Свободные колебания тонкостенного криволинейного участка магистрального газопровода при подземной бестраншейной прокладке

Разов Игорь Олегович
кандидат технических наук, доцент, доцент базовой кафедры АО «Мостострой-11», Тюменский индустриальный университет,
razovio@mail.ru

Соколов Владимир Григорьевич
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет,
sokolovvg@tyuiu.ru

В работе рассмотрены решения по определению частот свободных колебаний магистральных газопроводов прокладываемых одним из методов бестраншейной прокладки – «методом кривых». Представленный метод имеет преимущества перед более распространенным методом горизонтально направленного бурения. Изгиб элементов газопровода – труб создается при помощи трубогибочного станка на угол от 2 до 9 градусов. Отдельные элементы свариваются в единый участок – дюкер, который в дальнейшем при помощи специальных машин и механизмов затягивается в скважину, после всех проверок дюкер сваривается с основной линейной частью, по которой транспортируется газ. Во время эксплуатации на линейную часть передаются колебания от функционирующих компрессорных станций, а также вибрации от внешних динамических воздействий и вибраций от проезжающего транспорта (автомобильного или железнодорожного). В связи с чем необходимо корректно определить собственные частоты рассматриваемого участка газопровода с учетом воздействий внешней среды таких как: внутреннее рабочее давление, влияние упругого основания грунта и геометрических характеристик. В качестве расчетной модели рассматривается участок криволинейного газопровода конечной длины L, радиусом срединной поверхности r, радиусом кривизны в продольном направлении R, и толщиной стенки h. Расчетная модель участка газопровода представлена в виде тороидальной оболочки. Решения получены на основе геометрически нелинейном варианте полубезмоментной теории тороидальных оболочек среднего изгиба. Полученные решения позволят произвести отстройку линейной части газопровода от резонанса по трем наименьшим частотам.
Ключевые слова: газопровод, метод кривых, горизонтально-направленное бурение, динамический расчет, свободные колебания, упругое основание.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2681.2022.4 «Аналитические методы определения динамических характеристик тонкостенных трубопроводов большого диаметра в среде "труба – грунт" при стационарных и нестационарных воздействиях».

Введение

При прохождении линейной части газопровода через естественные и искусственные преграды наиболее эффективным являются методы бестраншейной прокладки, такие как метод горизонтально-направленного бурения, наклонно-направленное бурение, микротонелирование, технология Direct Pipe, и "метод кривых" [1]. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, а также технологические ограничения. «Метод кривых» основан на создании криволинейных участков газопроводов из труб, изогнутых на станке для холодного гнутья, что позволяет преодолеть естественные преграды (реки, озера) и искусственные преграды (мосты, путепроводы, авто и железные дороги). Он широко применяется в строительстве магистральных газопроводов, особенно на территориях с непригодной для прокладки традиционными способами местностью.

Технология строительства газопроводов методом кривых включает несколько этапов. Сначала производится тщательный анализ местности и препятствий, чтобы определить оптимальный маршрут газопровода с учетом всех требований безопасности и экономической эффективности. Затем происходит подготовка грунта и методом холодного гнутья подготавливают элементы-трубы для последующей сварки. Трубы изгибают при помощи трубогибочного станка на угол от 2 до 9 градусов, что позволяет обеспечить необходимую кривизну дюкера. Завершающий этап включает тестирование и контроль качества установленного газопровода, а также его обслуживание и эксплуатацию.

Таким образом, метод кривых и его технология строительства представляют собой инновационный подход к прокладке газопроводов в сложных условиях. Они позволяют эффективно преодолевать преграды и оптимизировать маршрут прокладки, обеспечивая надежность и безопасность эксплуатации газопровода (Рис.1). Важно отметить, что длина дюкера при этом существенно меньше, чем при ННБ, за счет большей кривизны траектории скважины. После прокладки и всех соответствующих этапов испытаний дюкер соединяют с основной линейной частью.

