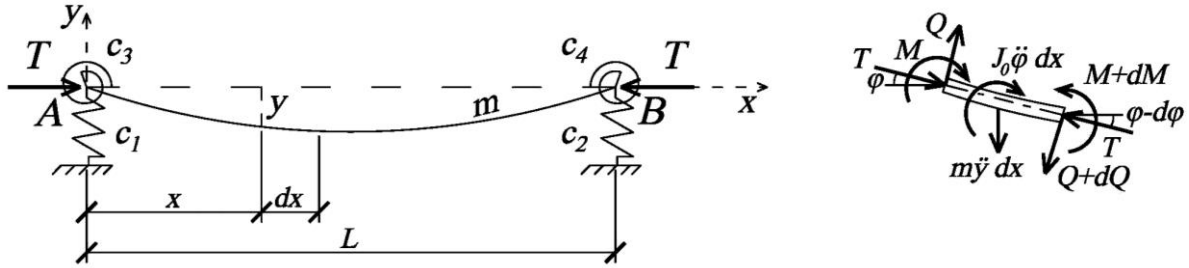


Рисунок 5. Схема колебаний стержня с распределенной массой на упругих опорах.

Известно, что наиболее точным описанием процесса поперечных колебаний является дифференциальное уравнение, в котором учтены силы инерции поворота ($J_0 \ddot{\phi} \cdot dx$) и сдвига поперечных сечений:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - m i^2 \left(1 + \frac{kE}{G} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{i^2 k m^2}{FG} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} + T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial y}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

Граничные условия имеют вид: $M_0 = c_3 Y'_0$, $P_0 = -c_1 Y_0$, $M_L = -c_4 Y'_L$, $P_L = c_2 Y_L$. Граничные условия для шарнирных опор: $M_0 = 0$, $Y_0 = 0$, $M_L = 0$, $Y_L = 0$.

Для последующего проведения экспериментальных исследований с установкой на трубу-шину вибромашины, последняя в математической модели учитывалась в виде сосредоточенной массы (рисунок 6).

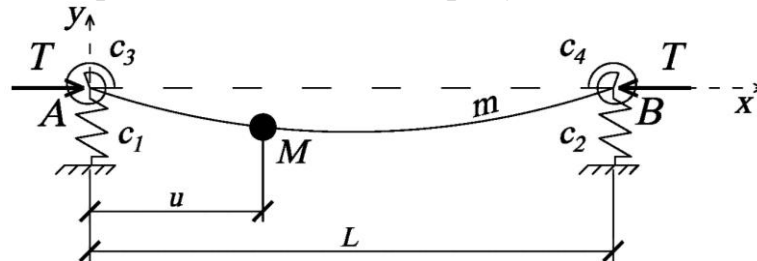


Рисунок 6. Схема колебаний стержня на упругих опорах с распределенной массой и одной сосредоточенной массой.

«Гаситель на нити» представляет собой затухающие колебания весомой нити погонной массой m_1 с сосредоточенной массой M_1 , растянутой силой T_1 (рисунок 7).

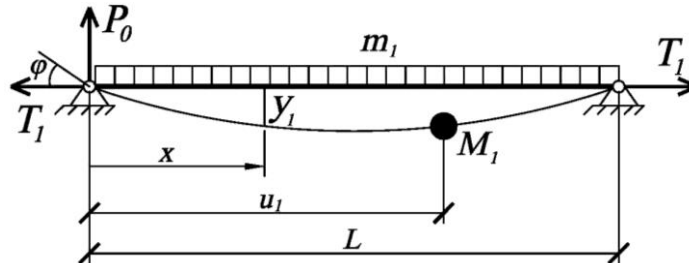


Рисунок 7. Схема колебаний нити с распределенной массой и одной сосредоточенной массой на шарнирных опорах.

Дифференциальное уравнение поперечных колебаний нити погонной массы m_1 , растянутой силой T_1 , с учетом затухания имеет вид

$$m_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} - T_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial x^2} + \beta_1 \frac{\partial y_1}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

с граничными условиями трубы в местах закрепления.

«Гаситель на нити» с симметричным расположением сосредоточенных масс M_1 и M_2 приводится к системе с двумя степенями свободы (рисунок 8).

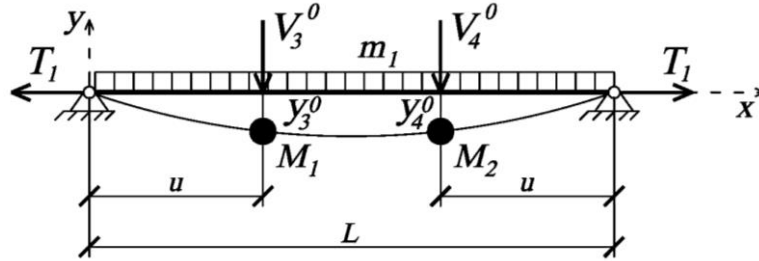


Рисунок 8. Схема колебаний «гасителя на нити» с двумя сосредоточенными массами.

В расчетах принят абсолютно упругий удар стенок трубы о «гаситель на нити». По известным формулам теории удара определяются скорости движения после соударения.

Совместную работу конструкции, подверженной вихревому возбуждению ветра, и пружинного гасителя представляем в виде системы с двумя степенями свободы.

Система дифференциальных уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 + ay_1 - by_2 = q \sin \theta t, \\ \ddot{y}_2 - cy_1 + cy_2 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для гасителя в виде жесткой вставки (рисунок 9) механическая система мысленно разбивается на три тела: стержень A_0A_1 , твёрдое тело A_1A_2 и стержень A_2A_3 . Уравнения движения механической системы состоят из уравнения поперечных колебаний первого стержня A_0A_1 , уравнений движения твёрдой вставки A_1A_2 и уравнения поперечных колебаний второго стержня A_2A_3 .

