

На правах рукописи

**Дегтярева Наталья Владимировна**

**ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО  
НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ НАДЗЕМНЫХ  
ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ ВЕТРОВОМ РЕЗОНАНСЕ**

05.23.17 – строительная механика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск– 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Потапов Александр Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Гребенюк Григорий Иванович**

кандидат технических наук, доцент  
**Тухфатуллин Борис Ахатович**

Ведущая организация: ГОУ ВПО МГСУ (г. Москва)

Защита состоится 18 декабря 2009 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.265.01 при Томском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корпус 5, аудитория 307, факс (3822) 65-42-71

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета

Автореферат разослан 17 ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Копаница Н.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Динамический расчет конструкций, подверженных аэродинамическому действию ветра, относится к важному и малоисследованному классу задач строительной механики. Ветровой резонанс требуется учитывать в расчете большинства гибких конструкций с цилиндрическими поверхностями, в том числе надземных газопроводов. Игнорирование этих требований при динамическом расчете может привести к авариям на трассах газопроводов. Расчет на ветровой резонанс по действующим нормативным документам приводит к относительно коротким пролетам и, в результате, к перерасходу материала.

Построения аэродинамически устойчивой конструкции надземных газопроводов можно добиться путем создания перестраиваемой расчетной схемы. В настоящей работе циклическая перестройка расчетной модели осуществляется за счет применения односторонних связей (ОС). Подобный подход, наряду с выключающимися связями, применялся для ограничения колебаний вантовых сооружений, зданий, подверженных сейсмическому воздействию, и других конструкций. Разработанные к настоящему времени методы расчета таких конструктивно нелинейных систем решают вопросы статического расчета, а динамический расчет выполняется с введением ряда упрощающих предпосылок. Упрощения, как правило, связаны с моделированием параметров расчетной схемы и внешней нагрузки, выбором режима вынужденных колебаний и моделей демпфирования, а также другими факторами.

Эти обстоятельства говорят о важности развития теории динамического расчета диссипативных конструктивно нелинейных систем. В работе разрабатывается метод временного анализа, основанный на исследовании матричного квадратного уравнения, для решения задачи колебаний конструктивно нелинейной системы «газопровод–гаситель». Данный подход обладает рядом преимуществ перед существующими численными и аналитическими методами расчета. Свое применение он получил при анализе колебаний каркасных зданий в линейной и нелинейной постановках со сложной моделью демпфирования и сложной программой нагружений в работах А.Н. Потапова.

**Объектом исследования** являются конструктивно нелинейные модели надземных газопроводов. **Предметом исследования** является зависимость параметров динамической реакции указанных моделей от скорости ветрового потока.

**Цель диссертационной работы:** Совершенствование метода временного анализа для исследования колебаний моделей надземных газопроводов при ветровом резонансе с учетом конструктивной нелинейности.

Для достижения поставленной цели определены следующие *задачи исследований*:

1. Разработать математическую модель, адекватно характеризующую колебания системы «газопровод-гаситель» при ветровом воздействии;
2. Установить параметры устройства гашения колебаний, работающих по принципу односторонних связей для повышения аэродинамической устойчивости надземных газопроводов;
3. Установить влияние скоростей ветра на эффективность работы односторонних связей для ограничения колебаний;
4. Разработать рекомендации по применению устройств гашения колебаний, работающих по принципу односторонних связей, на трассах газопроводов;
5. Подтвердить эффективность теоретических разработок проведением экспериментальных исследований.

**Методология исследований и достоверность результатов.** Диссертационные исследования основаны на фундаментальных положениях строительной механики совместно с методами высшей математики и матричной алгебры, замкнутой формой интеграла Дюамеля при упругих колебаниях дискретной диссипативной системы. Достоверность результатов подтверждена сравнением с численным решением задачи при упрощающих предположениях в программном комплексе SAP2000 и проведенными экспериментальными исследованиями.

***Научная новизна диссертации.***

Получены новые знания о колебаниях конструктивно нелинейных моделей надземных газопроводов при ветровом резонансе. Конкретные научные результаты состоят в следующем:

1. В аналитическом виде получено решение задачи вынужденных колебаний диссипативных конструктивно нелинейных моделей надземных газопроводов при ветровом резонансе;
2. Установлено, что в диапазоне возможных скоростей ветрового потока применение устройства гашения колебаний, работающего по принципу односторонней связи, позволяет сократить амплитуду реакции расчетной модели по сравнению с моделью без такого устройства: по виброперемещениям минимум на 11% – 44 %, по среднеквадратичным значениям (СКЗ) виброскорости на 7% – 25% в зависимости от конструкции газопровода;
3. Выявлены скорости ветрового потока, соответствующие наиболее эффективной работе устройства гашения колебаний. При установке устройства гашения колебаний в середине центрального пролета наибольшие виброперемещения и СКЗ виброскорости при колебаниях системы «газопровод-гаситель» соответствуют скорости ветра, вызывающей резонанс на второй собственной форме колебаний модели без односторонней связи.

**Практическая значимость результатов исследований.** Выполненные исследования позволили оценить работу надземных газопроводов с односторонними связями на основе анализа напряженно-деформированного состояния при различных скоростях ветрового потока.

На основании результатов расчета были разработаны, изготовлены, обеспечены патентной защитой и установлены устройства гашения колебаний на трассе надземного газопровода в с. Бектыш Коркинского района Челябинской области.

Разработаны рекомендации по применению устройств гашения колебаний на трассах надземных газопроводов.

Результаты исследований в области динамических расчетов конструктивно нелинейных систем использованы при подготовке лекций по курсу «Динамика и устойчивость сооружений» на кафедре «Строительная механика» ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Полученные теоретические результаты служат основой для дальнейших научных исследований по ограничению колебаний с помощью устройств, работающих по принципу односторонних связей.

**Личный вклад** автора состоит в построении математических моделей конструктивно нелинейного расчета, создании программы для временного анализа надземных газопроводов, организации и проведении испытаний. Роль научного руководителя сводилась к участию в составлении плана исследований, обсуждении и формулировках полученных результатов.

**Автор защищает:**

1. Метод временного анализа, разработанный для расчета конструктивно нелинейной модели «газопровод – гаситель» при ветровом резонансе;
2. Результаты о влиянии параметров динамической системы, внешней нагрузки и моделей демпфирования на отклик расчетных моделей надземных газопроводов;
3. Результаты сравнительного анализа колебаний надземных газопроводов с односторонними связями и без них при различных скоростях ветрового потока;
4. Рекомендации по применению устройств гашения колебаний надземных газопроводов при ветровом резонансе.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях и симпозиумах:

- 59-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов ЮУрГУ (г. Челябинск, 2007г.);
- симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (г. Нижний Новгород, 2007 г.);
- 65-я научно-техническая конференция НГАСУ «Актуальные проблемы строительной отрасли» (г. Новосибирск, 2008 г.)

- международная научно-практическая конференция «Строительство–2008» (г. Ростов-на-Дону, 2008 г.);
- 60-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов ЮУрГУ (г. Челябинск, 2008 г.);
- симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (г. Пермь, 2008 г.);
- 61-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов ЮУрГУ (г. Челябинск, 2009 г.);
- XXIX Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 85-летию со дня рождения В. П. Макеева (г. Миасс, 2009 г.);
- XXIII Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов» (г. Санкт-Петербург, 2009 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Роль стратегии индустриально-инновационного развития республики Казахстан в условиях глобализации: проблемы и перспективы». (г. Рудный, Казахстан, 2009 г.).