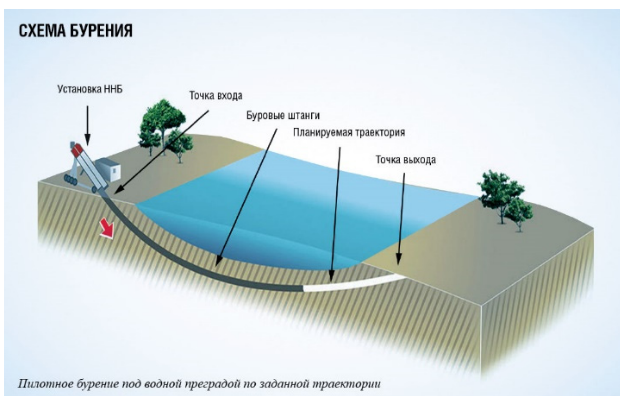

Рисунок 1 – Схема прокладки трубопровода через водные преграды

Важным аспектом при проектировании и строительстве газопроводов является динамический расчет трубопроводов, он позволяет оценить поведение газопровода при воздействии различных нагрузок, таких как грунтовые деформации, температурные изменения, сейсмические воздействия и другие факторы. Это позволяет предотвратить возможные повреждения и аварийные ситуации, а также обеспечить долговечность и надежность газопровода. Динамический расчет трубопроводов в грунте является неотъемлемой частью процесса проектирования и строительства, гарантируя стабильность и функциональность системы.

Анализ отказов конструкции газопровода в местности с высокой гидродинамической активностью, выполненный в диссертационной работе Султангареева Р.Х [11], показывает, что 60% аварийных ситуаций происходит на участках, расположенных не более 15 километров от компрессорных станций. В настоящее время предварительные расчеты напряжений, продольных и поперечных перемещений труб проводятся при сооружении любого трубопровода, независимо от способа укладки (наземный, подземный, полуподземный и др.).

Во избежание резонанса на участках не менее 15-20 километров от станции необходимо выполнять отстройку газопровода по частотным характеристикам. Например, частота вращения ротора газотурбинной компрессорной установки 66ГЦ-1 162/1,3-38, используемой на компрессорных станциях для перекачки газа, составляет 5285 об/мин или 88,08 Гц. Поэтому при отстройке газопровода необходимо учитывать эти частоты.

Исследование динамической устойчивости тонкостенных криволинейных трубопроводов большого диаметра является актуальной задачей, которая требует учета влияния грунта на изучаемые динамические характеристики. Для достижения окончательного решения данной проблемы были использованы дифференциальные уравнения движения тороидальной оболочки, полученные для надземного трубопровода в работах [2]. Вопрос динамической устойчивости трубопроводов является предметом исследования не только в РФ, но и за рубежом [3,4,5]. Однако, большинство работ основаны на стержневой теории и рассматривают прямолинейные участки трубопроводов. Таким образом, данная работа имеет уникальность и значимость в области исследования динамики трубопроводов, так как она представляет новое решение, учитывающее влияние грунта на динамические характеристики тонкостенных криволинейных трубопроводов большого диаметра.

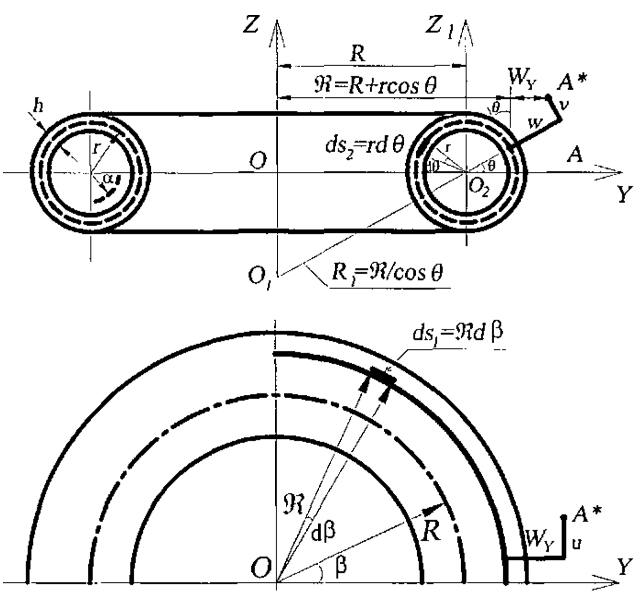

Рисунок 2 – Тороидальная оболочка (разработано авторами)

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.

