

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №2, Том 12 / 2020, No 2, Vol 12 <https://esj.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/19SAVN220.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Дмитриев А.В., Соколов В.Г. Динамический расчёт подземного тонкостенного трубопровода с учётом влияния демпфера // Вестник Евразийской науки, 2020 №2, <https://esj.today/PDF/19SAVN220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Dmitriev A.V., Sokolov V.G. (2020). Dynamic calculation of an underground thin-walled pipeline taking into account the influence of a damper. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(12). Available at: <https://esj.today/PDF/19SAVN220.pdf> (in Russian)

УДК 624.074.433

ГРНТИ 73.39.31

Дмитриев Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Аспирант

E-mail: dandid@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3832-5321>

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1034764

Соколов Владимир Григорьевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Заведующий кафедры «Строительной механики»
Доктор технических наук, доцент

E-mail: dandid@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=524484

Динамический расчёт подземного тонкостенного трубопровода с учётом влияния демпфера

Аннотация. Решается задача по нахождению частот собственных колебаний тонкостенных подземных магистральных трубопроводов с учётом силы сопротивления среды (демпфера), основанная на применении полубезмоментной теории цилиндрических оболочек среднего изгиба Власова-Новожилова, в которой изгибающие моменты в продольном направлении не учитываются в виду их малости по сравнению с моментами, действующими в поперечном направлении. Решением такого подхода является однородное дифференциальное уравнение четвёртого порядка, удовлетворяющее граничным условиям шарнирного закрепления на каждом конце. В данное уравнение входят параметры длины, внутреннего рабочего давления, тонкостенности трубопровода, а также величины коэффициента упругого отпора грунта, присоединённой массы грунта, продольной сжимающей силы и силы сопротивления среды (демпфер). Произведя математические преобразования, получена система разделяющихся линейных однородных дифференциальных уравнений второго порядка относительно функции времени. Решение такой системы при $m = 1$, позволяет определить форму свободных колебаний с не деформируемым контуром поперечного сечения с учётом демпфера, для $m = 2$ форма свободных колебаний демпфируемой оболочки для 2-х полувольт в поперечном сечении, $m = 3$ для трёх полувольт.

Установлена связь между влажностью грунта и коэффициентом динамической вязкости, а также модулем упругости грунта, который в свою очередь оказывает влияние на коэффициент упругого отпора демпфированной цилиндрической оболочки. На основании данных расчёта по

выведенным формулам установлено, что при значении коэффициента демпфирования больше чем собственная частота, движение не будет колебательным, то есть масса один раз может перейти через положение равновесия и возвратиться к нему с другой стороны (апериодические колебания). Если коэффициент демпфирования меньше собственной частоты, то свободные колебания можно условно назвать периодическими или затухающе периодическими.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка; собственная частота колебаний; сила сопротивления среды; демпфер; коэффициент упругого отпора грунта; параметр тонкостенности; длина трубопровода; присоединённая масса грунта

Введение

Данный материал является продолжением работ [1–4] в которых исследовались частотные характеристики подземных тонкостенных магистральных газопроводов большого диаметра без учёта демпфера. В настоящее время многими авторами исследуются свободные колебания цилиндрических оболочек в упругой безынерционной среде, основанной на гипотезе Винклера-Пастернака [5–13], в которых частоты свободных колебаний исследуются с учётом деформации поперечного сечения, но без учёта сил сопротивления среды. На фоне этого остаётся открытым вопрос об исследовании частотных характеристик тонкостенной цилиндрической оболочки (трубопровода) с учётом демпфирующего свойства грунта. В работе [14] автор коэффициент демпфирования, при нахождении крутильных частот цилиндрической оболочки, учитывает в мнимой части корней трансцендентного уравнения. В работе [15] для цилиндрической оболочки в инерционной среде частотные характеристики определяются решением трансцендентного уравнения при помощи программного обеспечения. В настоящей работе ставится задача по нахождению простого и практически применимого решения для нахождения частот собственных колебаний цилиндрической оболочки с учётом демпфера.