**Публикации.** По материалам работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских диссертаций, и патент на полезную модель.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав основной части, общих выводов по работе, списка использованной литературы из 207 наименований и приложений. Работа изложена на 187 страницах, содержит 12 таблиц и 124 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** рассматриваются основные вопросы, возникающие при решении задач динамического расчета конструкций под действием ветра, существующие методы расчета конструктивно нелинейных систем, требования нормативных документов для расчета трубопроводных систем на динамические нагрузки и известные способы ограничения колебаний цилиндрических конструкций.

Разработкой и исследованием динамических методов расчета строительных конструкций занимались такие ученые, как А.М. Белостоцкий, А.С. Бернштейн, В.В. Болотин, И.Г. Бубнов, А.Н. Крылов, Б.Г. Корнев, Л.С. Ляхович, А.М. Масленников, Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев, В.Т. Рассказовский, Ю. Т. Чернов, Р. Клаф, Д.Ж. Пензиен, Дж. Рэлей и др. При построении интеграла Дюамеля для систем с  $n$  степенями свободы в традиционном виде выполняются спектральные разложения. Учет внутреннего трения при этом осуществляется на основе модели пропорционального демпфирования. В случае, когда диссипация энергии подчиняется более сложному (непропор-

циональному) закону эти методы становятся труднореализуемыми или неприменимыми.

Такой метод временного анализа, как метод комплексных собственных форм, позволяет использовать модели непропорционального демпфирования. Однако незначительный объем публикаций по данному методу свидетельствует о его слабой разработанности.

Методы, основанные на использовании передаточных и импульсных переходных функций линейных динамических систем, применяются для расчета дискретных систем с малым числом степеней свободы из-за отсутствия разработанных и эффективных алгоритмов расчета.

Построение решения, основанного на непосредственном интегрировании уравнений движения (в форме интеграла Дюамеля), для конечномерных диссипативных систем предпринималось в работах А.И. Ананьина, А.Н. Потапова, Л.М. Резникова, А.И. Цейтлина и др.

Разрабатываемый в диссертации метод временного анализа, основанный на исследовании матричного квадратного уравнения, применялся к упругим, нелинейно-упругим, упруго-пластическим системам с диаграммой Прандтля. Такая возможность приложения этого метода к физически нелинейным системам обусловлена его универсальностью, способностью к модификации и созданию таких расчетных схем, при которых исходная нелинейная задача сводится к последовательности линейных задач.

Вопросами расчета диссипативных систем занимались Г.И. Гребенюк, Н.Н. Давиденков, И.Л. Корчинский, Г.Б. Муравский, Г.Я. Пановко, В.Т. Расказовский, Б.С. Расторгуев, Л.М. Резников, А.Р. Ржаницын, А.П. Филиппов, А.И. Цейтлин, Е.С. Сорокин, С. Крэндаль, Кафи и др. Для упрощения чаще рассматриваются системы без демпфирования или с пропорциональным типом демпфирования. В этом случае дифференциальные уравнения движения раскладываются по собственным формам. При непропорциональном типе демпфирования приведение системы дифференциальных уравнений к нормальным координатам и выполнение разложения решения по собственным формам колебаний трудно реализуется.

Конструктивная нелинейность связывается с такими понятиями, как односторонние и выключающиеся связи, прогрессирующие разрушение и т.п. Во всех перечисленных случаях меняется жесткость системы. Решением задач с выключающимися связями занимались Я.М. Айзенберг, Г.В. Васильков, В.В. Безделев, Н.В. Клюева, И. Е. Люминарский, П.Д. Мухамеджанов и др. Решением задач с односторонними связями занимались В.П. Аленин, Н.А. Алфутов, В. А. Баженов, С.В. Бакушев, Л.А. Бернштейн, М.С. Бернштейн, В. И. Гордеев, Е.А. Гоцуляк, Т.С. Ким, С.С. Клеников, Г.Н. Колесников, Г.С. Кондаков, Э. Кузнецов, Р.Е. Кузнецова, А.Д. Ловцов, И.Е. Люминарский, Л.С. Ляхович, А.И. Оглобля, А.В. Перельмутер, Л.П. Портаев, Е.И. Путеев, И.М.

Рабинович, Л.Н. Семишев, В.И. Сливкер, В.В. Хименко, А. В. Хлупин, В. Г. Яцура, Ф. Пфайфер и др. В большинстве работ по исследованию систем с односторонними связями решаются вопросы статического расчета, динамический расчет выполняется только для частных случаев с рядом упрощающих предпосылок.

При расчете надземных газопроводов на аэродинамическое действие ветра в СП 42-102-2004 предлагается эмпирическая формула для определения длины пролета, который зависит от постоянных нагрузок, длины газопровода, характеристик сечения и материала.

Среди всех существующих способов гашения колебаний трубопроводов можно выделить разные варианты навивки проволоки, применение турбулизаторов, использование пористых материалов на поверхности конструкции, что влияет на характер обтекания ее потоком ветра. Часто встречающийся гаситель колебаний – масса, присоединенная к конструкции с помощью упругой связи. Существуют и более сложные устройства, применение которых затруднено из-за сложной конструкции устройств и большой протяженности надземных трубопроводов на открытой местности. Поэтому на сегодняшний день для ограничения нежелательных вибраций применяют меры, связанные с уменьшением шага опор трубопровода, что ведет к повышению материалоемкости конструкций газопровода, а значит к дополнительным экономическим затратам.

На основе представленного обзора и анализа известных научных публикаций сформулированы цель и задачи настоящих исследований.

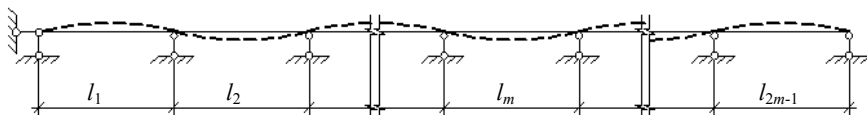
**В главе 2** строится дискретная расчетно-динамическая модель надземного газопровода (рисунок 1, а) и проводятся исследования по оптимизации ее параметров: выбирается оптимальное число пролетов и число сосредоточенных масс в пролете базовой модели (БМ) – модели без ОС. На этом этапе определяются формы собственных колебаний и внутренние динамические параметры системы: коэффициенты демпфирования  $\varepsilon_k$  и частоты собственных колебаний  $\omega_k$ .

В работе на примере двух эксплуатируемых надземных газопроводов Челябинской области исследуются колебания конструктивно нелинейной системы «газопровод – гаситель» при аэродинамическом действии ветра. Первый газопровод (модель «1»), находящийся в с. Байрамгулово, имеет параметры трубы  $\varnothing 219 \times 5$  мм, длина пролета  $l = 15$  м, второй (модель «2»), расположенный в районе с. Бекгыш, с параметрами трубы  $\varnothing 57 \times 5$  мм, длина пролета  $l = 7$  м.