Тороидальная оболочка - это форма, которую можно найти в различных объектах, от космических кораблей до электрических катушек. В данном случае, тороидальная оболочка используется для моделирования трубопровода. Эта модель позволяет точно рассчитать параметры и характеристики трубопровода, такие как пропускная способность и потери давления. Расчетная модель тороидальной оболочки является одной из наиболее точных и надежных в инженерной практике. Кроме того, она позволяет учесть различные факторы, такие как температурные изменения и деформации, которые могут влиять на работу трубопровода. Поэтому использование такой модели является важным шагом в проектировании и эксплуатации трубопроводов.

В работе [6] была получена полная система дифференциальных уравнений в перемещениях для криволинейного участка газопровода в тороидальной системе координат [β,Θ]. Эта система учитывает влияние нового слагаемого - влияния внешнего давления грунта на стенку трубы. На рисунке 2 представлен участок тороидальной оболочки со срединной поверхностью в тороидальных криволинейных координатах β, Θ. Здесь β обозначает центральный угол тора, а Θ - угол в поперечном сечении оболочки (0≤Θ≤2π). Важно отметить, что угол β изменяется в пределах 0≤β≤π. Таким образом, данная система уравнений позволяет более точно описывать деформацию и перемещение газопровода в тороидальной системе координат:

$$\frac{r^2}{R^2}\frac{\partial^3 u}{\partial\beta\partial\theta^2}\cos\theta+\frac{r^3}{R^3}\frac{\partial^3 u}{\partial\beta^3}-\frac{r^2}{R^2}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\frac{\partial u}{\partial\beta}\sin\theta\right)+\frac{r^3}{R^3}\frac{\partial^2 W_y}{\partial\beta^2}+ \qquad (1)$$

$$\frac{r^2}{R^2}\frac{\partial}{\partial\theta}\left[\frac{\partial}{\partial\theta}(W_y\cos\theta)-W_y\sin\theta\right]+\frac{h^2}{r^2 12(1-\nu^2)}\frac{\partial^3}{\partial\theta^3}\left(\frac{\partial^2\vartheta}{\partial\theta^2}+\vartheta\right)=$$

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

Для анализа динамических характеристик оболочки необходимо учитывать компоненты перемещения срединной поверхности, отнесенные к радиусу r, обозначаемые как u, v и w. Также следует учесть параметры материала оболочки, такие как E - модуль упругости и коэффициент Пуассона *ν*. Радиус срединной поверхности оболочки обозначается как r, а радиус изгиба продольной оси - как R. Параметр относительной толщины оболочки обозначается как $h_\nu=\frac{h}{R\sqrt{12(1-\nu^2)}}$.

Составляющие сил инерции в продольном и окружном направлении:

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

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

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

Здесь ρ представляет собой плотность материала оболочки, p_0 - внутреннее постоянное рабочее давление, q(θ) - радиальное давление грунта на внешнюю поверхность трубы в зависимости от времени и угла θ.

Значение параметра q(θ) может быть определено экспериментально или при помощи математической модели.

В процессе бурения для достижения требуемого диаметра скважины используют расширители, например для современных труб диаметром 1420мм при горизонтально-направленном бурении используют расширитель диаметром 1800мм, в связи с чем при протаскивании дюкера над ним образуется свободная область без давления грунта. В связи с чем сам дюкер взаимодействует с грунтом по полосе контакта вплоть до половины диаметра трубопровода. Распределение внешнего давления грунта представлено по закону $q_{max}cos\varphi$ (рисунок 3).