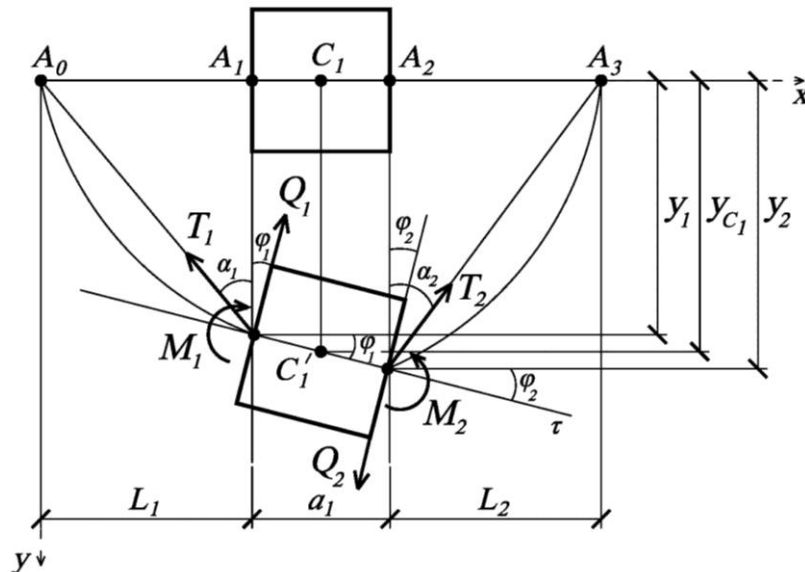


Рисунок 9. Расчетная схема гасителя в виде жесткой вставки.

Дифференциальные уравнения поперечных колебаний стержней A_0A_1 и A_2A_3 имеют вид

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0, \quad (4)$$

учитывая шарнирное опирание на концах.

Уравнения движения твёрдой вставки A_1A_2 с частью трубы:

$$\begin{cases} m_1 a_y = \sum_k F_{ky}, \\ J_c \varepsilon = \sum_k m_{c1} (\bar{F}_k), \end{cases} \quad (5)$$

По приведенным формулам получены трансцендентные уравнения для определения частот собственных колебаний трубы-шины и новых гасителей колебаний, а также определены амплитуды собственных колебаний трубы-шины с приведенными гасителями колебаний.

В результате проведенных исследований на основании разработанных математических моделей:

а) получены рациональные параметры «гасителя на нити» с одной или двумя массами:

- рациональные параметры частоты гасителя лежат в пределах (1,75-2,2) от частоты колебаний 1-го тона шины;
- рациональные параметры массы гасителя лежат в пределах (1-3)% от массы шины;
- размеры зазоров между гасителем и стенкой шины рекомендуется принимать в пределах 0,15-0,2 ее диаметра;

б) применен пружинный гаситель для гашения колебаний конструкций жесткой ошиновки. Рекомендуемая масса пружинного гасителя лежит в пределах (1-3)% от массы шины. Жесткость пружинного гасителя зависит от частоты собственных колебаний трубы-шины.

в) впервые получены рациональные параметры гасителя в виде жесткой вставки. Гаситель рационален при его небольшой массе (плотность менее 500 кг/м³) и длине равной 40-60% от длины трубы.

В третьем разделе проверялись математические модели и изучались фактические динамические характеристики конструкции жесткой ошиновки без гасителей колебаний и с гасителями колебаний.

Для возбуждения колебаний стальных конструкций использовалась вибромашина электромеханического эксцентрикового типа (рисунок 10). Она имеет два синхронно вращающихся во встречных направлениях эксцентрика, приводимых в действие электромотором. Машина закрепляется на конструкции и плавное изменение угловой скорости вращения валов вибромашины дает возможность изучать поведение конструкции при разных частотах возмущающей силы и отмечать резонанс.

Технические характеристики вибромашины: электродвигатель коллекторный, постоянного тока (ДП 108-24/300); номинальная мощность – 300 Вт; номинальное напряжение – 24 В; номинальная частота вращения –

2000 мин⁻¹; номинальный момент нагрузки – 1,4 Н·м; номинальный потребляемый ток – 20 А; масса вибромашины в сборе – 25 кг; максимальное амплитудное значение возмущающей силы – 5,0 кН.



Рисунок 10. Вибромашина с эксцентриками.

Определение частоты и амплитуды колебаний трубы-шины производилось в следующем порядке:

1. На испытываемую конструкцию наклеивается пьезоэлектрический датчик (рисунок 11), который соединен с аналогово-цифровым преобразователем и компьютером.

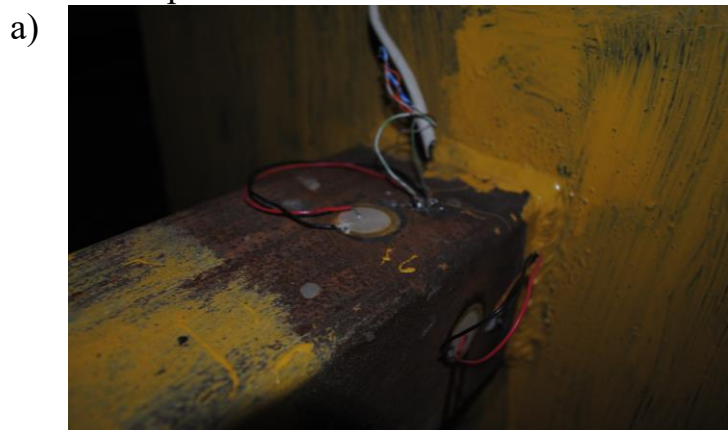


Рисунок 11. Пьезоэлектрический датчик:

а) установлен на консольной балке; б) установлен на двухопорной балке.

2. На испытываемую конструкцию устанавливается вибромашина.

3. Вызываются изгибные колебания первого тона колебаний конструкции, плавно переходящие в резонанс.

4. Фиксируется размах амплитуды вынужденных колебаний конструкции при помощи геодезической рейки.

5. Выключается вибромашина и записывается процесс собственных затухающих колебаний конструкции.

6. Обработка результатов.

Для экспериментального исследования эффективности применения «гасителя на нити» была собрана экспериментальная установка (рисунок 12) в виде стальной консольной балки длиной 3 м. Сечение балки – квадратная труба 100х3 мм. Гаситель представлен в виде струны из стальной проволоки диаметром 1 мм, натянутой на опоры и демпфирующей насадки с регулируемой массой. Частота собственных колебаний демпфера изменялась при помощи натяжения нити, масса при помощи внутреннего заполнения демпфирующей насадки. Величина натяжения нити определялась при помощи виброграммы колебаний массы на нити, полученной от пьезоэлектрического датчика, закрепленного на нити.