1. Построение решения

Наиболее распространённая модель, «которая учитывает демпфирование, основана на допущении о сопротивлении среды, пропорциональном скорости перемещения конструкции в данной среде. Для цилиндрической оболочки, колеблющейся в грунте, эта гипотеза выражается в пропорциональности силы сопротивления среды q_c к скорости радиального перемещения точки срединной поверхности оболочки» [16]:

$$q_c = -\eta \cdot \frac{\partial w}{\partial t} \quad (1)$$

где: w – радиальная составляющая перемещения, отнесенная к радиусу поперечного сечения оболочки. «Знак минус показывает, что сила сопротивления действует в направлении, противоположном скорости» [16], η – (Па·с) динамический коэффициент вязкости.

«Рассматривая участок подземного газопровода в виде замкнутой цилиндрической оболочки длиной L с радиусом срединной поверхности поперечного сечения R и толщиной стенки h в координатах $\xi = x/R$ и θ , где x – продольная координата, θ – полярный угол, запишем уравнение движения оболочки в усилиях, полученное на основании геометрически нелинейного варианта полубезмоментной теории цилиндрических оболочек» [1]:

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

где: $X_1 = -Rh\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$, $X_2 = -Rh\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$ – тангенциальные составляющие сил инерции, а демпфирующее действие грунта учитывается в нормальной составляющей сил инерции X_3 (последнее слагаемое):

$$X_3 = -Rh\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \rho_0 \Phi_{mn} \frac{R}{Eh} \left(R^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} + V^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial \xi^2} \right) + p_0 - \gamma H (2 - \alpha_1 \cos \theta - \alpha_2 \cos 2\theta) - \kappa R w - \eta \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3)$$

При помощи математических преобразований, учитывая соотношения полубезмоментной теории среднего изгиба, для шарнирного опирания по концам участка цилиндрической оболочки [1]:

$$w = \sum_m \cdot \sum_n b_{mn} \sin(\bar{\lambda}_n \bar{\xi}) \cos(m\theta) \cdot f(t),$$

$$u = -\sum_m \cdot \sum_n b_{mn} \frac{\bar{\lambda}_n}{m^2} \cos(\bar{\lambda}_n \bar{\xi}) \cos(m\theta) \cdot f(t),$$

$$v = \sum_m \cdot \sum_n b_{mn} \frac{1}{m} \sin(\bar{\lambda}_n \bar{\xi}) \sin(m\theta) \cdot f(t),$$

$$\vartheta_2 = -\sum_m \cdot \sum_n b_{mn} \frac{m^2 - 1}{m} \sin(\bar{\lambda}_n \bar{\xi}) \sin(m\theta) \cdot f(t),$$

используя метод разделяющихся переменных (Фурье) выражение (2) преобразовывается в:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} + h_v^2 \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_2}{\theta} + \vartheta_2 \right) + 2 \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \varepsilon_0 \right) - \frac{R}{Eh} p_0 \frac{\partial^3 \vartheta_2}{\partial \theta^3} + \frac{R^2 \kappa \cdot \partial^2 w}{Eh \cdot \partial \theta^2} + \\ & + R\gamma H \frac{\partial^3 \vartheta_2}{\partial \theta^3} (2 - \alpha_1 \cos \theta - 2 \cos 2\theta) + R\gamma H \left(\frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial \theta^2} \alpha_1 \sin \theta + \frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial \theta^2} 2\alpha_2 \sin 2\theta \right) + \\ & + R\gamma H \left(\frac{\partial \vartheta_2}{\partial \theta} \alpha_1 \cos \theta - \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \theta} 4\alpha_2 \cos 2\theta \right) - \frac{R^2 \rho}{E} \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \xi \partial t^2} - \frac{\partial^3 v}{\partial \xi \partial t} - \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} \right) + \\ & + \rho_0 \Phi_{mn} \frac{R}{Eh} \left(R^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} + V^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial \xi^2} \right) + R\eta \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^2 \partial t} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где: u, v, w – компоненты перемещений срединной поверхности оболочки, отнесенные к радиусу R , ϑ_2 – угол поворота, p_0 – внутреннее давление в трубе, ρ – коэффициент бокового

давления грунта, H – толщина обжимаемого слоя, γ – объемный вес грунта, E – модуль упругости материала трубы, R – радиус срединной поверхности, $h_v = \frac{h}{R\sqrt{12(1-\nu^2)}}$ – параметр относительной толщины оболочки, μ_{bj} – присоединенная масса грунта на единицу длины трубопровода, $\kappa = \frac{E_0}{R(1+\nu_0)}$ – коэффициент упругого отпора грунта для трубопровода подверженного действию внутреннего рабочего давления [1].

