

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

2021, №2, Том 13 / 2021, No 2, Vol 13 <https://esj.today/issue-2-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/18SAVN221.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Соколов В.Г., Разов И.О. Свободные колебания тонкостенного криволинейного участка магистрального газопровода при наземной прокладке // Вестник Евразийской науки, 2021 №2, <https://esj.today/PDF/18SAVN221.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Sokolov V.G., Razov I.O. (2021). Free vibrations of a thin-walled curved section of a main gas pipeline during ground laying. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(13). Available at: <https://esj.today/PDF/18SAVN221.pdf> (in Russian)

УДК 624.074.433

ГРНТИ 73.39.31; 67.11.39

Соколов Владимир Григорьевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Профессор кафедры «Строительной механики»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: sokolovvg@tyuiu.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=524484

Разов Игорь Олегович

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Доцент кафедры «Строительной механики»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: razovio@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4829-7080>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=816920

**Свободные колебания тонкостенного
криволинейного участка магистрального газопровода
при наземной прокладке**

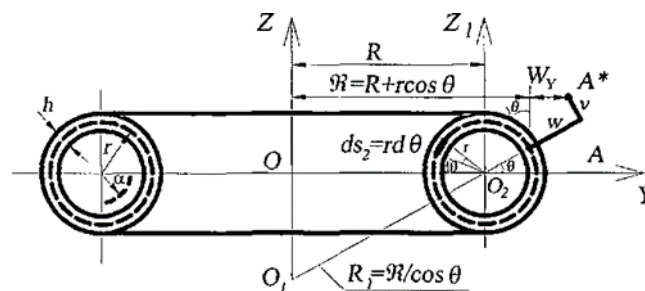
Аннотация. Представленная работа является продолжением цикла работ связанных с вопросом колебаний тонкостенных оболочек на упругом основании. В данной работе решается задача о свободных колебаниях криволинейного тонкостенного магистрального газопровода большого диаметра (в виде тороидальной оболочки) при наземной прокладке. Оболочка подвержена действию стационарного внутреннего рабочего давления, и радиального давления грунта на внешнюю поверхность трубы, которое распределено по узкой контактной поверхности. Влияние грунта на внешнюю стенку трубы описывается импульсной функцией. Для элемента срединной поверхности тороидальной оболочки получено разрешающее уравнение на основании геометрически нелинейной теории тороидальных оболочек среднего изгиба, с учетом допущений полубезмоментной теории оболочек В.З. Власова и В.В. Новожилова. Для детального анализа полученной системы однородных линейных алгебраических уравнений представим систему в матричной форме. После математических преобразований приходим к выводу, что поставленная задача определения частот собственных колебаний заданного криволинейного участка трубопровода по оболочечным формам колебаний сводится к задаче на собственные значения матрицы коэффициентов системы однородных линейных алгебраических уравнений. Полученные решения позволяют определить частоты и формы свободных колебаний криволинейного участка газопровода в

зависимости от значений внутреннего рабочего давления, коэффициента постели грунта, и геометрических характеристик. Данная работа является частью диссертационного исследования по вопросу динамического расчета цилиндрических и тороидальных оболочек в среде «труба-грунт».

Ключевые слова: свободные колебания магистрального газопровода; влияние упругого основания грунта; динамическая устойчивость; частота свободных колебаний; контактная задача; газопровод на упругом основании; динамический расчет; тороидальная оболочка

