

УДК 624.074.433

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ НАЗЕМНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

И. О. РАЗОВ

Тюменский индустриальный университет
Тюмень, Россия

UDK 624.074.433

INVESTIGATION OF FREQUENCIES OF FREE OSCILLATIONS OF SURFACE AND UNDERGROUND THIN-WALLED PIPELINES OF LARGE DIAMETER FROM THE POINT OF VIEW OF THE THEORY OF CYLINDRICAL SHELLS

I. O. RAZOV

Аннотация. Производится сравнение и сопоставление частот свободных колебаний, определенных по полубезмоментной теории цилиндрических оболочек среднего изгиба. На основании уравнения движения элемента срединной поверхности цилиндрической оболочки, записанного в усилиях, а затем в перемещениях, получена система уравнений, позволяющая определить частоты свободных колебаний тонкостенного трубопровода при различных значениях волновых чисел m и n , с учетом совместного влияния внутреннего рабочего давления, параметра продольной сжимающей силы, влияния грунта и различных геометрических характеристик. В конечном решении учтены инерционные составляющие материала оболочки в продольном, окружном и радиальном направлениях. Определены частоты свободных колебаний для наземного и подземного газопровода, исследовано влияние грунта на значения частотных характеристик. Результаты расчетов сведены в таблицы и иллюстрированы в виде графиков на рисунках.

Ключевые слова: газопровод, продольная сила, упругое основание грунта, свободные колебания, резонанс.

Abstract. In this paper, we compare and compare the frequencies of free oscillations determined by the semi-momentum theory of cylindrical shells of average bending. Based on the equation of motion of an element of the middle surface of a cylindrical shell, written in forces, and then in displacements, a system of equations was obtained that makes it possible to determine the frequencies of free vibrations of a thin-walled pipeline for various values of the wave numbers m and n , taking into account the joint influence of the internal working pressure, the parameter of the longitudinal compressive force, ground influence and various geometric characteristics. The final solution takes into account the inertial components of the shell material in the longitudinal, circumferential and radial directions. The frequencies of free oscillations for the ground and underground gas pipelines are determined, the influence of soil on the values of frequency characteristics is studied. The calculation results are summarized in tables and illustrated in the form of graphs in the figures.

Keywords: gas pipeline, longitudinal force, elastic foundation of the soil, free oscillations, resonance.

Сеть магистральных трубопроводов с каждым годом расширяется все больше и больше в виду возросшей потребности в энергоносителях как самой

Российской Федерации, так и стран Европы и Азии. Наряду с увеличением километража трасс трубопроводов, увеличивается и их диаметр в целях повышения эффективности и пропускной способности. В настоящее время применяются трубы диаметром больше 1000 и 1420 мм, а на некоторых участках 1720 мм. Такие трубопроводы следует рассчитывать не по классической стержневой теории, а по теории цилиндрических оболочек. Динамическому расчету в открытой литературе посвящено достаточно большое количество работ [1–13], однако с позиции теории оболочек вопрос колебаний трубопроводов раскрыт недостаточно полно. Такой подход позволяет учесть влияние внутреннего рабочего давления на частоты свободных колебаний, а также деформацию поперечного сечения (эффект кармана).

Запишем решение, полученное для наземного трубопровода (рис. 1) [7], позволяющее исследовать влияние внутреннего рабочего давления, параметра продольной сжимающей силы, геометрических характеристик и влияние упругого основания грунта на частоты свободных колебаний наземного газопровода конечной длины L :

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

где P – безразмерный параметр продольной сжимающей силы, $P = \frac{F}{F_9}$;

F_9 – эйлерова сила, $F_9 = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$; E – модуль упругости материала оболочки;

I – осевой момент инерции; $h_{\nu} = \frac{h}{R\sqrt{12(1-\nu^2)}}$; R – радиус срединной

поверхности; $\tilde{\lambda}_n = \frac{n\pi R}{L\sqrt{h_{\nu}}}$; m – волновое число в окружном направлении;

n – волновое число в продольном направлении; p^* – параметр внутреннего

рабочего давления, $p^* = p \frac{R}{Ehh_{\nu}^2}$; ρ^* – параметр плотности материала оболочки

(трубы), $\rho^* = \rho \frac{R}{Ehh_{\nu}^2}$; k^* – коэффициент, учитывающий влияние грунта на

наземный трубопровод, $k^* = \frac{R^2 k}{\pi Ehh_{\nu}^2} z_m$; z_m – коэффициент, определяемый по [2].

