

На правах рукописи

РАЗОВ Игорь Олегович

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ
ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО
ДИАМЕТРА ПРИ НАЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКЕ**

Специальность: 05.23.17 – Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Соколов Владимир Григорьевич

Официальные оппоненты: **Якубовский Юрий Евгеньевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тюменский
государственный нефтегазовый
университет», кафедра прикладной
механики, заведующий;

Яваров Александр Валерьевич,
кандидат технических наук,
ООО «ИСП «Геореконструкция»,
руководитель группы

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора
Александра I»**

Защита диссертации состоится «22» декабря 2015 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.03 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316–58–72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Кондратьева Лидия Никитовна

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. В настоящее время наблюдается тенденция расширения существующих, и строительства новых сетей магистральных трубопроводов, выполненных из тонкостенных труб диаметром свыше 1000мм. Применение таких труб выдвигает новые задачи теории колебаний, связанные с определением частот и форм свободных колебаний. А для нестационарного воздействия, вызванного пульсацией внутреннего рабочего давления, протекающей жидкости – изучение параметрического резонанса. Динамические расчеты, производимые с позиции классической стержневой теории, не позволяют в полной мере оценить работу тонкостенных труб. Это связано с тем, что стержневая модель не позволяет учесть влияние таких факторов, как внутреннего рабочего давления и деформацию поперечного сечения. Таким образом, для получения более достоверных результатов, по определению динамических характеристик, необходимо принять в качестве расчетной модели не стержень, а цилиндрическую оболочку, которая наиболее полно отражает реальную работу конструкции.

Данная работа посвящена изучению вопроса колебаний, статической и динамической устойчивости, наземных тонкостенных трубопроводов большого диаметра с учетом совместного влияния упругого основания грунта, продольной сжимающей силы, внутреннего рабочего давления, протекающей жидкости, и геометрических характеристик. Таким образом, актуальность работы не вызывает сомнений.

Степень разработанности темы исследований. Динамический расчет прямолинейных участков трубопроводов с позиции стержневой теории по определению частот свободных колебаний был рассмотрен авторами: С.П. Тимошенко, Я.Г. Пановко, В.В. Болотин, В.И. Феодосьев, Т.Е. Смит, Дж. Герман, Х. Эшли, Дж. Хевиленд, Н.А. Алфутов, Г.В. Хаузнер, А.П. Ковревский, Р. Лонг, В.В. Лалин, П.А. Джонджоров, С.В. Челомей, В.А. Светлицкий и другими.

Большой вклад в развитие теории колебаний с позиции цилиндрических оболочек внесли: М.А. Ильгамов, М.П. Пайдусис, А.С. Вольмир, Б.К. Михайлов, Э.И. Иванюта, С.Н. Кукуджанов, В.П. Ильин, О.Б. Халецкая и др. В работах М.П. Пайдусиса, А.С. Вольмира, Г.В. Хаузнера, частоты свободных колебаний цилиндрической оболочки определены при помощи численных методов, основанных на уравнениях В. Флюгге. В.П. Ильиным и О.Б. Халецкой разработан новый алгоритм по определению, в аналитическом виде, частот и форм свободных колебаний на основании геометрически нелинейной теории цилиндрических оболочек с учетом тангенциальных и радиальных сил инерции, а также внутреннего рабочего давления.

Исследования параметрических колебаний и динамической устойчивости с позиции стержневой теории рассмотрены в работах: А.А. Андропова, М.А. Леонтовича, В.А. Гастьева, И.И. Гольденבלата, Н.А. Картвелишвили, А.В. Индейкина, В.Н. Челомея, О.Д. Ониашвили, А.Н. Маркова, В.В. Болотина, А.С. Вольмира, Б.З. Брачковского, М.П. Пайдусиса, и др.

Вопрос исследования колебаний и динамической устойчивости наземных трубопроводов, даже с позиции стержневой теории, рассмотрен не достаточно полно, является актуальным и находится в стадии развития.

Цель исследования.

Цель исследования – разработать методику динамического расчета прямолинейных участков тонкостенных трубопроводов большого диаметра при наземной прокладке, со стационарным и нестационарным потоком нефти и газа с учетом параметра продольной сжимающей силы и упругого основания грунта.

Задачи исследования:

– изучить существующие методы динамического расчета нефте- и газопроводов при наземной прокладке;

– решить контактную задачу с учетом взаимодействия трубопровода с грунтом по узкой полосе;

– на основании геометрически нелинейном варианте полубезмоментной теории цилиндрических оболочек получить уравнение движения наземного нефте- и газопровода с учетом всех составляющих сил инерции, внутреннего рабочего давления, скорости потока протекающей жидкости, параметра продольной сжимающей силы, и упругого основания грунта;

– для системы «труба-газ», «труба-нефть» при различных геометрических характеристиках изучить влияние упругого основания грунта, внутреннего рабочего давления, параметра продольной сжимающей силы на частоты свободных колебаний;

– получить выражения в аналитическом виде для параметра критической продольной сжимающей силы наземных нефте- и газопроводов, вызывающей потерю статической устойчивости;

– решить задачу о параметрических колебаниях и динамической устойчивости нефте- и газопроводов при наземной прокладке, с построением модифицированных диаграмм Айнса – Стретта, при различных геометрических и механических характеристиках.

Объектом исследования являются наземные, тонкостенные, магистральные трубопроводы большого диаметра.

Предметом исследования являются свободные и параметрические колебания, статическая и динамическая устойчивость наземных тонкостенных магистральных трубопроводов большого диаметра.

Научная новизна исследования:

1. Решена контактная задача с учетом взаимодействия трубопровода с грунтом по узкой полосе позволяющая определить радиальное давления грунта на внешнюю поверхность трубы. На основании геометрически нелинейном варианте полубезмоментной теории цилиндрических оболочек и теории потенциального течения потока жидкости получены уравнения движения наземных нефте- и газопроводов. Получены аналитические выражения по определению частот и форм свободных колебаний для стационарного потока нефти и газа.

2. Получены аналитические зависимости позволяющие уточнить определение частот свободных колебаний наземных тонкостенных нефте- и газопроводов большого диаметра и изучить влияние упругого основания грунта, параметра продольной сжимающей силы, геометрических характеристик, и стационарного потока жидкости (для нефтепровода).

3. Получены выражения для определения параметра критической продольной сжимающей силы наземных нефте- и газопроводов.

4. Установлен критерий применимости теории оболочек для определения наименьших частот свободных колебаний в виде параметра длины l^* .

5. Разработана методика исследования динамической устойчивости нефте- и газопроводов при наземной прокладке с использованием системы уравнений Матье. Построены области динамической неустойчивости при помощи модифицированных диаграмм Айнса – Стретта. Полученные диаграммы позволяют оценить влияние геометрических и механических характеристик на размеры, и расположение областей динамической неустойчивости.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Полученные в данной диссертации решения по определению частот свободных колебаний, статической и динамической устойчивости наземных, тонкостенных магистральных трубопроводов большого диаметра позволяют уточнить решения, полученные по стержневой теории, а также учесть совместное влияние внутреннего рабочего давления, геометрических характеристик, параметра продольной сжимающей силы, упругого основания грунта, и скорости потока протекающей жидкости (для нефтепровода). Решение системы дифференциальных уравнений Матье позволяет изучить динамическую устойчивость наземных трубопроводов, на основании построения областей динамической неустойчивости при помощи модифицированных диаграмм Айнса – Стретта с верхними и нижними границами.

Методология и методы исследования. Диссертационная работа выполнена с применением современных методов строительной механики и математики. Решения, полученные в диссертации, основаны на методике предложенной В.З. Власовым – В.В. Новожиловым, В.П. Ильиным, и другими учеными.

Положения, выносимые на защиту:

1. Решение контактной задачи, и разработка расчетной схемы для наземных трубопроводов с учетом взаимодействия трубы с грунтом по узкой полосе.