Решив данное уравнение, получим систему разделяющихся линейных однородных дифференциальных уравнений второго порядка относительно функции времени $f(t)$:

$$f''(t) + 2d_m f'(t) + \omega_{mn}^2 f(t) = 0, \quad (5)$$

где: $d_m = \eta/2Rh\rho$ – коэффициент демпфирования, ω_{mn} – частота свободных колебаний без учёта сил сопротивления среды, полученная в работе [2] и равна:

$$\omega_{mn} = \sqrt{\frac{\lambda_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2q_{ep}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2}{\rho^* Rh(\lambda_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \mu_{bj} m^4}}; \quad (6)$$

где: $p^* = p_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}, \rho^* = \rho_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}, \kappa^* = \frac{R^2 \kappa}{Eh \cdot h_v^2}, q_{ep}^* = \frac{\gamma HR}{Eh \cdot h_v^2}, \lambda_n = \frac{n\pi R}{L\sqrt{h_v}},$

$$\mu_{bj}^* = 0,4 \cdot \mu_{bj} \frac{R}{Eh \cdot h_v^2};$$

где: L – длина участка трубопровода, h – толщина стенки трубопровода, E – модуль упругости материала трубы, ρ – плотность материала трубы, p_0 – внутреннее давление в трубе,

F – продольная сжимающая сила, $F_s = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$ – Эйлера сила; $I = \pi R^3 h$, μ_{bj}^* – параметр присоединённой массы грунта, $h_v = \frac{h}{R\sqrt{12(1-\nu^2)}}$ – параметр относительной толщины оболочки, μ_{bj} – присоединенная масса грунта на единицу длины трубопровода, κ – коэффициент упругого отпора грунта, когда труба подвергается действию внутреннего давления [17]:

$$\kappa = \frac{E_0}{R(1+\nu_0)} \quad (7)$$

Решение системы (5) при $m = 1$, позволяет определить форму свободных колебаний с не деформируемым контуром поперечного сечения с учётом демпфера, для $m = 2$ форма свободных колебаний демпфируемой оболочки для 2-х полуволн в поперечном сечении, $m = 3$ для трёх полуволн.

Решением системы уравнений (5), является квадратное уравнение вида:

$$s^2 + 2d_m s + \omega_{mn}^2 = 0 \quad (8)$$

Данное уравнение имеет известное решение [18, с. 28; 19, с. 93; 20, с. 98] и корни этого характеристического уравнения (8) определяются как:

$$s_{1,2} = -d_m \pm \sqrt{d_m^2 - \omega_{mn}^2}. \quad (9)$$

Численное значение корней зависит от величин d_m и ω_{mn} . В случае, когда $d_m < \omega_{mn}$ корни уравнения (5) будут комплексные сопряжённые и принимают вид:

$$s_{1,2} = -d_m \pm i\sqrt{\omega_{mn}^2 - d_m^2} \quad (10)$$

Для комплексных сопряженных корней (10) общее решение дифференциального уравнения (5) имеет вид:

$$f(t) = e^{-d_m t} (C_1 \cos(t\sqrt{\omega_{mn}^2 - d_m^2}) + C_2 \sin(t\sqrt{\omega_{mn}^2 - d_m^2})) \quad (11)$$

Это выражение определяет форму колебаний демпфированной оболочки. Отсюда следует, что круговая частота свободных колебаний оболочки ω_{mn}^* с учётом сил сопротивления среды определяется как:

$$\omega_{mn}^* = \sqrt{\omega_{mn}^2 - d_m^2} = \omega_{mn} \sqrt{1 - \frac{d_m^2}{\omega_{mn}^2}} \quad (12)$$

«При $d_m = 0$ движения системы будут иметь периодический характер, при $d_m > 0$ они будут неограниченно затухать во времени, при $d_m < 0$ будут неограниченно возрастающими. Если $0 < d_m < \omega_{mn}$, то затухание будет сопровождаться колебаниями. При $d_m > \omega_{mn}$ затухание будет монотонным (кроме, может быть, небольшого начального отрезка времени). Значение коэффициента демпфирования $d_m = \omega_{mn}$, соответствующее переходу от колебательного процесса затухания колебаний к монотонному, называют критическим» [18].