Для исследования значений собственных частот подземного трубопровода (рис. 2) примем решения, приведенные в [6, 7].

Погонная присоединенная масса грунта, вовлекаемая газопроводом при вертикальных упругих колебаниях, определяется выражением

$$\mu_{zpj} = k_{zpj} \mu_{zp},$$

где k_{zpj} – поправочный коэффициент, зависящий от номера тона колебаний; j – номер тона колебаний; μ_{zp} – присоединенная масса грунта на единицу длины трубопровода,

$$\mu_{zp} = \frac{\gamma_{zp} \pi d^2}{4}; \quad (2)$$

γ_{zp} – плотность грунта, окружающего газопровод; d – внешний диаметр газопровода.

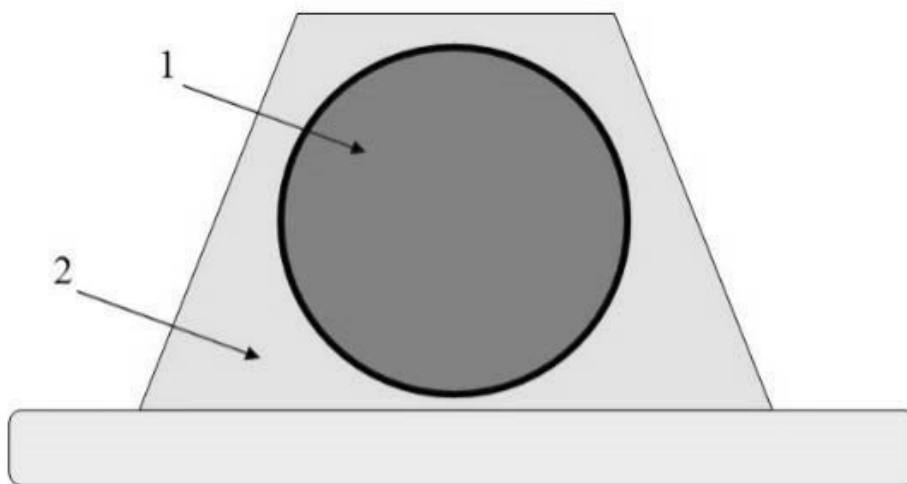


Рис. 1. Наземный трубопровод: 1 – трубопровод; 2 – грунтовая подушка и внешняя обсыпка грунтом

Для исследования частот свободных колебаний трубопроводов примем характеристическое уравнение матрицы A [12, 13]:

$$\begin{vmatrix} d_{11} - \lambda & d_{12} & d_{13} & d_{14} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} - \lambda & d_{23} & d_{24} & \dots & d_{2n} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} - \lambda & d_{34} & \dots & d_{3n} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} - \lambda & \dots & d_{4n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{p-41} & d_{p-31} & d_{p-21} & d_{p-11} & \dots & d_{pn} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } d_{m,m} = \frac{a_{m,m}}{B_{m,n}}; \quad d_{m,m\pm 1} = \frac{a_{m,m\pm 1}}{B_{m,n}}; \quad d_{m,m\pm 2} = \frac{a_{m,m\pm 2}}{B_{m,n}}; \quad \lambda = \omega^2;$$

$$a_{m,m} = A_{m,n} - B_{m,n} \omega_{nm}^2; \quad (4)$$

$$a_{m,m\pm 1} = -\frac{m^5(m\pm 2)}{2} q_{zp}^* \alpha_1; \quad (5)$$

$$a_{m,m\pm 2} = -\frac{m^4[(m\pm 2)^2 - 1]}{2} q_{zp}^* \alpha_2; \quad (6)$$

$$A_{m,n} = \lambda_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2q_{zp}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2; \quad (7)$$

