

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ НАРУШЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ГАЗОПРОВОДА

Воронин К.С.<sup>1</sup>, Дудин С.М.<sup>1</sup>, Земенкова М.Ю.<sup>1</sup>, Закиров Н.Н.<sup>1</sup>, Гладенко А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: voronin\_tsogu@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, Омск, Пр. Мира, д. 11), e-mail: voronin\_tsogu@mail.ru

---

Магистральные газопроводы при эксплуатации находятся под воздействием постоянных перепадов давления, что приводит к их удлинению и, как следствие, появлению неустойчивости положения в пространстве. В динамических системах, обладающих обратной связью, должны наблюдаться явления, предшествующие аварийным событиям. В статье рассматриваются вынужденные колебания цилиндрической поверхности газопровода под действием динамических нагрузок, вызванных скачками давления, и процесс нарушения его геометрической формы. Определяется частота колебаний, возникающих в трубопроводе на стадии, предшествующей его изгибу. Выявление этой частоты может служить основой для разработки метода мониторинга технического состояния газопровода, а прогнозирование возможных аварийных ситуаций позволяет планировать и своевременно проводить ремонтные работы на участках газопровода с возможным отклонением от проектного положения.

---

Ключевые слова: газопровод, трубопроводный транспорт, надежность, колебания, изгиб газопровода.

## PREDICTION AND EVALUATION OF THE RISK OF CHANGING THE GEOMETRIC SHAPE OF A GAS PIPELINE

<sup>1</sup>Voronin K.S., <sup>1</sup>Dudin S.M., <sup>1</sup>Zemenkova M.Y., <sup>1</sup>Zakirov N.N., <sup>2</sup>Gladenko A.A.

<sup>1</sup>FGBO of higher education "Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: voronin\_tsogu@mail.ru

<sup>2</sup>FGBO of higher education «Omsk state technical university» Omsk, Russia (644050, Omsk, Mira Ave., 11), e-mail: voronin\_tsogu@mail.ru

---

Trunk pipelines during operation under the influence of the permanent pressure drop, which leads to their elongation, and consequently, appearance of instability position in space. In dynamic systems that have feedback effects should be observed prior to emergency events. The article deals with the forced oscillations of a cylindrical surface of a gas pipeline under the action of dynamic loads caused by pressure surges and the process of violating the geometrical shape. Determined frequency vibrations arising in the piping at the stage preceding its bending. Identification of this frequency can be the basis for the development of a method for monitoring the technical condition of the pipeline and forecasting of possible emergency situations allows you to plan and carry out timely repair work on sections of the pipeline with a possible deviation from the design position.

---

Keywords: gas pipeline, pipeline transport, reliability, oscillations, deformation of pipeline.

Магистральный газопровод представляет собой сложную инженерную конструкцию, эксплуатируемую в разнообразных природно-климатических условиях. Особенности подземной укладки в условиях сильной обводненности грунта являются причиной выделения в технологии строительства дополнительных параметров прочности газопроводов. Одним из таких параметров надежной работы газопроводной системы в северных районах является обеспечение глубины залегания трубопровода [10].

В результате всплытия и сброса утяжелителей происходит искривление геометрической формы трубопровода [9]. Глинистые и водонасыщенные грунты, которыми засыпается газопровод, имеют значительно сниженную плотность и, как следствие этого, низкую заземляющую способность. В таких условиях продольные перемещения

газопровода в грунте приводят к его удлинению. Механизмы удлинения трубопровода, связанные с заземляющей способностью грунта, рассматривались в ряде работ [5, 6, 10]. В работе [5] приведен расчет продольной устойчивости забалластированных трубопроводов на продольных участках. Однако в этих работах не рассматривается влияние переменной нагрузки на трубопровод, вызванной колебаниями давления при транспортировке газа.

Работы по строительству магистральных газопроводов в заболоченной местности, как правило, производятся зимой, а ввод газопровода в работу осуществляется летом. В результате этого происходит однократное удлинение уже в первый весенне-летний период эксплуатации. Но на практике удлинение носит систематический характер.