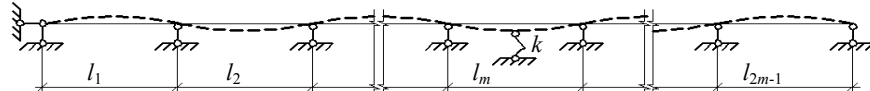
В качестве БМ газопровода «1» принимается 11-ти пролетная неразрезная балка с 5-ю массами в пролете, для газопровода «2» – 15-ти пролетная балка с 5-ю массами в пролете. Для БМ газопровода «1» число степеней свободы  $n = 55$ , а для газопровода «2» –  $n = 75$ .

Расчетная модель газопровода с устройством гашения колебаний (МОС) строится (рисунок 1, б) на основе БМ с учетом работы устройства гашения колебаний, основанной на идее использования ОС. Устройство устанавливается в среднем сечении центрального пролета участка трассы надземного газопровода, определяемого расчетной моделью. Циклическое включение и выключение ОС вызывает циклическую смену расчетных моделей – базовой модели (БМ) и модели с дополнительной упругой связью (МДУС). Следовательно, основной тон колебаний чередуется с колебаниями по второй собственной форме, что приводит к снижению резонансных амплитуд. МДУС имеет  $(n-1)$  степеней свободы. В каждом цикле работа МОС состоит из работы БМ (рисунок 1, в) и МДУС (рисунок 1, г).

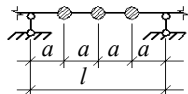
а)



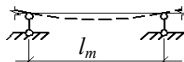
б)



д)



в)



г)

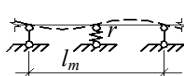


Рисунок 1– Расчетные модели: а – общий вид БМ; б – общий вид МОС; в – работа  $m$ -го пролета по БМ; г – работа  $m$ -го пролета по МДУС; д – дискретное моделирование

Уравнение движения комплексной модели «газопровод – гаситель» как дискретной диссипативной системы записывается в следующей матричной форме:

$$M\ddot{Y}(t) + C\dot{Y}(t) + K_j Y(t) = P(t) \quad (j = 1, 2), \quad (1)$$

где  $M = \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$ ,  $C = C^T$ ,  $K_j = K_j^T \in M_n(R)$  – вещественные и симметрические матрицы масс, демпфирования и жесткости. Индекс  $j$  указывает на номер состояния модели в процессе колебаний. При  $j = 1$  расчетная модель находится в состоянии БМ, при  $j = 2$  – в состоянии МДУС.

*Матрица масс* представляет собой диагональную матрицу размером  $n \times n$ . Элементы на главной диагонали – это массы  $m_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ), собранные с элементарных участков  $q_i$  длиной  $a$  (рисунок 1, д).

В рамках работы МОС изменение расчетной схемы приводит к изменению жесткости динамической системы. Поэтому *матрицы жесткости* также циклически сменяют друг друга в процессе колебаний.

В настоящем исследовании учет внутреннего трения материала проводится на основе модели непропорционального демпфирования:

$$C = KT, \quad (2)$$

где  $T = \gamma \omega_0^{-1}$ ;  $\omega_0 = \text{diag}(\omega_1, \dots, \omega_n)$  – диагональная матрица собственных частот колебаний консервативной системы;  $\gamma = \delta/\pi$  – коэффициент потерь;  $\delta$  – логарифмический декремент колебаний. Наряду с моделью (2) для сравнения результатов расчета используются модели пропорционального демпфирования Рэлея ( $C^R = \alpha M + \beta K$ ) и А.И. Цейтлина ( $C^U = \gamma M \sqrt{M^{-1}K}$ ), где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты пропорциональности.

Считая трубу газопровода неподвижной, в качестве первого приближения для интенсивности силы, действующей на трубу поперек воздушного потока, представляется известное в литературе выражение

$P(t) = \frac{1}{2} \rho V^2 D \sin \theta t$ , где  $\rho$  – плотность воздуха,  $V$  – скорость ветрового потока,  $D$  – диаметр трубы газопровода,  $\theta$  – частота вынужденных колебаний  $\theta = 2\pi N_s$ ,  $N_s$  – частота срыва вихрей с поверхности трубы, удовлетворяющая соотношению Струхалия. Направление подъемных гармонических сил  $P(t)$  определяется вектором собственных форм. Нагрузки от собственного веса трубы газопровода и веса транспортируемого газа учитываются при определении суммарной (статической и динамической) реакции (рисунок 12, б).

Согласно методу вариации произвольных постоянных Лагранжа частное решение системы (1) обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) определяется в виде

$$Y(t) = \text{Re}[\Phi(t)A(t)],$$

где  $A(t)$  – вектор произвольных постоянных, зависящий от начальных условий интегрирования;  $\Phi(t) = e^{St}$  – фундаментальная матрица однородного ОДУ, соответствующая неоднородному ОДУ (1);  $S$  – матрица внутренних динамических параметров системы, полученная в результате решения характеристического матричного квадратного уравнения (МКУ):

$$M S_j^2 + C S_j + K_j = 0 \quad (j = 1, 2). \quad (3)$$

При симметрических матрицах  $M$ ,  $C$ ,  $K_j$  решение уравнения (3) имеет вид корневой пары

$$S_{j(1,2)} = M^{-1}(-C + V_j \pm U_j)/2,$$

где  $V_j = -V_j^T$ ,  $U_j = U_j^T \in M_n$ . После нахождения значений матриц  $V_j$ ,  $U_j$  с помощью итерационного алгоритма, и построения фундаментальных решений  $\Phi_j(t) = e^{\delta_j t}$  уравнение реакции модели записывается в виде интеграла Дюамеля ( $t \geq t_i$ ).

$$Y(t) = 2\text{Re} \{ \Phi_j(t - t_i) U_j^{-1} M [-\bar{S}_j Y_0 + \dot{Y}_0] + U_j^{-1} I(t) P_0 \}, \quad (4)$$

где  $t_i$  – время включения или выключения ОС,  $I(t)$  – интеграл Дюамеля.

Исследование этого интеграла приводит к непрерывному уравнению Сильвестра

$$(S_j^T)^2 I(t) + I(t) \theta^2 = F(t), \quad (5)$$

правая часть которого определяется по формуле

$$F(t) = S_j^T [\Phi_j(t - t_i)^T \sin(\theta t_i) - \sin(\theta t)] + [\Phi_j(t - t_i)^T \cos(\theta t_i) - \cos(\theta t)] \theta \quad (j = 1, 2). \quad (6)$$

В процессе колебаний МОС система совершает переходы от одной расчетной модели к другой. Они имеют квазипериодический характер, сопровождаются включением или выключением ОС. Включение ОС в работу (в момент перехода от БМ к МДУС) представляется кинематическими условиями:

$$y_k(t) < 0, \quad y_k(t + \Delta t) \geq 0, \quad (7)$$

где  $y_k(t)$  – перемещение точки  $k$  (рисунок 1, б),  $\Delta t$  – шаг интегрирования в процессе вычисления динамической реакции системы.