2. Решения задачи о свободных колебаниях наземных, тонкостенных, прямолинейных участков трубопроводов большого диаметра подверженных действию стационарного внутреннего рабочего давления, параметра продольной сжимающей силы, потока протекающей жидкости (для нефтепровода) и влияния упругого основания грунта.

3. Аналитические зависимости для определения влияния упругого основания грунта, внутреннего рабочего давления, параметра продольной

сжимающей силы, стационарного потока жидкости на частоты свободных колебаний, при различных геометрических характеристиках.

4. Аналитические зависимости для определения параметров критических продольных сжимающих сил для наземных тонкостенных, прямолинейных участков нефте- и газопроводов с учетом влияния упругого основания грунта.

5. Решение задачи о параметрических колебаниях наземных трубопроводов подверженных действию нестационарного внутреннего рабочего давления, продольной сжимающей силы, и скорости потока протекающей жидкости (для нефтепровода).

6. Построение и анализ областей динамической неустойчивости при помощи диаграмм Айнса – Стретта, от действия нестационарного потока газа и нефти в трубопроводах при различных значениях механических и геометрических характеристиках.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.17 – Строительная механика, п.3 «Аналитические методы расчета сооружений и их элементов».

Степень достоверности и апробация результатов. В настоящей диссертационной работе получены решения при помощи известных и апробированных методов, применяемых в строительной механике. Частные случаи полученных решений хорошо согласуются с решениями известных авторов. Основные положения работы были доложены на следующих научных конференциях: XII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ, Тюмень, 2012 год; Конкурс лучший научный доклад на иностранном языке, 2013 (английский), ТюмГАСУ; XXV Международная конференция. Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов. 23–26 сентября 2013. г. Санкт Петербург, Россия; XIII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ, Тюмень, 2013 год; Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири, Тюмень, ТюмГАСУ, 2014 год; Конкурс лучший научный доклад на иностранном языке, 2014 (английский), ТюмГАСУ; IX Международная конференция «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте», проводимой 27–28 мая 2014 года в г. Санкт-Петербург в ПГУПС имени Александра I; XIV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ, 2015г; Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири, Тюмень, ТюмГАСУ, 2015 год;

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 12 научных статьях общим объемом 5,44 п.л., лично автором 3,27 п.л., из них 6 статей, в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 145 наименований. Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста. Работа содержит 43 рисунка, 25 таблиц, 2 приложения.

Во введении описывается актуальность темы диссертации и постановка задач исследования.

В первой главе производится обзор и анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных вопросам колебаний, статической и динамической устойчивости магистральных трубопроводов, на основании стержневой теории, и теории цилиндрических оболочек.

Во второй главе решается контактная задача, с учетом взаимодействия трубопровода с грунтом по узкой полосе, исследовано влияние упругого основания грунта на частоты свободных колебаний и статической устойчивости наземных прямолинейных магистральных газопроводов с позиции теории тонких цилиндрических оболочек.

В третьей главе на основании методики приведенной во второй главе исследован вопрос колебаний и статической устойчивости наземного прямолинейного нефтепровода.

В четвертой главе исследован вопрос динамической устойчивости (параметрических колебаний) наземных нефте- и газопроводов при помощи системы дифференциальных уравнений Матье. Определены области динамической неустойчивости, при помощи модифицированных диаграмм Айнса – Стретта.

В пятой главе произведено сравнение и сопоставление решений, полученных в данной диссертации, с решениями других авторов по стержневой теории и по теории цилиндрических оболочек.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Решена контактная задача с учетом взаимодействия трубопровода с грунтом по узкой полосе позволяющая определить радиальное давления грунта на внешнюю поверхность трубы. На основании геометрически нелинейном варианте полубезмоментной теории цилиндрических оболочек и теории потенциального течения потока жидкости получены уравнения движения наземных нефте- и газопроводов. Получены аналитические выражения по определению частот и форм свободных колебаний для стационарного потока нефти и газа.

В реальных условиях наземные трубопроводы подвергаются действию внутреннего рабочего давления p_0 , продольной сжимающей силы F , скорости потока протекающей жидкости V и влиянию упругого основания грунта k . Нефте- и газопровод рассматривается как тонкостенная, изотропная, плотностью $\rho = const$, замкнутая цилиндрическая оболочка, разделенная

кольцами жесткости, конечной длины L , радиусом срединной поверхности R , толщиной стенки h , модулем упругости E , и коэффициентом Пуассона $\tilde{\nu}$. Тонкостенная труба рассматривается в системе цилиндрических координат $\xi = x/R$, где x – продольная координата вдоль оси трубы, θ – полярный угол поворота в плоскости поперечного сечения.

Задача о свободных колебаниях наземных трубопроводов решается с позиции геометрически нелинейного варианта полубезмоментной теории цилиндрических оболочек среднего изгиба Галимова – Муштари и допущений полубезмоментной теории Власова – Новожилова:

1. Относительное удлинение в окружном направлении ε_2 мало по сравнению с относительными радиальными перемещениями w и производной $\partial v / \partial \theta$.

2. Относительный сдвиг срединной поверхности $\tilde{\omega}$ мал в сравнении с углами поворота $\partial u / \partial \theta$ и $\partial v / \partial \xi$.

3. Соотношения между усилиями и деформациями имеют вид:

$$\begin{aligned} T_1 = Eh\varepsilon_1, M_2 = D\aleph_2, M_1 = \tilde{\nu}D\aleph_2, \varepsilon_2 + \tilde{\nu}\varepsilon_1 = 0, \\ H_1 = H_2 = H = (1 - \tilde{\nu})D\tau, S_1 = S_2 = S = Eh/2(1 + \tilde{\nu})\tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (1)$$

где T_1 – продольная нормальная сила, H – крутящий момент, S – сдвигающее усилие, M_1, M_2 – изгибающие моменты, ε_1 и ε_2 – относительные удлинения в направлении безразмерных ортогональных координат $\xi = x/R$ и θ , τ – кручение срединной поверхности вдоль оболочки; $D = Eh^3/12(1 - \tilde{\nu}^2)$ – цилиндрическая жесткость; \aleph_2 – изменение кривизны линии θ срединной поверхности.

4. В уравнениях равновесия общей теории оболочек величинами поперечных сил Q_1 и крутящего момента H (в последнем уравнении равновесия) можно пренебречь.

На основании геометрически нелинейном варианте полубезмоментной теории цилиндрических оболочек среднего изгиба уравнение движения в усилиях имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\tau \frac{\partial M_2}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{R_2^*}{R_1^*} T_1 \right) - \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(R_2^* \frac{\partial^2 M_2}{\partial \theta^2} \right) - \\ - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{R_2^*} \frac{\partial M_2}{\partial \theta} \right) + R \frac{\partial X_1}{\partial \xi} - R \frac{\partial X_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (R_2^* X_3) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } X_1 = -Rh\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, X_2 = -Rh\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, X_3 = -Rh\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + p_0 - \Psi(\theta)w(\xi, \theta, t), \quad (3)$$

$$\Psi(\theta) = \frac{kR}{\pi} \left[\frac{\varphi_0^3}{3} + \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m \cos m\theta \right];$$

$\beta_m = (-1)^m m^{-3} [2\varphi_m \cos \varphi_m - (\varphi_m^2 - 2) \sin \varphi_m]$; $\varphi_m = m\varphi_0$, φ_0 – центральный угол вдавливания; $m=1,2,3\dots$, k – коэффициент постели грунта в соответствии с моделью Фусса – Винклера, Н/м³; R – радиус срединной поверхности, м; τ – кручение срединной поверхности; $\Psi(\theta)$ – радиальное давление грунта на

внешнюю поверхность трубы, $\text{H}/\text{м}^2$, определяемое в результате решения контактной задачи.

u, v, w – безразмерные (отнесенные к радиусу R) компоненты перемещения элемента срединной поверхности, в продольном, окружном и радиальном направлении.