Данная работа является продолжением цикла работ, связанных с вопросом определения частот свободных колебаний тонкостенных трубопроводов большого диаметра на упругом основании. Актуальность представленной работы заключается в развитии методов динамического расчета тонкостенных элементов подверженных действию внешних стационарных и нестационарных воздействий. Ранее в работах [1–3] были получены решения в аналитическом виде, по определению частот и форм свободных колебаний наземных тонкостенных прямолинейных газопроводов большого диаметра. Представленные решения позволяют более точно определить частоты свободных колебаний тонкостенных трубопроводов, что позволит произвести более точную отстройку системы от резонанса. Область применения может быть весьма разнообразной, например, топливные трубки летательных аппаратов, трубки охлаждения атомно-энергетических установок, а также, как и исследовано в данной работе, тонкостенные газопроводы большого диаметра. Рассматривается трубопровод, взаимодействующий с грунтом по узкой полосе. Для учета влияния грунта на частоты свободных колебаний была решена контактная задача [4]¹. В настоящей же работе речь пойдет про криволинейные участки газопроводов, уложенные на грунт, где будет получено решения по определению частот свободных колебаний криволинейного трубопровода-тороидальной оболочки с учетом влияния упругого основания грунта. Для получения окончательного решения за основу были взяты дифференциальные уравнения движения (в перемещениях) тороидальной оболочки, полученные в работах [5] для наземного трубопровода, без учета влияния грунта. Уникальность данной работы заключается в том, что в доступной, открытой литературы не было найдено решений учитывающих влияние грунта на динамические характеристики тонкостенных трубопроводов большого диаметра, как по стержневой теории, так и по теории цилиндрических оболочек. Вопрос динамической устойчивости трубопроводов исследуется не только в РФ, но и зарубежом [6–8], однако в основном с позиции стержневой теории и для прямолинейных участков.

Рассматривается расчетная модель трубопровода в виде тороидальной оболочки.



¹ Разов И.О. Аналитические методы расчета динамических характеристик прямолинейных тонкостенных трубопроводов большого диаметра при наземной прокладке: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Разов Игорь Олегович. – Тюмень, 2015. – 130 с.

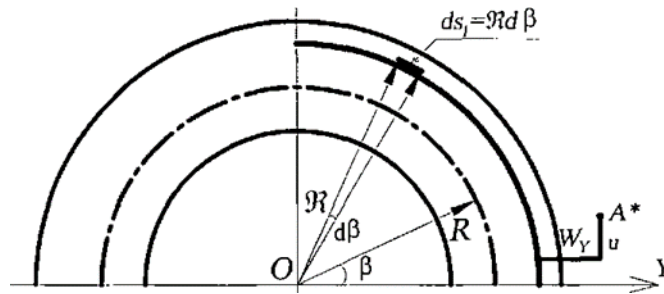


Рисунок 1. Криволинейный участок трубопровода в тороидальных координатах: где $R_{кр}$ радиус продольной оси, проходящей через центр тяжести ее поперечных сечений, h – толщина оболочки. Величина отношения $\frac{h}{R}$ считается малой, что позволяет использовать соотношения теории оболочек, основанной на гипотезах Кирхгофа-Лява. Закрепление краев оболочки – шарнирное (разработано авторами)

На рисунке 1 изображен участок тороидальной оболочки со срединной поверхностью в тороидальных криволинейных координатах β, Θ , где β означает центральный угол тора, а Θ – угол в поперечном сечении оболочки ($0 \leq \Theta \leq 2\pi$), угол β изменяется в пределах $0 \leq \beta \leq \pi$.

Используем полную систему дифференциальных уравнений в перемещениях, криволинейного участка газопровода, полученную в работах [9]² в тороидальной системе координат $[\beta, \Theta]$ которая в отличие от ранее опубликованных работ учитывает влияния нового слагаемого – влияния упругого основания грунта имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial^3 u}{\partial \beta \partial \theta^2} \cos \theta + \frac{r^3}{R^3} \frac{\partial^3 u}{\partial \beta^3} - \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial u}{\partial \beta} \sin \theta \right) + \frac{r^3}{R^3} \frac{\partial^2 W_y}{\partial \beta^2} + \\ & \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (W_y \cos \theta) - W_y \sin \theta \right] + \frac{h^2}{r^2 12(1-\nu^2)} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \left(\frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial \theta^2} + \mathcal{G} \right) = \end{aligned} \quad (1)$$

$$= -\frac{r^2}{EhR} \frac{\partial X_1^*}{\partial \beta} + \frac{R}{Eh} \frac{\partial X_2^*}{\partial \theta} + \frac{r}{Eh} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial \theta^2} X_3^* + \frac{\partial X_3^*}{\partial \theta} \right),$$