В первом приближении будем считать, что грунт, обрушившийся со свода обрушения будет оказывать мало влияние по сравнению с грунтом под дюкером [7].

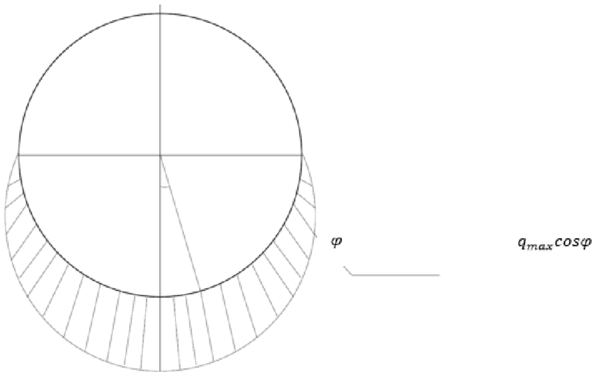

Рис. 3 – Распределение радиальной нагрузки

Представим нагрузку в виде ряда

$$\mathbf{q}\,(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{q_0} + \sum_{\mathbf{1}}^{\infty} \boldsymbol{q_m cosm\varphi}, \qquad (4)$$

Для определения q_0 проинтегрируем правую и левую часть равенства от 0 до 360^0:

$$\int_0^{\varphi}(-\,q_{max}cos\varphi)d\varphi + \int_{\varphi}^{360^0}(-\,q_{max}cos\varphi)d\varphi = q_0 2\pi,$$

$$q_0 = \frac{-q_{max}}{\pi}sin\varphi.$$

Для определения q_m умножим правую и левую части равенства на $cosm\varphi$ и так же проинтегрируем от 0 до 360^0:

$$2\int_0^{\varphi}(-\,q_{max}cos\varphi)cosm\varphi d\varphi = \int_0^{360^0}(\,q_m cos^2 m\varphi d\varphi)$$

При m=1 $-q_{max}(\frac{\varphi}{2}+\frac{1}{4}sin2\varphi) = q_1\pi$, откуда $q_1 = -\frac{2q_{max}}{\pi}(\frac{\varphi}{2}+\frac{1}{4}sin2\varphi)$,

При m$\geq$ 2 $-2q_{max}\left\{\frac{sin[(m+1)\varphi]}{2(m+1)}+\frac{sin[(m-1)\varphi]}{2(m-1)}\right\}|_0^{\varphi} = q_m\pi$,

Откуда

$$q_m = \frac{-q_{max}}{\pi}\left\{\frac{sin[(m+1)\varphi]}{(m+1)}+\frac{sin[(m-1)\varphi]}{(m-1)}\right\}.$$

Для корректности дальнейших обозначений примем $\varphi = \theta$

Первый член ряда соответствует равномерно распределенной радиальной нагрузке q_{max}=$q_r = kr$, где k – коэффициент постели грунта, [Н/м^3].

Преобразуем решение к удобному виду:

$$q(\theta) = \frac{kr}{\pi}\left[sin\theta + \sum_{m=1}^{\infty} \mathrm{K}_m \cos m\,\theta\right];\ \mathrm{K}_m = \frac{sin[(m+1)\theta]}{(m+1)} + \frac{sin[(m-1)\theta]}{(m-1)}; \qquad (5)$$

