

На правах рукописи



ДМИТРИЕВ Андрей Викторович

**СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ
УСТОЙЧИВОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО
ДИАМЕТРА ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКЕ**

Специальность 2.1.9. Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Соколов Владимир Григорьевич

Официальные оппоненты: **Вельмисов Петр Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Ульяновский государственный технический универ-
ситет», кафедра «Высшая математика», профессор;

Смирнова Любовь Николаевна,
кандидат технических наук, АО «НИЦ «Строительство»,
г. Москва, кафедра «Строительные сооружения, конструк-
ции и материалы», доцент;

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский государственный универ-
ситет путей сообщения Императора Александра I».**

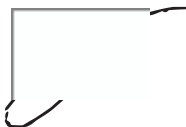
Защита состоится «09» февраля 2023 г. в 15:30 часов на заседании диссертацион-
ного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный ар-
хитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я
Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220).

Тел./Факс: (812) 316–58–73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/dmitriev-andrey-viktorovich>

Автореферат разослан «05» декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов Владимир Мирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В текущий период времени для развития энергетической составляющей в нашей стране большое внимание уделяется строительству трубопроводов большого диаметра от 1000 мм. Основной способ прокладки при этом является подземный. Использование таких тонкостенных трубопроводов ставит новые задачи по определению частотных характеристик, которые наряду с прочностью, жёсткостью и устойчивостью является основным показателем обеспечения надёжности. А для нестационарного внутреннего рабочего давления, а так же потока протекающей жидкости ещё одной задачей становится изучение динамической устойчивости данных трубопроводов. В изучении данных вопросов классической теорией является стержневая теория с недеформируемым контуром поперечного сечения. Данной теорией нельзя учесть упругий отпор грунта и внутреннее давление. Следовательно, для наиболее точного отражения реальных условий работы подземного трубопровода большого диаметра необходимо использовать расчётную схему в виде цилиндрической оболочки, которая позволяет учесть совместное действие внешнего давления грунта, упругого отпора грунтовой среды, присоединённой массы грунта, демпфера.

Данная работа посвящена решению задачи по нахождению частотных характеристики подземного тонкостенного трубопровода, а так же исследованию динамической устойчивости с учётом совместного действия внешнего давления грунта, упругого отпора грунтовой среды, присоединённой массы грунта, демпфера.

Степень разработанности темы исследования. В трудах классических и современных авторов, таких как: В. В. Болотин, С. П. Тимошенко, В. И. Феодосьев, С. В. Челомей, В. В. Лалин, В. В. Карпов, П. П. Бородавкин, Чжен, О. Фирилев рассмотрен вопрос динамического расчёта трубопровода с использованием базовой модели в виде стержня.

Для модели в виде цилиндрической оболочки эта задача была рассмотрена такими авторами как: М. П. Пайдусис, С. А. Бочкарев, И. И. Сафаров, О. К. Салиева. Опираясь на полубезмоментную теорию цилиндрических оболочек среднего изгиба Власова-Новожилова более подробное решение по определению частоты свободных колебаний для надземных прямолинейных газопроводов большого диаметра с шарнирным типом закрепления, было получено В. П. Ильиным и О. Б. Халецкой, в котором учтены влияние всех инерционных составляющих, внутреннего давления и деформация поперечного сечения. Работы в этом направлении продолжают вести В. Г. Соколов, А. В. Березнёв, Е. П. Матвеев, А. А. Ефимов, И. О. Разов.

Параметрический резонанс для трубопроводов был исследован в работах: В. В. Болотина, Г. Шмидта, Н. С. Кондрашева, В. Н. Васиной, М. И. Валиева, В. В. Желобова, Е. И. Тарновского, М. А. Ильгамова, М. М. Шакирьянова и др.

Данный вопрос применительно к подземным трубопроводам большого диаметра рассмотрен не в полном объеме, в том числе с позиции стержневой теории, поэтому является актуальным.

Цель исследования – с использованием полубезмоментной теории замкнутых цилиндрических оболочек среднего изгиба разработать метод исследования частот свободных колебаний подземного тонкостенного трубопровода большого диаметра с учётом действия внешнего давления грунта, упругого отпора грунтовой среды, присоединённой массы грунта, демпфирующего действия грунтовой среды, внутреннего рабочего давления на стенку, продольной сжимающей силы, а так же стационарным и нестационарным потоком нефти.

Задачи исследования:

1. Изучить существующие методы динамического расчёта подземных трубопроводов большого диаметра.

2. Для объекта исследования получить уравнение движения элемента срединной поверхности с учётом всех инерционных составляющих, упругого отпора грунта, демпфера, присоединённой массы грунта, давление грунта на стенку трубопровода, внутреннего давления, скорости потока нефти, а так же продольной сжимающей силы (учитывается в виде её отношения к силе Эйлера).

3. Изучить влияние на частоту собственных колебаний для подземного трубопровода внешнего давления грунта, упругого отпора грунта, присоединённой массы грунта, внутреннего давления, демпфера и параметра продольной сжимающей силы.

4. Установить границу применимости стержневой и оболочечной теории при динамическом расчёте для подземных трубопроводов большого диаметра.

5. Установить границу применимости нахождения частот и форм собственных колебаний в зависимости от вязкости грунтовой среды.

6. Решить задачу в области параметрического резонанса для подземных трубопроводов, при различных факторах в зависимости от коэффициента динамической вязкости грунтовой среды.

Объектом исследования являются подземные тонкостенные трубопроводы большого диаметра.

Предметом исследования являются свободные колебания, статическая и динамическая устойчивость.

Область исследования соответствует паспорту специальности ВАК 2.1.9. Строительная механика (технические науки), в части п.1 – «Общие принципы расчета зданий, сооружений и их элементов на всех этапах жизненного цикла»; п.2 – «Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета»; п.3 – «Аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость, при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях».

Научная новизна исследования:

1. Получено уравнение движения для подземного нефте - газопровода с учётом внешнего давления грунта на стенку трубопровода, упругого отпора грунта, присоединённой массы грунта и демпфера на основе использования геометрически нелинейного варианта полубезмоментной теории цилиндрических оболочек.

2. Получены аналитические выражения для нахождения частот и форм собственных колебаний для подземных тонкостенных трубопроводов большого диаметра с учётом и без учёта демпфера.

3. Установлены границы применимости стержневой и оболочечной теории для расчёта частотных характеристик подземных тонкостенных трубопроводов большого диаметра в виде параметра длины.

4. Установлены границы периодических и аperiodических колебательных процессов для подземных тонкостенных трубопроводов большого диаметра в зависимости от коэффициента динамической вязкости грунтовой среды.

5. Разработана методика построения областей динамической неустойчивости на основе использования системы уравнений Матье при параметрическом резонансе для подземных тонкостенных трубопроводов большого диаметра.