Уравнения реакции МДУС на интервале  $t \in [t_i, t_{i+1}]$  принимают вид:

$$Y(t) = 2\text{Re} \{ Z(t) P_0 \}, \quad \dot{Y}(t) = 2\text{Re} \{ S_2 Z(t) P_0 \},$$

$$Z(t) = \Phi_2(t - t_i) U_2^{-1} M [-\bar{S}_2 Y_0 + \dot{Y}_0] + [U_2 (S_2^2 + \theta^2)]^{-1} F(t) P_0, \quad (8)$$

Условие выключения ОС из работы при обратном переходе модели имеет вид статических неравенств:

$$N(t) \geq 0, \quad N(t + \Delta t) < 0, \quad (9)$$

где  $N(t)$  – усилие в ОС.

Уравнения реакции БМ в этот момент согласно (4) на интервале времени  $t \in [t_{i-1}, t_i]$  имеют сходную запись с уравнениями (8):

$$Y(t) = 2\text{Re} \{ Z(t) P_0 \}, \quad \dot{Y}(t) = 2\text{Re} \{ S_1 Z(t) P_0 \},$$

$$Z(t) = \Phi_1(t - t_{i-1}) U_1^{-1} M [-\bar{S}_1 Y_0 + \dot{Y}_0] + [U_1 (S_1^2 + \theta^2)]^{-1} F(t) P_0. \quad (10)$$

В этих уравнениях матричная функция  $F(t)$  определяется из выражения (6) при замене индекса  $i$  на  $i-1$ .

Системы уравнений (8), (10), (5), (6) и комплекс условий, включающих кинематические (7) и статические (9) неравенства, представляют собой математические модели нелинейного расчета системы с ОС в рамках теории временного анализа, основанном на исследовании матричного квадратного уравнения. Таким образом, расчетная схема нелинейного расчета методом временного анализа сводится к последовательности упругих решений в фор-

ме интеграла Дюамеля. Для реализации этого алгоритма составлена программа в программном комплексе MatLab.

Виброперемещения и виброскорости БМ определяются по формулам (10), в которой реакция при свободных колебаниях должна быть исключена, т.к.  $Y_0 = 0$ ,  $\dot{Y}_0 = 0$ .

Точность построения расчетной и математической моделей подтверждаются сравнительным расчетом БМ при учете внутреннего трения по модели Рэлея в программном комплексе SAP2000, и результатами испытаний надземного газопровода с устройством гашения колебаний в с. Бектыш, Коркинского р-на, Челябинской обл.

В **главе 3** приводятся данные, полученные в результате расчета методом временного анализа БМ надземного газопровода. В качестве критериев ограничения колебаний принимаются максимально допустимое среднеквадратичное значение виброскорости  $[U] = 2$  см/с по данным ООО «ЦКТИ-ВИБРО-СЕЙСМ», и допустимый уровень вибронапряжений, амплитуда которых для оценочных расчетов  $[\sigma_{\text{доп}}] = 70$  МПа по данным РТМ 38.001-94.

В основу колебаний БМ заложена 1-ая собственная форма. Оценка динамических реакций в сечениях БМ проводится при действии ветра со скоростями  $V_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), которые вызывают резонанс на трех низших собственных формах колебаний (таблица 1).

Таблица 1 – Нагрузка, вызывающая резонанс на низших собственных формах колебаний

Модель	№ формы колебаний	Частота собственных колебаний $\omega_i$ , Гц	Скорость ветра $V_i$ , вызывающая резонанс, м/с
«1»	1	$\omega_1 = 2,69$	$V_1 = 2,952$
	2	$\omega_2 = 2,76$	$V_2 = 3,021$
	3	$\omega_3 = 2,94$	$V_3 = 3,221$
«2»	1	$\omega_1 = 3,05$	$V_1 = 0,868$
	2	$\omega_2 = 3,12$	$V_2 = 0,879$
	3	$\omega_3 = 3,33$	$V_3 = 0,912$

При скорости ветра  $V_1$  на осциллограммах виброперемещений (рисунок 2) расчетной модели «1» идет рост амплитуды на всем интервале времени. Отличным от резонанса становятся изменения во времени виброперемещений, виброскоростей и вибронапряжений при действии ветра со скоростями  $V_2$  (рисунок 3) и  $V_3$  (рисунок 4). Когда разность частот собственных  $\omega$  и вынужденных  $\theta$  колебаний мала, что характерно для случая действия ветра на БМ со скоростями  $V_2$  (рисунок 3) и  $V_3$ , то колебания приобретают характер «бие-ний».

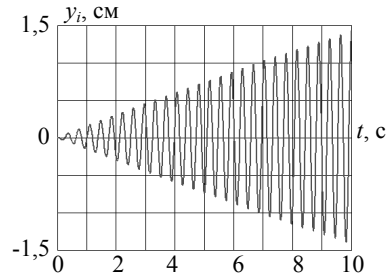
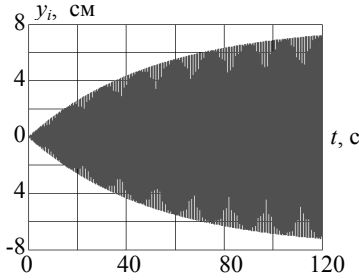


Рисунок 2 – Осциллограммы виброперемещений центрального сечения первого пролета БМ «1» при  $V_1 = 2,952$  м/с на разных интервалах времени

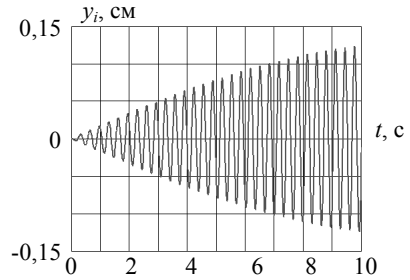
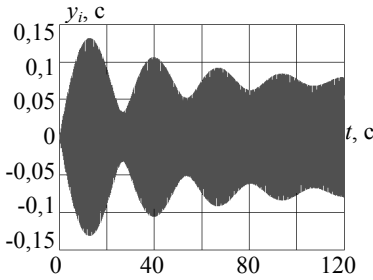


Рисунок 3 – Осциллограммы виброперемещений центрального сечения первого пролета БМ «2» при  $V_2 = 0,879$  м/с на разных интервалах времени

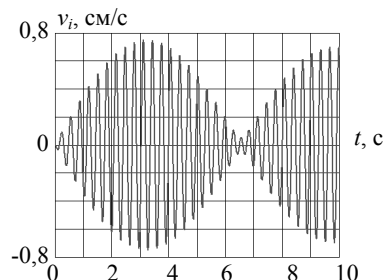
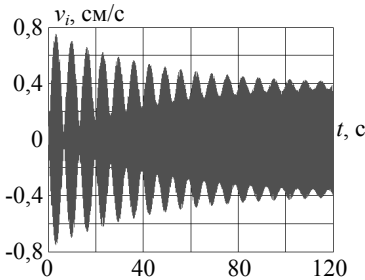


Рисунок 4 – Осциллограммы виброскоростей центрального сечения первого пролета БМ «2» при  $V_3 = 0,912$  м/с на разных интервалах времени

Для оценки пригодности надземных газопроводов к эксплуатации строятся графики изменения максимальных среднеквадратичных значений (СКЗ) виброскорости  $U_i$  по  $i$ -м сечениям модели «1» (рисунок 5, а) и «2» (рисунок 5, б) для каждого случая нагружения  $V_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Темным фоном на рисунке 5 обозначена граница допустимых СКЗ виброскорости  $[U] = 2$  см/с. Согласно рисунку 5 колебания на безопасном уровне будут происходить в модели «1»

при  $V_3 = 3,221$  м/с, а в модели «2» – при  $V_2 = 0,879$  м/с,  $V_3 = 0,912$  м/с. При действии ветра со скоростью  $V_1$  в обеих моделях уровень колебаний превышает допустимый.