Соотношения между деформациями и перемещениями с учетом допущений полубезмоментной теории цилиндрических оболочек (пункт 1–4) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial \theta} + w = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \theta} = 0, \quad \vartheta_2 = \frac{\partial w}{\partial \theta} - v, \quad \aleph_1 = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}, \quad \aleph_2 = -\frac{1}{R} \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \theta}, \\ \varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \frac{\partial u}{\partial \xi}, \quad \varepsilon_0 = \frac{F}{EA}, \quad \tau = -\frac{1}{R} \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \xi}, \quad \frac{1}{R_1^*} = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}, \quad \frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R} \left(1 - \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \theta}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где ϑ_2 – угол поворота касательной к срединной линии поперечного сечения;

R_1^*, R_2^* – радиусы кривизны оболочки в деформированном состоянии (индекс 1 обозначает продольное направление, индекс 2 – окружное), E – модуль упругости материала оболочки; A – площадь поперечного сечения, F – продольная сжимающая сила.

В результате преобразования уравнения (2) с учетом формул (1), (3), (4), получим линеаризованное уравнение движения в перемещениях:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} + h_v^2 \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \left(\vartheta_2 + \frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial \theta^2} \right) + 2 \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \varepsilon_0 \right) - \frac{R}{Eh} p_0 \frac{\partial^3 \vartheta_2}{\partial \theta^3} + \\ + \frac{R}{Eh} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} [\Psi(\theta) w(\xi, \theta, t)] - \frac{R^2 \rho}{E} \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \xi \partial t^2} - \frac{\partial^3 v}{\partial \theta \partial t^2} - \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} \right) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $h_v = \frac{h}{R\sqrt{12(1-\tilde{\nu}^2)}}$; h – толщина оболочки.

Граничные условия, для шарнирного типа закрепления концов оболочки:

$$v|_{\xi=0, \xi=L/R} = 0, \quad \vartheta_2|_{\xi=0, \xi=L/R} = 0, \quad w|_{\xi=0, \xi=L/R} = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}|_{\xi=0, \xi=L/R} = 0, \quad (6)$$

Решаем полученную систему уравнений (4), (5) методом разделения переменных, методом Фурье. Представим функцию радиального перемещения $w(\xi, \theta, t)$ удовлетворяющей граничным условиям шарнирного закрепления и условию периодичности по окружной координате θ в виде:

$$w = \sum_m \sum_n f(t) \sin(\lambda_n \xi) \cos(m\theta), \quad (7)$$

где $\lambda_n = \frac{n\pi R}{L}$; $m, n = 1, 2, \dots$ – волновые числа в окружном и продольном направлениях.

Остальные компоненты перемещения и угол поворота касательной определяются из соотношений полубезмоментной теории оболочек (4):

$$\begin{aligned} u &= -\sum_m \sum_n \frac{\lambda_n}{m^2} f(t) \cos(\lambda_n \xi) \cos(m\theta), \\ v &= -\sum_m \sum_n \frac{1}{m} f(t) \sin(\lambda_n \xi) \sin(m\theta), \\ \vartheta_2 &= -\sum_m \sum_n \frac{m^2 - 1}{m} f(t) \sin(\lambda_n \xi) \sin(m\theta). \end{aligned} \quad (8)$$

Полученные соотношения (7), (8), подставим в дифференциальное уравнение (5) и приравнявая коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях получим линейризованную систему разделяющихся уравнений:

$$\begin{aligned} \{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - 2\varepsilon_0^* \tilde{\lambda}_n^2 m^4\} f(t) + \\ + \rho^* R h [\tilde{\lambda}_n^2 h_v + m^2 + m^4] f''(t) = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\tilde{\lambda}_n = \frac{n\pi R}{L\sqrt{h_v}}$, $p^* = p_0 \frac{R}{Ehh_v^2}$, $\rho^* = \rho \frac{R}{Ehh_v^2}$, $k^* = \frac{kR^2}{\pi Ehh_v^2} z_m$, $\varepsilon_0^* = \frac{F}{EAh_v}$, z_m –

коэффициент определяемый в результате дифференцирования произведения функций $\Psi(\theta)w(\xi, \theta, t)$, разложенных в ряды Фурье, и зависящий от волновых чисел $m=1,2,3\dots$

Полагая, что свободные колебания оболочки являются гармоническими, представим функцию времени $f(t)$ в виде:

$$f(t) = \sin \omega_{mn} t, \quad f''(t) = -\omega_{mn}^2 \sin \omega_{mn} t \quad (10)$$

где ω_{mn} – круговая частота свободных изгибных колебаний оболочки по формам $m, n = 1, 2, 3, \dots$

Подставляя формулы (10) в уравнение (9) получим систему уравнений в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - 2\varepsilon_0^* \tilde{\lambda}_n^2 m^4 - \\ - \rho^* R \cdot h(\tilde{\lambda}_n^2 h_v + m^2 + m^4) \omega_{mn}^2 = 0, \end{aligned}$$

или после преобразований слагаемого $2\varepsilon_0^* \tilde{\lambda}_n^2 m^4$ получим:

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P / n^2 - \\ - \rho^* R \cdot h(\tilde{\lambda}_n^2 h_v + m^2 + m^4) \omega_{mn}^2 = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где $P = F / F_0$ – параметр продольной сжимающей силы, $F_0 = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}$ – сила Эйлера.

После преобразования формулы (11) получим выражение для квадрата частоты свободных колебаний ω_{mn}^2 прямолинейного участка газопровода:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P / n^2}{\rho^* R \cdot h(\tilde{\lambda}_n^2 h_v + m^2 + m^4)}. \quad (12)$$

Полученное выражение (12) позволяет учесть совместное влияние внутреннего рабочего давления p_0 , параметра продольной сжимающей силы P , и влияния упругого основания грунта, на частоты свободных колебаний наземного газопровода при различных значениях волновых числах m, n .

Далее решается задача о свободных колебаниях наземного нефтепровода большого диаметра. Здесь в отличие от газопровода необходимо дополнительно учесть влияния стационарного потока жидкости. Для этого дополним нормальную составляющую сил инерции X_3 гидродинамическим давлением, полученным на базе теории потенциального течения жидкости и решения модифицированного уравнения Бесселя:

$$q_{ж} = \rho_0 \Phi_{mn} (R^2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + V^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}), \quad (13)$$

где $\rho_0 \Phi_{mn}$ – присоединенная масса жидкости, ρ_0 – плотность жидкости, V – скорость протекающей жидкости, $\Phi_{mn} = \frac{I_m(\lambda_n)}{\lambda_n I_m'(\lambda_n)}$, $I_m(\lambda_n)$ и $I_m'(\lambda_n)$ – модифицированные функции Бесселя первого рода, порядка m (m – волновое число в окружном направлении) и их производные.

В результате учета гидродинамического давления (13) в X_3 получим:

$$X_3 = -R h \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \rho_0 \Phi_{mn} (R^2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + V^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}) + p_0 - \Psi(\theta) w(\xi, \theta, t). \quad (14)$$

Линеаризованное уравнение движения в перемещениях с учетом выражения (14) и соотношений (1), (4) имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} + h_v^2 \cdot \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} (\mathfrak{G}_2 + \frac{\partial^2 \mathfrak{G}_2}{\partial \theta^2}) + 2 \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \cdot \varepsilon_0) - \frac{R}{Eh} p_0 \frac{\partial^3 \mathfrak{G}_2}{\partial \theta^3} + \\ & + \frac{R}{Eh} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} [\Psi(\theta) w(\xi, \theta, t)] - \frac{R^2 \rho}{E} (\frac{\partial^3 u}{\partial \xi \partial t^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial \theta \partial t^2} - \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2}) + \\ & + \rho_0 \Phi_{mn} \frac{R}{Eh} (R^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} + V^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial \xi^2}) = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

Решая систему уравнений (4), (15) о свободных изгибных колебаниях нефтепровода, методом разделения переменных, получим выражение для квадрата круговой частоты:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P / n^2 - \tilde{\lambda}_n^2 \rho_0^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v}{\rho^* R \cdot h (\tilde{\lambda}_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \rho_0^* \Phi_{mn} R^2 m^4}, \quad (16)$$

где $\rho_0^* = \rho_0 \frac{R}{Eh h_v^2}$.

