

УДК 504.064.4; 504.064.43; 658.567

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ТРУБА-ГРУНТ» НА ОТКЛОНЕНИЕ ГАЗОПРОВОДА ОТ ПРОЕКТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Воронин К.С.¹, Гладенко А.А.², Соколов С.М.¹, Чекардовский М.Н.³

¹ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: voronin_tsogu@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, Омск, Пр. Мира, д. 11), e-mail: voronin_tsogu@mail.ru

³ФГБОУ ВО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», Тюмень, Россия, (625001, Тюмень, ул. Луначарского, д. 2), e-mail: ktgv@tgasu.ru, тел.: (3452) 43-42-27.

В статье рассматривается изменение геометрической формы магистрального газопровода, то есть отклонение его положения от проектного, как один из важных факторов, влияющих на надежность эксплуатации подземных магистральных трубопроводов. При исследовании процессов, происходящих при взаимодействии магистрального газопровода с грунтовым основанием, рассмотрена модель стержня, закрепленного с одной стороны, с приложенной к нему нагрузкой. Действие упругого основания поперек трубопровода смоделировано пружинной подложкой, которая сопротивляется поперечным перемещениям. В результате, установлено влияние воздействия грунта на частоту колебаний стенки трубопровода, возникающих на стадии, предшествующей его отклонению от проектного положения. Выявление частоты этих колебаний позволит прогнозировать изгиб трубопровода не на стадии его роста, а на стадии, предшествующей его появлению.

Ключевые слова: газопровод, трубопроводный транспорт, надежность, мониторинг, колебания, отклонение от проектного положения.

INFLUENCE OF DYNAMIC PROCESSES IN SYSTEM "PIPELINE-SOIL" ON THE GAS PIPELINE DEVIATION FROM THE DESIGN POSITION

¹ Voronin K.S., ² Gladenko A.A., ¹ Sokolov S.M., ³ Chekardovsky M.N.

¹FGBO of higher education "Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: voronin_tsogu@mail.ru

²FGBO of higher education «Omsk state technical university» Omsk, Russia (644050, Omsk, Mira Ave., 11), e-mail: voronin_tsogu@mail.ru

³FGBO of higher education «Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering», Tyumen, Russia, (625001, Tyumen, Lunacharskogo street, 2), e-mail: ktgv@tgasu.ru.

In this article the changes in geometric shape that is deviation from design position of a main gas pipeline is considered as one of important factors which impact on reliability of an underground main pipelines operation. Studying the processes occurring when main gas pipeline interacts with soil, model of fixed from one side rod with an applied load is considered. The action of the ground is modelled by an elastic backing which resists the transverse movement of pipeline. As a result, found effects of soil on the oscillation frequency of the pipe wall, resulting in the step preceding its deviation from the design position. Detection frequency of these oscillations will predict the bending of the pipeline is not at the stage of its growth, and at the stage preceding its appearance.

Keywords: gas pipeline, pipeline transport, reliability, monitoring, oscillations, deviation from position.

Важным фактором, влияющим на надежность эксплуатации подземных магистральных трубопроводов, является изменение геометрической формы трубопровода, то есть отклонение его положения от проектного. Всплытие и образование изгибов трубопроводов является одним из факторов, влияющих на их напряженно-деформированное состояние, которое, как известно, существенно влияет на прочностные свойства труб.

По мнению многих авторов [1, 3, 6, 8], важнейшим элементом этой проблемы является взаимодействие подземного трубопровода с окружающим грунтом. Это взаимодействие

происходит как со стороны грунта за счет тепловых процессов, влажности, сил сцепления, так и со стороны трубопровода на грунт за счет действующих нагрузок, обусловленных температурой и давлением.

При строительстве трубопровода его устойчивое положение достигается за счет использования утяжелителей, в качестве средств балластировки, или непосредственного закрепления анкерами. Однако, на многих участках, особенно в северных районах, не смотря на действие утяжелителей, магистральные трубопроводы оказываются выше проектного уровня вплоть до образования вертикальных и горизонтальных изгибов.

Из анализа приведенных моделей можно выделить следующие общие закономерности. В моделях рассматривается продольное перемещение линейного участка трубопровода с низким сопротивлением грунта в перпендикулярном направлении. Такой участок можно определить, как опасный с точки зрения образования арки. Если стенка трубопровода находится в сжатом состоянии, при увеличении продольной силы (в происхождении которой модели расходятся) на рассматриваемом участке выше критического значения происходит потеря устойчивости прямолинейной формы. Значение критической силы зависит от коэффициента постели грунта и изгибной жесткости трубы [5]. Коэффициент постели резко уменьшается с увеличением обводненности грунта, что соответствует сезонному оттаиванию. Взаимодействие с грунтом может существенно ослабляться за счет вибрации.