$$B_{m,n} = \rho^* R h (\lambda_m^2 h_v + m^2 + m^4) + \mu_{bj}^* m^4; \quad (8)$$

$$p^* = p_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}; \quad \rho^* = \rho_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}; \quad \kappa^* = \frac{R^2 \kappa}{Eh \cdot h_v^2}; \quad q_{zp}^* = \frac{\gamma HR}{Eh \cdot h_v^2}; \quad \lambda_n = \frac{n\pi R}{L\sqrt{h_v}};$$

$$\mu_{bj}^* = \mu_{bj} \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}; \quad P = \frac{F}{F_0}.$$

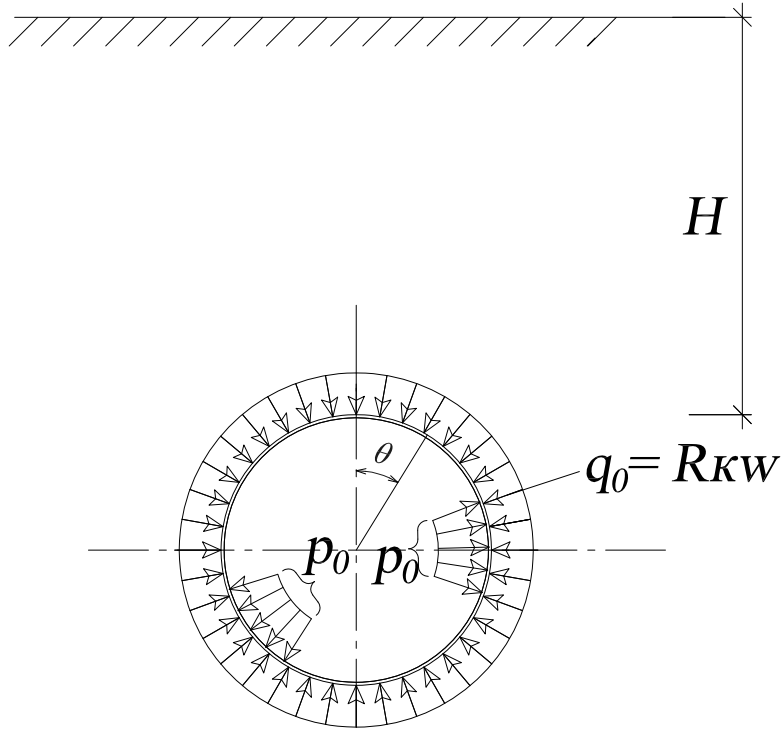


Рис. 2. Радиальный отпор грунта и внутреннее рабочее давление p_0 , действующее на стенку трубы при подземной прокладке глубокого заложения

Рассмотрим однородную изотропную стальную цилиндрическую оболочку, являющуюся участком трубопровода со следующими характеристиками: соотношения толщины стенки h к радиусу $R - 1/50$ (диаметр 1420 мм и толщина стенки 14,2 мм) и параметром длины $L = 10R$. Участок подвержен действию параметра продольной сжимающей силы $P = 0,2$ и внутреннего рабочего давления, изменяющегося в диапазоне от 0 до 7 МПа. Модуль упругости материала стальной трубы $E_{cm} = 2 \cdot 10^5$ МПа. Расчеты выполняются при различных значениях коэффициента постели грунта. Наибольший интерес представляют минимальные частоты, которые реализуются при ω_{21} , что соответствует оболочечной форме колебаний. Рассмотрим не водонасыщенные грунты, в связи с чем демпфером можно пренебречь.

Полученные значения сведены в табл. 1 и 2 и иллюстрированы в виде графиков на рис. 3 и 4.