Максимальные значения вибронпряжений модели «1» составляют  $\sigma_i = 74,5$  МПа  $> [\sigma_{\text{доп}}] = 70$  МПа, что больше допустимого уровня вибронпряжений. В модели «2» вибронпряжения  $\sigma_i = 7,72$  МПа  $< [\sigma_{\text{доп}}] = 70$  МПа не превышают допустимый уровень. Анализ СКЗ виброскорости в сечениях моделей «1» и «2» и сравнение максимальных вибронпряжений  $\sigma_i$  с допустимыми значениями  $[\sigma_{\text{доп}}]$ , свидетельствует о необходимости ограничения уровня колебаний.

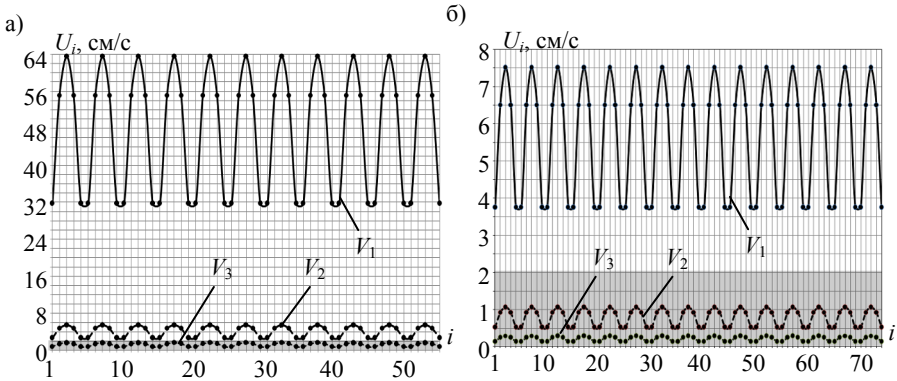


Рисунок 5 – СКЗ виброскорости в сечениях: а – БМ «1» при  $V_1 = 2,952$  м/с,  $V_2 = 3,0213$  м/с,  $V_3 = 3,2211$  м/с; б - БМ «2» при  $V_1 = 0,868$  м/с,  $V_2 = 0,879$  м/с,  $V_3 = 0,912$  м/с

Сравнение коэффициентов демпфирования  $\varepsilon_k$  на низших  $k$ -х собственных формах колебаний (рисунок 6) позволяет считать, что при модели непропорционального демпфирования (кривая 1), когда матрица демпфирования имеет вид (2), затухание колебаний будет слабее, чем при моделях пропорционального демпфирования Рэлея (кривая 2) и А.И. Цейтлина (кривая 3). На резонансных кривых (рисунок 7) в околорезонансной области ( $\theta/\omega=1$ ) максимальные виброперемещения  $Y_{\text{max}}$  на интервале времени  $t = 50$  с, при пропорциональных типах демпфирования (кривые 2, 3), значительно меньше, чем в случае модели непропорционального демпфирования (кривая 1).

Проведенное сравнение отклика БМ «1» при разных типах демпфирования подтверждает преимущества учета внутреннего трения непропорциональным типом демпфирования по сравнению с пропорциональным, т. к. при этом типе демпфирования появляется возможность учитывать диссипативные связи между формами колебаний. Кроме того, учет диссипации энергии по непропорциональному типу демпфирования дают результаты, которые

идут в запас прочности исследуемой конструкции по сравнению с рассмотренными моделями пропорционального демпфирования.

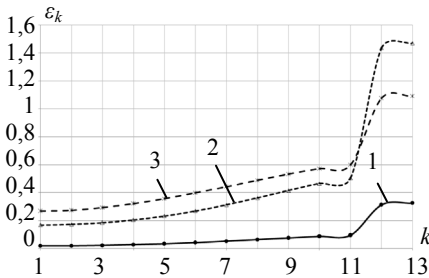


Рисунок 6 – Кривые коэффициентов демпфирования для нижней части спектра при моделях непропорционального демпфирования (1), Рэлея (2), А. И. Цейтлина (3) БМ «1»

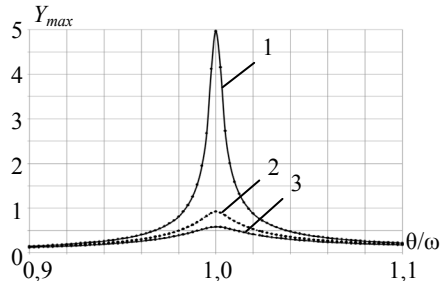


Рисунок 7 – резонансные кривые БМ «1» на 1-ой собственной форме колебаний при моделях непропорционального демпфирования (1), Рэлея (2), А. И. Цейтлина (3) БМ

В главе 4 проводится анализ результатов расчета конструктивно нелинейных моделей надземных газопроводов. Исследуется эффективность гашения колебаний с помощью устройства, работающего по принципу ОС при разном скоростном напоре.

За оптимальные принимаются такие параметры модели с односторонней связью (МОС), которые обеспечивают безопасный уровень колебаний по условиям прочности и выносливости: выбирается ОС такой жесткости, при которой СКЗ виброскорости в сечениях МОС будут минимальны. Кроме того, учитываются усилия, возникающие в ОС и виброперемещения точки  $k$  крепления ОС к расчетной модели. С увеличением жесткости ОС, усилие в ней также увеличивается (рисунок 8). Действие ветра со скоростью  $V_2$  вызывает большие усилия в ОС, чем в случае действия ветра со скоростью  $V_1$ .

Малая жесткость ОС ( $r_j = 10$  кН/м,  $r_j = 5$  кН/м) оказывает слабый эффект на ограничение перемещений  $y_k$  (рисунок 1,б) (кривые 1 и 2, рисунок 9). При жесткости ОС  $r_j = 5 \cdot 10^3$  кН/м (кривая 3), с одной стороны, обеспечивается более «мягкий» переход от БМ к МДУС и меньшие усилия в ОС (рисунок 9) по сравнению с вариантом высокой жесткости ОС (кривая 4). С другой стороны, исключается получение больших перемещений точки крепления, как это имеет место в варианте модели с малой жесткостью ОС (кривые 1 и 2).

После проведенного анализа в модели «1» для ОС выбирается стальной канат по ГОСТ 2688-80 Ø13 мм, в модели «2» – Ø 9,6 мм.