Теоретическая значимость заключается в применение аналитического подхода к решению задачи нахождения динамических характеристик для подземного трубопровода большого диаметра, основанного на геометрически нелинейном варианте полубезмоментной теории оболочек среднего изгиба и теории потенциального течения жидкости.

Практическая значимость заключается в возможности применения методики отстройки по частотным характеристикам с целью исключения резонансных явлений, а так же динамического расчёта для магистральных трубопроводов большого диаметра при подземной прокладке, как вновь строящихся, так и реконструируемых.

Методология и методы исследования. Предложен аналитический подход к решению задачи определения динамических характеристик трубопроводов, основанный на применении известных методов строительной механики. В решениях использованы: метод Бубнова – Галеркина, метод разделяющихся переменных, метод Боголюбова - Митропольского.

Положения, выносимые на защиту:

- применение расчётной модели в виде цилиндрической оболочки для трубопровода большого диаметра, с учётом взаимодействия с грунтовой средой;
- решение задачи по нахождению динамических характеристик для подземных участков трубопроводов большого диаметра, позволяющие одновременно учесть глубину заложения трубопровода, влияние упругого отпора грунта, внешнего давления грунта на стенку трубопровода, присоединённую массу грунта, продольную сжимающую силу в виде её параметра и внутреннее давление при различных размерах поперечного сечения и длины рассматриваемого участка;

- расчётные формулы по определению частоты свободных колебаний с учётом демпфера для подземного трубопровода, а так же установление границы между апериодическим и затухающе периодическим колебательным процессом;
- решение задачи о динамической устойчивости подземных трубопроводов с учётом влияния сил сопротивления среды при нестационарном действии коэффициента упругого отпора грунта, внутреннего давления, потока протекающей жидкости и продольной сжимающей силы;
- построение областей динамической неустойчивости и их анализ с учётом влияния сил сопротивления среды при нестационарном действии коэффициента упругого отпора грунта, внутреннего давления, потока протекающей жидкости и продольной сжимающей силы.

Степень достоверности. Результаты, полученные в диссертационном исследовании, можно сопоставить с результатами, полученными в работах других авторов. Так, например, если рассматривать частный случай при отсутствии продольной сжимающей силы, которая учитывается в виде её параметра, для надземной прокладки трубопровода формула по определению квадрата частоты собственных колебаний в отношении газопровода преобразовывается в выражение, полученное С. Н. Кукуджановым. А при отсутствии внутреннего рабочего давления, для бесконечно длинной трубы, в формулу С. П. Тимошенко. Рассматривая выражение по определению критического параметра продольной сжимающей силы, при $m = 1$ это выражение преобразовывается в известную формулу Н. А. Алфутова. Выражение по определению внешнего критического давления грунта на стенку газопровода, для безнапорных трубопроводов бесконечной длины, приобретает выражение для кольца в упругой среде, полученную Е. Л. Николаи.

Апробация работы.

Основные положения работы были доложены на следующих научных конференциях: Национальная научно-практическая конференция НЕФТЬ И ГАЗ: технологии и инновации. г. Тюмень ТИУ 7–8 ноября 2019 г.; Международная научно-практическая конференция «Арктика: Современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе» г. Тюмень ТИУ 27 ноября 2019 г.; Международная научно-практическая конференция «Новые технологии – нефтегазовому региону» г. Тюмень ТИУ 10 май 2020 г.; Международная научно-практическая конференция «Проблемы прочности материалов и конструкций в транспортном строительстве», посвященная 175-летию со дня рождения Н. А. Белелюбского ПГУПС, 18–20 май 2021 г.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 12 научных статьях объемом 4,7 п.л., лично автором 2,456 п.л., из них 7 статей в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 111 наименова-

ний. Общий объем диссертации составляет 126 страницы машинописного текста. Работа содержит 27 рисунков, 22 таблицы, 1-но приложение.

Во введении изложена актуальность научной проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, а так же положения, выносимые на защиту, описана степень разработанности темы исследования, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе производится анализ литературных источников имеющих данную в области динамического расчёта применительно к трубопроводам большого диаметра. Изложена тенденция развития расчётов с позиции стержневой и оболочной теории.

Во второй главе для тонкостенного газопровода с моделью в виде цилиндрической оболочки решается задача динамического расчёта с учетом взаимодействия с грунтом. Исследовано влияние упругого отпора грунта, присоединённой массы грунта и глубины заложения трубопровода. Произведён анализ побочных коэффициентов определителя, по результатам которого принято решение в дальнейших расчётах ими пренебречь, что позволило упростить решение задачи и учесть влияние сил сопротивления среды на частоту свободных колебаний.

В третьей главе по аналогии с газопроводом, без учёта побочных коэффициентов, исследован вопрос нахождения частот собственных колебаний для подземного прямолинейного нефтепровода с учётом влияния демпфера.

В четвертой главе рассмотрен параметрический резонанс подземных трубопроводов с учётом влияния демпфера при помощи построения областей динамической неустойчивости для различных грунтовых условий и физико-механических характеристик.

В заключении описываются основные выводы и результаты диссертационной работы, а так же рекомендации к практическому применению.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Для расчётной схемы (рис. 1) в виде замкнутой цилиндрической оболочки решена задача динамического расчёта в отношении подземного трубопровода большого диаметра, позволяющая одновременно учесть радиальное давление грунта на стенку трубопровода, присоединённую массу грунта, упругий отпор грунта, а так же демпфер в уравнении движения элемента срединной поверхности.

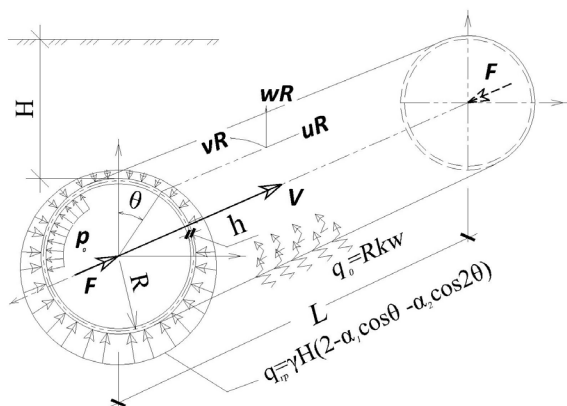


Рис. 1. Расчётная схема трубопровода (L – оболочка длины, R – радиус, h – толщина стенки, p_0 – постоянное внутренне рабочее давление, F – продольная сжимающая сила, q_0 – реакция упругого отпора грунта, $q_{rp} = H\gamma$ – давление грунта)

При выводе уравнения движения учитывается:

- давление грунта на стенку трубопровода учтено в виде распределенной нагрузки, которая сведена к эквивалентной, при этом пренебрегая тангенциальной составляющей, которая направлена радиально и учитывается выражением (1):

$$q_{rp} = \gamma H(2 - \alpha_1 \cos \theta - \alpha_2 \cos 2\theta), \quad (1)$$