Одновременно с обводненностью грунта возрастает выталкивающая сила, меняющая высотное положение трубы в грунте. Считается, что появление опасных участков (с низким сопротивлением и высокой обводненностью) обусловлено сложным сочетанием климатических и гидрогеологических условий, что осложняет прогнозирование аркообразования. В рассматриваемых моделях прогноз аркообразования строится на расчетах параметров опасного участка в зависимости от времени и характеристик грунта.

Таким образом, можно сделать вывод, что, не смотря на различие моделей в их прогнозной части, основанной на расчете реализации «стрелы прогиба», они достаточно хорошо предсказывают нарастание прогиба, если он уже существует.

Механизмы, обуславливающие увеличение длины линейной части трубопровода, до сих пор остаются до конца не выясненными. Так, вне рамок моделей оказывается взаимодействие трубопровода с утяжелителями. Ведь, прежде чем наступит условие реализации неустойчивости горизонтального положения трубопровода, утяжелители должны быть сброшены.

Рассмотрим стадию, предшествующую изгибу трубопровода. В качестве модели выберем стержень длиной L , закрепленный с одной стороны, и с приложенной нагрузкой F .

Перемещение стержня будет определяться функцией $\varphi(x)$. Кривизна стержня определяется изменением угла:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d}{dx} \arcsin \varphi'(x) = \varphi'' \sqrt{1 - \varphi'^2} = \frac{d^2 \varphi}{dx^2} \sqrt{1 - \left(\frac{d\varphi}{dx}\right)^2} \quad (1)$$

где θ – угол кривизны стержня; $\varphi(x)$ – перемещение стержня.

Энергия деформации стержня будет определяться уравнением:

$$\delta V = \frac{1}{2} EI \left(\frac{d\theta}{dx}\right)^2 \delta x \quad (2)$$

где E – модуль упругости; I – момент инерции сечения трубы.

Для единицы длины выберем значение массы m , тогда выражение для кинетической энергии будет иметь вид:

$$\delta \varepsilon = \frac{1}{2} m (\varphi'(x))^2 \delta x \quad (3)$$

Потенциальная энергия изогнутого стержня определяется выражением:

$$V = U - \frac{1}{2} F \int_0^L \varphi'^2 dx \quad (4)$$

где U – потенциальная энергия деформации; F – сжимающая сила.

Изгибную моду $\varphi(x)$ с произвольной амплитудой можно выбрать в виде половины синусоиды:

$$\varphi(x) = w(t) \sin \frac{\pi x}{L} \quad (5)$$

По данным работы [2], на стадии, предшествующей моменту изгиба трубопровода, в нем должны развиваться колебания, как следствие неустойчивости:

$$\omega_0^2 \approx \frac{\pi^4 EI}{2L^3} \left[1 - \frac{Sl}{\pi^2 I} \left(\frac{16}{\pi^2 \rho h} P \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos \alpha_m \xi \sin \varphi}{m \omega_{mn}^2} \sin \omega t \right)^2 \right] \quad (6)$$

где L – длина трубы; P – давление; ρ – масса оболочки на единицу площади; h – толщина стенки; $\xi = \frac{x}{r}$; x – меняющийся радиус оболочки; φ – угол; $\alpha_m = \frac{m\pi r}{l}$, l – длина оболочки, m – число полуволин в направлении образующей оболочки, n – число волн по окружности; ω_{mn} – собственная частота колебаний.

Выделение частоты этих колебаний может служить основой для разработки метода мониторинга состояния трубопровода на стадии, предшествующей его изгибу. В этом случае нарушение геометрической формы будет следствием нелинейности скачков давления при неустойчивом течении газа. Уменьшение угловой частоты колебаний (1) определяет приближение системы к точке бифуркации. В задаче выделяется две траектории равновесия. В докритической области колебания (ω_0) отвечают устойчивому состоянию с амплитудой (Q_1).