где u, v, w – компоненты перемещения срединной поверхности оболочки, отнесенные к радиусу r ; E – модуль упругости материала оболочки; ν – коэффициент Пуассона; r – радиус срединной поверхности оболочки; R – радиус изгиба продольной оси; h_v – параметр

относительной толщины оболочки, $h_v = \frac{h}{R\sqrt{12(1-\nu^2)}}$, X_i^* – составляющие сил инерции:

тангенциальные составляющие сил инерции по координатам β и θ

$$X_1^* = -rh\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad X_2^* = -rh\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \quad (2)$$

нормальная составляющая с учетом влияния внутреннего рабочего давления p и упругого отпора грунта:

$$X_3^* = -rh\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + p_0 - \Psi(\theta)w(\xi, \theta, t), \quad (3)$$

² Соколов, В.Г. Колебания, статическая и динамическая устойчивость трубопроводов большого диаметра: дис. ... доктор. техн. наук: 05.23.17 / Соколов Владимир Григорьевич. – Спб., 2011. – 314 с.

где ρ – плотность материала оболочки, p_0 – внутренне постоянное гидростатическое давление, $\Psi(\theta)$ – радиальное давление грунта на внешнюю поверхность трубы, $m = 1, 2, 3, \dots$

Решение по определению радиального давления грунта на внешнюю поверхность трубы было получено в работе [4]¹

$$\Psi(\theta) = \frac{kr}{\pi} \left[\frac{\phi_0^3}{3} + \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m \cos m\theta \right]; \quad (4)$$

$$\beta_m = (-1)^m m^{-3} [2\phi_m \cos \phi_m - (\phi_m^2 - 2) \sin \phi_m]; \quad \phi_m = m\phi_0,$$

где ϕ_0 – центральный угол вдавливания, k – коэффициент постели грунта [$\text{H}/\text{м}^2$].

Проведем преобразования выражения (1) с учетом (2), (3), (4) получим:

$$\begin{aligned} & \frac{r^3}{R^3} \frac{\partial^3 u}{\partial \beta^3} + \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial^3 u}{\partial \theta^2 \partial \beta} \cos \theta - \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial u}{\partial \beta} \cos \theta - \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \beta \partial \theta} \sin \theta + \frac{r^3}{R^3} \frac{\partial^2 W_y}{\partial \beta^2} + \frac{r^2}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (W_y \cos \theta) - W_y \sin \theta \right] + \\ & h_v^2 \frac{\partial^5 g}{\partial \theta^5} + h_v^2 \frac{\partial^3 g}{\partial \theta^3} - \frac{r^2}{EhR} r h \rho \frac{\partial^3 u}{\partial \beta \partial t^2} + \frac{r}{Eh} r h \rho \frac{\partial^3 v}{\partial \theta \partial t^2} + \frac{r}{Eh} [r h \rho \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} - \frac{\partial^3 g}{\partial \theta^3} p_0 + \\ & + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \Psi(\theta) w(\xi, \theta, t)] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных с пятью неизвестными величинами u , v , w , W_y , g . Неизвестные определяем, учитывая допущения полубезмоментной теории:

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} + w = 0, \quad \frac{r}{R} \frac{\partial v}{\partial \beta} + \frac{\partial u}{\partial \theta} = 0, \quad g = \frac{\partial w}{\partial \theta} - v, \quad W_y = w \cos \theta - v \sin \theta. \quad (6)$$

Подставим (6) в (5) и преобразуем, далее получим полную систему уравнений, решение которой позволяет определить частоты и формы свободных колебаний криволинейного участка газопровода.