где: коэффициенты $\alpha_1 = 0,75$ и $\alpha_2 = 0,25$ определяются подбором в зависимости от грунтовых условий; θ – безразмерная координата в круговом направлении; H – толщина обжимаемого слоя; γ – объемный вес грунта;

- упругий отпор грунта $q_0 = Rkw$, принят радиальным и учтён с использованием модели Фусса – Винклера в зависимости от коэффициента упругого отпора κ (2):

$$\kappa = E_0 / R(1 + \nu_0); \quad (2)$$

- присоединенная масса грунта определяется выражением (3):

$$\mu_{bj} = \kappa_{bj} \mu_b, \quad (3)$$

где: $\mu_b = \rho_{rp} \pi R^2 / 2$ присоединенная масса грунта, κ_{bj} – безразмерный коэффициент присоединенной массы грунта, учитывающий тон колебаний (4):

$$\kappa_{bj} = 1 / \sqrt{m^2 + \lambda_0^2} (1 + \lambda_0^2 / 2(m^2 + \lambda_0^2)^{3/2}); \quad (4)$$

- демпфер учтён на основании допущения о сопротивлении среды, пропорциональном скорости перемещения элемента срединной поверхности в данной среде выражением (5), в зависимости от коэффициента динамической вязкости среды (η):

$$q_{cp} = -\eta \cdot (\partial w / \partial t), \quad (5)$$

где w – радиальное перемещение, отнесенное к радиусу оболочки.

Для вывода уравнений равновесия элемента срединной поверхности используем геометрически нелинейный вариант полубезмоментной теории оболочек среднего изгиба Муштари – Галимова. С учётом параметров Ламе и допущений полубезмоментной теории Власова – Новожилова получаем систему уравнений в усилиях (6):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\tau \frac{\partial M_2}{\partial \theta} \right) - \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \left(R_2^* \frac{\partial M_2}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{R_2^*} \frac{\partial M_2}{\partial \theta} \right) + \\ + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{R_2^*}{R_1^*} T_1 \right) + R \frac{\partial X_1}{\partial \xi} - R \frac{\partial X_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (R_2^* X_3) = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

Руководствуясь принципом Д'аламбера, X_1, X_2, X_3 представлены в виде (7), где X_1 – инерционная составляющая в продольном направлении, X_2 – в окружном, X_3 в радиальном направлении:

$$\begin{aligned} X_1 &= -R h \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \quad X_2 = -R h \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\ X_3 &= -R h \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + p_0 - \gamma H (2 - \alpha_1 \cos \theta - \\ &\quad - \alpha_2 \cos 2\theta) - \kappa R w + \mu_{bj} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Используя соотношения между усилиями и деформациями, деформациями и перемещениями получим линеаризованное дифференциальное уравнение движения элемента срединной поверхности в перемещениях (8), которое содержит 4 неизвестных функций координат u, v, w, ϑ_2 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} + h_v^2 \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial \theta^2} + \vartheta_2 \right) + 2 \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \varepsilon_0 \right) - \frac{R}{E h} p_0 \frac{\partial^3 \vartheta_2}{\partial \theta^3} + \\ + \frac{R \mu_{bj}}{E h} \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} + \frac{R^2 w \kappa}{E h} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{R^2 \rho}{E h} \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \xi \partial t^2} - \frac{\partial^3 v}{\partial \xi \partial t^2} - \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} \right) + \\ + \frac{R \gamma H}{E h} \frac{\partial^3 \vartheta_2}{\partial \theta^3} (2 - \alpha_1 \cos \theta - 2 \alpha_2 \cos 2\theta) + \\ + \frac{R \gamma H}{E h} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial \theta^2} \alpha_1 \sin \theta + \frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial \theta^2} 2 \alpha_2 \sin 2\theta \right) + \\ + \frac{R \gamma H}{E h} \left(\frac{\partial \vartheta_2}{\partial \theta} \alpha_1 \cos \theta - \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \theta} 4 \alpha_2 \cos 2\theta \right) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Присоединяя соотношения полубезмоментной теории оболочек

$$\left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + w = 0; \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \theta} = 0; \vartheta_2 = \frac{\partial w}{\partial \theta} - v \right),$$

получим полную систему дифференциальных уравнений, состоящую из 4-х уравнений.

Для решения поставленной задачи принимаем шарнирный тип закрепления по концам трубопровода, удовлетворяющий граничным условиям (9):

$$\begin{aligned} v \left\{ \xi = 0, \quad \xi = \frac{L}{R} = 0 \right\}, \quad \theta_2 \left\{ \xi = 0, \quad \xi = \frac{L}{R} = 0 \right\}, \\ w \left\{ \xi = 0, \quad \xi = \frac{L}{R} = 0 \right\}, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \left\{ \xi = 0, \quad \xi = \frac{L}{R} = 0 \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Опираясь на метод разделяющихся переменных, относительное радиальное перемещение w представлено в виде двойного ряда Фурье (10):

$$w = \sum_m \sum_n b_{mn} \varphi(t) \sin(\lambda_n \xi) \cos(m\theta), \quad (10)$$

Остальные перемещения u , v и угол поворота ϑ_2 определяются из соотношений полубезмоментной теории выражениями (11):

$$\begin{aligned} u &= \sum_m \sum_n b_{mn} \frac{\lambda_n}{m^2} \varphi(t) \cos(\lambda_n \xi) \cos(m\theta); \\ v &= \sum_m \sum_n b_{mn} \frac{1}{m} \varphi(t) \sin(\lambda_n \xi) \sin(m\theta); \\ \vartheta_2 &= -\sum_m \sum_n b_{mn} \frac{m^2 - 1}{m} \varphi(t) \sin(\lambda_n \xi) \sin(m\theta), \end{aligned} \quad (11)$$

Для колебательного процесса функцию $\varphi(t)$ представим в виде:

$$\varphi(t) = \sin \omega_{mn} t, \quad \varphi'(t) = -\omega_{mn} \cos \omega_{mn} t, \quad \varphi''(t) = -\omega^2 \sin \omega_{mn} t, \quad (12)$$

где ω_{mn} — частота колебаний.