Табл. 1. Зависимость частот свободных колебаний ω_{21} от различных значений внутреннего рабочего давления p_0 и коэффициента постели грунта при наземной прокладке

$h/R = 1/50; p_0 = 0 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	3,36	11,32	15,66	23,19	33,51	41,32	47,88
$h/R = 1/50; p_0 = 3 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	48,37	49,56	50,73	53,53	58,74	63,53	67,98
$h/R = 1/50; p_0 = 5 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	62,38	63,31	64,23	66,47	70,73	74,75	78,57

Табл. 2. Зависимость частот свободных колебаний ω_{21} от различных значений внутреннего рабочего давления p_0 и коэффициента постели грунта при подземной прокладке на глубине 2 м

$h/R = 1/50; p_0 = 0 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	11,68	22,44	29,51	42,30	60,22	73,91	85,44
$h/R = 1/50; p_0 = 3 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	49,65	53,22	56,56	64,17	77,16	88,27	98,12
$h/R = 1/50; p_0 = 5 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	63,38	66,21	68,93	75,30	86,64	96,66	105,74

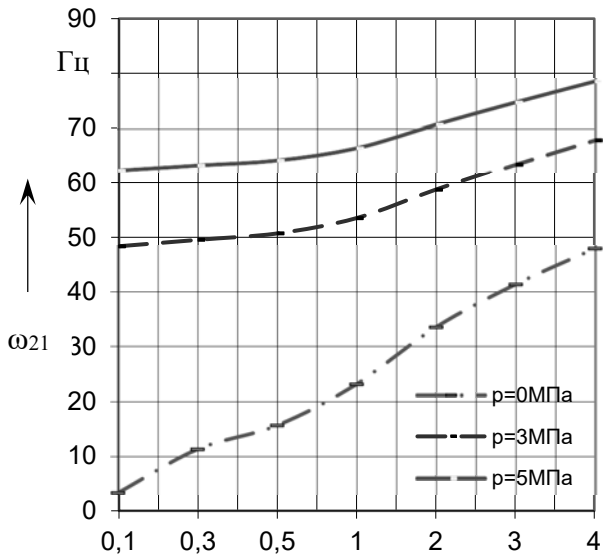


Рис. 3. Зависимость частот свободных колебаний ω_{21} от различных значений внутреннего рабочего давления p_0 и коэффициента постели грунта при наземной прокладке

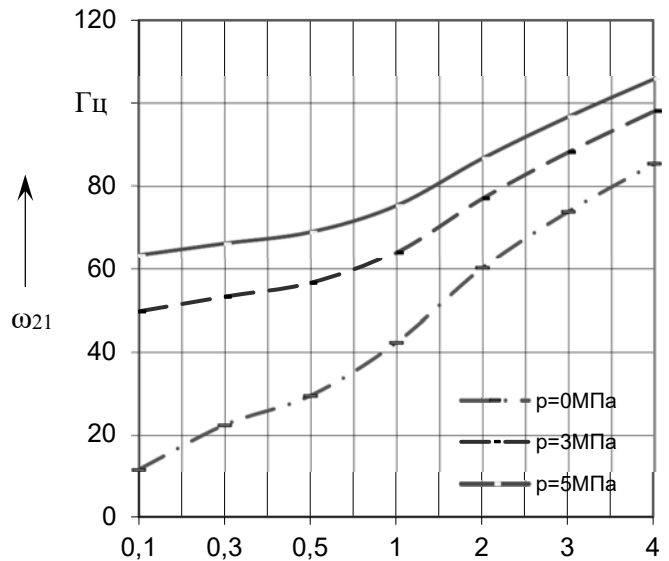


Рис. 4. Зависимость частот свободных колебаний ω_{21} от различных значений внутреннего рабочего давления p_0 и коэффициента постели грунта при подземной прокладке на глубине 2 м

В результате проведенных исследований сделаем следующие **выводы**.