В расчетах принят шарнирный тип закрепления оболочки. Для решения системы уравнений (5), (6) представим нормальную составляющую перемещения возникающую при изгибных колебаниях тороидальной оболочки $w(\beta, \theta, t)$ в виде:

$$w \Big|_{\beta=0}^{\beta=\pi} = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2} \Big|_{\beta=0}^{\beta=\pi} = 0, \quad (7)$$

а также удовлетворяющих условиям цикличности по окружной координате θ :

$$w(\beta, \theta, t) = \sum_m \sum_n f(t) b_m \cos(m\theta) \sin(n\beta), \quad (8)$$

где $f(t)$ – функция времени t , $b_m = \text{const}$, m, n – волновые числа, определяющие формы колебаний оболочки в окружном и продольном направлениях соответственно.

Остальные составляющие перемещения и угол поворота найдем из допущений полубезмоментной теории (6) и (8):

$$v = -\frac{1}{m} \varphi(t) b_m \sin m\theta \sin n\beta, \quad u = -\frac{r}{R} \frac{n}{m^2} \varphi(t) b_m \cos m\theta \cos n\beta, \quad (9)$$

$$g = -\frac{m^2 - 1}{m} \varphi(t) b_m \sin m\theta \sin n\beta \quad W_y = \frac{1}{2} (b_{m+1} \frac{m+2}{m+1} + b_{m-1} \frac{m-2}{m-1}) \cos m\theta \sin n\beta.$$

Вычислим необходимые для решения частные производные по β и θ , и получим разрешающее уравнение относительно неизвестных амплитудных значений b_m , содержащее функцию $\varphi(t)$ и ее вторую производную по времени $\varphi''(t)$:

$$\varphi(t) \left\{ \mu_0^4 h_v^2 n^4 b_m \sin m\theta - \frac{\mu_0^3}{2} h_v m^2 [b_m (\sin(m-1)\theta + \sin(m+1)\theta) + (b_{m+1} \frac{m+2}{m+1} + b_{m-1} \frac{m-2}{m-1}) \sin m\theta] + \right.$$

$$+ \frac{\mu_0^4}{4} m^3 (b_{m+1} \frac{m+2}{m+1} + b_{m-1} \frac{m-2}{m-1}) \cdot [(m-2) \sin(m-1)\theta + (m+2) \sin(m+1)\theta] + \quad (10)$$

$$+ m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) \cdot b_m \sin m\theta + k^* m^4 b_m \sin m\theta \left. \right\} +$$

$$+ [rh\rho^* (\mu_0^2 h_v^2 n^2 + m^4 + m^2)] b_m \sin m\theta \varphi''(t) = 0$$

где $G = \frac{R}{Eh h_v^2}$, $\mu_0 = \frac{r}{R h_v}$, $\rho^* = G\rho$, $k^* = \frac{R^2 k}{\pi E h h_v^2} z_m$ – параметр упругого основания (методика определения коэффициента z_m приведена в работе [4]¹).

Полагая, что свободные изгибные колебания являются гармоническими с круговой частотой ω :

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

Подставив значения функции времени $\varphi(t)$ и ее производную $\varphi''(t)$ в уравнение (12) и приравняем множители при $\sin \omega_{mn} t$ получим систему трансцендентных уравнений для определения частот ω_{mn} :

$$\left\{ \mu_0^4 h_v^2 n^4 b_m \sin m\theta - \frac{\mu_0^3}{2} h_v m^2 [b_m (\sin(m-1)\theta + \sin(m+1)\theta) + (b_{m+1} \frac{m+2}{m+1} + b_{m-1} \frac{m-2}{m-1}) \sin m\theta] + \right.$$

$$+ \frac{\mu_0^4}{4} m^3 (b_{m+1} \frac{m+2}{m+1} + b_{m-1} \frac{m-2}{m-1}) \cdot [(m-2) \sin(m-1)\theta + (m+2) \sin(m+1)\theta] + \quad (11)$$

$$+ m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) \cdot b_m \sin m\theta + k^* m^4 b_m \sin m\theta \left. \right\} -$$