Подставив (10) и (11) в уравнение (8) получим бесконечную систему однородных линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитудных значений b_{mn} (13):

$$a_{m,m-2} b_{m-2,n} + a_{m,m-1} b_{m-1,n} + a_{m,m} b_{m,n} + a_{m,m+1} b_{m+1,n} + a_{m,m+2} b_{m+2,n} = 0, \quad (13)$$

где коэффициенты в этих уравнениях a_{ij} , определяются по (14):

$$\begin{aligned} a_{m,m} &= A_{m,n} - B_{m,n} \omega_{mn}^2; \quad a_{m,m \pm 1} = -\frac{m^5 (m \pm 2)}{2} q_{\text{гп}}^* \alpha_1; \\ a_{m,m \pm 2} &= -\frac{m^4 [(m \pm 2)^2 - 1]}{2} q_{\text{гп}}^* \alpha_2; \end{aligned} \quad (14)$$

$$A_{m,n} = \lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2q_{\text{гп}}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2;$$

$$B_{m,n} = \rho^* R h (\lambda^2 h_v + m^2 + m^4) + \mu_{bj}^* m^4,$$

$$p^* = p_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}, \quad \rho^* = \rho_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}, \quad \kappa^* = \frac{R^2 \kappa}{Eh \cdot h_v^2}, \quad q_{\text{гр}}^* = \frac{\gamma HR}{Eh \cdot h_v^2},$$

здесь:

$$\lambda_n = \frac{n\pi R}{L\sqrt{h_v}}, \quad \mu_{bj}^* = \mu_{bj} \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}, \quad P = \frac{F}{F_3}.$$

Далее решение системы производим в матричной форме, при этом коэффициенты определителя находятся по выражениям (15):

$$d_{m,m} = a_{m,m} / B_{m,n}; \quad d_{m,m\pm 1} = a_{m,m\pm 1} / B_{m,n}; \quad d_{m,m\pm 2} = a_{m,m\pm 2} / B_{m,n}; \quad \lambda = \omega_{n,m}^2. \quad (15)$$

Раскрыв определитель, получим характеристическое уравнение, а дальнейшее решение сводится к нахождению собственных чисел λ , где λ частота свободных колебаний в квадрате без учёта демпфера.

Учёт влияния демпфера описывается выражением (5), добавив его к нормальной инерционной составляющей X_3 выражения (7) со знаком минус, получим (16):

$$X_3 = -R h \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + p_0 - \gamma H (2 - \alpha_1 \cos \theta - \alpha_2 \cos 2\theta) - \\ - \kappa R w + \mu_{bj} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \eta \frac{\partial w}{\partial t}. \quad (16)$$

Используя предложенную выше методику, пренебрегая слагаемыми второстепенных членов $a_{m,m+1}$, $a_{m,m+2}$ в силу их малого влияния (не более 1%) на частоту свободных колебаний, получим систему разделяющихся линейных однородных дифференциальных уравнений второго порядка относительно функции времени:

$$\varphi''(t) + 2d_m \varphi'(t) + \omega_{mn}^2 \varphi(t) = 0, \quad (17)$$

где компонент $2d$ при $\varphi'(t)$ есть коэффициент демпфирования или

$$d_m = \eta m^2 / 2 \left[R \rho_0 h \left(\frac{\lambda_n^2}{m^2} + 1 + m^2 \right) + \mu_{bj} m^2 \right], \text{ а } \omega_{mn}^2 \text{ при } \varphi(t) - \text{квадрат частоты сво-}$$

бодных колебаний без учёта демпфера.

Решая систему (17) получим выражение, по нахождению круговой частоты свободных колебаний оболочки ω_{mn}^* с учётом сил сопротивления среды (18):

$$\omega_{mn}^* = \sqrt{\omega_{mn}^2 - d_{mn}^2} = \omega_{mn} \sqrt{1 - d_{mn}^2 / \omega_{mn}^2}. \quad (18)$$

В выражении (18) ω_{mn}^2 определяется без учёта демпфера и побочных коэффициентов выражениями (19) и (20):

для газопроводов:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2d_{zp}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2}{\rho^* R h (\lambda_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \mu_{bj} m^4}; \quad (19)$$

для нефтепроводов:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\lambda_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2q_{гп}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2 - \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v}{\rho^* R h (\lambda_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \mu_{bj} m^4 + \rho_0^* \Phi_{mn} R^2 m^4}; \quad (20)$$

где:

m – число полуволн в окружном направлении;

n – число полуволн в продольном направлении;

$\lambda_n = n\pi R / L\sqrt{h_v}$ – параметр длины трубопровода (величина безразмерная);

L – длина участка трубопровода (м);

R – радиус трубопровода (м);

$h_v = h / R\sqrt{12(1 - \nu^2)}$ – параметр относительной толщины оболочки (величина безразмерная);

ν – коэффициент Пуассона материала цилиндрической оболочки (величина безразмерная);

h – толщина стенки трубопровода (м);

$p^* = p_0(R / Eh \cdot h_v^2)$ – параметр внутреннего рабочего давления (величина безразмерная);

p_0 – внутреннее рабочее давление (Н/м²);

E – модуль упругости материала трубы (Н/м²);

$\rho^* = \rho_0(R / Eh \cdot h_v^2)$ – параметр плотности материала трубопровода (с²/м²);

ρ_0 – плотность трубопровода (Н·с²/м⁴);

$\kappa^* = R^2 \kappa / E_0 h \cdot h_v^2$ – приведённый коэффициент упругого отпора грунта;

$\kappa = E_0 / R(1 + \nu_0)$ – коэффициент упругого отпора грунта (величина безразмерная);

E_0 – модуль упругости грунта (Н/м²);

$q_{гп}^* = \gamma HR / E_0 h \cdot h_v^2$ – параметр упругого отпора грунта (величина безразмерная);

γ – плотность грунта (Н/м³);

$P = F/F_0$ – параметр продольной сжимающей силы (величина безразмерная);

F – продольная сжимающая сила (Н);

$F_0 = \pi^2 EI / L^2$ – сила Эйлера (Н);

$\mu_{bj} = 0,4 \cdot \mu_{bj}(R / E_0 h \cdot h_v^2)$ – параметр присоединённой массы грунта (с²);

$\mu_{bj} = \kappa_{bj} \mu_b$ – присоединённая масса грунта;

$\kappa_{bj} = 1 / \sqrt{m^2 + \lambda_0^2(1 + \lambda_0^2 / 2(m^2 + \lambda_0^2)^{3/2})}$ – коэффициент присоединённой массы;

$\lambda_0 = n\pi R / L$ – коэффициент приведённой длины (величина безразмерная);

$\mu_b = \gamma \pi R^2 / 2$ – присоединённая масса грунта, приходящаяся на единицу длины трубопровода;

ρ_0^* – плотность жидкости;

$\Phi_{mn} = I_m(\lambda_0) / \lambda_0 I_m'(\lambda_0)$ – параметр, определяемый отношением функции Бесселя к её производной, в зависимости от λ_0 ;

V – скорость потока жидкости (м/с);

$\rho_0^* \Phi_{mn}$ – присоединённая масса жидкости.

2. Выведены аналитические выражения (19) и (20) по нахождению частот свободных колебаний для подземных тонкостенных трубопроводов большого диаметра, которые учитывают упругий отпор грунта, давление грунта на стенку цилиндрической оболочки, присоединённую массу грунта, скорость потока нефти, внутреннее давление, параметр продольной сжимающей силы, а так же демпфер.