2. Анализ полученных данных

«В трубопроводных обвязках поршневых машин максимальная энергия приходится на низшие гармоники. Расчеты допустимо проводить по нескольким первым (до 3–5) собственным частотам каждого пролета и реализовывать отстройку по этим значениям» [п.2 РТМ 38.001-94], поэтому проведём анализ частот собственных колебаний по первым 3-м низшим частотам.

Частотные характеристики определим для тонкостенного газопровода радиусом $R = 710$ мм, длиной участка $L = 10 \cdot R$, с параметром тонкостенности $h/R = 1/40$ уложенного на глубину $H = 2$ м в различных грунтовых условиях (среднесуглинистая почва, торфяная масса, илистый грунт), при отсутствии продольной силы. Значения вычислим для $m = 1, m = 2, m = 3, n = 1$, так как в работах [2–4] установлено, что данные частоты являются низшими (минимальными).

2.1 Среднесуглинистая почва

Для среднесуглинистой почвы в работе [21] установлено, что слишком большая разница в значениях для коэффициента динамической вязкости обусловлена абсолютной влажностью с учетом гранулометрического состава почвы. То есть чем больше влажность, тем меньше коэффициент динамической вязкости (см. рис. 1).

Влажность грунта существенно влияет не только на динамический коэффициент вязкости η (Па·с), но и на модуль упругости грунта E_0 (Н/м²), который в свою очередь определяет коэффициент упругого отпора грунта k (Н/м³). При увеличении влажности грунта снижению значений подвержен не только динамический коэффициент вязкости η , но и модуль упругости грунта E_0 (см. рис. 2), следовательно, данный факт отразится и на коэффициенте упругого отпора грунта k .

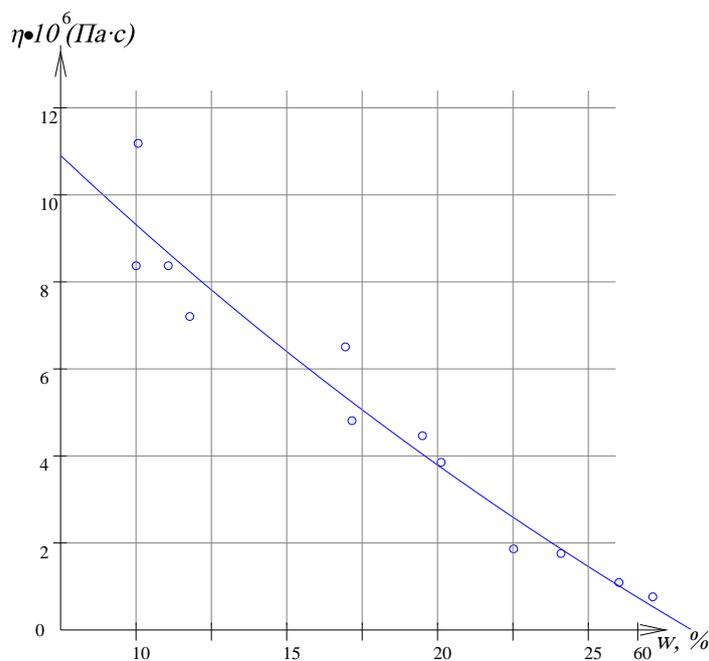


Рисунок 1. График зависимости коэффициента динамической вязкости среднесуглинистой почвы от абсолютной влажности (график взят из [21])