$$- [rh\rho^* (\mu_0^2 h_v^2 n^2 + m^4 + m^2)] b_m \omega_{mn}^2 = 0$$

Далее приравняем коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях $\sin m\theta$ при $m = 1, 2, 3, \dots$. Приведем систему однородных линейных алгебраических уравнений к компактному виду:

$$a_{m,m-2} b_{m-2} + a_{m,m-1} b_{m-1} + a_{m,m} b_m + a_{m,m+1} b_{m+1} + a_{m,m+2} b_{m+2} = 0, \quad (12)$$

Для подробного анализа полученной системы однородных линейных алгебраических уравнений (12) представим её в матричной форме:

$$AB = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{75} & a_{76} & a_{77} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{pp-2} & a_{pp-1} & a_{pp} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_{n,1} \\ b_{n,2} \\ b_{n,3} \\ b_{n,4} \\ b_{n,5} \\ b_{n,6} \\ b_{n,7} \\ \dots \\ b_{n,p} \end{pmatrix} = 0. \quad (13)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, s, b_{mn} \neq 0,$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$; $m-1 > 0$; $m-2 > 0$, а коэффициент $a_{i,j}$ определяется выражениями:

$$\begin{aligned} a_{m,m} &= A_{mn} - B_{mn} \omega_{mn}^2, \\ a_{m,m\pm 1} &= -\mu^3 n^2 h_v \frac{m^2(m^2 \pm m + 1)}{(m \pm 1)}, \\ a_{m,m\pm 2} &= \mu_0^2 m^3 \frac{(m \pm 3)(m \mp 1)}{4(m \pm 2)}, \\ A_{mn} &= \mu_0^4 n^4 h_v^2 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p_0^*) + k^* m^4 + 0,5 \mu_0^2 m^2(m^2 + 1), \\ B_{mn} &= \rho^* r h (\mu_0^2 n^2 h_v^2 + m^4 + m^2). \end{aligned} \quad (14)$$

где $k^* = \frac{kr^2}{\pi E h h_v^2} z_m$; $\rho^* = \rho \frac{r}{E h h_v^2}$ $p_0^* = p_0 \frac{r}{E h h_v^2}$, E – модуль упругости материала оболочки, МПа, k – коэффициент постели грунта, по модели Фусса-Винклера, остальные коэффициенты являются безразмерными.

Используя тот же математический аппарат, что и в работе² усеченный определитель матрица A после всех преобразований имеет вид:

$$|A - \lambda E| = \begin{vmatrix} d_{1,1} - \lambda & d_{1,2} & d_{1,3} \\ d_{2,1} & d_{2,2} - \lambda & d_{2,3} \\ d_{3,1} & d_{3,2} & d_{3,3} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (15)$$

где приняты обозначения:

$$\begin{aligned} \lambda &= \omega^2, & d_{m,m} &= \frac{A_{mn}}{B_{mn}} \\ d_{m,m\pm 1} &= \frac{a_{m,m\pm 1}}{B_{mn}} & d_{m,m\pm 2} &= \frac{a_{m,m\pm 2}}{B_{mn}} \end{aligned} \quad (16)$$

Коэффициенты $A_{mn}, B_{mn}, a_{m,m\pm 1}, a_{m,m\pm 2}$ определяются по формулам (14).

После раскрытия определителя (15), получаем характеристическое уравнение степени, где λ_i , является собственным значением, позволяющий определить квадрат частот свободных колебаний рассматриваемого участка газопровода.