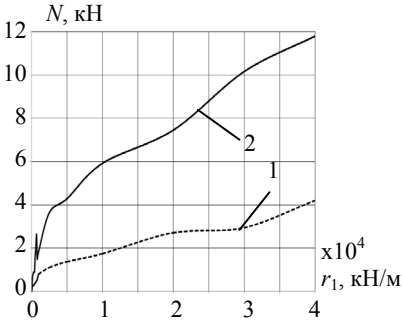


Рисунок 8 – Максимальные усилия в ОС модели «1» при  $V_1 = 2,952$  м/ (1) и  $V_2 = 3,0213$  м/с (2)

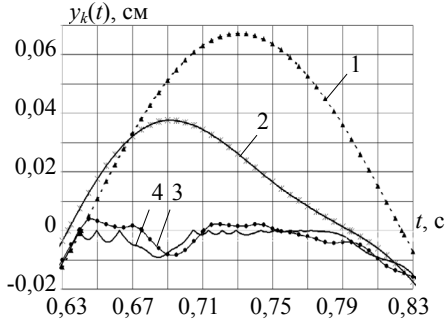


Рисунок 9 – График изменения виброперемещений в точке  $k$  МОС «2» при  $r_2 = 5$  кН/м (1),  $r_2 = 10$  кН/м (2),  $r_2 = 5 \cdot 10^3$  кН/м (3),  $r_2 = 10^8$  кН/м (4)

В сечениях МОС при действии ветра со скоростью  $V_1$  (таблица 1), вызывающей резонанс при колебаниях БМ, изменение реакции во времени имеет затухающий характер (рисунок 10) в форме «биений». Максимальные значения реакции характерны для начального периода времени и соответствуют экстремуму первого «биения». При нагрузке  $V_2$ , вызывающей резонанс в БМ на 2-й собственной форме колебаний, в МОС происходит рост амплитуды колебаний до определенного интервала времени, а в дальнейшем колебания идут с постоянной амплитудой (рисунок 11). Рост амплитуды колебаний при этой нагрузке связан с особенностями установки ОС в расчетных моделях, т.е. в середине центрального пролета. Это сечение является «нулевой» точкой на 2-ой форме собственных колебаний. И, следовательно, нагрузка, вызывающая резонанс на 2-ой собственной форме колебаний БМ, действуя на МОС, в каждом полуцикле которой работает МДУС, вызывает рост амплитуды колебаний.

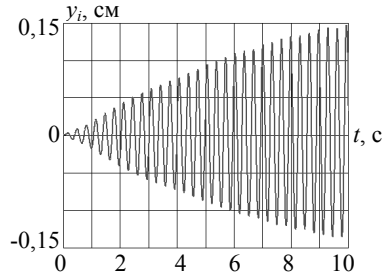
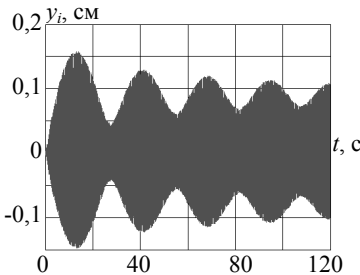


Рисунок 10 – Осциллограммы виброперемещений центрального сечения первого пролета МОС «2» при  $V_1 = 0,868$  м/с на разных интервалах времени

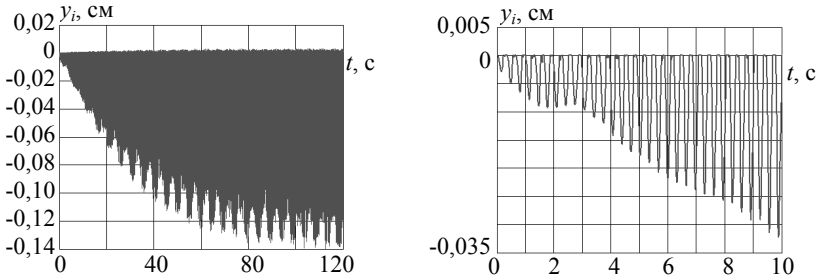


Рисунок 11 – Осциллограммы виброперемещений центрального сечения центрального пролета МОС «2» при  $V_2 = 0,879$  м/с на разных интервалах времени

Сравнивая максимальную реакцию расчетной модели «1» при разных скоростях ветра ( $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$ ) на рисунке 12, а видно, что наибольший по величине отклик соответствует скорости ветра  $V_2$ . Действие ветра со скоростями  $V_1$  и  $V_3$  вызывает меньшую по величине реакцию по сравнению со случаем  $V_2$ . Максимальная суммарная реакция (рисунок 12, б) отличается в более чем 1,5 раза от реакции только на динамическое действие (рисунок 12, а).

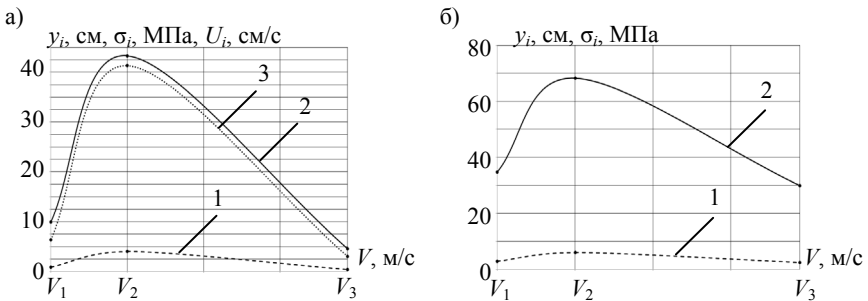


Рисунок 12 – Максимальные перемещения (1), напряжения (2) и СКЗ виброскорости (3) МОС «1» при скоростях ветра  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$ : а – только на аэродинамическое действие ветра, б – с учетом начального статического состояния

В конструктивно нелинейной системе, также как и в БМ, амплитуды колебаний на низших собственных формах в резонансной области при модели непропорционального демпфирования (2) превышают амплитуды колебаний при моделях демпфирования Рэлея и А.И. Цейтлина.

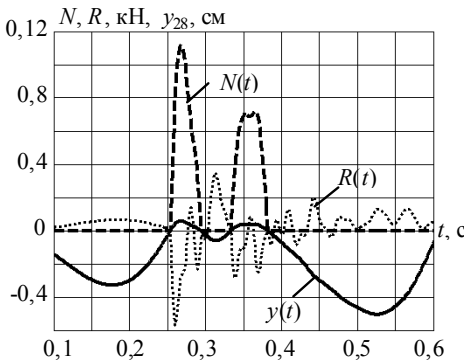


Рисунок 13 – Осциллограммы восстанавливающих сил  $R$ , усилий  $N$  в ОС и виброперемещений  $y_{28}$  точки  $k$  МОС «1»

В главе 5 сравниваются реакции БМ и МОС, анализируется эффективность применения ОС для гашения колебаний. Предлагаются рекомендации по установке ОС для ограничения колебаний в надземных газопроводах до допустимого уровня.

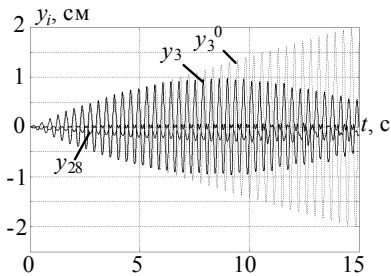


Рисунок 14 – Осциллограммы виброперемещений модели «1» при  $V_1$  центральных сечений первого пролета БМ ( $y_3^0$ ), первого ( $y_3$ ) и центрального ( $y_{28}$ ) пролетов МОС

В итоге строятся графики изменения максимальных СКЗ виброскорости  $\max U_i$  по всем  $i$ -м сечениям расчетной модели (рисунок 15). При  $V_1$  максимальные СКЗ виброскорости в МОС «2» (рисунок 15, а) после установки ОС уменьшились в первом пролете более чем в 5 раз, в центральном пролете –

Нелинейная работа расчетной модели с ОС иллюстрируются на рисунок 13 осциллограммами кинематических и силовых параметров реакций. В режиме колебаний МДУС в точке  $k$  (рисунок 1, б) или 28-м сечении МОС «1» виброперемещения  $y_{28}(t) > 0$  или близки к нулю, поэтому ОС на данных временных интервалах испытывает растяжение. Так как в момент натяжения ОС кинетическая энергия движения внезапно трансформируется в потенциальную (упругую) энергию, то одновременно с появлением растягивающих усилий в ОС происходит резкая активизация восстанавливающих сил  $-R(t)$ .