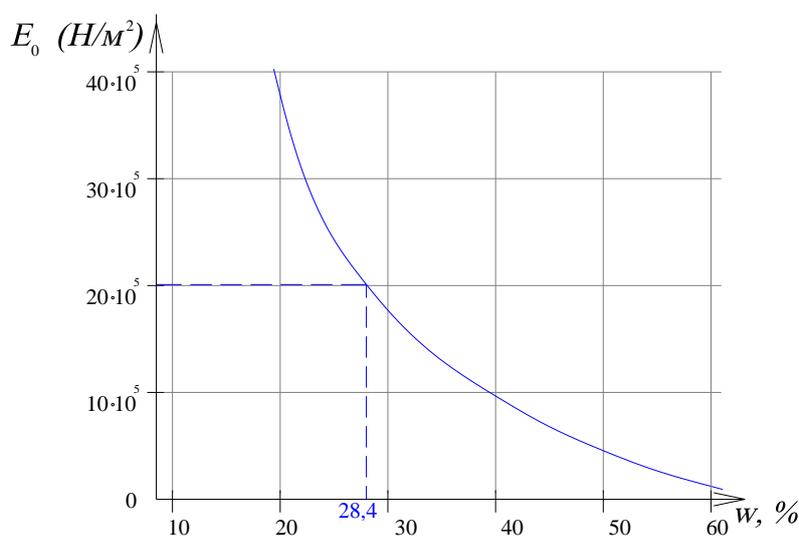


Рисунок 2. Зависимость модуля деформации пылевого глинистого грунта от влажности (график взят из [22])

Одновременно с этим установим связь между влажностью и коэффициентом демпфирования. Для определения коэффициента динамической вязкости воспользуемся формулой « $\eta = 5627,569w^2 - 722\,124,877w + 1,598 \cdot 10^7$ (Па·с)» [21].

Методом последовательного приближения, вычислена влажность, при которой коэффициент демпфирования соизмерим с собственной частотой колебаний. Данные занесены в таблицу 1. При такой влажности ($w = 28,38\% - 28,41\%$) значения модуля упругости и соответственно коэффициента упругого отпора грунта меняются в пределах 0,01 %, что никак не сказывается на конечном результате по определению собственных частот, поэтому ω_{mn} , занесённая в таблицу 1, принята без учёта данного фактора.

Результаты расчёта частотных характеристик трубопровода уложенного в среднесуглинистой почве показывают, что при влажности $w < 28,38\%$ коэффициент

демпфирования $d_m > \omega_{mn}$, в этом случае движение не будет колебательным. Отклоненный участок трубы будет практически мгновенно приближаться к своему исходному положению. При некоторых условиях масса один раз может перейти через положение равновесия и возвратиться к нему с другой стороны. Движение называется аperiодическим. С увеличением влажности $w > 28,41\%$ коэффициент демпфирования $d_m < \omega_{mn}$. В данной ситуации видно, что скобки в формуле (11) содержат периодическую функцию, так как от прибавления к t величины $T_1 = 2\pi/\sqrt{(\omega_{mn}^2 + d_m^2)}$ значение этой функции численно не меняется. Следовательно, свободные затухающие колебания можно условно назвать периодическими или затухающе периодическими с периодом $T_1 = 2\pi/\sqrt{(\omega_{mn}^2 + d_m^2)}$.

Влияние демпфера на уменьшение частоты собственных колебаний, к примеру, для ситуации при $p_0 = 6$ МПа, $m = 2$, $n = 1$ (см. табл. 1), весьма значительно и составляет 33 %.

Для среднесуглинистой почвы при определённой влажности существует ситуация, когда значения коэффициента демпфирования и собственная частота трубопровода будут равны между собой $d_m = \omega_{mn}$, движение в данном случае тоже является аperiодическим, а состояние называют критическим.

2.2 Торфяная масса

Для торфяной массы коэффициент динамической вязкости принят по [23] и равен $\eta = 92,4$ (Па·с) при влажности $w = 87,4\%$.

Модуль упругости торфяной массы в данном случае $E_0 = 0$ (см. рис. 2), соответственно и коэффициент упругого отпора грунта $\kappa = 0$. В расчётах по определению собственной частоты трубопровода данные параметры для грунтов с водонасыщением более 70 % учитываться не должны.