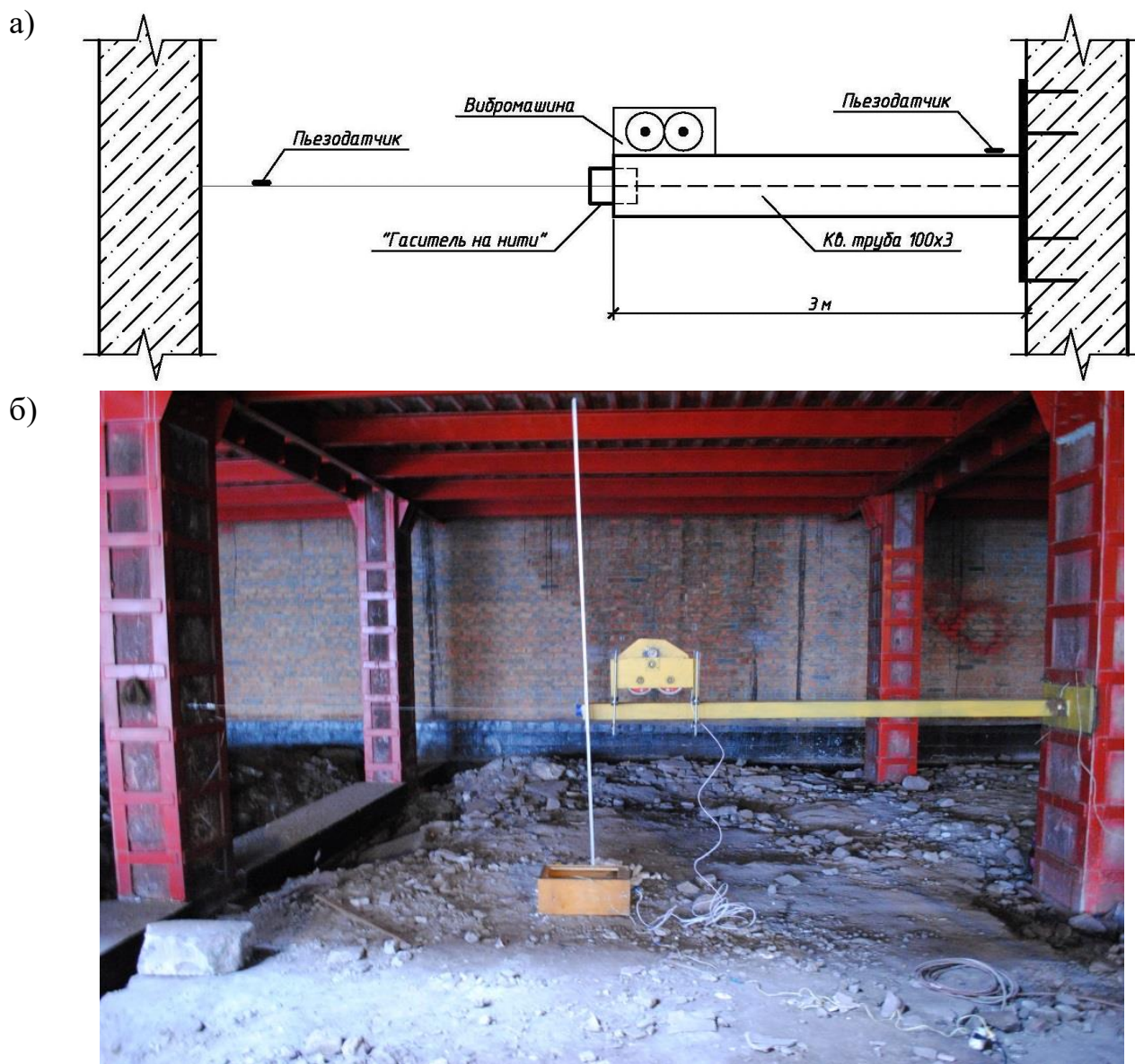


Рисунок 12. Экспериментальная установка консольной балки с «гасителем на нити»:

а) схема установки и расстановки приборов;

б) экспериментальная установка с гасителем на нити.

В качестве полномасштабной модели была собрана экспериментальная установка (рисунок 13) в виде стальной двухопорной балки пролетом 13,5 м. Сечение балки – круглая труба 159х5,5 мм. Крепление на концах шарнирное.

Гаситель представлен в виде струны из стальной проволоки диаметром 1,35 мм и 3 мм, натянутой на опоры и демпфирующей насадки с регулируемой массой (массами). Частота собственных колебаний демпфера изменялась при помощи силы натяжения нити, тарированных масс 0,41 кг, 1 кг, 1,5 кг (рисунок 14).

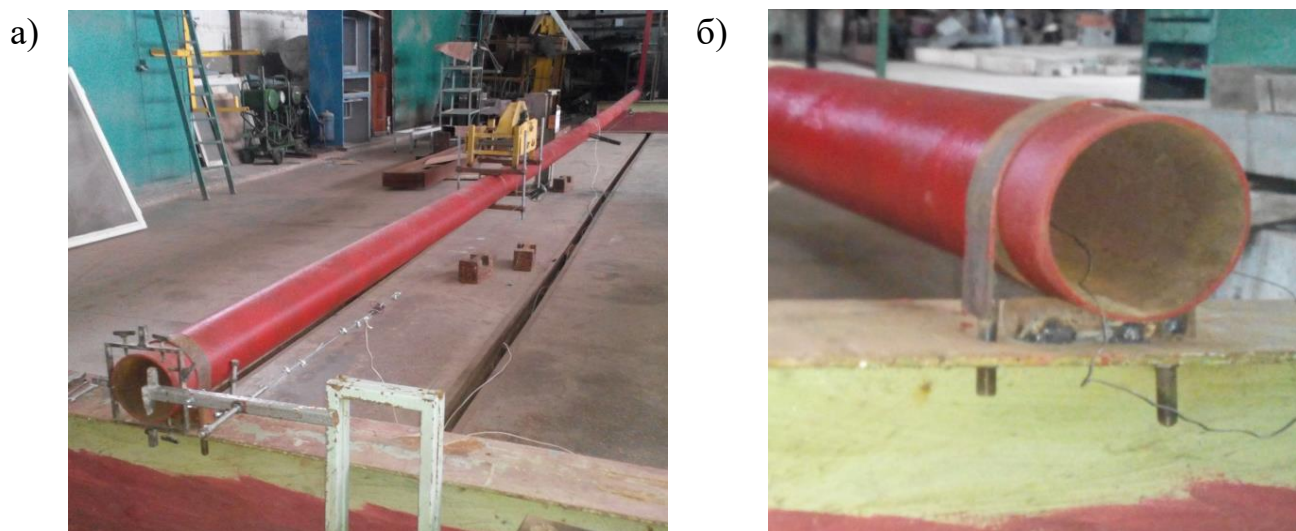


Рисунок 13. Экспериментальная установка двухопорной балки с «гасителем на нити»: а) общий вид; б) шарнирное закрепление трубы.