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

$$\frac{r^3}{R^3}\frac{\partial^3 u}{\partial\beta^3}+\frac{r^2}{R^2}\frac{\partial^3 u}{\partial\theta^2\partial\beta}\cos\theta-\frac{r^2}{R^2}\frac{\partial u}{\partial\beta}\cos\theta-\frac{r^2}{R^2}\frac{\partial^2 u}{\partial\beta\partial\theta}\sin\theta+$$
$$+\frac{r^3}{R^3}\frac{\partial^2 W_y}{\partial\beta^2}+\frac{r^2}{R^2}\frac{\partial}{\partial\theta}[\frac{\partial}{\partial\theta}(W_y\cos\theta)-W_y\sin\theta]+$$
$$h_v^2\frac{\partial^5\vartheta}{\partial\theta^5}+h_v^2\frac{\partial^3\vartheta}{\partial\theta^3}-\frac{r^2}{EhR}rh\rho\frac{\partial^3 u}{\partial\beta\partial t^2}+$$
$$+\frac{r}{Eh}rh\rho\frac{\partial^3 v}{\partial\theta\partial t^2}+\frac{r}{Eh}[rh\rho\frac{\partial^4 w}{\partial\theta^2\partial t^2}-\frac{\partial^3\vartheta}{\partial\theta^3}p_0+$$
$$+\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}q(\theta)w(\xi,\theta,t)] = 0 \qquad (6)$$

При решении дифференциальных уравнений принимаем граничные условия для шарнирного типа закрепления концов участка оболочки $w\Big|_{\substack{\beta=0\\ \beta=\pi}} = 0,\ \frac{\partial^2 w}{\partial\beta^2}\Big|_{\substack{\beta=0\\ \beta=\pi}} = 0.$ Методика дальнейших математических вычислений более подробно разобрана в работах [8]. После всех преобразований получим:

$$\varphi(t)\begin{cases}\mu_0^4 h_v^2 n^4 b_m\sin m\theta-\frac{\mu_0^3}{2}h_v m^2[b_m(\sin(m-1)\theta+\\ +\sin(m+1)\theta)+(b_{m+1}\frac{m+2}{m+1}+b_{m-1}\frac{m-2}{m-1})\sin m\theta]+\end{cases}$$
$$+\frac{\mu_0^4}{4}m^3(b_{m+1}\frac{m+2}{m+1}+b_{m-1}\frac{m-2}{m-1})\cdot\left[(m-2)\sin(m-1)\theta+(m+2)\sin(m+1)\theta\right]+$$
$$+m^4(m^2-1)(m^2-1+p^*)\cdot b_m\sin m\theta+k^* m^4 b_m\sin m\theta\Big\}+ \qquad (7)$$
$$+[rh\rho^*(\mu_0^2 h_v^2 n^2+m^4+m^2)]b_m\sin m\theta\varphi''(t)=0$$

где $G=\frac{R}{Ehh_v^2}$; $\mu_0=\frac{r}{Rh_v}$, $\rho^*=G\rho$, $p^*=Gp$, $k^*=$

$k^*=\frac{R^2k}{\pi Ehh_v^2}z_m$ – параметр упругого основания (методика определения коэффициента z_m приведена в работе [9].

Подставим значения функции времени и ее производную $\varphi(t)=\sin\omega_{mn}t$, $\varphi''(t)=-\omega^2\sin\omega_{mn}t.$ в уравнение (7) и приравняем множители при $\sin\omega_{mn}t$ получим систему трансцендентных уравнений для определения частот ω_{mn}:

$$\begin{cases}\mu_0^4 h_v^2 n^4 b_m\sin m\theta-\frac{\mu_0^3}{2}h_v m^2[b_m(\sin(m-1)\theta+\\ +\sin(m+1)\theta)+(b_{m+1}\frac{m+2}{m+1}+b_{m-1}\frac{m-2}{m-1})\sin m\theta]+\end{cases}$$
$$+\frac{\mu_0^4}{4}m^3(b_{m+1}\frac{m+2}{m+1}+b_{m-1}\frac{m-2}{m-1})\cdot\begin{bmatrix}(m-2)\sin(m-1)\theta+\\+(m+2)\sin(m+1)\theta\end{bmatrix}+$$
$$+m^4(m^2-1)(m^2-1+p^*)\cdot b_m\sin m\theta+k^*m^4b_m\sin m\theta\Big\}- \qquad (8)$$
$$-[rh\rho^*(\mu_0^2h_v^2n^2+m^4+m^2)]b_m\omega_{mn}^2=0$$