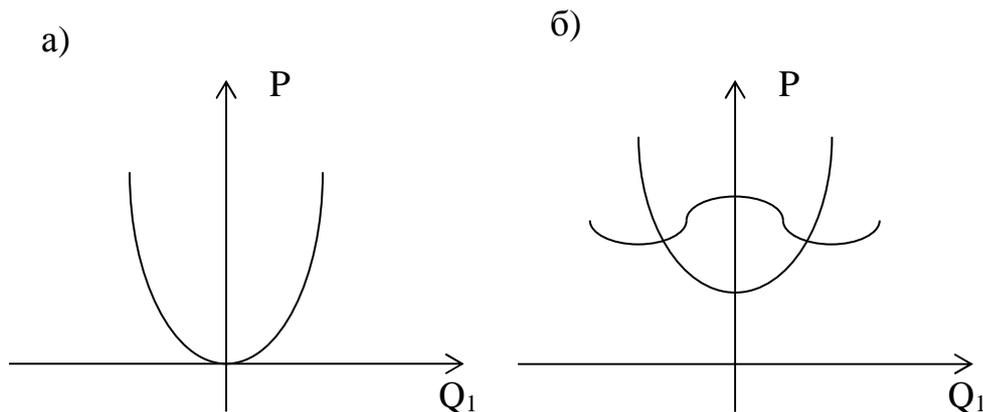


Рис. 1. Динамическое поведение трубы
 а) вдали от точки бифуркации, $P < P_c$
 б) вблизи точки бифуркации, $P \approx P_c$

Управляющим параметром в этой задаче является $\lambda = P_c - P$. По мере приближения к точке бифуркации управляющий параметр убывает до нуля, вместе с ним к нулю приближается и частота собственных колебаний (ω_0). В точке бифуркации потенциальная энергия видоизменяется, переходя от одноявного (устойчивого) состояния (рис. 1а) к двухъявному (рис. 1б).

Появление критической нагрузки P_c соответствует исчезновению минимума потенциальной энергии. Вследствие этого частота колебаний стремится к нулю. Таким образом, обращение частоты колебаний в ноль определяет момент появления изгиба трубопровода, как переход к новому устойчивому состоянию.

Главной составляющей нагрузки (P) является продольное перемещение, вызываемое динамической нагрузкой. В работах [1, 8, 10] рассчитывается величина продольного смещения при взаимодействии с грунтом не на стадии образования изгиба, а его роста, когда изгиб уже произошел. Представляется, что и на стадии появления изгиба, взаимодействие с грунтом так же будет важным условием.

Рассмотрим появление изгибной моды при продольном нагружении трубопровода переменной динамической нагрузкой в условиях взаимодействия с грунтом. Так как грунт обладает защемляющей способностью, из всех видов взаимодействия выберем его упругое сопротивление сдвигу. Рассмотрим стационарный случай, тогда перемещение $u(x)$ должно удовлетворять уравнению продольно-поперечного изгиба:

$$\frac{d^2u}{dx^2} - \frac{\pi D_1 k_n}{ES} = \frac{dP}{dx} \quad (7)$$

где D_1 , k_n – коэффициенты, характеризующие упругие свойства грунта [9]; x – расстояние от начала участка трубопровода.

Распределение давления по длине трубопровода выберем в виде модельной функции:

$$P(x) = P_0 - a_1 e^{-\alpha_1 x} \quad (8)$$

Определим граничные условия:

$$\begin{aligned} u(0) &= 0 \\ \frac{du(L)}{dx} &= \frac{1}{ES} F \end{aligned} \quad (9)$$

где L – длина участка трубопровода, на котором произошел изгиб.

Уравнение (4) должно быть дополнено выражением для силы внутренних напряжений, сдавливающих трубу [1].

$$F = \frac{ES}{2} \int_0^L \left[\left(\frac{dz}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] dx \approx ES \left(\frac{w}{l} \right)^2 l \quad (10)$$

где w – величина прогиба трубопровода.

Приведенные уравнения образуют систему, решение которой определяется выражением, полученным с условиями приближения.

$$u(x) \approx \frac{Fsh(\theta x)}{\theta ch(mL)} - \frac{\alpha_1 a_1}{\theta^2 - \alpha^2} (e^{\theta x} - e^{-\alpha x})$$

$$= \frac{1}{\theta L} \left(\frac{16}{\pi^2 \rho h} P \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \alpha_m \xi \sin \varphi \sin \omega t}{mn(\omega_{mn}^2 - \omega^2)} \right) \frac{sh(\theta x)}{ch(\theta L)} - \frac{\alpha_1 a_1}{\theta^2 - \alpha^2} (e^{\theta x} - e^{-\alpha x}) \quad (11)$$