Полученные выражения (12), (16) для определения квадрата круговой частоты участка газо- и нефтепровода позволяют определить более широкий спектр частот по оболочечным формам при волновых числах m и $n=1,2,3\dots$ с учетом внутреннего рабочего давления, параметра продольной сжимающей

силы, упругого основания грунта, скорости потока протекающей жидкости и геометрических характеристик.

2. Получены аналитические зависимости позволяющие уточнить определение частот свободных колебаний наземных тонкостенных нефте- и газопроводов большого диаметра, и изучить влияние упругого основания грунта, параметра продольной сжимающей силы, геометрических характеристик, и стационарного потока жидкости (для нефтепровода).

Для исследования влияния геометрических и механических характеристик, на частоты свободных колебаний по формулам (12), (16) был выбран участок, выполненный из стальной трубы длиной $L=10R$. Трубопровод подвержен действию стационарного внутреннего рабочего давления p_0 от 2 до 8 МПа, параметра продольной сжимающей силы P изменяющимся в диапазоне от 0 до 0,7, и упругого основания грунта с коэффициентом постели k от 0 до $3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$. Результаты расчета выполнены при различных значениях параметра тонкостенности труб $h/R = 1/30 - 1/50$ и приведены в виде графиков на рисунках 1,2,3. Анализ полученных значений частот показал:

– для класса труб $L/R < 15$ и $h/R < 1/20$ минимальные значения частот свободных колебаний реализуются при $m=2$ и $n=1$ т.е $\min \omega_{mn} = \omega_{21}$, что соответствует оболочечной форме колебаний;

– с уменьшением параметра тонкостенности трубы h/R частоты уменьшаются (рисунок 2);

– по мере увеличения внутреннего рабочего давления частоты свободных колебаний увеличиваются. Это объясняется тем, что внутреннее рабочее давление препятствует деформации (овализации) поперечного сечения труб, тем самым увеличивая жесткость (рисунок 3);

– с возрастанием значений коэффициента постели k от 0 до $3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$ частоты свободных колебаний увеличиваются на 26,95% для газопровода, и на 18,75% для нефтепровода (рисунок 1,2);

– с увеличением значений параметра продольной сжимающей силы, частоты резко уменьшаются (рисунок 3);

– в нефтепроводах частоты свободных колебаний при одинаковых механических и геометрических характеристиках на 30 – 50% ниже чем для газопроводов. Этот эффект объясняется влиянием присоединенной массы жидкости (рисунок 1);

– скорость потока протекающей жидкости V мало сказывается на значения частот свободных колебаний нефтепровода, и её вклад в конечный результат не превышает 1%, это связано с тем, что скорость потока протекающей жидкости в нефтепроводе не превышает 3–5 м/сек.

– с уменьшением параметра тонкостенности трубы h/R и увеличения L/R величина параметра критической продольной сжимающей силы резко уменьшаются (рисунок 3);

Анализ значений частот свободных колебаний при различных волновых числах m и n показал, что потеря устойчивости происходит за счет сплющивания поперечного сечения трубы как в тонкостенном стержне, а не за

счет местного смятия стенок, как в короткой цилиндрической оболочке при осевом сжатии.

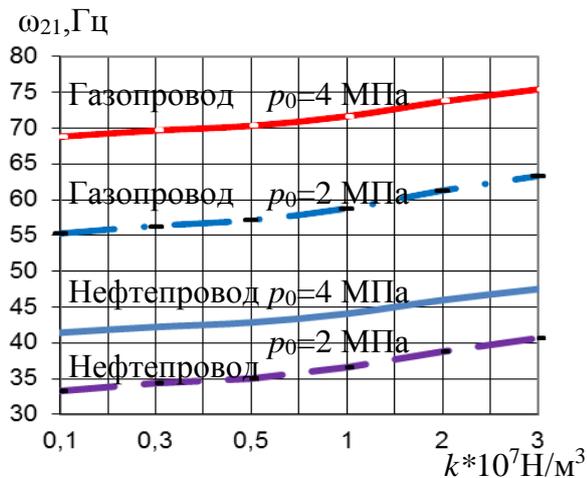


Рисунок 1 – Зависимость минимальных частот свободных колебаний ω_{21} , определяемых по формулам (12), (16) от значений коэффициента постели грунта k при $p_0=2$ и 4 МПа, $h/R=1/40$, $L/R=10$, $P=0,02$, $V=3$ м/сек (для нефтепровода).

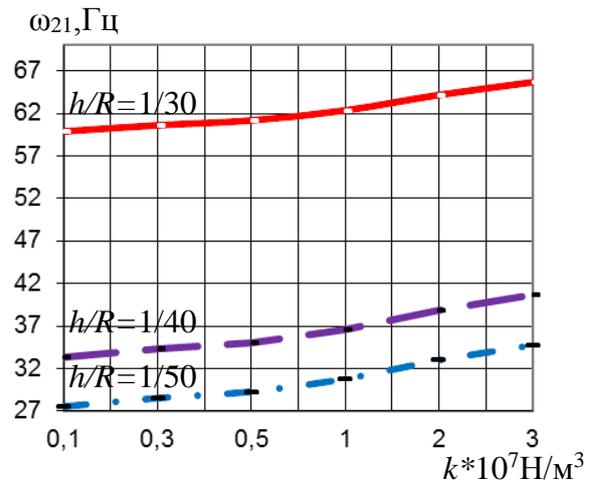


Рисунок 2 – Зависимость минимальных частот свободных колебаний ω_{21} , определяемых по формуле (16) от значений коэффициента постели грунта k при $p_0=2$ МПа, $L/R=10$, $P=0,02$, $V=3$ м/сек

3. Получены выражения для определения параметра критической продольной сжимающей силы наземных нефте- и газопроводов.

Используя динамический критерий устойчивости, из выражений (12), (16) получим выражения, для определения параметра критической продольной сжимающей силы, когда $\omega_{mn} = 0$:

– для газопровода

$$P_{кр} = \frac{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4}{\tilde{\lambda}_n^4 m^4} n^2, \quad (17)$$

– для нефтепровода

$$P_{кр} = \frac{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - \tilde{\lambda}_n^2 \rho_{жс}^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v}{\tilde{\lambda}_n^4 m^4} n^2, \quad (18)$$

где $P_{кр} = F_{кр} / F_3$, $F_3 = n^2 \pi^2 EI / l^2$.

Анализ полученных формул (17), (18) для определения величины параметра критической продольной сжимающей силы в нефте- и газопроводах показывает, что с увеличением коэффициента постели и внутреннего рабочего давления, значение параметра критической продольной сжимающей силы увеличивается. Полученные значения $P_{кр}$ сведены в таблицы 1,2 и иллюстрированы в виде графиков на рисунках 3,4.

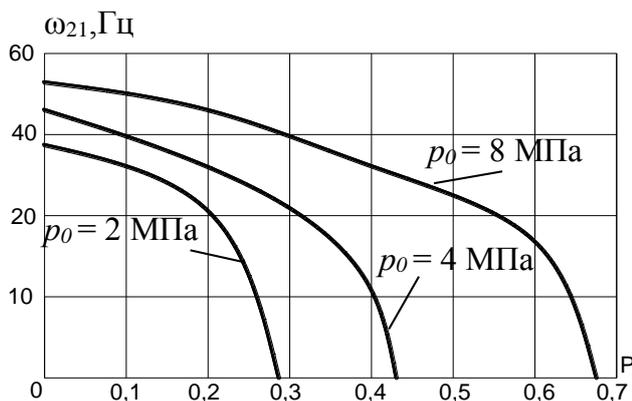


Рисунок 3 – Зависимость частоты свободных колебаний наземного нефтепровода от параметра продольной сжимающей силы P , при различных значениях внутреннего рабочего давления при $L=10R$;
 $V=3$ м/сек; $k=1,0 \cdot 10^7$ Н/м³; $h/R=1/40$.