Действие ветра со скоростью  $V_1$  вызывает резонанс при колебаниях БМ «1» на 1-ой собственной форме (кривая  $y_3^0$ , рисунок 14). В МОС «1» колебания имеют затухающий характер (кривые  $y_3$  и  $y_{28}$ ). В центральном ( $y_{28}$ ) пролете МОС виброперемещения меньше чем в крайнем ( $y_3$ ). На интервале времени  $t = 120$  с при этой скорости ветра амплитуда виброперемещений в МОС благодаря работе ОС уменьшается в первом пролете более чем в 8 раз, в центральном пролете более чем в 25 раз для модели «1».

более чем в 34 раза и не превышают допустимых значений  $[U] = 2 \text{ см/с}$  (15, а). Реакция БМ в каждом пролете имеет регулярный вид, циклически повторяясь в каждом пролете. В МОС характеристика  $\max U_i$  на порядок ниже, чем в БМ. Кроме того в центральной части расчетной модели, где наиболее сильно влияние ОС, происходит заметное снижение реакции.

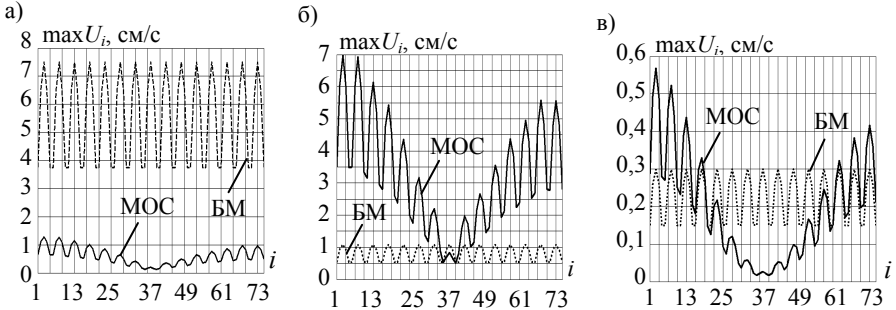


Рисунок 15 – Сравнение СКЗ виброскоростей в БМ и МОС «2» при  $V_1 = 0,868 \text{ м/с}$  (а),  $V_2 = 0,879 \text{ м/с}$  (б),  $V_3 = 0,912 \text{ м/с}$  (в)

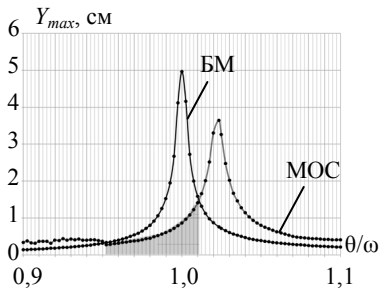


Рисунок 16– Резонансные кривые модели «1»

Варьируя соотношением  $\theta/\omega \in [0,9, 1,1]$ , максимальное значение виброперемещений  $Y_{max}$  (на интервале времени  $t = 50 \text{ с}$ ) БМ приходится на случай  $\theta/\omega = 1$  (рисунок 16), в то время как максимальное значение виброперемещений при работе по МОС приходится на случай при  $\theta/\omega = 1,0235$ , т.е. когда на расчетную модель «1» действует нагрузка, вызывающая резонанс на 2-ой собственной форме колебаний БМ ( $V_2/V_1 = 3,0213/2,952 = 1,0235$ ).

Эффективность работы ОС, как устройства гашения колебаний, прослеживается только вблизи резонансной для БМ нагрузки (темный фон на рисунке 16). Например, при  $\theta/\omega = 1$  в БМ  $Y_{max} = 4,971 \text{ см}$ , в МОС  $Y_{max} = 0,873 \text{ см}$ , а при  $\theta/\omega = 1,04$  в БМ  $Y_{max} = 0,476 \text{ см}$ , в МОС  $Y_{max} = 1,145 \text{ см}$ . Однако, максимально возможное значение отклика МОС  $Y_{max} = 3,652 \text{ см}$  меньше максимально возможного отклика БМ  $Y_{max} = 4,971 \text{ см}$  (рисунок 16).

Установка одного устройства гашения колебаний в каком-либо пролете надземного газопровода приводит к ограничению колебаний до безопасного

уровня только в некоторой локализованной зоне, которую можно характеризовать как предельный радиус действия одного устройства. За пределами этого радиуса колебания надземного газопровода будут превышать предельно допустимый уровень. Для того, чтобы ограничить резонансные амплитуды до безопасного уровня по всей трассе газопровода, необходимо установить оптимальный шаг расстановки ОС, который не должен быть более предельного радиуса.

На рисунке 17 приводятся графики изменения максимальных СКЗ виброскорости  $\max U_i$  в МОС «1» и «2» в зависимости от числа пролетов, приходящихся на одну ОС, при действии ветра со скоростями  $V_1$  и  $V_2$ . Наименьшие СКЗ виброскорости характерны для случая, когда одно устройство гашения колебаний устанавливается на 3 пролета, наибольшие – когда на 15 пролетов. Так, при колебаниях модели «2» СКЗ виброскорости не будут превышать допустимых значений  $[U] = 2$  см/с, если одна ОС приходится на 7 пролетов и менее.

Расчет, предшествующий установке устройств гашения колебаний, работающих по принципу ОС, по трассе надземного газопровода, выполняется в два этапа. Предварительный расчет заключается в определении длины пролета по условиям обеспечения статической прочности по формуле (25) СП 42-102-2004. Поверочный расчет МОС проводится на аэродинамическое действие ветра методом временного анализа, основанном на исследовании матричного квадратного уравнения. При этом длина пролетов не должна превышать длину пролета, определенную на предварительном этапе.

Если устройство гашения колебаний будет установлено в середине центрального пролета, то наиболее опасной при колебаниях МОС является скорость ветра  $V_2$ .