Если взять матрицу 1-го порядка при волновом числе $m = 1$, то из (15) получим линейное характеристическое уравнение относительно λ :

$$d_{1,1} - \lambda = 0. \tag{17}$$

Рассматривая матрицу 2-го порядка при волновых числах $m = 1$ и 2, имеем из (15):

$$\begin{vmatrix} d_{1,1} - \lambda & d_{1,2} \\ d_{2,1} & d_{2,2} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \tag{18}$$

Для матрицы 3-го порядка, получаем кубическое характеристическое уравнение матрицы A , соответствующее формам колебаний при $m = 1, 2, 3$:

$$\lambda^3 - I_1 \lambda^2 + I_2 \lambda - I_3 = 0, \tag{19}$$

В качестве примера расчета был выбран участок трубопровода 1420x14 мм ($h/R = 1/50$), длиной $L = 10r$, из стали (например, К65 (X80)), $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,3, плотность материала трубы – 7,85 г/см³. Труба-оболочка подвержена действию внутреннего рабочего давления p , параметра продольной сжимающей силы P , и упругого основания грунта k . Произведем расчет минимальных частот свободных колебаний участка трубопровода с различными значениями коэффициента постели грунта и соотношений радиуса поперечного сечения и радиуса кривизны в продольном направлении $r/R = 1/10, 1/50, 1/100$. Полученные значения по вышеуказанным расчетным формулам сведены в виде таблицы 1 и иллюстрированы в виде графиков на рисунке 1.

Таблица 1

Определение значений минимальных частот свободных колебаний в зависимости от изменения значений коэффициента постели грунта k и соотношений радиуса поперечного сечения трубы k к радиусу продольного изгиба

h/r = 1/50; v = 0,3; L/R = 10, p = 2 МПа; r/R = 1/10								
w_{min}	2,72	2,73	2,75	2,79	2,86	2,93	3	3,07
$k, \text{кг/см}^3$	0	0,1	0,5	1	2	3	4	5
h/r = 1/50; v = 0,3; L/R = 10, p = 2 МПа; r/R = 1/50								
w_{min}	0,53	0,57	0,699	0,832	1,049	1,228	1,384	1,525
$k, \text{кг/см}^3$	0	0,1	0,5	1	2	3	4	5
h/r = 1/50; v = 0,3; L/R = 10, p = 2 МПа; r/R = 1/100								
w_{min}	0,266	0,33	0,524	0,693	0,943	1,138	1,305	1,453
$k, \text{кг/см}^3$	0	0,1	0,5	1	2	3	4	5

В случае рассмотрения частного случая криволинейной трубы – тора без учета упругого основания $k = 0$, то полученные результаты хорошо согласуются с полученными частотами по формуле Камерштейна [10] для шарнирно опертой круговой арки полученной по стержневой теории:

$$\omega_i = \frac{K_i}{R^2 \varphi_i^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \tag{20}$$