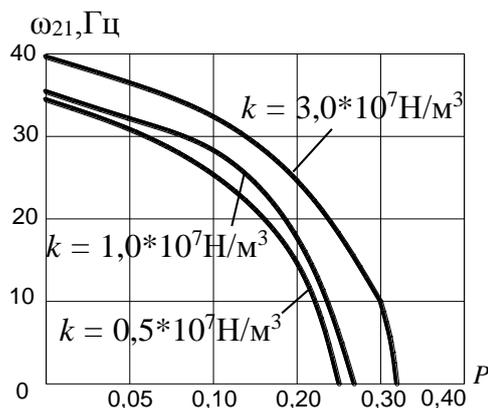


Рисунок 4 – Зависимость частоты свободных колебаний наземного нефтепровода от параметра продольной сжимающей силы P , при различных значениях коэффициента постели грунта при $L=10R$; $V=3$ м/сек;
 $p_0=2$ МПа; $h/R=1/40$.

Таблица 1 – Значения параметра критической продольной сжимающей силы для газо- и нефтепровода, в зависимости от значений внутреннего рабочего давления

Газопровод			
$L=10R; k=1,0 \cdot 10^7$ Н/м ³ ; $h/R=1/40$			
$P_{кр}$	$p_0=2$ МПа	$p_0=4$ МПа	$p_0=8$ МПа
	0,259	0,384	0,635
Нефтепровод			
$L=10R; V=3$ м/сек; $k=1,0 \cdot 10^7$ Н/м ³ ; $h/R=1/40$			
$P_{кр}$	$p_0=2$ МПа	$p_0=4$ МПа	$p_0=8$ МПа
	0,297	0,421	0,673

Таблица 2 – Значения параметра критической продольной сжимающей силы для газо- и нефтепровода, в зависимости от значений коэффициента постели грунта

Газопровод			
$L=10R; p_0=2$ МПа; $h/R=1/40$			
$P_{кр}$	$k=0,1 \cdot 10^7$ Н/м ³	$k=0,5 \cdot 10^7$ Н/м ³	$k=3,0 \cdot 10^7$ Н/м ³
	0,245	0,260	0,313
Нефтепровод			
$L=10R; V=3$ м/сек; $k=0,4 \cdot 10^7$ Н/м ³ ; $h/R=1/40$			
$P_{кр}$	$k=0,1 \cdot 10^7$ Н/м ³	$k=0,5 \cdot 10^7$ Н/м ³	$k=3,0 \cdot 10^7$ Н/м ³
	0,245	0,262	0,322

4. Установлен критерий применимости теории оболочек для определения наименьших частот свободных колебаний в виде параметра длины l^* .

В результате исследования значений частот свободных изгибных колебаний по формулам (12), (16) выяснилось, что при некоторой длине трубы $l^* = L^*/R$, значения наименьших частот, рассчитанных при $m=1$, и $m=2$ совпадают, т.е. используя это свойство, определен параметр длины l^* :

– для газопровода:

$$l^* = \frac{L^*}{R} = \frac{\pi}{\sqrt{h_{\gamma}}} \cdot \sqrt[4]{\frac{9 + 6P}{6k^* + 48(3 + p^*)}}. \quad (19)$$

– для нефтепровода, при $V=0$:

$$l^* = \frac{L^*}{R} = \frac{\pi}{\sqrt{h_{\gamma}}} \sqrt[4]{\frac{\alpha - P\alpha - \beta + 16P\beta}{k^*(16\beta - \alpha) + 48(3 + p^*)\beta}}. \quad (20)$$

где $\alpha = 20\rho^*Rh + 16\rho_0^*\Phi_{21}R^2$, $\beta = 2\rho^*Rh + \rho_0^*\Phi_{11}R^2$.

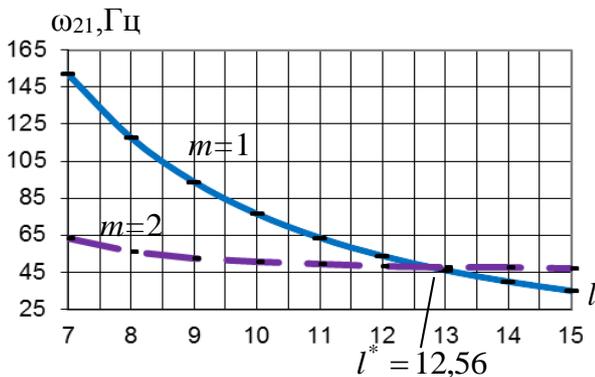


Рисунок 5 – Зависимость частот свободных колебаний газопровода от различных волновых чисел m и параметра длины $l=L/R$ при $p_0=2$ МПа, $k=0,4*10^7$ Н/м³, $P=0,02$, $h/R=1/50$.

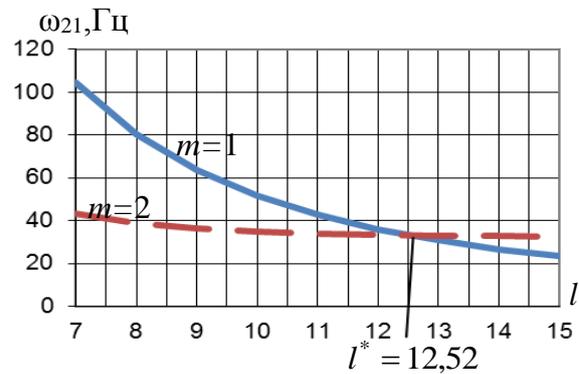


Рисунок 6 – Зависимость частот свободных колебаний нефтепровода от различных волновых чисел m и параметра длины $l=L/R$ при $p_0=2$ МПа, $k=0,4*10^7$ Н/м³, $P=0,02$, $h/R=1/50$, $V=3$ м/сек

Анализ значений представленных на графиках рисунков 5,6 показал, что при соотношениях $l < l^*$ частоты следует определять при $m=2$ используя теорию оболочек т.е. по формулам (12), (16), а при $l > l^*$ при $m=1$.

5. Разработана методика исследования динамической устойчивости нефте- и газопроводов при наземной прокладке с использованием системы уравнений Матье. Построены области динамической неустойчивости при помощи модифицированных диаграмм Айнса-Стретта. Полученные диаграммы позволяют оценить влияние геометрических и механических характеристик на размеры, и расположение областей динамической неустойчивости.

Наземные нефте- и газопроводы в процессе эксплуатации подвергаются воздействию нестационарного внутреннего рабочего давления $p(t)$,

пульсирующего потока нефти, протекающей со скоростью $V(t)$, и продольной сжимающей силы $F(t)$.

Сначала решается задача о динамической устойчивости газопроводов подверженных действию нестационарного внутреннего рабочего давления:

$$p(t) = p_0(1 + \mu \cos \gamma t), \quad (21)$$

и продольной сжимающей силы:

$$F(t) = F_0(1 + \mu \cos \gamma t) \quad (22)$$

где γ – частоты возбуждения, задаваемые работой компрессорных станций; μ – параметр возбуждения, ограничивающий величину переменной составляющей соответствующего воздействия $\mu \leq 0,5$; p_0 – внутреннее рабочее давление; F_0 – продольная сжимающая сила.