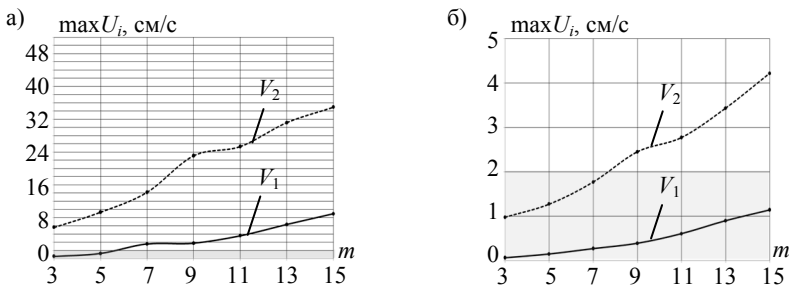


Рисунок 17 – Изменение максимальных СКЗ виброскорости в МОС «1» (а) и «2» (б) в зависимости от числа пролетов, приходящихся на одну ОС

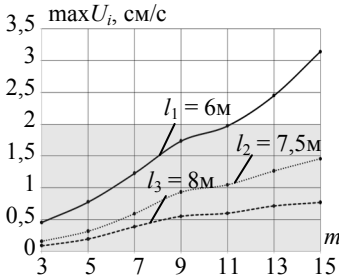


Рисунок 18 – изменение СКЗ виброскорости при разном числе  $m$  пролетов, приходящихся на одну ОС, для газопровода с трубой  $\varnothing 89$  мм

В качестве рекомендаций по применению устройств гашения колебаний предлагаются графики (рисунок 18) изменения максимальных СКЗ виброскорости при действии ветра со скоростью  $V_2$  в зависимости от числа  $m$  пролетов, приходящихся на одну ОС при разном шаге опор  $l_1, l_2, l_3$  в расчетной модели. Все кривые одного графика соответствуют трубе газопровода одного диаметра и ОС одной жесткости. Графики рисунка 18 позволяют узнать, на какой длине расчетной модели одно устройство гашения колебаний может обеспечить колебаний на допустимом уровне  $[U] = 2$  см/с (таблица 2).

Таблица 2 – Число пролетов приходящихся на одну ОС для обеспечения колебаний на допустимом уровне

Ø трубы (мм) / Ø каната (мм)	Шаг опор		
	$l_1 = 6$ м	$l_2 = 7,5$ м	$l_3 = 9$ м
89/22,5	3 – 11	3 – 15	3 – 15

Таким образом можно построить графики для газопроводов с разным шагом опор  $l$  и с трубой разного диаметра.

Благодаря применению гасителя колебаний может быть увеличена требуемая длина пролета надземного газопровода, определяемая по СП 42-102-2004, что позволит уменьшить материалоемкость на трассах надземных газопроводов.

### Основные результаты

1. Разработан метод временного анализа для аналитического решения задачи колебаний конструктивно нелинейной системы «газопровод – гаситель» при ветровом резонансе. Расчетная схема нелинейного временного анализа надземного газопровода при нестационарном процессе сводится к последовательности упругих решений в матричной форме интеграла Дюамеля.

2. Получено аналитическое решение задачи колебаний систем «газопровод – гаситель» с 55 и 75 степенями свободы при непропорциональной модели демпфирования. Показано, отличие виброперемещений при учете внутреннего трения на основе модели непропорционального демпфирования и

известных моделей пропорционального демпфирования Рэлея и А.И. Цейтлина.

3. Установлено влияние жесткости односторонней связи на реакцию системы «газопровод – гаситель». Выбор оптимальных параметров устройства гашения колебаний осуществляется таким образом, чтобы реакция расчетной модели с односторонней связью (среднеквадратичные значения виброскорости и растягивающие усилия в односторонней связи) была на безопасном уровне по условиям прочности.

4. Исследовано влияние скорости ветра на реакцию модели надземного газопровода с односторонней связью и без односторонней связи. Обнаружено, что в модели с односторонней связью реакция системы (виброперемещения, вибронпряжения, среднеквадратичные значения виброскорости) при определенных скоростях ветра может превышать аналогичную реакцию модели без односторонней связи. Однако, на диапазоне возможных скоростей ветрового потока применение односторонних связей позволяет существенно сократить амплитуду реакции расчетной модели.

5. Разработаны рекомендации по проектированию менее материалоемкой и аэродинамически устойчивой конструкции надземного газопровода с устройством гашения колебаний. Введение такого устройства, работающего по принципу односторонней связи, позволяет увеличить длину пролета по сравнению с требуемой длиной пролета по СП 42-102-2004 более чем на 26%.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Потапов, А.Н. Характеристика напряженно-деформированного состояния надземных газопроводов при ветровом резонансе / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. - 2008. - V. 4, Issue 2. P. 100–101.

2. 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». – Вып. 8. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009. – №16(149). – С. 23–28.

3. Потапов, А.Н. О повышении аэродинамической устойчивости надземных газопроводов / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева // Тезисы докладов 63-й научно-технической конференции. - Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2006. – С. 30

4. Потапов, А.Н. О построении аэродинамически устойчивой расчетной модели надземного газопровода / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева // Тезисы докладов симпозиума. - Нижний Новгород: НГАСУ, 2007. – С. 89–91.

5. Дегтярева, Н.В. Построение аэродинамически устойчивой расчетной модели надземного газопровода с односторонней связью / Н.В. Дегтярева // Вестник ЮУрГУ. Серия "Строительство и архитектура". - 2007. Вып. 5. - № 22(94). - С. 15–16.

6. Дегтярева, Н.В. Ограничение резонансных амплитуд при автоколебаниях надземных газопроводов / Н.В. Дегтярева, Е.В. Бережкова // Тезисы докладов 65-й научно-технической конференции. - Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. - С. 39.

7. Дегтярева, Н.В. Особенности аэродинамического расчета надземных газопроводов методом временного анализа / Н.В. Дегтярева, А.Е. Павленко // Материалы международной научно-технической конференции. - Ростов на Дону: РГСУ, 2008. - С. 133–134.

8. Дегтярева, Н.В. Учет внутреннего трения при колебаниях расчетно-динамической модели надземного газопровода / Н.В. Дегтярева // Наука в ЮУрГУ: материалы юбилейной научной конференции. Секции технических наук. Том. 1 – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. - С. 25–29

9. Потапов, А.Н. Анализ колебаний конструктивно нелинейных систем при гармонических воздействиях / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева // Наука и технологии. Тезисы докладов XXIX Российской школы, посвященной 85-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. – Миасс: МСНТ, 2009. – С. 42.

10. Потапов, А.Н. Динамический расчет систем с односторонними связями / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева // Тезисы XXIII Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел. Методы граничных и конечных элементов». – Санкт-Петербург, 2009. – С. 162–163.

11. Дегтярева, Н.В. Временной анализ надземных газопроводов с учетом конструктивной нелинейности / Н.В. Дегтярева // Сборник международной науч.-практ. конф. «Роль стратегии индустриально-инновационного развития республики Казахстан в условиях глобализации: проблемы и перспективы». – Рудный: Рудный индустриальный институт, 2009. – Т.1. – С. 169–171.

12. Пат. на полезную модель 66000 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> F16L55/033, F16L3/00. Устройство для гашения резонансных колебаний трубопровода / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева, Е.В. Бережкова, А.Е. Павленко. – № 2007109081/22; заявл. 12.03.2007; опублик. 27.08.2007, Бюл. №24 – 3 с.

ДЕГТЯРЕВА НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО  
НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ НАДЗЕМНЫХ  
ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ ВЕТРОВОМ РЕЗОНАНСЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

Изд. лиц. № 021253 от 31.10.1997

Подписано в печать 16.11.2009 г. Формат 60х84 1/16

Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Усл. – печ.л. 1. Уч.-изд. Л. 1,0.

Тираж 120 экз. Заказ № 431

Изд-во ГОУ ВПО «ТГАСУ», 634003, Томск, пл. Соляная, 2.

Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ГОУ ВПО «ТГАСУ».

634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.