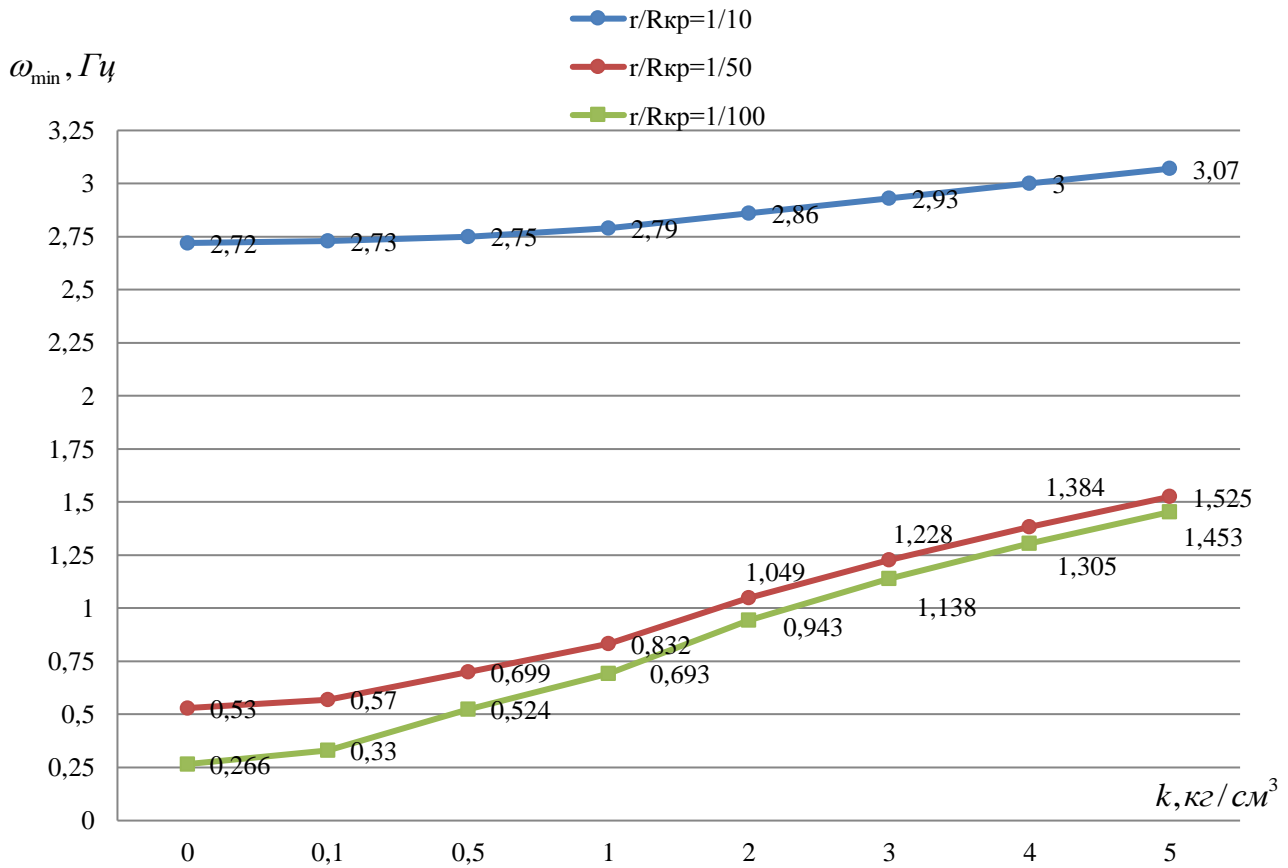


Рисунок 2. Определение значений минимальных частот свободных колебаний в зависимости от изменения значений коэффициента постели грунта k и соотношений радиуса поперечного сечения трубы к радиусу продольного изгиба (разработано авторами)

где R – радиус оси криволинейного участка, φ – центральный угол в радианах, m – погонная масса трубы; K_i – коэффициент, зависящий от условий закрепления концов трубы и от формы колебаний. Так для криволинейного шарнирно опертого участка тонкостенного трубопровода с двумя полуволнами в продольном направлении K_i определяется по формуле:

$$K_2 = \frac{4\pi^2 - \varphi^2}{\sqrt{1 + \frac{3\varphi^2}{4\pi^2}}} \quad (21)$$

Заключение

Выражения (14–19) позволяют определить квадраты круговых частот изгибных колебаний ω_{mn}^2 заданного криволинейного участка газопровода по формам колебаний при $m = 1, 2, 3$. Решение позволяет учесть в себе такие параметры как: внутреннее рабочее давление, параметр продольной сжимающей силы, геометрические характеристики, а также влияние упругого основания грунта на частоты и формы свободных колебаний. Более детальный анализ полученных решений будет произведен в последующих работах.

Областью применения полученных решений является проектирование и эксплуатация. На стадии проектирования можно подобрать режим работы компрессорной установки и