При исследовании динамических характеристик выбран стальной трубопровод длиной $L = 10R$ с глубиной заложения $H = 2,0$ м. В качестве изменяющихся параметров, использованы:

p_0 – внутреннее рабочее давление, которое меняется от 0,0 до 8,0 МПа;

κ – коэффициент упругого отпора грунта, изменяющееся от 0,0 до 0,6 Н/м³;

P – параметр продольной сжимающей силы, от 0,0 до 0,45;

h/R – параметр тонкостенности трубопровода варьируется в пределах 1/30–1/40–1/50.

Результаты расчётов отражены на графиках (рис. 2, 3), а их анализ показывает:

- при увеличении упругого отпора грунта κ от $0,1 \cdot 10^7$ до $0,6 \cdot 10^7$ Н/м³ частота свободных колебаний увеличивается, это говорит об увеличении жёсткости трубопровода за счёт отпора грунта, который препятствует деформации поперечного сечения и чем меньше толщина стенки, тем более выражен этот эффект;
- для трубопроводов с параметрами тонкостенности от 1/30 до 1/50 минимальные частоты реализуются при $n = 1$, $m = 2$, то есть по оболочечной форме;
- с увеличением рабочего давления в трубопроводе частотные характеристики нете и газопроводов возрастают в 3,5 раза, это объясняется повышением жёсткости трубы, за счёт внутреннего давления, которое препятствует овализации сечения;
- с уменьшением толщины трубопроводов, как для нефти, так и для газа приводит снижению частотных характеристик (рисунки 2, 3);
- при увеличении параметра продольной силы собственные частоты нефтегазопроводов резко снижаются, а при определённых значениях данного параметра обращаются в ноль, что свидетельствует о потере устойчивости (рисунок 3);
- для тонкостенных газопроводов частотные характеристики по сравнению с нефтепроводами при одинаковых параметрах выше на 70–100%, это объясняется вовлечением в колебательный процесс присоединённой массы жидкости нефтепровода;

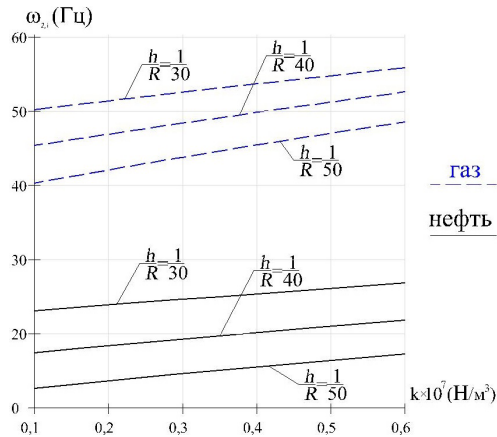


Рис. 2. График зависимости частот от коэффициента упругого отпора грунта при различных значениях h/R .

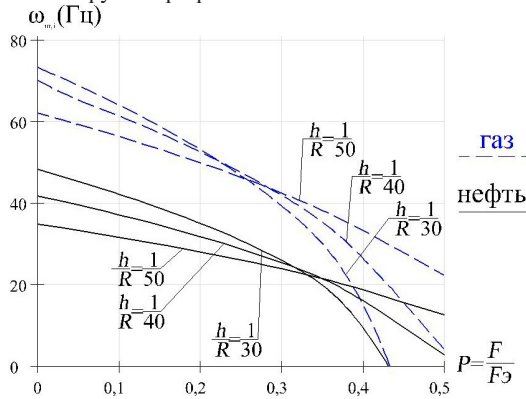


Рис. 3. График зависимости частот от параметра продольной сжимающей силы для различных значений h/R .

3. Выведены аналитические формулы, которые позволяют определять частоту свободных колебаний подземных тонкостенных трубопроводов большого диаметра с учётом демпфера.

Результаты расчёта частотных характеристик для тонкостенного подземного газопровода и нефтепровода с учётом демпфера приведены на рисунках 4 и 5.

Анализ показывает, что при увеличении коэффициента динамической вязкости η частота собственных колебаний ω_{21}^* снижается и при некоторых значениях может обратиться в «ноль», то есть колебаний в данном случае не происходит. Иначе говоря, при некоторых условиях, масса один раз может перейти через положение равновесия и возвратиться к нему с другой стороны или остаться в отклонённом состоянии.

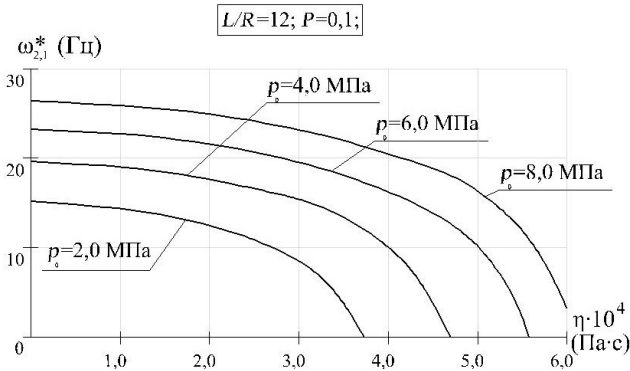


Рис. 4. Графики зависимость частот газопровода от коэффициента динамической вязкости грунта

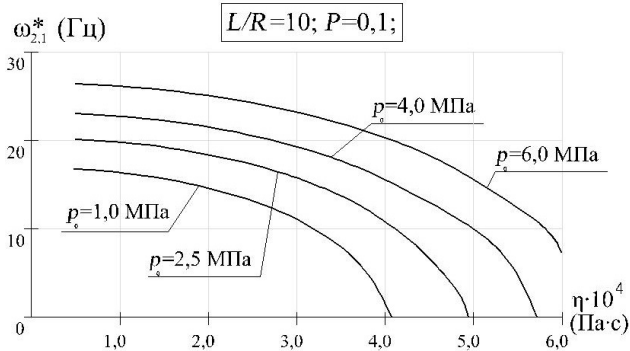


Рис. 5. Графики зависимость частот нефтепровода от коэффициента динамической вязкости грунта

Присоединённая масса грунта μ_{bj} тоже является своеобразным демпфером и как показали расчёты, снижает частоту свободных колебаний в 1,5–2 раза, однако учитывать в расчётах её следует не всегда. Учёт присоединенной массы грунтовой среды следует производить для водонасыщенных грунтов, с коэффициентом упругого отпора $\kappa < 0,45 \cdot 10^7$ Н/м³, а присоединенная масса для грунтов сложенной структуры при $\kappa > 0,45 \cdot 10^7$ Н/м³ не учитывается, то есть $\mu_{bj} = 0$.