Результаты расчёта (см. табл. 1) частотных характеристик трубопровода при проходке через торфяную массу с влажностью $w = 87,4\%$ показывают, что коэффициент демпфирования много меньше собственной частоты свободных колебаний $d_m \ll \omega_{mn}$, колебания будут затухающе периодические.

Влияние сопротивления сил среды на уменьшение частот крайне мало и не превышает 0,01 %, так из данных таблицы 1 видно, что для ситуации при $p_0 = 0$ МПа, $m = 2$, $n = 1$ собственная частота $\omega_{21} = 7,04$ Гц, а частота демпфированного трубопровода $\omega_{*21} = 7,03$ Гц.

2.3 Илистый грунт

Для илистого грунта значения коэффициента динамической вязкости взят из [24] и равен $\eta = 0,35$ (Па·с) при влажности $w = 90\%$.

Модуль упругости илистого грунта в данном случае $E_0 = 0$ (см. рис. 2), соответственно $\kappa = 0$. Полученные результаты занесены в таблицу 1.

Результаты расчёта собственных частот и частот с учётом сил сопротивления среды для трубопровода, уложенного в илистый грунт с влажностью $w = 90\%$, показывают, что коэффициент демпфирования менее 0,5, а при увеличении влажности стремится к нулю. В таких условиях снижение частот собственных колебаний за счёт демпфирования не происходит, как показывают результаты из таблицы 1 при $p_0 = 0$ МПа, $m = 2$, $n = 1$ собственная частота $\omega_{21} = 7,04$ Гц и равна частоте с учётом влияния демпфера $\omega_{*21} = 7,04$ Гц.

Таблица 1

Коэффициент демпфирования среды (Гц) и частота собственных колебаний (Гц) в зависимости от влажности грунта (%), при различных параметрах тонкостенности h/R и величине внутреннего рабочего давления трубопровода p_0 (МПа)

Влажность		Внутреннее рабочее давление											
		$p_0 = 0,0$ (МПа)			$p_0 = 2,0$ (МПа)			$p_0 = 6,0$ (МПа)			$p_0 = 10,0$ (МПа)		
		Частота Гц			Частота Гц			Частота Гц			Частота Гц		
		ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}
среднесуглинистая почва													
w = 28,38 %	d_m	92,37	92,37	92,37	92,37	92,37	92,37	92,37	92,37	92,37	92,37	92,37	92,37
	ω_{mn}	78,59	37,62	68,12	78,59	51,12	90,82	78,59	70,78	124,35	78,59	86,05	150,59
	ω_{mn}^*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	118,94
w = 28,4 %	d_m	52,54	52,54	52,54	52,54	52,54	52,54	52,54	52,54	52,54	52,54	52,54	52,54
	ω_{mn}	78,59	37,62	68,12	78,59	51,12	90,82	78,59	70,78	124,35	78,59	86,05	150,59
	ω_{mn}^*	58,45	-	43,36	58,45	-	74,08	58,45	47,42	112,70	58,45	68,15	141,13
w = 28,41 %	d_m	32,64	32,64	32,64	32,64	32,64	32,64	32,64	32,64	32,64	32,64	32,64	32,64
	ω_{mn}	78,59	37,62	68,12	78,59	51,12	90,82	78,59	70,78	124,35	78,59	86,05	150,59
	ω_{mn}^*	71,49	18,71	59,79	71,49	39,34	84,75	71,49	62,80	119,99	71,49	79,62	147,01
торфяная масса													
w = 87,4 %	d_m	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
	ω_{mn}	20,76	7,04	13,03	20,76	10,13	17,66	20,76	14,45	24,42	20,76	17,74	29,67
	ω_{mn}^*	20,75	7,03	13,02	20,75	10,12	17,65	20,75	14,43	24,41	20,75	17,73	29,66
илистый грунт													
w = 90 %	d_m	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	ω_{mn}	20,76	7,04	13,03	20,76	10,13	17,66	20,76	14,45	24,42	20,76	17,74	29,67
	ω_{mn}^*	20,76	7,04	13,03	20,76	10,13	17,66	20,76	14,45	24,42	20,76	17,74	29,67