В литературе [6] отмечается влияние переменного давления на процесс удлинения трубопровода. На сегодняшний момент можно считать общепринятым, что процесс удлинения в конечном итоге способствует появлению неустойчивости геометрической формы. Неустойчивости такого рода являются следствием нелинейности динамических процессов. В работах [7, 8] проводился анализ аварийных и катастрофических явлений, было показано, что эти события описываются степенным законом распределения. Такой закон распределения случайных событий характерен для систем, обладающих обратной связью. В таких условиях в системе должны наблюдаться явления, предшествующие аварийным событиям, что крайне важно для процесса мониторинга работы трубопроводной системы.

В данной работе рассматриваются явления, происходящие в трубопроводе перед изменением его геометрической формы (изгибом). Рассмотрим изгибные колебания цилиндрической оболочки (рис. 1) радиусом  $r$ . Обозначим перемещение точки на поверхности вдоль оболочки -  $u$ , вдоль касательной к окружности -  $v$ , изменение по радиусу -  $w$ .

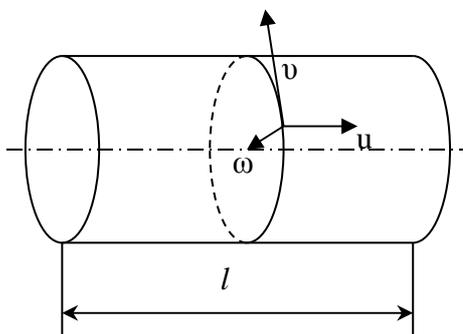


Рис. 1. Модель тонкой цилиндрической оболочки.

$u$  – перемещение точки на поверхности вдоль оболочки,  $v$  – перемещение точки на поверхности вдоль касательной к окружности,  $w$  – перемещение точки на поверхности по радиусу.

Исходную систему уравнений вынужденных колебаний цилиндрической оболочки под действием давления  $P(t)$ , в пренебрежении сил инерции вдоль оболочки и по касательной к окружности ( $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$ ;  $\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0$ ), можно записать в следующем виде [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} - \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \varphi} - \mu \frac{\partial w}{\partial \xi} = 0 \\ \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \varphi} + \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} - \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} - \frac{\partial w}{\partial \varphi} = 0 \\ \mu \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \varphi} - w - k \nabla^4 w = \frac{\rho r^2}{B} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + P(t) \end{cases} \quad (1)$$

где  $\xi = \frac{x}{r}$ ,  $x$  - меняющийся радиус оболочки,  $\varphi$  - угол,  $k = \frac{h^2}{12r^2}$ ,  $h$  - толщина оболочки,  $B = \frac{Eh}{1-\mu^2}$ ,  $E$  - модуль упругости,  $\mu$  - коэффициент Пуассона,  $\rho$  - масса оболочки на единицу площади.

В литературе [9] рассмотрены методы решения данной системы. Считая, что  $P(t) = P \sin \omega t$ , можно найти решение системы для изменения радиуса оболочки  $w$  в следующем виде [2]:

$$w = \frac{16}{\pi^2 \rho h} P \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{mn(\omega_{mn}^2 - \omega^2)} \cos \alpha_m \xi \sin \varphi \sin \omega t \quad (2)$$

где  $\alpha_m = \frac{m\pi r}{l}$ ,  $l$  - длина оболочки,  $m$  - число полуволен в направлении образующей оболочки,  $n$  - число волн по окружности,

$$\omega_{mn}^2 = \frac{Bk}{\omega^2 \rho h} \left[ (\alpha_m^2 + n^2)^2 + \frac{1-\mu}{k} \frac{\alpha_m^4}{(\alpha_m^2 + n^2)^2} \right] - \text{частота собственных колебаний оболочки.}$$

Упругие колебания, изменяя диаметр, вызывают местный изгиб стенки трубы, в результате чего возникает напряжение не только в радиальном направлении, но и вдоль трубы (продольные напряжения -  $\sigma_x$ ) [5].

$$\sigma_x \approx w \left( \frac{3}{1-\mu^2} \right)^{1/2} E \quad (3)$$

В свою очередь, продольные напряжения являются причиной удлинения трубы  $u_x$ , которое можно оценить выражением [2]:

$$u_x \approx \frac{\sigma_x}{E} \approx \left( \frac{3}{1 - \mu^2} \right)^{1/2} \frac{16}{\pi^2 \rho h} P \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(\omega_n^2 - \omega^2)} \cos \alpha_m \xi \sin \varphi \sin \omega t \quad (4)$$

Удлинение приводит к появлению силы  $F$  внутренних напряжений, сдавливающих трубу:

$$F = \frac{ES}{2} \int_0^l \left[ \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right] dx \quad (5)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения оболочки.