Решена задача в области параметрического резонанса подземных тонкостенных трубопроводов. Решение сведено к разделяющейся системе дифференциальных уравнений Матье, при помощи которой строятся области неустойчивости. Оценка возможности появления параметрического резонанса заключается в нахождении точки на плоскости данных параметров, при известных значениях ω_{mn} , ω_0 , p_0 , P , κ , если точка не попадает в очерченную область то динамическая устойчивость обеспечена, иначе опасность возникновения параметрического резонанса очень велика.

Рассматривается участок подземного трубопровода, который подвергается воздействию нестационарного внутреннего рабочего давления $P(t)$:

$$P(t) = P_0 (1 + \mu \cos \omega_0 t). \quad (21)$$

Нестационарное давление приводит к возбуждению стационарную продольную сжимающую силу и коэффициент упругого отпора грунта, которые определяются выражениями (28) и (29):

$$F(t) = F (1 + \mu \cos \omega_0 t); \quad (22)$$

$$\kappa(t) = \kappa (1 + \mu \cos \omega_0 t); \quad (23)$$

а для нефтепроводов дополнительно и скорость потока протекающей жидкости:

$$V(t) = V_0 (1 + \mu \cos \omega_0 t); \quad (24)$$

где: p_0 – внутреннее рабочее давление; ω_0 – частота возбуждения, соответствующая характеристикам насосной станции; $\mu \leq 0,5$ – коэффициент возбуждения, F – продольная сжимающая сила; κ – коэффициент упругого отпора грунта.

Используя предложенную ранее методику, без учёта побочных коэффициентов решение сводится к разделяющейся системе дифференциальных уравнений уравнению Матъе (25):

$$\varphi''(t) + 2\varepsilon_0 \varphi'(t) + \omega_{mn}^2 (1 - \delta_{mn} \cos \omega_0 t) \varphi(t) = 0, \quad (25)$$

где: ω_{mn}^2 – квадрат частоты собственных колебаний (19), (20); δ_{mn} – коэффициент возбуждения для газопровода (26), для нефтепровода (27):

$$\delta_{mn} = \frac{\lambda_n^4 m^4 P / n - \kappa^* m^4 - p^* m^4 (m^2 - 1)}{\lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2q_{cp}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n} \cdot \mu; \quad (26)$$

$$\delta_{mn} = \frac{\lambda_n^4 m^4 P / n + \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v - \kappa^* m^4 - p^* m^4 (m^2 - 1)}{\lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2q_{cp}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n - \lambda_n^4 \rho_0^* \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v} \cdot \mu. \quad (27)$$

$2\varepsilon_0$ – коэффициент демпфирования для газопровода и нефтепровода соответственно (28) и (29):

$$2\varepsilon_0 = \eta m^2 / (R \rho_0 h (\lambda_n^2 / m^2 + 1 + m^2) + \mu_{bj} m^2), \quad (28)$$

$$2\varepsilon_0 = \eta m^2 / (R \rho_0 h (\lambda_n^2 / m^2 + 1 + m^2) + \mu_{bj} m^2 + \rho_0 \Phi_{mn} R^2 m^2). \quad (29)$$

Решение уравнения Матъе (25) получено Н. Н. Боголюбовым – Ю. А. Митропольским и представляет собой неравенства для нахождения границ первой, второй, третьей и так далее областей неустойчивости:

- главная первая область неустойчивости

$$1 - \sqrt{\frac{\delta_{mn}^2}{4} - \frac{4(2\varepsilon_0)^2}{\omega_0^2}} < \left(\frac{2\omega_{mn}}{\omega_0} \right)^2 < 1 + \sqrt{\frac{\delta_{mn}^2}{4} - \frac{4(2\varepsilon_0)^2}{\omega_0^2}}; \quad (30)$$

- вторая область неустойчивости

$$4 + \frac{2(\delta_{mn})^2}{3} - \sqrt{\delta_{mn}^4 - \frac{64(2\varepsilon_{mn})^2}{\omega_0^2}} \left\langle \left(\frac{2\omega_{mn}}{\omega_0} \right)^2 \right\rangle < 4 + \frac{2(\delta_{mn})^2}{3} + \sqrt{\delta_{mn}^4 - \frac{64(2\varepsilon_{mn})^2}{\omega_0^2}}; \quad (31)$$

- третья область неустойчивости

$$9 + \frac{81(\delta_{mn})^2}{64} - \sqrt{\frac{3^{12}(\delta_{mn})^6}{2^{18}} - \frac{324(2\varepsilon_0)^2}{\omega_0^2}} \left\langle \left(\frac{2\omega_{mn}}{\omega_0} \right)^2 \right\rangle < 9 + \frac{81(\delta_{mn})^2}{64} + \sqrt{\frac{3^{12}(\delta_{mn})^6}{2^{18}} - \frac{324(2\varepsilon_0)^2}{\omega_0^2}}; \quad (32)$$

Используя данный метод, ниже построены области динамической неустойчивости для подземного нефте и газопровода большого диаметра с учётом влияния демпфера и без него (рисунок 6, 7).

Анализ графиков на рисунках 6 и 7 показывает:

- с уменьшением параметра тонкостенности область динамической неустойчивости увеличивается, это говорит о том, что трубопроводы с большей толщиной стенки менее подвержены параметрическому резонансу;

- при параметре тонкостенности $h/R = 1/30$ для первой области неустойчивости нижняя и верхняя границы сходятся, когда внутреннее рабочее давление равно $p_0 = 4,2$ МПа. Без учёта влияния демпфера граница находится при значении $p_0 = 2,0$ МПа, это означает что, область динамической неустойчивости, для расчётов без учета влияния демпфера расширяется (рис. 6), следовательно, учёт сил сопротивления среды дает более узкую область неустойчивости, а значит для определённых значений частот возбуждения, исключает возможность возникновения параметрического резонанса из части области без учёта демпфера;

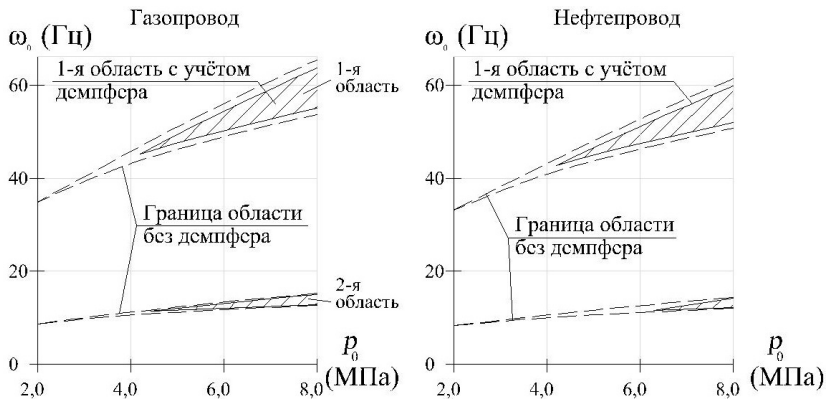


Рис. 6. Области динамической неустойчивости в зависимости от внутреннего давления для трубопровода в грунте с коэффициентом динамической вязкости $\eta = 0,5 \cdot 10^4$ Па·с, при $P = F/F_э = 0,1$; $L/R = 1/10$; $\kappa = 0$, $H = 2$ м, $h/R = 1/30$