Разработано авторами

Заключение

В условиях наличия сил сопротивления среды для цилиндрических оболочек происходит снижение собственных частот колебаний. Степень снижения характеризуется влажностью грунтовой среды, в который помещена цилиндрическая оболочка (трубопровод). При влажности менее 28,4 % колебательный процесс становится аperiodическим, для значений влажности в пределах 29–88 % движение будет периодическим, при чём частоты снижаются и затухают со временем. Грунтовая среда с влажностью более 88 % никакого влияния на частоту свободных колебаний не оказывает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов В.Г., Дмитриев А.В. Свободные колебания подземных прямолинейных тонкостенных участков газопроводов // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2 (73). С. 29–34, https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38589575_16941659.pdf.
2. Дмитриев А.В., Соколов В.Г., Березнёв А.В. Исследование параметра длины и продольной сжимающей силы по определению частот свободных колебаний подземных тонкостенных газопроводов большого диаметра // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, DOI: 10.15862/40SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/40SATS319>).
3. Дмитриев А.В. Зависимость частот свободных колебаний тонкостенного подземного газопровода большого диаметра от глубины заложения // Электронный научный журнал «Инженерный вестник дона». 2019. №6, http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_94_6y19_Dmitriev.pdf_6054e8b529.pdf.
4. Соколов В.Г., Огороднова Ю.В., Дмитриев А.В., Масленников А.М. Колебания подземных тонкостенных магистральных трубопроводов с учетом внутреннего давления и продольной силы // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ 2019 № 5 (76), стр. 105–112, https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41653852_73103768.pdf.
5. Бочкарев С.А. Собственные колебания цилиндрической оболочки, частично лежащей на упругом основании // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 406–415. <https://readera.org/read/143163477>.
6. Кузнецова Е.Л., Леоненко Д.В., Старовойтов Э.И. Собственные колебания трехслойных круговых цилиндрических оболочек в упругой среде // МТТ. – 2015. – № 3. – С. 152–160. DOI: 10.3103/S0025654415030127.
7. Леоненко Д.В. Свободные колебания трехслойных цилиндрических оболочек в упругой среде Пастернака // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 4(25). – С. 57–59. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21181550_53586556.pdf.
8. Sofiyev A.H., Keskin S.N., Sofiyev Ali H. (2004) Effects of elastic foundation on the vibration of laminated non-homogeneous orthotropic circular cylindrical shells // Shock Vib. – Vol. 11, no. 2. – P. 89–101. DOI:10.1155/2004/424926.
9. Sofiyev A.H., Hui D., Naciye V.C., Erdem H., Yuan G.Q., Schnack E., Guldal V. (2017) The nonlinear vibration of orthotropic functionally graded cylindrical shells surrounded by an elastic foundation within first order shear deformation theory. Compos. Part B-Eng., 2017, vol. 116, pp. 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.006>.
10. Kim Y.-W. (2015). Free vibration analysis of FGM cylindrical shell partially resting on Pasternak elastic foundation with an oblique edge. Compos. Part B-Eng., vol. 70, pp. 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.024>.
11. Torkaman-Asadi, M.A., Firouz-Abadi, R.D. (2016). Free vibration analysis of cylindrical shells partially resting on an elastic foundation. Meccanica 51, 1113–1125 <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0264-3>.
12. Khalifa M.A. (2016). Natural frequencies and mode shapes of variable thickness elastic cylindrical shells resting on a Pasternak foundation // J. Vib. Control. – Vol. 22, no. 1. – P. 37–50. <https://doi.org/10.1177/1077546314528229>.