Учитывая выражения (21), (22) и системы (9) получим систему уравнений, при нестационарном воздействии:

$$\begin{aligned} & \{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k * m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P / n^2 - \\ & - \mu \cos \gamma t \cdot m^4 \tilde{\lambda}_n^4 [P - p^*(m^2 - 1) / \tilde{\lambda}_n^4]\} f(t) + \\ & + \rho * Rh[\tilde{\lambda}_n^4 h_v + m^2 + m^4] f''(t) = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

После преобразования уравнения (23) получаем систему разделяющихся дифференциальных уравнений Матье:

$$f''(t) + \omega_{mn}^2 (1 - \delta_{mn} \cos \gamma t) f(t) = 0, \quad (24)$$

где квадрат частоты свободных колебаний газопровода определяется выражением (12):

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k * m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P / n^2}{\rho * Rh[\tilde{\lambda}_n^2 h_v + m^2 + m^4]},$$

а коэффициент возбуждения:

$$\delta_{mn} = \frac{[P - p^*(m^2 - 1) / \tilde{\lambda}_n^4] \cdot m^4 \tilde{\lambda}_n^4}{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1 + p^*) + k * m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P / n^2} \cdot \mu. \quad (25)$$

Полученная система уравнений Матье (24) позволяет построить и оценить области динамической неустойчивости участка наземного газопровода для различных значений волновых чисел $m, n = 1, 2, 3 \dots$

Оценка динамической устойчивости наземных газопроводов заключается в построении областей динамической неустойчивости на плоскости параметров ω_{mn} и γ при заданных значениях параметра продольной сжимающей силы P , h/R и коэффициенте постели k .

Области динамической неустойчивости определяются при соотношениях частот ω_{mn} и γ :

$$\omega_{mn} = \frac{\gamma}{2} i, \quad i=1,2,3\dots$$

Наиболее широкая область при $i=1$, называется главной областью неустойчивости. Второстепенные области неустойчивости при $i>1$ имеют меньшую ширину и обычно перекрываются главной областью.

Используя решения Н.Н. Боголюбова – Ю.А. Митропольского получаем неравенство для определения главной области неустойчивости с верхними и нижними границами:

$$1 - \frac{\delta_{mn}}{2} < \left(\frac{2\omega_{mn}}{\gamma}\right)^2 < 1 + \frac{\delta_{mn}}{2} \quad (26)$$

– верхняя границы, определяется равенством:

$$\gamma^2 = 4\omega_{mn}^2 \left(1 - \frac{\delta_{mn}}{2}\right)^{-1} \quad (27)$$

– нижняя граница:

$$\gamma^2 = 4\omega_{mn}^2 \left(1 + \frac{\delta_{mn}}{2}\right)^{-1} \quad (28)$$

На основании полученного решения построены области динамической неустойчивости (рисунки 7 – 14) для стальных труб размерами 720×11мм ($h/R = 1/33$), и 1420×17мм ($h/R = 1/42$) при $p_0=2$ МПа; коэффициенте постели $k=0,4$ и $3,0 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$; длина участка трубопровода $L= 10R$; коэффициент Пуассона $\tilde{\nu} = 0,3$ и модуль упругости стали $E=2 \cdot 10^5$ МПа. При расчете следует отдавать предпочтение наименьшим частотам свободных колебаний при $m=2$ и $n=1$.

Исследование динамической устойчивости газопровода при известных значениях ω_{mn} , γ и P производится посредством наложения точки, соответствующей значениям на плоскости параметров « $\gamma - P$ ». В том случае, когда точка попадает в свободную от штриховки область, устойчивость газопровода обеспечена. В противном случае, когда значение попадает в заштрихованную область происходит потеря динамической устойчивости. Следовательно необходимо изменить режим работы компрессорной станции или основные параметры газопровода.

Анализ полученных значений показал, во первых, область динамической неустойчивости, для газопровода (рисунок 9,10), с соотношением тонкостенности труб $h/R=1/42$, является более широкой и занимает значительную часть плоскости, чем при $h/R=1/33$. Это означает что вероятность возникновения параметрического резонанса в газопроводе при соотношениях $h/R=1/42$ значительно выше, чем для труб порядка $h/R=1/33$. Во вторых, с увеличением значений коэффициента постели грунта k от 0,4 до $3,0 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$ наблюдается сужение области динамической неустойчивости и смещению вверх, т.е. в сторону увеличения значений частот γ .

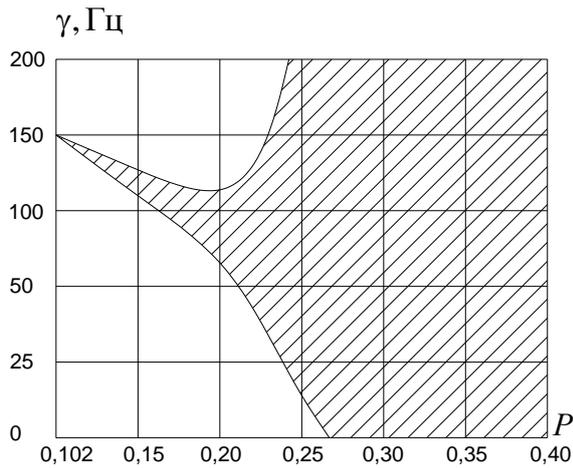


Рисунок 7 – Области динамической неустойчивости наземного газопровода с различными значениями параметра P при $p_0=2$ МПа; $h/R=1/33$ и $k=0,4*10^7$ Н/м³

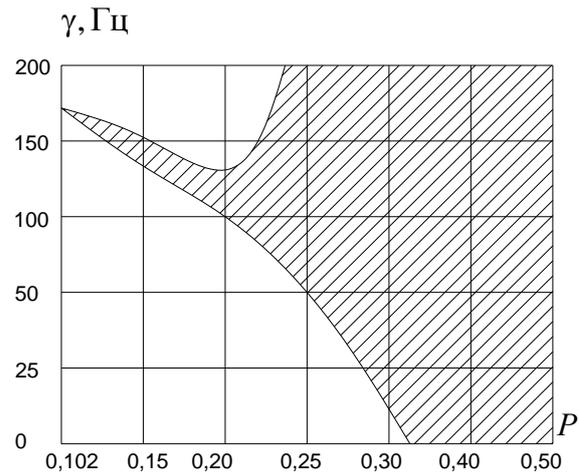


Рисунок 8 – Области динамической неустойчивости наземного газопровода с различными значениями параметра P при $p_0=2$ МПа; $h/R=1/33$ и $k=3,0*10^7$ Н/м³

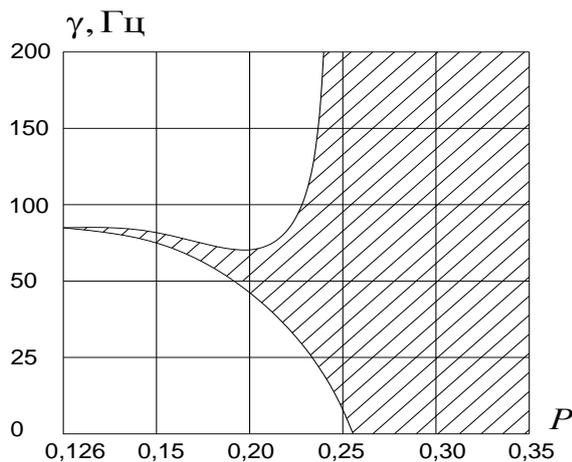


Рисунок 9 – Области динамической неустойчивости наземного газопровода с различными значениями параметра P при $p_0=2$ МПа; $h/R=1/42$ и $k=0,4*10^7$ Н/м³