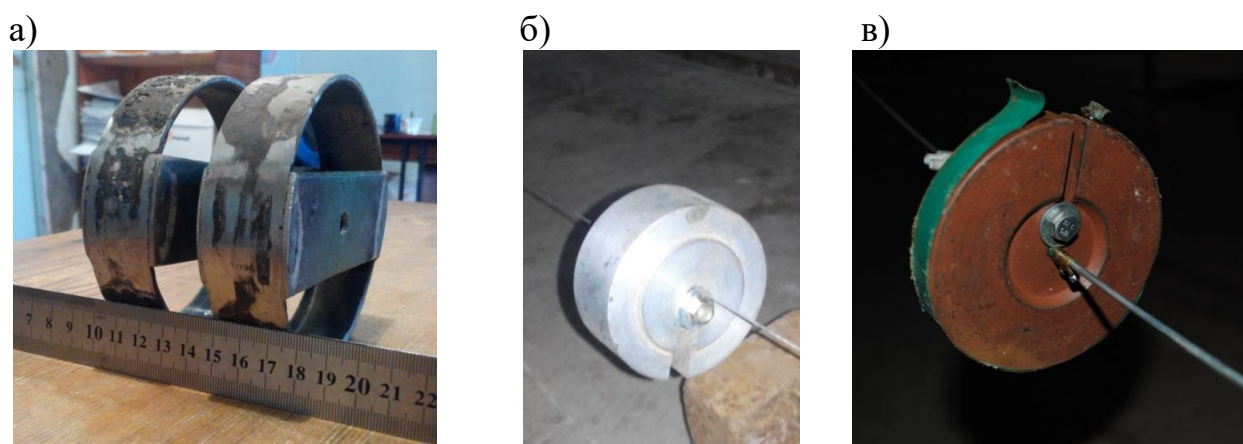


Рисунок 14. Набор масс для «гасителя на нити»: а) массы 0,41 кг; б) масса 1 кг; в) масса 1,5 кг.

Экспериментально проверялось гашение колебаний жесткой ошиновки при помощи пружинного гасителя и виброударного ДГК (рисунок 15). Пружинный гаситель устанавливался как снаружи, так и внутри трубы.

Гаситель в виде жесткой вставки проверялся на консольной балке при помощи установленного внутрь пенополистирола (отдельными кусками и склеенного), а также на двухопорной конструкции при помощи круглого деревянного бруса диаметром 143 мм и длиной 3 м.

Основным фактором эффективности гасителя являлась амплитуда колебаний трубы-шины, а также по полученным виброграммам определялись логарифмические декременты колебаний.

Впервые теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что применение «гасителя на нити» позволяет уменьшить амплитуду колебаний

в резонансном режиме в 1,5 - 3 раза и увеличить логарифмический декремент колебаний в 2,0 – 4,0 раза (рисунок 16).

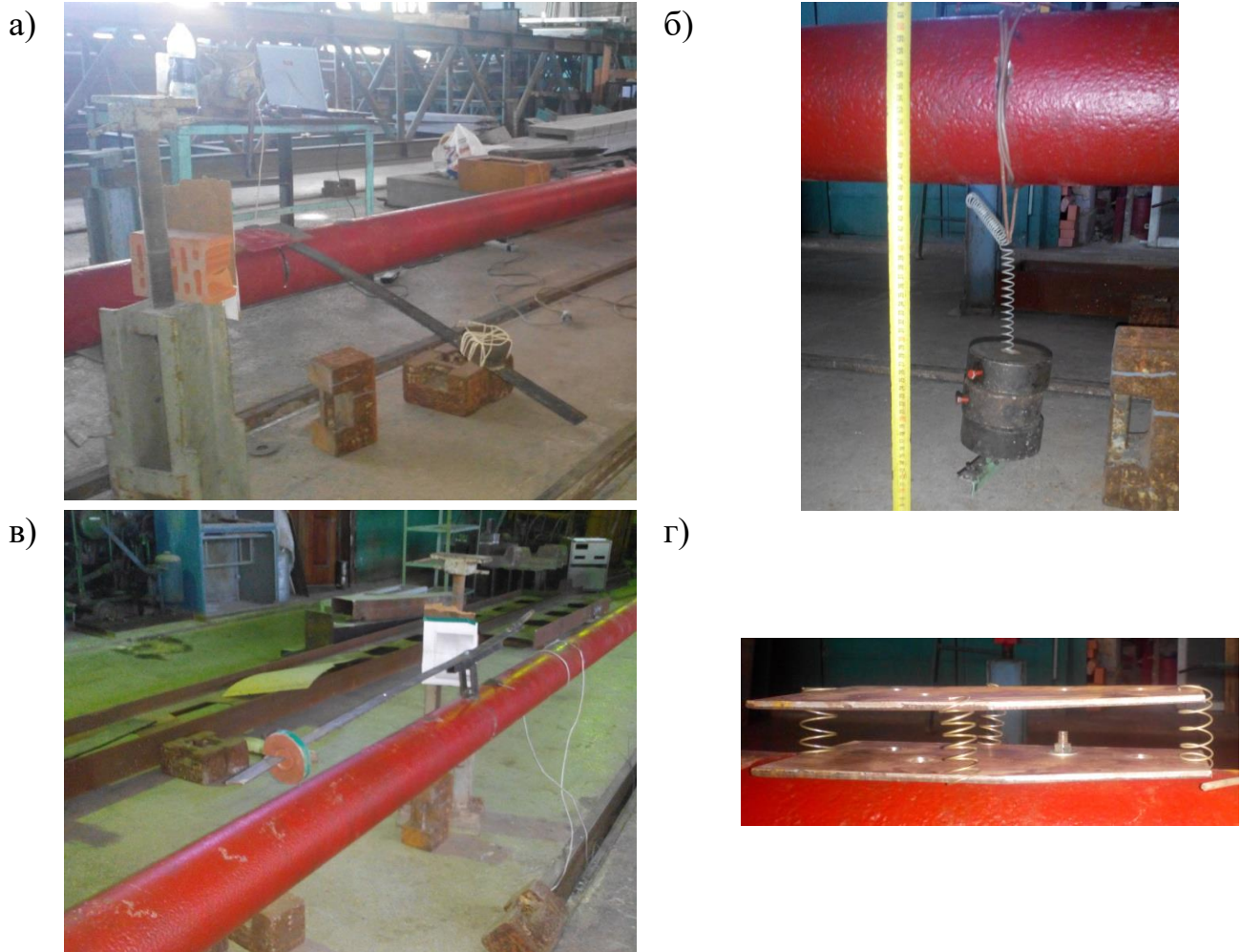


Рисунок 15. Пружинный гаситель (б, г) и виброударный ДГК (а, в).