отстроить режим работы с линейной частью. В части эксплуатации следует отметить то, что трубопроводные системы устаревают, появляются новые более производительные компрессорные установки с другими режимами работы и вынужденной частотой колебаний. Замена старых установок на новые при неправильной отстройке может привести к нежелательным последствиям для линейной части, а именно привести к резонансу и как следствие увеличение амплитуды колебаний, усталостному разрушению металла и катастрофе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов, В.Г. Свободные колебания наземных газопроводов, обжатых продольной силой, с учетом упругого основания грунта / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 1(36). – С. 29–32.
2. Соколов, В.Г. Свободные колебания и статическая устойчивость нефтепровода большого диаметра с учетом потока жидкости, продольной сжимающей силы и упругого основания / В.Г. Соколов, И.О. Разов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №1. – С. 49–53.
3. Разов, И.О. Исследования свободных колебаний наземных тонкостенных газопроводов большого диаметра / Разов, И.О. // Вестник гражданских инженеров. 2013. №4 – С. 100–104.
4. Разов И.О. Напряжения и перемещения на контактной поверхности наземного трубопровода большого диаметра // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 105–108.
5. Соколов В.Г. Свободные колебания криволинейного трубопровода, содержащего поток жидкости / Строительство трубопроводов. 1981. № 6. – С. 25–26.
6. Djondjorov, P. Dynamic stability of fluid conveying cantilevered pipes on elastic foundations / Djondjorov, P., Vassilev, V. and Dzhupanov // Journal of Sound and Vibration. – 2001. Vol. 247(3) – P. 537–546.
7. Djondjorov, P. Dynamic stability of pipes partly resting on Winkler foundation / Djondjorov, P. // Journal of Theoretical and Applied Mechanics – 2001. Vol. 31(3) – P. 101–112.
8. Doare, O. Local and global instability of fluid–conveying pipes on elastic foundations / O. Doare, E. de Langre // Journal of Fluids and Structures. – 2002. Vol.16 – P. 1–14.
9. Ильин В.П., Соколов В.Г. Собственные колебания тороидальной оболочки со стационарным потоком жидкости // Межвуз. Тематический сборник трудов: «Исследования по механике строительных конструкций и материалов». – СПб ГАСУ. – Санкт-Петербург, 2000. – С. 42–49.
10. Камерштейн А.Г. Расчет трубопроводов на прочность / А.Г. Камерштейн, В.В. Рождественский, М.Н. Ручимский // ГНТИН и ГТЛ. Москва. – 1963. – 424 с.

Sokolov Vladimir Grigor'evich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia

E-mail: sokolovvg@tyuiu.ru

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

Razov Igor' Olegovich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia

E-mail: razovio@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4829-7080>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=816920

Free vibrations of a thin-walled curved section of a main gas pipeline during ground laying

Abstract. The presented work is a continuation of the cycle of works related to the issue of vibrations of thin-walled shells on an elastic foundation. This work solves the problem of free vibrations of a curvilinear thin-walled main gas pipeline of large diameter (in the form of a toroidal shell) during ground laying. The shell is subjected to the action of a stationary internal working pressure, and radial soil pressure on the outer surface of the pipe, which is distributed over a narrow contact surface. The effect of soil on the outer wall of the pipe is described by an impulse function. For an element of the middle surface of a toroidal shell, a resolving equation is obtained based on the geometrically nonlinear theory of toroidal shells of mean bending, taking into account the assumptions of the semi-momentless theory of shells by V.Z. Vlasov and V.V. Novozhilov. For a detailed analysis of the resulting system of homogeneous linear algebraic equations, we represent the system in matrix form. After mathematical transformations, we come to the conclusion that the posed problem of determining the frequencies of natural vibrations of a given curvilinear section of a pipeline using shell vibration modes is reduced to a problem for the eigenvalues of the matrix of coefficients of a system of homogeneous linear algebraic equations. The solutions obtained make it possible to determine the frequencies and forms of free vibrations of the curvilinear section of the gas pipeline depending on the values of the internal working pressure, the soil bed coefficient, and geometric characteristics. This work is part of a dissertation research on the dynamic calculation of cylindrical and toroidal shells in a pipe-soil environment.

Keywords: free vibrations of a main gas pipeline; the influence of an elastic soil foundation; dynamic stability; frequency of free vibrations; contact problem; gas pipeline on an elastic foundation; dynamic calculation; toroidal shell