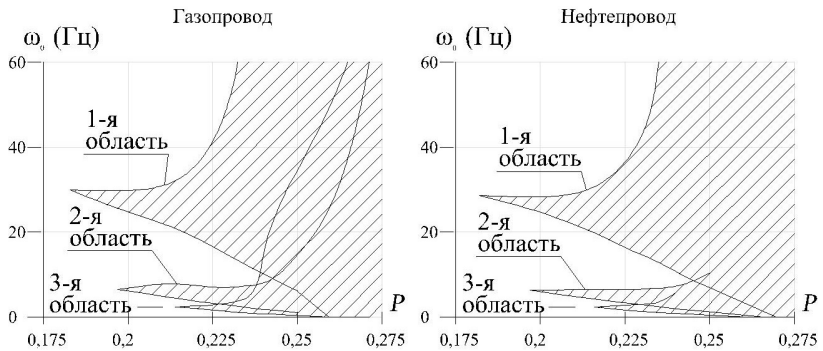


Рис. 7. Области динамической неустойчивости для трубопровода, в грунте с коэффициентом динамической вязкости $\eta = 0,5 \cdot 10^4$ Па·с в зависимости от величины параметра продольной силы, при $L/R = 1/10$; $\kappa = 0$, $H = 2$ м, $h/R = 1/30$

Исследование влияния продольной силы показывает (рис. 7), что с увеличением данного параметра, как для нефтепровода, так и для газопровода, области расширяются и при определённых значениях 1-я область перекрывает все остальные и занимает всё пространство. То есть возникновение параметрического резонанса в данном случае составляет 100%.

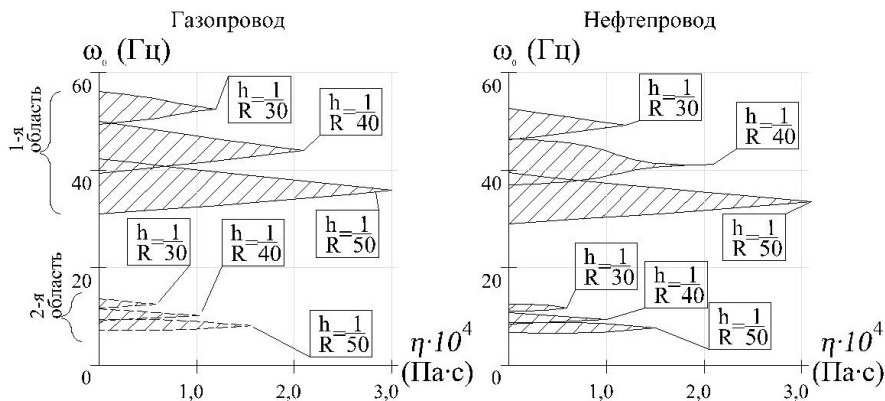


Рис. 8. Области динамической неустойчивости для трубопровода, в грунте с различным коэффициентом динамической вязкости, для различных параметров тонкостенности, при $P = F/F\varepsilon = 0,1$; $L/R = 1/10$; $\kappa = 0$, $H = 2$ м; $p_0 = 6,0$ МПа

Далее исследуется влияние динамической вязкости грунта. Анализ графиков на рисунке 8, показывает что:

- с увеличением вязкости 1-я, 2-я, 3-я области динамической неустойчивости сужаются и при некоторых значениях перестают существовать. Так, например для нефте - газопровода с внутренним рабочим давлением 6,0 МПа при значении динамической вязкости более $\eta > 3 \cdot 10^4$ Па·с, возникновение параметрического резонанса маловероятно. Увеличение толщины стенки трубопровода сужает области динамической неустойчивости и минимизирует вероятность появления параметрического резонанса.
- области неустойчивости для одинаковых значений механических и геометрических характеристик подземных нефтепроводов и газопроводов мало различимы (не более 20%), следовательно, возникновение параметрического резонанса одинаково вероятны в обоих случаях.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Для выбранной расчётной схемы в виде замкнутой цилиндрической оболочки с применением геометрически нелинейного варианта полубезмоментной теории цилиндрических оболочек решена задача динамического расчёта для подземных прямолинейных участков трубопроводов большого диаметра с учётом внешнего давления грунта на стенку трубопровода, упругого отпора грунта, присоединённой массы грунта, демпфера, стационарного внутреннего давления и продольной сжимающей силы.

2. Получены формулы по нахождению частоты свободных колебаний для подземного тонкостенного трубопровода большого диаметра при различных параметрах тонкостенности и длины участка трубопровода в зависимости

от коэффициента упругого отпора грунта, глубины заложения трубопровода, параметра продольной сжимающей силы, внутреннего давления и стационарного потока жидкости.

3. Анализ значений для частот и форм собственных колебаний для тонкостенных подземных трубопроводов показал:

- для трубопроводов с заявленными параметрами тонкостенности 1/30; 1/40; 1/50 минимальные частоты реализуются при $n = 1$, $m = 2$, то есть по оболочечной форме колебаний;
- увеличением давления внутри трубопровода приводит к увеличению частотных характеристик, это объясняется повышением жёсткости за счёт внутреннего давления, которое препятствует овализации поперечного сечения;
- с уменьшением толщины трубопроводов как для нефти, так и для газопроводов значения частотных характеристик снижаются;
- с увеличением коэффициента упругого отпора грунта k частота свободных колебаний увеличивается, что так же свидетельствует об увеличении жёсткости трубопровода за счёт отпора грунта, который препятствует деформации поперечного сечения трубопровода. Увеличение частоты собственных колебаний для газопровода составляет 26,06%, а для нефтепровода 31,77%;
- при увеличении параметра продольной силы собственные частоты нефтепроводов и газопроводов резко снижаются;
- для тонкостенных газопроводов частотные характеристики по сравнению с нефтепроводами при одинаковых параметрах выше на 70–100%, это объясняется вовлечением в колебательный процесс присоединённой массы жидкости нефтепровода;

4. Произведён учёт влияния сил сопротивления среды (демпфера) при составлении аналитических зависимостей для определения частоты свободных колебаний, а так же установление границы между аperiodическим и затухающе периодическим колебательным процессом. Анализ результатов, полученных с применением данных зависимостей показывает, что при увеличении коэффициента динамической вязкости η (Па·с) частота собственных колебаний с учётом сил сопротивления среды ω_{21}^* снижается и при некоторых значениях для различных величин внутреннего рабочего давления может обратиться в «ноль», то есть, в данном случае коэффициент демпфирования d_{21} равен частоте собственных колебаний без учёта влияния демпфера ω_{21} , колебательный процесс будет аperiodическим, а состояние критическим. Иначе говоря, при некоторых условиях, масса один раз может перейти через положение равновесия и возвратиться к нему с другой стороны. При $d_m < \omega_{mn}$ свободные колебания можно условно назвать периодическими или затухающе периодическими с периодом $T_1 = 2\pi/\sqrt{(\omega_{mn}^2 + d_{mn}^2)}$. При $d_m > \omega_{mn}$ движение тоже является аperiodическим (колебательного процесса не происходит). Присоединённая масса грунта μ_{hj} тоже является своеобразным демпфером и как показали расчёты, снижает частоту