Впервые теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что пружинный гаситель и виброударный ДГК снижают амплитуду колебаний конструкции в 12 раз, однако требуют точной настройки. Данные гасители рационально располагать внутри трубы (2-3 шт) для равномерного восприятия колебаний трубы с настройками близкими к резонансной частоте.

Гаситель в виде жесткой вставки из пенополистирола не имел достаточной жесткости для восприятия изгибных колебаний, однако имел преимущество по массе. Гаситель из деревянной вставки эффективно снизил амплитуду колебаний конструкции в соответствии с теоретическими расчетами (частота собственных колебаний конструкции увеличилась в 1,5 раза).

В четвертом разделе разработан порядок проектирования, строительства и эксплуатации жесткой ошиновки с учетом выбора гасителя колебаний:

1. Согласно нормативных документов или решая уравнение (2) определяем первую частоту собственных колебаний трубы-шины f_{1y} .

2. Проверяем условие $u_{p, \text{доп}} < u_{\text{max}}$ для принятой конструкции жесткой ошиновки.

3. При невыполнении условия $u_{p, \text{доп}} < u_{\text{max}}$ выбираем тип гасителя колебаний.

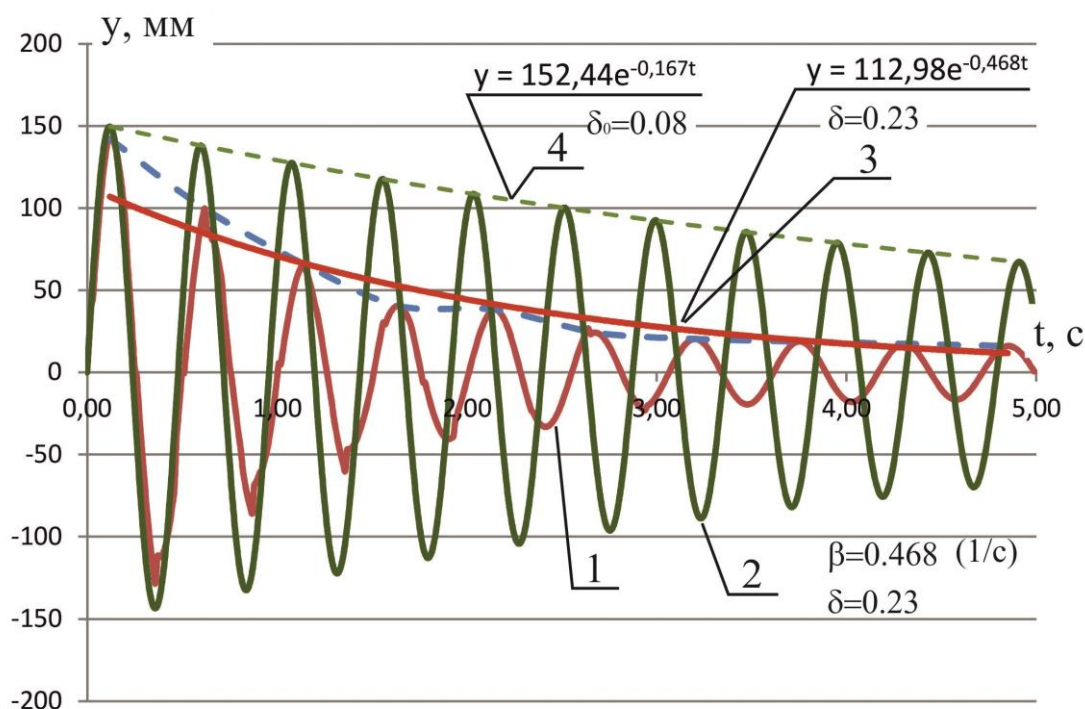


Рисунок 16. Виброграммы колебаний середины пролета трубы:
 1 – виброграмма колебаний шины с гасителем; 2 – виброграмма колебаний без гасителя; 3 – аппроксимация огибающей по экспоненте для виброграммы с гасителем ($\delta = 0,23$); 4 – огибающая точек максимальных перемещений во времени шины без гасителя ($\delta_0 = 0,08$). (В указанном случае собственная частота шины $f_{mp} = 1,883$ Гц, гасителя $f_g = 3,5$ Гц).

Предполагаемой рациональной областью для применения «гасителя на нити» с одной массой являются конструкции жесткой ошиновки с диаметрами шин 150 – 250 мм и пролетами 9 – 15 м.

Предполагаемой рациональной областью для применения «гасителя на нити» с двумя массами являются конструкции жесткой ошиновки с диаметрами шин 150 – 250 мм и пролетами 12 – 17 м.

Предполагаемой рациональной областью для применения виброударного (пружинного) гасителя являются конструкции жесткой ошиновки с диаметрами шин 90 – 250 мм и пролетами 9 – 20 м.

4. Производим расчет параметров выбранного гасителя колебаний.

Массу «гасителя на нити» с одной или двумя массами M_1 принимаем равной 1-3% от массы трубы-шины и располагаем в месте максимальных перемещений трубы-шины. Силу натяжения нити T_1 принимаем такой, чтобы была максимально допустимой для выбранной нити (провода) и частота «гасителя на нити» была в 2 раза выше частоты собственных колебаний трубы-шины.

Масса виброударного (пружинного) гасителя колебаний также лежит в пределах 1-3% от массы конструкции ЖО. Длина (вылет) L консоли виброударного гасителя колебаний определяется по формуле

$$L = \sqrt[3]{\frac{3EI}{M(2\pi \cdot f_{1y})^2}}. \quad (6)$$

Жесткость пружинного гасителя определяется по формуле

$$k_2 = M_2 \cdot (2\pi \cdot f_{1y})^2 \quad (7)$$

5. Выполняют динамические испытания для установленной конструкции ЖО без гасителя колебаний.

6. По полученным параметрам гасителя производится его изготовление, монтаж на установленную конструкцию ЖО и настройка.

7. Выполняют динамические испытания для установленной конструкции ЖО с гасителем колебаний.

8. Полученные динамические характеристики конструкции с гасителем и без него заносят в динамический паспорт.

9. Рекомендуются периодическая проверка динамических характеристик конструкции не реже 1 раза в 2 года. Изменение конструктивных решений трубы-шины или гасителя колебаний может быть вызвано отличием полученных параметров от эталонных не менее, чем на 20%.