1. Внутреннее рабочее давление увеличивает значения частот свободных колебаний трубопровода, например, при $k = 1 \cdot 10^7$ Н/м³ при $p = 0$ частота $\omega_{21} = 23,19$ Гц, а при $p = 5$ МПа составляет 66,47 Гц, увеличение происходит в 2,86 раз. Это объясняется увеличенной жесткостью самого трубопровода. Для подземного трубопровода увеличение происходит в 1,78 раз. Меньшая тенденция увеличения частот объясняется большим влиянием упругого отпора грунта.

2. В связи с большей площадью взаимодействия трубы с грунтом частоты свободных колебаний для подземного трубопровода увеличиваются с большей тенденцией, например, при $p = 3$ МПа и $k = 0,1 \cdot 10^7$ Н/м³ частота $\omega_{21} = 49,65$ Гц, а при $k = 4 \cdot 10^7$ Н/м³ частота равна 98,12 Гц. Таким образом увеличение составляет почти 50 %, а для наземного при тех же параметрах – 29 %.

Представленные исследования и решения полезны при изучении влияния типов грунтов на частоты свободных колебаний газопроводов при различных вариантах заложения. Дальнейшее исследование механических параметров и воздействий на трубопровод будет проведено в последующих работах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постнов, В. А.** Вибрация корабля / В. А. Постнов, В. С. Калинин, Д. М. Ростовец. – Ленинград : Судостроение, 1983. – 248 с.
2. **Аксельрад, Э. Л.** Расчет трубопроводов / Э. Л. Аксельрад, В. П. Ильин. – Ленинград: Машиностроение, 1972. – 240 с.
3. **Болотин, В. В.** Конечные деформации гибких трубопроводов / В. В. Болотин // Тр. Моск. энергет. ин-та. – Москва, 1956. – Вып. XIX. – С. 272–291.
4. **Болотин, В. В.** Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва: Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1956. – 600 с.
5. **Соколов, В. Г.** Свободные колебания наземных газопроводов, обжатых продольной силой, с учетом упругого основания грунта / В. Г. Соколов, И. О. Разов // Вестн. гражданских инженеров. – 2013. – № 1 (36). – С. 29–32.
6. **Разов, И. О.** Напряжения и перемещения на контактной поверхности наземного трубопровода большого диаметра / И. О. Разов // Вестн. гражданских инженеров. – 2015. – № 3 (50). – С. 105–108.
7. **Разов, И. О.** Исследования свободных колебаний наземных тонкостенных газопроводов большого диаметра / И. О. Разов // Вестн. гражданских инженеров. – 2013. – № 4 (39). – С. 100–104.
8. **Соколов, В. Г.** Свободные колебания тонкостенных газопроводов большого диаметра при полуподземной прокладке / В. Г. Соколов, И. О. Разов // Вестн. гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59). – С. 114–120.
9. **Valiev, M. I.** Intrinsic and parametric oscillations of curved sections of the pipeline with pulsating motion of a weakly compressible fluid / M. I. Valiev, V. V. Zhelobov, E. I. Tarnovskij // Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov. – 2013. – № 2 (10). – P. 48–54.
10. **Il'gamov, M. A.** Forced and parametric fluctuations of the pipeline / M. A. Il'gamov, M. M. Shakir'yanov // Izvestiya Ufimskogo nacional'nogo centra RAN. – 2020. – № 3. – P. 5–11.
11. **Hudayarov, B. A.** Numerical study of pipeline vibrations taking into account the viscoelastic base of the soil / B. A. Hudayarov, F. Z. Turaev // Vestnik NTU «HPI». Ser. Informatika i modelirovanie. – 2017. – № 50 (1271). – P. 66–74.
12. **Dmitriev, A. V.** Dynamic calculation of an underground thin-walled pipeline taking into account the influence of a damper / A. V. Dmitriev, V. G. Sokolov // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2020. – Vol. 12. – P. 2–5.
13. **Sokolov, V. G.** Free vibrations of underground rectilinear thin-walled sections of gas pipelines / V. G. Sokolov, A. V. Dmitriev // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2019. – № 2 (73). – P. 29–34.

E-mail: razovio@mail.ru.