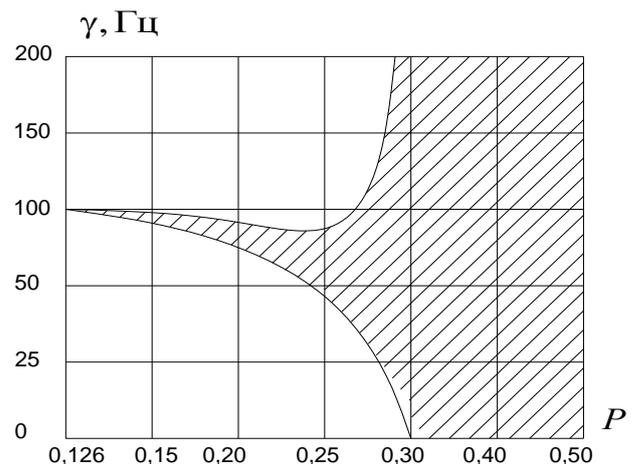


Рисунок 10 – Области динамической неустойчивости наземного газопровода с различными значениями параметра P при $p_0=2$ МПа; $h/R=1/42$ и $k=3,0*10^7$ Н/м³

Далее рассмотрим вопрос о динамической устойчивости наземного нефтепровода при комплексном воздействии трех параметрических возбуждений: – нестационарного внутреннего рабочего давления (21), продольной сжимающей силы (22) и скорости потока протекающей жидкости, которая изменяется по закону:

$$V(t) = V_0(1 + \mu \cos \gamma t) \quad (29)$$

Дополняя систему уравнений движения (14) выражениями (21), (22), (29) получим систему разделяющихся дифференциальных уравнений Матье:

$$f''(t) + \omega_{mn}^2 (1 - \delta_{mn} \cos \gamma t) f(t) = 0, \quad (30)$$

где квадрат частоты свободных колебаний нефтепровода по формуле (16):

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P / n^2 - \tilde{\lambda}_n^2 \rho_0^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v}{\rho^* R \cdot h (\tilde{\lambda}_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \rho_0^* \Phi_{mn} R^2 m^4},$$

коэффициент возбуждения:

$$\delta_{mn} = \frac{\tilde{\lambda}_n^4 m^4 [P - (p^* (m^2 - 1) + 2\rho_0^* \Phi_{mn} V^2 \tilde{\lambda}_n^2 h_v) / \tilde{\lambda}_n^4]}{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P / n^2 - \tilde{\lambda}_n^2 \rho_0^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v} \mu. \quad (31)$$

Полученные решения позволяют исследовать области динамической неустойчивости наземного нефтепровода при $L=10R$, $p_0=2$ МПа, $V=3$ м/сек, $k=0,4$ и $3,0 \cdot 10^7$ Н/м³. Анализ построенных областей показал, что с увеличением значений коэффициента постели k , области динамической неустойчивости сужаются и смещаются вверх в сторону увеличения значений γ . Дальнейшее исследование показывает, что область динамической неустойчивости нефтепровода значительно шире, чем для газопровода, и может занимать почти всю плоскость параметров " $\gamma - P$ " (рисунки 11–14), при одинаковых механических и геометрических характеристиках. Это означает, что потеря динамической устойчивости для нефтепровода значительно выше, чем для газопровода.

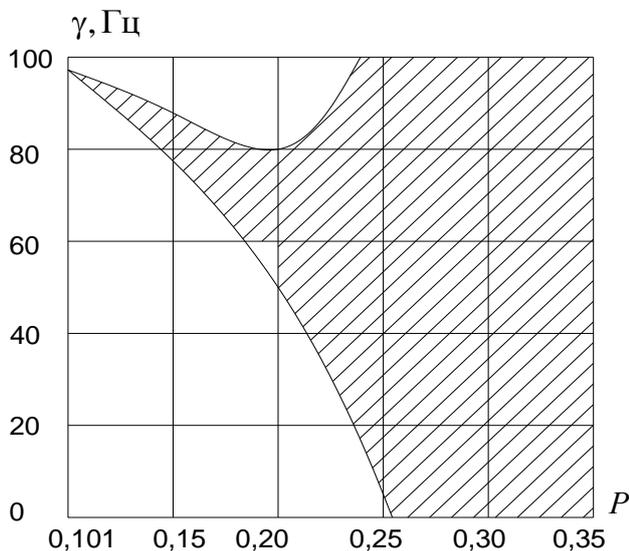


Рисунок 11 – Области динамической неустойчивости наземного нефтепровода с различными значениями параметра P при $p_0=2$ МПа; $h/R=1/33$ и $k=0,4 \cdot 10^7$ Н/м³

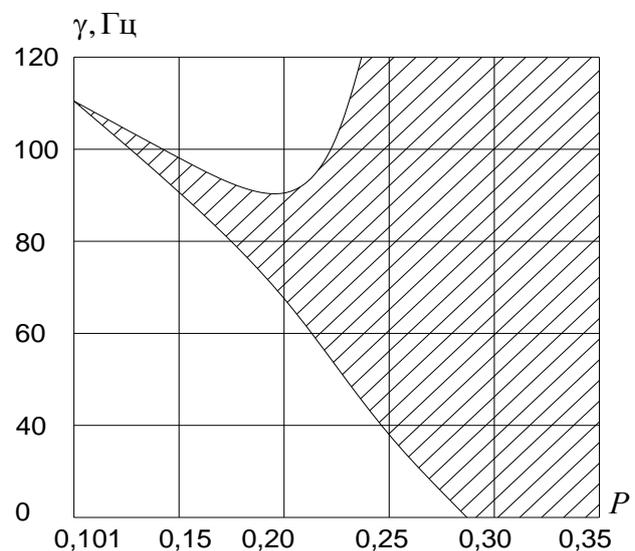


Рисунок 12 – Области динамической неустойчивости наземного нефтепровода с различными значениями параметра P при $p_0=2$ МПа; $h/R=1/33$ и $k=3,0 \cdot 10^7$ Н/м³

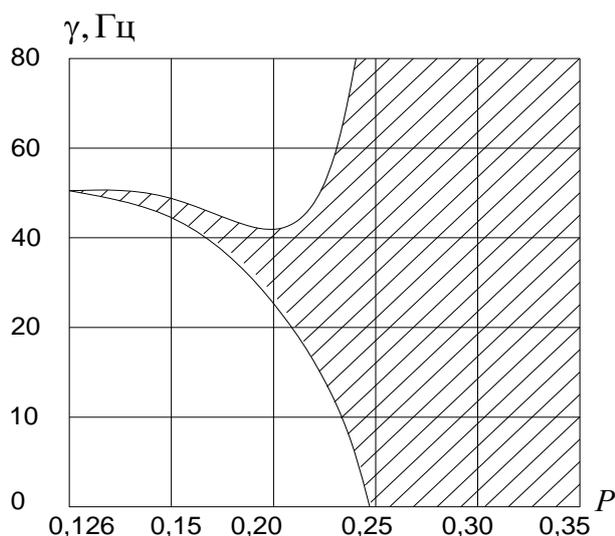


Рисунок 13 – Области динамической неустойчивости наземного нефтепровода с различными значениями параметра P при $p_0=2$ МПа; $h/R=1/42$ и $k=0,4 \cdot 10^7$ Н/м³

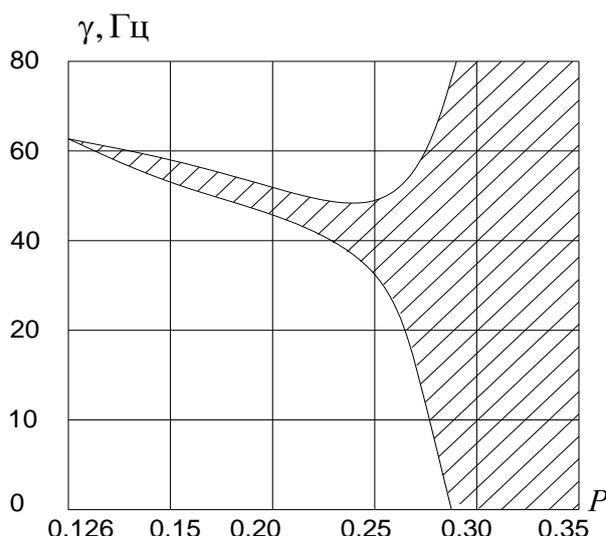


Рисунок 14 – Области динамической неустойчивости наземного нефтепровода с различными значениями параметра P при $p_0=2$ МПа; $h/R=1/42$ и $k=3,0 \cdot 10^7$ Н/м³

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Решена контактная задача с учетом взаимодействия трубопровода с грунтом по узкой полосе. Получены выражения для определения параметров контактной поверхности. Определено влияние радиального давления грунта на внешнюю поверхность трубы.