Приведенная методика была апробирована на длинномерных ферменных конструкциях балочного типа КСКЦ «Концерн СТИРОЛ» (рисунок 17).



Рисунок 17. Общий вид здания после реконструкции (фасад 1-19).

Конструкции стальных ферм декоративных элементов представляют собой отдельные несвязанные консольные Г-образные элементы вылетом 6–7 м (рисунок 18), вертикальная часть которых закреплена на фасаде здания к элементам усиления, а горизонтальная часть совершает сложные колебания в ветровом потоке.

Вертикальная часть представляет собой ферму, пояса которой выполнены из двутавра №18 и гнутосварной трубы 180x100x6 мм, решетка – из гнутосварной трубы 60x3 мм. Горизонтальная часть (таблица 1) выполнена в виде фермы с поясами из двутавра №18, решетка ферм – из гнутосварной трубы 60x3 мм. Снаружи данные конструкции обшиты композитным материалом.

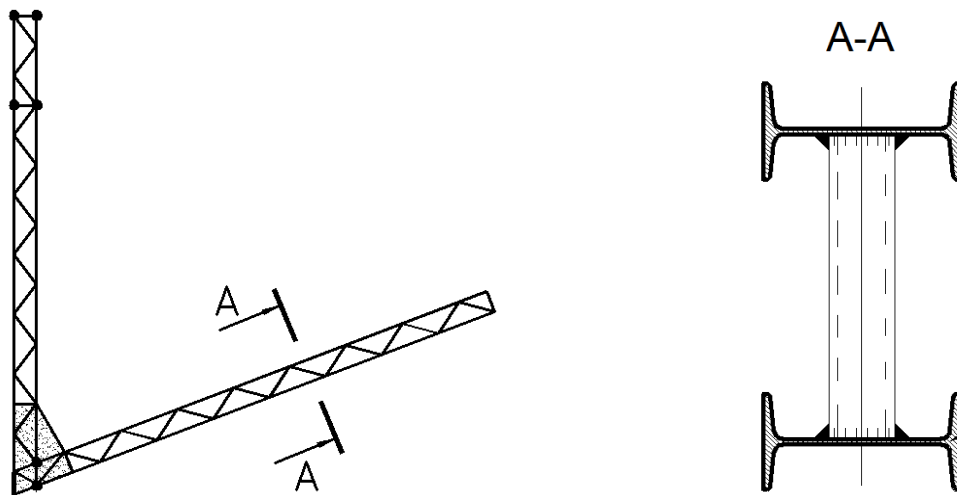


Рисунок 18. Схема Г-образной фермы декоративных элементов фасада.

Таблица 1. Основные характеристики горизонтальной части стальных ферм

Позиция	Длина, м	Погонная масса, кг/м	Изгибная жесткость, Н·м ²
Ферма №1	5,915	53,2	20009800
Ферма №2	6,301		
Ферма №3	6,635		
Ферма №4	6,8		
Ферма №5	7,019		

Для консольных частей стальных ферм декоративных элементов центрального входа были проведены натурные испытания, в ходе которых были определены фактические динамические характеристики колебаний конструкций и произведено их сравнение с величинами, предусмотренными при проектировании. Результаты натурного определения частот собственных колебаний основного тона и логарифмического декремента колебаний и сравнение их с проектными величинами представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты сравнения динамических параметров

Место проведения испытаний	Частота собственных колебаний основного тона, Гц			Логарифмический декремент колебаний		
	Фактич.	Проект. модели	Отличие	Фактич.	Проект. модели	Отличие
Ферма №1	8,288 ± 0,004	7,095	16,8%	0,007 ± 0,0014	0,03	328%
Ферма №2	7,190 ± 0,003	6,378	12,7%	0,0088 ± 0,0029	0,03	241%
Ферма №3	6,713 ± 0,024	6,147	9,2%	0,0077 ± 0,002	0,03	290%
Ферма №4	6,591 ± 0,002	6,012	9,6%	0,0081 ± 0,0022	0,03	270%
Ферма №5	6,905 ± 0,057	6,802	1,5%	0,0265 ± 0,0062	0,03	13%

Обосновано применение специальных гасителей колебаний для консольных частей балочных ферм.

Гаситель состоит из консольно закрепленной на ферме пластины с сосредоточенной на краю массой, которая может для точной настройки перемещаться вдоль пластины (рисунок 19).

Настройка гасителя производилась таким образом, что в резонансном режиме гаситель колеблется в противофазе к основной конструкции, что приводит к уменьшению амплитуды колебаний основной конструкции и рассеиванию энергии колебаний.

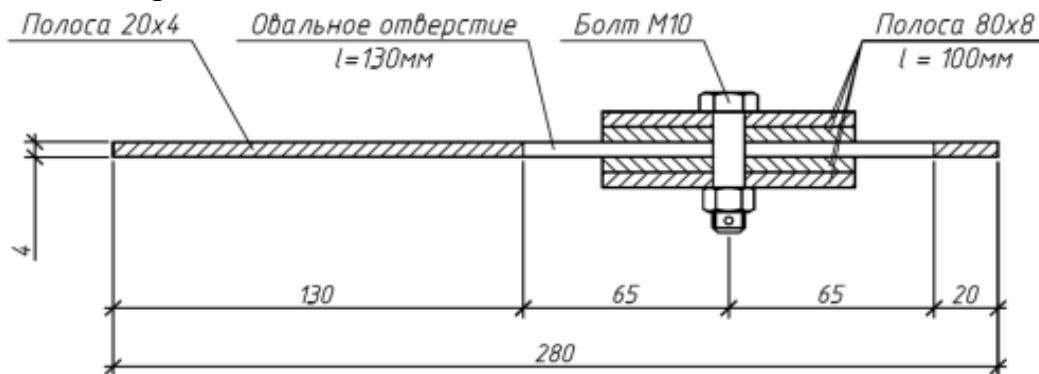


Рисунок 19. Принципиальная схема пластинчатого гасителя колебаний.

Для определения эффективности работы гасителя производились специальные динамические испытания. Целью испытаний являлось определение динамических параметров колебаний ферменной конструкции – амплитуды и логарифмического декремента, в резонансном режиме в 2-ух состояниях: при работающем настроенном гасителе и без него. При этом фиксировались амплитуды перемещений края консоли и виброграммы напряжений в сечениях элементов в 2-ух состояниях.