Далее приравняем коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях sin mθ при m = 1,2,3… Приведем систему однородных линейных алгебраических уравнений к компактному виду:

$$a_{m,m-2}b_{m-2}+a_{m,m-1}b_{m-1}+a_{m,m}b_m+$$
$$+a_{m,m+1}b_{m+1}+a_{m,m+2}b_{m+2}=0, \qquad (9)$$

Для подробного анализа полученной системы однородных линейных алгебраических уравнений (9) представим её в матричной форме:

$$AB=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{75} & a_{76} & a_{77} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{pp-2} & a_{pp-1} & a_{pp} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_{n,1} \\ b_{n,2} \\ b_{n,3} \\ b_{n,4} \\ b_{n,5} \\ b_{n,6} \\ b_{n,7} \\ \dots \\ b_{n,p} \end{pmatrix} = 0. \qquad (10)$$

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

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

$$a_{m,m} = A_{mn} - B_{mn}\omega_{mn}^2,$$
$$a_{m,m\pm1} = -\mu^3 n^2 h_v \frac{m^2(m^2 \pm m + 1)}{(m \pm 1)},$$
$$a_{m,m\pm2} = \mu_0^2 m^3 \frac{(m \pm 3)(m \mp 1)}{4(m \pm 2)}, \qquad (11)$$
$$A_{mn} = \mu_0^4 n^4 h_v^2 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p_0^*) + k^* m^4 + 0{,}5\mu_0^2 m^2(m^2 + 1),$$
$$B_{mn} = \rho^* rh(\mu_0^2 n^2 h_v^2 + m^4 + m^2).$$

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

Использую тот же математический аппарат, что и в работе [6,8,10] усеченный определитель матрица А после всех преобразований имеет вид:

$$|A - \lambda E| = \begin{vmatrix} d_{1,1} - \lambda & d_{1,2} & d_{1,3} \\ d_{2,1} & d_{2,2} - \lambda & d_{2,3} \\ d_{3,1} & d_{3,2} & d_{3,3} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \qquad (12)$$

где приняты обозначения:

$$\lambda = \omega^2, \qquad d_{m,m} = \frac{A_{mn}}{B_{mn}}$$
$$d_{m,m\pm1} = \frac{a_{m,m\pm1}}{B_{mn}} \quad d_{m,m\pm2} = \frac{a_{m,m\pm2}}{B_{mn}}, \qquad (13)$$

Таблица 1

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.

h/r = 1/50; v=0,3; L/R=10, p=2 МПа; r/R=1/10								
ω_{21}	32,78	32,86	33,18	33,57	34,35	35,11	35,86	36,59
k, кг/см3	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=1/25								
ω_{21}	21,56	21,71	22,31	23,03	24,41	25,71	26,96	28,14
k, кг/см3	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=1/45								
ω_{21}	19,21	19,39	20,09	20,93	22,52	24,01	25,41	26,74
k, кг/см3	0	0,1	0,5	1	2	3	4	5

Рассмотрен участок газопровода 1420х14мм (h/R=1/50), длиной L=15r, из стали (например, К65 (Х80)), Е=2*10^5 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3, плотность материала трубы - 7,85 г/см^3. На трубу-оболочку действует постоянное внутреннее рабочее давления p_0 и упругое основание грунта k. Расчет выполнен по формулам 10-13 при различных значениях волновых числе m и n, описывающих деформации в окружном и продольном направлении. Выполнен расчет минимальных частот свободных колебаний участка газопровода с различными значениями коэффициента постели грунта и соотношений радиуса поперечного сечения и радиуса кривизны в продольном направлении r/R =1/10-1/45. Полученные значения по вышеуказанным расчетным формулам сведены в виде таблицы 1 и иллюстрированы в виде графиков на рисунке 2. Минимальные частоты реализуются при ω_{21}, что соответствует оболочечным формам колебаний с образованием двух полуволн в окружном и одной в продольном направлении.