13. D.N. Palival, R.K. Pandej, T. Natx. (1996). Free vibrations of circular cylindrical shell on Winkler and Pasternak foundations Author links open overlay panel. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(95\)00010-0](https://doi.org/10.1016/0308-0161(95)00010-0).
14. Сафаров И.И., Ахмедов М.Ш., Умаров А.О. Собственные линейные колебания цилиндрической оболочки в упругой среде // Вестник пермского университета. 2015 вып. 3(30) С. 40–45.
15. Салиева О.К., Шарипова Н.Р. Собственные крутильные колебания цилиндрической оболочки в упругой среде // Universum: технические науки. 2019. №12–1 (69). <https://cyberleninka.ru/article/n/sobstvennye-krutilnye-kolebaniya-tsilindricheskoj-obolochki-v-uprugoy-srede>.
16. Соколов В.Г. О демпфирующем влиянии воды на свободные колебания морских глубоководных трубопроводов // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 3 (24) С. 39–41, https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15620491_54869210.pdf.
17. Галеркин Б.Г., Перельман Я.И. Напряжение и перемещения в круговом цилиндрическом трубопроводе // Известия ВНИИТ. 1940. Т. 27. С. 160–192.
18. Киселев В.А. Строительная механика. Специальный курс: Динамика и устойчивость сооружений. Изд. 3, исп. и доп. – М: Стройиздат, 1980 – с. 616.
19. Челомей В.Н. (пред.) / Под ред. В.В. Болотина. Колебания линейных систем – М.: Машиностроение, 1978 – Т. 1., 352 с.
20. Филин А. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Том 3. Динамика и устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, Гл. ред. физ-мат литературы, 1981. – 480 с.
21. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П., Чемисов Н.И. Исследование вязкости среднесуглинистой почвы // Вестник ФГОУ ВО МГАУ.2011. №2 (47), <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vyazkosti-srednesuglinistoy-pochvy>.
22. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. «Здания и сооружения на крайнем севере» – Ленинград: Госстройиздат, 1963 – с. 492.
23. Воларович М.П., Кулаков Н.Н., Романский А.Н. Исследования пластично-вязких свойств торфяной массы // Известия Академии наук СССР. VII серия. Отделение математических и естественных наук. 1935. вып.10, С. 1371–1383.
24. Боровков В.С., Волынов М.А., Маркова И.М., Суйкова Н.В. Влияние физико-механических свойств донных грунтов на русловой процесс // Вестник МГСУ. 2012 №9, С. 75–82.

Dmitriev Andrey Viktorovich

Tyumen industrial university, Tyumen, Russia
E-mail: dandid@mail.ru

Sokolov Vladimir Grigoryevich

Tyumen industrial university, Tyumen, Russia
E-mail: sokolovvg@tyuiu.ru

Dynamic calculation of an underground thin-walled pipeline taking into account the influence of a damper

Abstract. The problem of finding the natural frequencies of thin-walled underground pipelines with the strength of resistance of the medium (damper), is based on the use polubeskonechnogo theory of cylindrical shells average bending Vlasov-Novozhilov, in which bending moments in the longitudinal direction are not taken into account in view of their smallness compared to the moments acting in the transverse direction. The solution to this approach is a homogeneous fourth-order differential equation that satisfies the boundary conditions of hinge attachment at each end. This equation includes the parameters of the length, internal working pressure, thinness of the pipeline, as well as the values of the coefficient of elastic resistance of the soil, the attached mass of the soil, the longitudinal compressive force and the resistance force of the medium (damper). After performing mathematical operations on this equation, a system of separable linear homogeneous differential equations of the second order with respect to the time function is obtained. The solution of such a system at $m = 1$, allows you to determine the shape of free oscillations with a non-deformable cross-section contour taking into account the damper, for $m = 2$, the shape of free oscillations of the damped shell for 2 half-waves in the cross section, $m = 3$ for three half-waves.

The relationship between soil moisture and the coefficient of dynamic viscosity, as well as the modulus of soil elasticity, which in turn affects the coefficient of elastic resistance of the damped cylindrical shell, is established. Based on the calculation data from the derived formulas, it is established that if the damping coefficient is greater than the natural frequency, the movement will not be oscillatory, that is, the mass can once pass through the equilibrium position and return to it from the other side (aperiodic oscillations). If the damping coefficient is less than the natural frequency, then free oscillations can be conditionally called periodic or damped periodic.

Keywords: cylindrical shell; natural frequency of vibrations; the resistance force of the medium; the damper; the coefficient of elastic resistance of the soil; the parameter of thinness; the length of the pipeline; the attached mass of the soil