На основе анализа результатов были сделаны выводы о том, что применение предложенных пластинчатых гасителей (рисунок 20) позволяет уменьшить амплитуду колебаний ферм в резонансном режиме в 1,5-2 раза и повысить логарифмический декремент колебаний в 3-3,5 раза. Используя экспериментально подтверждённые результаты по снижению амплитуды и повышению логарифмического декремента, обосновано отсутствие проявления устойчивых резонансных колебаний при вихревом возбуждении для конструкций с установленными гасителями.



Рисунок 20. Гаситель, установленный на стальную ферму.

ВЫВОДЫ

1. Полученные в работе новые результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют утверждать, что поставленная цель, а именно усовершенствование существующих и создание новых рациональных демпфирующих устройств и способов гашения изгибных колебаний балочных конструкций (на примере жесткой ошиновки открытых распределительных устройств) в ветровом потоке, достигнута.

2. Теоретически и экспериментально обоснован выбор новых способов гашения изгибных колебаний балочных конструкций, подтверждающих свою эффективность при установке демпфирующих устройств внутри конструкции.

3. Созданы математические модели совместной работы системы «балочная конструкция - демпфирующее устройство» в ветровом потоке таких способов гашения как «гаситель на нити», гаситель в виде жесткой вставки, пружинный гаситель.

4. Впервые определены рациональные параметры новых способов гашения изгибных колебаний балочных конструкций. При этом, установлены рациональные параметры различных типов гасителей колебаний:

- для «гасителя на нити» рациональные параметры собственной частоты лежат в пределах (1,75-2,2) от частоты собственных колебаний шины, а рациональные параметры массы - в пределах (1-3)% от массы шины;

- для гасителя в виде жесткой вставки при плотности материала гасителя до 500 кг/м^3 – рациональной является длина участка-вставки равной $(0,4...0,6) \cdot L$ (где L - длина трубы-шины).

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют оценить эффективность предложенных методов гашения изгибных колебаний, а именно:

- «гаситель на нити» позволяет уменьшить амплитуду колебаний в резонансном режиме в 1,5 - 3 раза и увеличить логарифмический декремент колебаний в 2,0 - 4,0 раза;

- пружинный гаситель и виброударный ДГК снижают амплитуду колебаний конструкции в 12 раз, однако требуют точной настройки;

- гаситель в виде вставки из пенополистирола имеет преимущество по массе, а гаситель из деревянной вставки эффективно снизил амплитуду колебаний конструкции.

6. Разработаны новые рекомендации, позволяющие осуществить выбор рационального типа демпфирующего устройства и выполнить расчет основных параметров гасителя колебаний конструкций жесткой ошиновки, а также условия его настройки и эксплуатации.

7. Изготовлены, смонтированы и настроены предложенные гасители на 8 -ми консольных фермах балочного типа элементов входной группы ДП КСКЦ ПАО «Концерн СТИРОЛ». Выполненные динамические испытания подтвердили эффективность применения предлагаемых гасителей, в результате чего удалось повысить логарифмический декремент колебаний в 3-3,5 раза и уменьшить амплитуду колебаний балочных ферм в резонансном режиме в 1,5-2 раза (2013 г., экономический эффект составил 72,202 тыс. грн.).

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в специализированных научных изданиях,
рекомендованных МОН Украины:

1. Денисов, Е. В. Пружинный одномассовый инерционный динамический гаситель колебаний [Текст] / Е. В. Денисов, **С. А. Фоменко** // Вестник ДонНАСА: сб. науч. тр. – Макеевка: ДонНАСА, 2010. – Выпуск 2010-4(84) – Том I. – С. 15-18.
2. Денисов, Е. В. Особенности применения конструкций жесткой ошиновки в открытых распределительных устройствах [Текст] / Е. В. Денисов, **С. А. Фоменко** // Металлические конструкции. – Макеевка: ДонНАСА, 2011. – Том 17, Номер 1. – С. 13-23.
3. Denisov, E. Vibration suppression of girder structures of public building of government-owned establishment of concert and sporting complex centre of public joint stock company of “Stirol Concern” [Текст] / E. Denisov, **S. Fomenko**, A. Kostritsky, A. Radchenko, A. Denisov // Металлические конструкции. – Макеевка: ДонНАСА, 2013. – Том 19, Номер 4. – С. 235-244.
4. Denisov, E. Rational parameters of a «damper on the thread» for damping bending oscillations of rigid bus structures [Текст] / E. Denisov, **S. Fomenko** // Металлические конструкции. – Макеевка: ДонНАСА, 2014. – Том 20, Номер 4. – С. 191-202.
5. **Фоменко, С. А.** Применение динамического гасителя в конструкциях балочного типа общественного здания [Текст] / **С. А. Фоменко**, Е. В. Денисов, И. М. Гаранжа, А. В. Танасогло // Металлические конструкции. – Макеевка: ДонНАСА, 2015. – Том 21, Номер 4. – С. 167-175.

– публикации в рецензируемых научных изданиях, утвержденных
перечнем ВАК МОН ДНР:

1. Мущанов, В. Ф. Гашение колебаний длинномерных конструкций [Текст] / В. Ф. Мущанов, **С. А. Фоменко** // Вестник ДонНАСА: сб. науч. тр. – Макеевка: ДонНАСА, 2017. – Выпуск 2017-4(126) – С. 121-124.

– публикации в других изданиях:

1. Бусько, М. В. Применение динамических испытаний при обследовании культового здания [Текст] / М. В. Бусько, А. С. Кострицкий, А. В. Денисов, Е. В. Денисов, **С. А. Фоменко** // Современные проблемы строительства / Ежегодный научно-технический сборник. – Донецк: ДП «Донецкий Промстройинипроект», 2011. – С. 114-124.
2. Денисов, Е. В. Динамический гаситель колебаний длинномерных конструкций балочного типа [Текст] / Е. В. Денисов, **С. А. Фоменко** // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: международный сборник научных трудов. – Гомель: БелГУТ, 2014. – Выпуск 8 – С. 74-80.