Будем считать, что малый поперечный прогиб трубы будет порядка  $w$ . Тогда производные  $\frac{dz}{dx}$  и  $\frac{dy}{dx}$  – порядка  $\frac{w}{l}$ , так что весь интеграл, определяющий силу:

$$F \sim ES \left( \frac{w}{l} \right)^2 l \quad (6)$$

Устойчивое равновесное положение трубы будет сохраняться лишь до тех пор, пока сжимающая сила  $F$  не достигнет своего критического значения. При  $|F| > F_{кр}$  прямолинейное положение трубы будет неустойчивым. Тогда достаточно малого воздействия (например, выталкивающей силы влажного грунта) чтобы равновесие нарушилось.

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (7)$$

где  $I$  – осевой момент инерции поперечного сечения трубы.

На стадии, предшествующей моменту изгиба трубопровода, в нем должны развиваться колебания, как следствие неустойчивости. Форма колебаний должна удовлетворять геометрическому краевому условию задачи. В линейном приближении можно выбрать половину синусоиды:

$$A(x, t) = A(t) \sin \left( \frac{\pi x}{l} \right) \quad (8)$$

где  $A(t)$  – амплитуда колебаний трубы.

Продифференцировав (8) по  $x$  и  $t$ , запишем выражение для потенциальной и кинетической энергии:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{1}{2} m \frac{\alpha}{2} \left( \frac{dA(t)}{dt} \right)^2 = \varepsilon_1 \frac{1}{2} \left( \frac{dA}{dt} \right)^2 \\ V &= \frac{1}{2} \left( EI \left( \frac{\pi}{l} \right)^4 \frac{l}{2} - F \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{l}{2} \right) A_{(x,t)}^2\end{aligned}\quad (9)$$

Из (9) получим выражение для частоты колебаний [7]:

$$\omega^2 = \frac{V_1}{\varepsilon_1} = \frac{(\pi/l)^2}{m} \left( EI \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 - F \right) \quad (10)$$

где  $V_1 = \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \frac{l}{2} \left( EI \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 - F \right)$ ,  $\varepsilon_1 = m \left( \frac{l}{2} \right)$ .

С учетом (6) и (2) получим окончательное выражение:

$$\begin{aligned}\omega_0^2 &\approx \frac{\pi^2}{2l} \left[ EI \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 - \frac{ES}{l} \left( \frac{16}{\pi^2 \rho h} P \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos \alpha_m \xi \sin \varphi}{m \omega_{mn}^2} \sin \omega t \right)^2 \right] \\ \omega_0^2 &\approx \frac{\pi^4 EI}{2l^3} \left[ 1 - \frac{Sl}{\pi^2 I} \left( \frac{16}{\pi^2 \rho h} P \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos \alpha_m \xi \sin \varphi}{m \omega_{mn}^2} \sin \omega t \right)^2 \right]\end{aligned}\quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что на стадии изгиба трубопровода в нем развиваются низкочастотные колебания, которые затухают с ростом давления. 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.

Моменту искривления трубопровода в результате потери устойчивости соответствует условие  $\omega_0^2 = 0$ . Слагаемое в формуле (11) фактически является вероятностью реализации события:

$$\rho = \frac{Sl}{\pi^2 l} \left( \frac{16}{\pi^2 \rho h} P \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos \alpha_m \xi \sin \varphi}{m \omega_{mn}^2} \sin \omega t \right)^2 \quad (12)$$

Плотность вероятности  $\xi(x, t)$  является функцией расстояния и времени эксплуатации трубопровода:

$$\begin{cases} \xi(x, t) = \frac{d\rho(x, t)}{dx} = |A \cdot P_1 K| e^{-kx} + P_2 \\ P = P_0 + P_1 e^{-kx} + P_2 x \end{cases} \quad (13)$$

На рис. 2 приведено сравнение расчетной плотности вероятности с аналогичным значением, полученным после обработки экспериментальных данных [8].