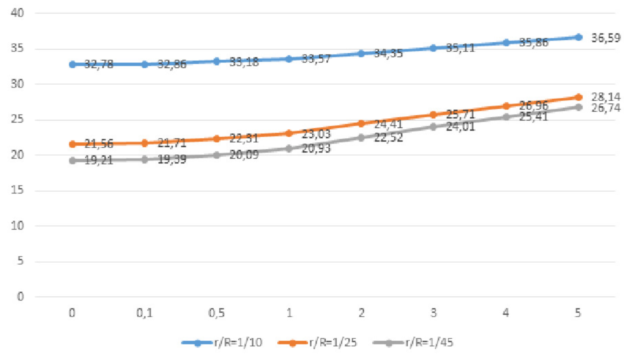

Рисунок 2 – Определение значений минимальных частот свободных колебаний в зависимости от изменения значений коэффициента постели грунта k и соотношений радиуса поперечного сечения трубы к радиусу продольного изгиба (разработано авторами).

Заключение

Проектирование и эксплуатация газопроводов являются областью применения полученных решений. Выражения (10-13) позволяют определить квадраты круговых частот ω_{mn}^2 изгибных колебаний заданного криволинейного участка газопровода по формам колебаний при m = 1,2,3. Эти решения учитывают в себе такие параметры, как внутреннее рабочее давление, геометрические характеристики, а также упругое основание грунта. При анализе результатов приведенных в таблице 1 и графиков на рисунке 2 можно сделать вывод о влиянии коэффициента постели грунта на частоты свободных колебаний. С увеличением значений коэффициента упругого отпора k частоты увеличиваются и тем больше, чем больше изгиб рассматриваемого участка. Так например, при r/R=1/10 и изменении значений упругого отпора грунта 0<k<5 кг/см^3 рост частот составляет – 11,5%, а при r/R=1/45 – 40%. Из графиков так же следует, что при большей кривизне участка газопровода частоты становятся ниже. Так например при k= 1 кг/см^3 разница частот между r/R=1/10 и r/R=1/45 составляет – 60%.

При проектировании линейной части необходимо учитывать значения возмущающих частот компрессорной установки с целью отстройки системы от резонанса. Однако в процессе эксплуатации возникают проблемы, связанные с устареванием трубопроводных систем и появлением новых, более продуктивных компрессорных установок с отличающимися режимами работы и вынужденной частотой колебаний. Неправильная замена старых установок новыми может привести к негативным последствиям для линейной части, таким как резонанс, увеличение амплитуды колебаний, усталостное разрушение металла. Поэтому необходимо внимательно отнестись к подбору и настройке компонентов системы, чтобы избежать нежелательных последствий.

Литература

1. Никишин, А. В. Применение "Метода кривых" при строительстве и ремонте магистральных нефтегазопроводов через естественные препятствия / А. В. Никишин, О. А. Коркишко // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1(44). – С. 72. – EDN ZBBNNB.
2. Соколов В.Г. Свободные колебания криволинейного трубопровода, содержащего поток жидкости / Строительство трубопроводов. 1981. № 6. -С. 25-26.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. *Бояршинов С. В.* Основы строительной механики машин. Учебное пособие для студентов вузов/ - М.: Машиностроение, 1973. - 456 с.
8. Соколов, В. Г. Свободные колебания тонкостенного криволинейного участка магистрального газопровода при наземной прокладке / В. Г. Соколов, И. О. Разов // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 15. – EDN TMHLLI.
9. Аналитические методы расчета динамических характеристик прямолинейных тонкостенных трубопроводов большого диаметра при наземной прокладке / И. О. Разов, В. Г. Соколов, А. Н. Коркишко, А. Н. Ермолаев. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "КОНВЕРТ", 2019. – 128 с. – ISBN 978-5-6043840-6-0. – EDN RNRTBO.
10. 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.
11. Султангареев Р.Х. Обеспечение работоспособности газопроводов в зонах геодинамической активности. Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук. Уфа /УГНТУ/, 2009. 24 с.