– публикации по материалам конференций:

1. Жук, Н. Р. Колебания систем с бесконечным числом степеней свободы [Текст] / Н. Р. Жук, **С. А. Фоменко** // Сборник тезисов докладов и сообщений V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов 19 апреля 2006 года. – Макеевка: ДонНАСА, 2006. – С. 48.
2. **Фоменко, С. А.** Эффект флаттера [Текст] / **С. А. Фоменко**, А. В. Синкевич // Сборник тезисов докладов по материалам XXXVII Всеукраинской студенческой научно-технической конференции «Научно-технические достижения студентов – строительной отрасли Украины» 21–22 апреля 2011 года – Макеевка: ДонНАСА, 2011. – С. 58.
3. **Фоменко, С. А.** Об актуальности разработки новых способов гашения колебаний конструкций жесткой ошиновки [Текст] / **С. А. Фоменко** // «Строительство-2011». Материалы Международной научно-практической конференции: пригласительный билет и программа. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2011. – С. 70-71.
4. **Фоменко, С. А.** «Гаситель на нити» для гашения изгибных колебаний конструкций жесткой ошиновки [Текст] / **С. А. Фоменко** // Строительство – формирование среды жизнедеятельности [Электронный ресурс]: сборник трудов Восемнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (22–24 апреля 2015 г., Москва) / М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. – Электрон. дан. и прогр. (38,5 Мб). – Москва: МГСУ, 2015. – Научное электронное издание комбинированного распространения: 1 электрон. оптич. диск. (CD-ROM). – Систем. требования: Intel; Microsoft Windows (XP, Vista, Windows 7); дисковод CD-ROM, 512 Мб ОЗУ; разрешение экрана не ниже 1024×768; Adobe Air, мышь. – С. 311-314.

Личный вклад автора в данных публикациях

В работах с соавторами автору принадлежат: разработка математических моделей расчета колебаний конструкций с гасителями колебаний [1-3, 6-9, 11]; создание методики проведения вибрационных испытаний в процессе технической диагностики ферменных конструкций [6, 7, 9]; сбор и анализ информации о современном состоянии конструкций жесткой ошиновки [5, 10]; создание методики проведения динамических и вибрационных испытаний, обработка результатов испытаний с новыми гасителями колебаний [4, 6-9, 11].

АННОТАЦИЯ

Фоменко Серафим Александрович. Рациональные способы демпфирования изгибных колебаний конструкций жесткой ошиновки. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2017 г.

В диссертации рассматриваются теоретические и экспериментальные исследования новых методов («гаситель на нити», «пружинный демпфер», гаситель в виде жесткой вставки) и усовершенствование существующих способов гашения изгибных колебаний конструкций жесткой ошиновки.

Во введении обоснована актуальность, сформулирована научная новизна, практическая ценность работы, дана ее общая характеристика.

В первом разделе выполнен анализ, что многие существующие и новые способы гашения колебаний конструкций ЖО требуют экспериментальных и теоретических исследований, а также некоторые из них ограничены в применении по электрическим нормам. Отмечено, что в нормативных документах по проектированию ЖО отсутствуют четкие рекомендации по расчетам параметров демпфирующих устройств для конструкций ЖО, а также их применению для разных параметров трубы-шины, в частности, балочного типа. Окончательно сформулированы цель и задачи исследования.

Во втором разделе впервые получены математические модели взаимодействия конструкции жесткой ошиновки с новыми способами гашения колебаний. Для «гасителя на нити», пружинного гасителя и гасителя в виде жесткой вставки впервые получены рациональные параметры.

В третьем разделе впервые теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что новые методы гашения конструкции жесткой ошиновки эффективны при установке их внутри трубы. Доказано, что «гаситель на нити», виброударный динамический гаситель колебаний, пружинный гаситель и гаситель в виде жесткой вставки эффективно снижают амплитуды вынужденных колебаний конструкций жесткой ошиновки.

В четвертом разделе разработаны новые рекомендации с уточнением методики расчета основных параметров рациональных способов гашения колебаний конструкций ЖО, тем самым, решена одна из поставленных задач исследования. Разработанная методика решает задачу необходимого дополнения существующих нормативных документов в части реализации расчетного обоснования применяемых методов гашения колебаний. Согласно полученной методики обосновано, что применение пластинчатых гасителей позволяет уменьшить амплитуду колебаний ферм в резонансном режиме в 1,5-2 раза и повысить логарифмический декремент колебаний в 3-3,5 раза. Используя экспериментально подтвержденные результаты по снижению амплитуды и повышению логарифмического декремента, обосновано отсутствие проявления устойчивых резонансных колебаний при вихревом возбуждении для конструкций с установленными гасителями. Такой вид гашения колебаний, позволяющий эффективно снизить амплитуды колебаний в ветровом потоке, имеет несущественную стоимость изготовления и монтажа.

Ключевые слова: балочные конструкции, жесткая ошиновка, гашение колебаний, вихревое возбуждение ветра, динамический гаситель колебаний, напряженно-деформированное состояние

ABSTRACT

Fomenko Serafim. Rational methods of beam structures bending oscillation damping (the example is rigid bus of outdoor switchgears). – Manuscript.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.23.01 – Building constructions, buildings and structures. – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2017.

The thesis considers theoretical and experimental investigations of new methods («damper on the thread», «spring damper», the damper as a rigid insert) and improvement of existing methods of rigid bus bending oscillation damping.

In the introduction justified the relevance of the formulated scientific novelty, practical value of the work, its general characteristic is given.

In the first section of the analysis is that many existing and new ways of rigid bus structures damping require experimental and theoretical studies, and some of them are limited to use for electrical codes. Noted that in the normative documents for rigid bus design there are no clear guidelines for calculation of parameters of damping devices for rigid bus structures and their application for different tube, in particular beam type. The purpose and objectives of the study are finally formulated.

In the second section, the mathematical model of fluid-structure interaction of rigid bus with new ways of damping are first obtained. For «damper on the thread», «spring damper» and the damper as a rigid insert first obtained by rational parameters.

In the third section of the first theoretically substantiated and experimentally confirmed that new methods of rigid bus structures damping effective when installed inside the tube. It is proved that «damper on the thread», vibro dynamic vibration absorber, spring damping and the damper as a rigid insert effectively reduce the amplitude of the forced oscillations of rigid bus structure.

In the fourth section, developed new guidelines with specification the calculation methods of basic parameters of rational methods of rigid bus structures damping. The one of the objectives of the study is solved. The developed method solves the problem of a necessary complement to existing regulations in part implement of a settlement substantiation of applied methods of oscillation damping. According to the received methods it is proved that the application of plate vibration damper reduces the amplitude of the truss in the resonance mode in 1,5-2 times and improve the logarithmic decrement of the oscillations in 3-3,5 times. Using experimentally-confirmed results in reducing the amplitude and increasing the logarithmic decrement, justified the lack of sustained resonance oscillations due to the vortex excitation for structures with dampers installed. This type of damping to effectively reduce the amplitude of oscillations at the wind flow has an insignificant cost of manufacture and installation.

Keywords: beam construction, rigid bus, oscillation damping, eddy excitation of wind, the dynamic damper, the stress-strain state