2. На основании геометрически нелинейном варианте полубезмоментной теории цилиндрических оболочек среднего изгиба и теории потенциального течения жидкости (для нефтепровода) получены и исследованы выражения для определения квадрата частоты свободных колебаний наземных тонкостенных прямолинейных нефте- и газопроводов большого диаметра с учетом влияния стационарного внутреннего рабочего давления, параметра продольной сжимающей силы, упругого основания грунта, геометрических характеристик, и скорости потока протекающей жидкости (для нефтепровода).

3. Используя критерий динамической устойчивости, получены и исследованы выражения по определению параметра критической продольной сжимающей силы, приводящей к потере статической устойчивости нефте- и газопроводов.

4. Определен критерий применимости теории цилиндрических оболочек для определения наименьших частот свободных колебаний наземных трубопроводов в виде параметра длины l^* . В случае, если параметр длины $l=L/R$ трубопровода меньше l^* ($l < l^*$), наименьшие частоты следует определять с позиции теории цилиндрических оболочек, по формулам (12), (16), а для случая когда $l > l^*$ частоты следует определять при волновом числе $m=1$, которое соответствует работе стержня с недеформируемым контуром поперечного сечения.

5. Анализ полученных решений по определению частот и форм свободных колебаний и статической устойчивости наземных нефте- и газопроводов показал:

– наименьшие частоты свободных колебаний трубопроводов реализуются при волновых числах $m=2$ и $n=1$, что соответствует оболочечным формам колебания, учитывающих деформацию (овализацией) поперечного сечения, сопровождаемого изгибными колебаниями в продольном направлении, с одной полуволной;

– с уменьшением отношения h/R при постоянном внутреннем рабочем давлении и постоянном коэффициенте постели грунта, частоты свободных колебаний уменьшаются на 15 – 45%.

– с увеличением внутреннего рабочего давления p_0 частоты возрастают на 30 – 80% в зависимости от геометрических характеристик (h/R ; L/R);

– с ростом значений коэффициента постели грунта k , частоты свободных колебаний увеличиваются на 18 – 40%, в зависимости от геометрических и механических характеристик.

– с увеличением значений параметра продольной сжимающей силы частоты резко уменьшаются;

– частоты свободных колебаний наземных нефтепроводов на 30 – 40% ниже, чем в газопроводах. На уменьшение значений частот большое влияние оказывает присоединенная масса жидкости (нефти);

6. Решена задача о параметрических колебаниях наземных нефте- и газопроводов, с различными значениями h/R , при нестационарном воздействии внутреннего рабочего давления, продольной сжимающей силы и скорости потока протекающей жидкости. Получена разделяющаяся система дифференциальных уравнений Матье, позволяющая оценить динамическую устойчивость при помощи построения областей динамической неустойчивости в виде модифицированных диаграмм Айнса – Стретта при различных параметрах тонкостенности. На основании полученных решений проведено исследование областей динамической неустойчивости наземных прямолинейных участков нефте- и газопроводов большого диаметра при различных значениях геометрических и механических характеристик. Анализ полученных результатов показал:

– построены главные области динамической неустойчивости которые реализуется при коэффициенте $i=1$, то есть при $\omega_{mn}=\gamma/2$. Второстепенные области неустойчивости при $i>1$ имеет значительно меньшую ширину и перекрываются главной областью.

– с увеличением параметра продольной сжимающей силы область динамической неустойчивости расширяется;

– трубы с соотношением $h/R=1/40$ – $1/50$ более опасны с позиции динамической устойчивости, чем трубы $h/R=1/20$ и $1/30$. Вероятность возникновения параметрического резонанса в таких трубах увеличивается, за счет расширения области динамической неустойчивости и её резкого смещения вниз, в сторону уменьшения значений γ ;

– с ростом значений коэффициента постели грунта k , область динамической неустойчивости заметно сужается, и смещается в сторону роста значений γ ;

– область динамической неустойчивости при фиксированных геометрических и механических характеристиках для нефтепроводов значительно шире, чем для газопроводов, что означает более высокую вероятность потери динамической устойчивости для нефтепроводов.

7. Полученные в диссертации частные случаи решений хорошо согласуются с решениями других авторов по стержневой теории и теории цилиндрических оболочек.

Рекомендации к практическому применению:

Полученные в диссертации решения могут быть использованы при проектировании наземных тонкостенных магистральных трубопроводов большого диаметра, а так же при проведении технической экспертизы.

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Разов, И.О.** Свободные колебания наземных газопроводов, обжатых продольной силой, с учетом упругого основания грунта [Текст] / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №1(36). – С. 29–32. (0,46 п.л. / 0,23 п.л.)

2. **Разов, И.О.** Исследования свободных колебаний наземных тонкостенных газопроводов большого диаметра [Текст] / И.О. Разов // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №4(39). – С. 100–104. (0,57 п.л. / 0,29 п.л.)

3. **Разов, И.О.** Свободные колебания и статическая устойчивость нефтепровода большого диаметра с учетом потока жидкости, продольной сжимающей силы и упругого основания [Текст] / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №1(42). – С. 49–53. (0,57 п.л. / 0,29 п.л.)

4. **Разов, И.О.** Параметрические колебания и динамическая устойчивость магистральных газопроводов при наземной прокладке [Текст] / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №2(43). – С. 65–68. (0,46 п.л. / 0,23 п.л.)

5. **Разов, И.О.** Параметрические колебания и динамическая устойчивость магистральных нефтепроводов большого диаметра при наземной прокладке [Текст] / И.О. Разов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №4(45). – С. 58–62. (0,57 п.л. / 0,29 п.л.)

6. **Разов, И.О.** Напряжения и перемещения на контактной поверхности наземного трубопровода большого диаметра [Текст] / И.О. Разов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – №3(50). – С. 105–108. (0,346 п.л.)

публикации в других изданиях:

7. **Разов, И.О.** Исследование свободных колебаний наземных, тонкостенных газопроводов большого диаметра [Текст] / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Тез. докл. международной конференции. Сборник XXV Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций.

Методы граничных и конечных элементов». – 2014. – С. 162–163. (0,24 п.л. / 0,12 п.л.)

8. **Разов, И.О.** Исследование свободных колебаний тонкостенных трубопроводов большого диаметра при наземной прокладке [Текст] / И.О. Разов // Сборник материалов международной научно–практической конференции «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергоснабжения в условиях западной Сибири». – 2014. – С.42–49. (0,46 п.л.)

9. **Разов, И.О.** Свободные колебания и статическая устойчивость нефтепровода большого диаметра с учетом потока жидкости продольной сжимающей силы и упругого основания [Текст] / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – 2014. – С. 82–84. (0,346 п.л. / 0,173 п.л.)

10. **Разов, И.О.** Свободные колебания газопроводов, загруженные однородным по окружности внешним давлением, обжатые продольной силой [Текст] / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Наука и ТЭК, №8. – Тюмень, 2012. – С. 54–55. (0,24 п.л. / 0,12 п.л.)

11. **Разов, И.О.** Анализ свободных колебаний наземных тонкостенных газопроводов большого диаметра с учетом продольной силы и упругого основания [Текст] / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Сборник материалов XIII научно–практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей. – 2013.– С.172–176. (0,57 п.л./ 0,346 п.л.)

12. **Разов, И.О.** Исследование параметрических колебаний и динамической устойчивости наземных тонкостенных магистральных газопроводов большого диаметра [Текст] / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Сборник материалов XIV научно–практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ. – 2015. – С. 134–138. (0,57 п.л./ 0,346 п.л.)