Взаимодействие с грунтом, как с упругим основанием меняет частоту моды, по которой развивается неустойчивость горизонтального положения трубопровода. Действие упругого основания поперек трубопровода может быть смоделировано пружинной подложкой, которая сопротивляется поперечным перемещениям (w). Рассмотрим линейаризованные выражения для энергии в анализе устойчивости упругого стержня. К энергии деформации изгиба

$$\varepsilon_D = \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx \quad (12)$$

и потенциальной энергии сжимающей нагрузки

$$U_D = -\frac{1}{2} P \int_0^L \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx \quad (13)$$

добавляется энергия деформации упругого основания

$$\varepsilon_k = \frac{1}{2} K \int_0^L w^2 dx \quad (14)$$

где K – жесткость основания.

Рассматривая начальную стадию закритического положения, w можно определить выражением:

$$w = Q \sin \left(\frac{\pi x}{L} \right) \quad (15)$$

где Q – амплитуда моды.

В результате проведенных преобразований можно получить выражение для ω_i^2 (i -я мода, по которой развивается неустойчивость):

$$\omega_i^2 = \frac{EI \left(\frac{i\pi}{L}\right)^4 + K - P \left(\frac{i\pi}{L}\right)^4}{m} \quad (16)$$

Из этого выражения следует, что частота моды, на которой реализуется неустойчивость, оказывается больше из-за упругого взаимодействия с грунтом.

Взаимодействие трубопровода с грунтом влияет на процесс изменения его геометрической формы, то есть на отклонение от проектного положения. В работах [3, 9] показано, что на частотах от 10 Гц до 100 Гц наблюдаются максимальные амплитуды колебаний и максимальное снижение касательных сопротивлений как продольному, так и поперечному перемещению. При этом оказалось, что какой бы малой ни была амплитуда вибрации, все равно наблюдается заметное снижение упругого воздействия грунта.

Выводы:

Таким образом, динамические процессы в системе «труба-грунт» оказывают влияние на процесс удлинения линейной части трубопровода за счет роста продольных сжимающих напряжений. По мере приближения системы к моменту потери устойчивости проектного положения в ней должны происходить определенные изменения. Так, на стадии, предшествующей изгибу трубопровода, в нем развиваются низкочастотные колебания (ω_i), которые затухают с ростом давления. На основании вышеизложенного, можно разработать метод прогнозирования начала появления изгиба, точнее можно определить область частот, при которых возможно появление неустойчивости.

Список литературы

1. Вагнер В.В. Изменение высотного положения газопровода при переменной обводненности грунта в траншее. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Тюмень – 2008. - 119с.
2. Воронин К.С. Прогнозирование развития повреждений на магистральных газопроводах под воздействием динамической нагрузки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тюмень: ТюмГНГУ 2013г. – 111с.
3. Горковенко А.И. Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов. Диссертация на соискание ученой степени доктора наук, Тюмень – 2006. Издательство ТюмГНГУ - 305с.

4. Гумеров А.Г., Азметов Х. А. Расчет напряжений в системе труб при устранении отклонений их формы поперечного сечения и диаметра от номинальных значений // Нефтяное хозяйство. 2007. - №1. - с. 78-79.
5. Ибрагимов А.А., Подорожников С.Ю., Шабаров А.Б., Медведев М.В., Земенкова М.Ю. Расчетная модель и алгоритм определения остаточного ресурса трубопровода в условиях периодических изменений напряжений и коррозии//Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – Москва:Горная книга – 2014, № S4. С. 199-206.
6. Михаленко Е.С. Разработка методики расчета и прогноза критических параметров аркообразования магистрального газопровода. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Тюмень – 2007. - 200с.
7. Перспективы развития систем геотехнического мониторинга /Смирнов В.В., Земенков Ю.Д., Торопов С.Ю., Сероштанов И.В., Никифоров В.Н.//Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - М.: Горная книга, 2014. - № S4. - С. 191-198.
8. Пульников С.А. Взаимодействие вибронгруженных магистральных газопроводов с окружающими грунтами. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Тюмень – 2007. - 172с.
9. Торопов С.Ю., Дорофеев В.С., Земенков Ю.Д. Об определении продольной силы в трубопроводе при образовании арки//Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- М.: Горная книга, 2013, № S3, С. 223-229.
10. Хариновский В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра 2000г. - 467с.

Рецензенты:

Кусков В.Н., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г.Тюмень;

Торопов С.Ю., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г.Тюмень.