Free vibrations of a thin-walled curved section of the main gas pipeline during underground trenchless laying

Razov I.O., Sokolov V.G.
Tyumen Industrial University

JEL classification: L61, L74, R53

The paper considers solutions for determining the frequencies of free oscillations of main gas pipelines laid by one of the trenchless laying methods – the "curve method". The presented method has advantages over the classical method – horizontal directional drilling. The bending of the elements of the gas pipeline – pipes is created using a pipe bending machine at an angle from 2 to 9 degrees. The individual elements are welded into a single section – the ducker, which is then tightened into the well with the help of special machines and mechanisms, after all checks, the ducker is welded to the main linear part through which the gas is transported. During operation, vibrations from functioning compressor stations, as well as vibrations from external dynamic influences, such as seismic and vibrations from passing vehicles (automobile or railway), are transmitted to the linear part. In this connection, it is necessary to correctly determine the natural frequencies of the considered section of the gas pipeline, taking into account the effects of the external environment such as: internal working pressure, the influence of the elastic base of the soil and geometric characteristics. As a computational model, a section of a curved gas pipeline of finite length L, the radius of the median surface r, the radius of curvature in the longitudinal direction R, and the wall thickness h are considered. The design model of the gas pipeline section is presented in the form of a toroidal shell. The solutions are obtained on the basis of a geometrically non-linear version of the semi-instantaneous theory of toroidal shells of medium bending. The solutions obtained will allow the linear part of the gas pipeline to be detuned from resonance at the three lowest frequencies.

Keywords: gas pipeline, curve method, horizontal directional drilling, dynamic calculation, free oscillations, elastic base.

References

1. Nikishin, A.V. Application of the "Method of curves" in the construction and repair of oil and gas pipelines through natural obstacles / A.V. Nikishin, O. A. Korkishko // Engineering Bulletin of the Don. – 2017. – № 1(44). – P. 72. – EDN ZBBNNB.
2. Sokolov V.G. Free oscillations of a curved pipeline containing a fluid flow / Pipeline construction. 1981. No. 6. - pp. 25-26.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Ilyin V.P., Sokolov V.G. Proper oscillations of a toroidal shell with a stationary fluid flow // Inter-university. Thematic collection of works: "Research on the mechanics of building structures and materials". - SPb GASU. -St. Petersburg, 2000. -pp. 42-49.
7. Boyarshinov S. V. Fundamentals of construction mechanics of machines. Textbook for university students/ - M.: Mechanical Engineering, 1973. - 456 p.
8. Sokolov, V. G. Free oscillations of a thin-walled curved section of a main gas pipeline during ground laying / V. G. Sokolov, I. O. Razov // Bulletin of Eurasian Science. – 2021. – Vol. 13, No. 2. – S. 15. – EDN TMHLLI.
9. Analytical methods for calculating the dynamic characteristics of rectilinear thin-walled pipelines of large diameter with ground laying / I. O. Razov, V. G. Sokolov, A. N. Korkishko, A. N. Ermolaev. – Moscow : Limited Liability Company "ENVELOPE", 2019. – 128 p. – ISBN 978-5-6043840-6-0. – EDN RNRTBO.
10. Sokolov, V.G. Vibrations, static and dynamic stability of large diameter pipelines: dis. ... Doctor of Technical Sciences: 05.23.17 / Sokolov Vladimir Grigorievich. – St. Petersburg, 2011. – 314 p.
11. Sultangareev R.Kh. Ensuring the operability of gas pipelines in zones of geodynamic activity. Abstract diss. for the competition scientist step. cand. those. Sciences. Ufa /UGNTU/, 2009. 24 p.