свободных колебаний в 1,5–2 раза, однако учитывать в расчётах её следует не всегда. Учёт присоединенной массы грунтовой среды следует производить для слабых обводнённых грунтов, торфяников или ила, с коэффициентом упругого отпора $\kappa < 0,45 \cdot 10^7$ Н/м³, а присоединенная масса для грунтов с коэффициентом упругого отпора $\kappa > 0,45 \cdot 10^7$ Н/м³ не учитывается, то есть $\mu_{bj} = 0$.

5. Решена задача параметрического резонанса для объекта исследования с различным диаметром и толщиной стенки, при нестационарном воздействии внутреннего давления, упругого отпора грунта, параметра продольной сжимающей силы и потока протекающей жидкости. Получена разделяющаяся система дифференциальных уравнений Матье, при помощи которой строятся области динамической неустойчивости для оценки возможности возникновения параметрического резонанса.

6. Исследована динамическая неустойчивость подземных трубопроводов, уложенных в грунт, с различными коэффициентами динамической вязкости, геометрическими характеристиками, внутренним давлением, и продольной силой. Исследования показывают, что:

- с увеличением вязкости грунтовой среды область динамической неустойчивости сужается и при некоторых значениях перестаёт существовать, то есть для трубопроводов, уложенных в грунт с динамическим коэффициентом вязкости более $\eta > 8 \cdot 10^5$ Па · с, возникновение параметрического резонанса исключено;
- для нестабильных грунтовых сред $0,1 \cdot 10^4 < \eta < 8 \cdot 10^5$ Па·с, в которые уложен трубопровод, потеря динамической устойчивости возможна и вероятность её появления тем выше, чем меньше динамическая вязкость грунтовой среды. Трубопроводов с более толстой стенкой $h/R = 1/30$ более выгодны с позиции динамической устойчивости, так как область динамической неустойчивости в 1,5–2,0 раза меньше чем при $h/R = 1/40$ или $h/R = 1/50$;
- области неустойчивости для одинаковых значений механических и геометрических характеристик подземных нефтепроводов и газопроводов мало различимы (не более 20%), следовательно, возникновение параметрического резонанса одинаково вероятны в обоих случаях.

Рекомендации к практическому применению:

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

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Соколов, В.Г. Свободные колебания подземных прямолинейных тонкостенных участков газопроводов / В. Г. Соколов, А. В. Дмитриев // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 2(73). – С. 29-34. – DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-2-29-34. (0,7 п.л.)

2. **Дмитриев, А. В.** Исследование параметра длины и продольной сжимающей силы по определению частот свободных колебаний подземных тонкостенных газопроводов большого диаметра / А. В. Дмитриев, В. Г. Соколов, А. В. Березнев // Транспортные сооружения. – 2019. – Т. 6. – № 3. – С. 36. (0,5 п.л.)

3. **Дмитриев, А. В.** Зависимость частот свободных колебаний тонкостенного подземного газопровода большого диаметра от глубины заложения / А. В. Дмитриев // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 6(57). – С. 49. (0,3 п.л.)

4. Соколов, В. Г. Колебания подземных тонкостенных магистральных трубопроводов с учетом внутреннего давления и продольной силы / В. Г. Соколов, Ю. В. Огороднова, **А. В. Дмитриев**, А. М. Масленников // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 5(76). – С. 105-112. – DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-105-112. (0,4 п.л.)

5. **Дмитриев, А. В.** Исследование частоты свободных колебаний для трубопроводов с различными физико-механическими свойствами материала / А. В. Дмитриев // Транспортные сооружения. – 2020. – Т. 7. – № 1. – С. 3. – DOI 10.15862/04SATS120. (0,5 п.л.)

6. **Дмитриев, А. В.** Динамический расчёт подземного тонкостенного трубопровода с учётом влияния демпфера / А. В. Дмитриев, В. Г. Соколов // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – № 2. – С. 5. (0,4 п.л.)

7. **Дмитриев, А. В.** Частотные характеристики трубопровода большого диаметра с потоком жидкости в упругой грунтовой среде с учётом внутреннего давления / А. В. Дмитриев, В. Г. Соколов, А. В. Березнев // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – № 6. – С. 5. (0,4 п.л.)

Публикации в изданиях SCOPUS:

8. Sokolov, V. Influence of the length parameter of an underground oil pipeline on the frequency of free oscillation / V. Sokolov, I. Razov, **A. Dmitriev** // E3S Web of Conferences : Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019, Moscow, 20–22 ноября 2019 года. – Moscow: EDP Sciences, 2020. – P. 03024. – DOI 10.1051/e3sconf/202016403024. (0,6 п.л.)

9. **Dmitriev, A.** Influence of longitudinal force and internal pressure on the frequency of free vibrations of an underground oil pipeline / A. Dmitriev, V. Sokolov, A. Berezniov // E3S Web of Conferences, Rostov-on-Don, 20–23 октября 2020 года. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 01010. – DOI 10.1051/e3sconf/202021701010. (0,6 п.л.)

Публикации в других изданиях:

10. **Дмитриев, А. В.** Определение критической силы подземного магистрального газопровода при динамическом расчёте / А. В. Дмитриев, В. Г. Соколов // Нефть и газ: технологии и инновации : Материалы Национальной научно-практической конференции, Тюмень, 07–08 ноября 2019 года / Отв. редактор П.В. Евтин. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 144-147. (0,1 п.л.)

11. **Дмитриев, А. В.** Определение критического внешнего давления подземного полиэтиленового трубопровода при динамическом расчёте / А. В. Дмитриев // Нефтегазовый терминал : материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 28–29 мая 2020 года / Под общей редакцией С. Ю. Подорожникова. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 147-152. (0,1 п.л.)

12. **Дмитриев, А. В.** О влиянии внутреннего давления на частоты свободных колебаний подземного тонкостенного магистрального нефтепровода / А. В. Дмитриев,

В. Г. Соколов // Проблемы прочности материалов и конструкций в транспортном строительстве : Международная научно-практическая конференция, посвященная 175-летию со дня рождения профессора Н. А. Белелюбского, Санкт-Петербург, 18–20 мая 2021 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. – С. 72-81. (0,1 п.л.)

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 18.11.2022. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 135.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.