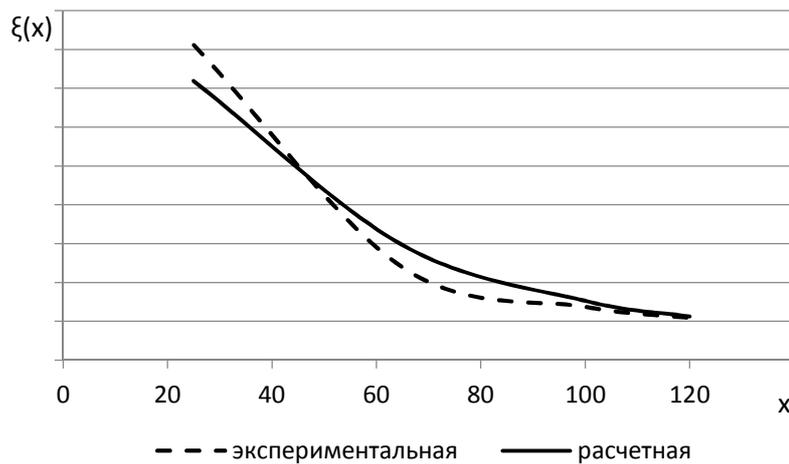


Рис. 2. Сравнение расчетной и экспериментальной плотности вероятности потери устойчивости.

Чаще всего искривление трубопровода связывается со степенью обводненности, как основной причиной. В работе [8] приведен статистический анализ местоположения 99 арочных выбросов, который позволил установить, что опасными с точки зрения потери проектного положения являются участки трубопровода, проложенные на первых 50 км от выхода из КС (76 выбросов), далее от 50-го до 80-го км произошло 15 выбросов, на участке от 80-го км до следующей КС в полностью обводненных траншеях произошло 8 выбросов. Из этого следует, что на удаленном от КС участке, где влияние скачков давления значительно ниже, снижено и число искривлений трубопровода, не смотря на полную обводненность этих участков. Таким образом результат работы хорошо согласуется с экспериментальными

данными, которые указывают на необходимость рассмотрения механизмов искривления, связанных не только с обводненностью грунта.

### **Выводы:**

В результате проведенной работы установлено, что появление низкочастотных колебаний предшествует изменению геометрической формы газопровода и как следствие нарушению его проектного положения, что имеет особое значение для трубопроводов, проложенных в слабонесущих грунтах. Прогнозирование возможных аварийных ситуаций на газопроводе позволяет планировать и своевременно проводить ремонтные работы участков трубопровода с возможным отклонением от проектного положения. Диагностирование участков газопровода за счет выявления изменения частоты колебаний стенки трубы может служить основой для разработки метода мониторинга технического состояния трубопровода.

### **Список литературы**

1. Бачерников В.Ф., Пахаруков Ю. В. Вибрация и разрушения в погружных центробежных электронасосах для добычи нефти. Тюмень – 2005. Издательство ТюмГНГУ – 325с.
2. Воронин К.С. Прогнозирование развития повреждений на магистральном газопроводе под воздействием динамической нагрузки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тюмень: ТюмГНГУ 2013г. – 111с.
3. Воронин К.С., Земенков Ю.Д. Динамические предвестники нарушения геометрической формы газопровода // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2012. № 3. С. 70-72.
4. Воронин К.С., Павлов В.П. Влияние колебаний давления в газопроводе на его отклонение от проектного положения // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы функционирования систем транспорта». Тюмень 2012г. Изд.: ТюмГНГУ
5. 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.
6. Димов Л.А., Богушевская Е. М. Магистральные трубопроводы в условиях болот и обводненной местности. М.: Горная книга: Издательство Московского государственного горного университета, 2010. - 391 с.
7. 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.

8. Курганова И.Н. Теоретическое обоснование результатов натурного обследования газопроводов в непроектном положении // Надежность газопроводных конструкций – М.: ВНИИГАЗ. 1990 – с. 147 – 155.

9. Оксогоев А.А., Слепов Б. И. Прикладная физика. Колебания элементов конструкций. Томск 2003. Издательство НТЛ - 300с.

10. Хариновский В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра 2000г. - 467с.

**Рецензенты:**

Соколов С.М., 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.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Воронин Константин Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», 8323207889 адрес для переписки: voronin\_tsogu@mail.ru

Дудин Сергей Михайлович, ассистент кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», 89088738406 адрес для переписки: srghome@mail.ru

Земенкова Мария Юрьевна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», 89199433533 адрес для переписки: muzemenkova@mail.ru

Закиров Николай Николаевич– профессор, доктор технических наук ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», тел.: 83452283053, адрес для переписки: zemenkov@tsogu.ru

Гладенко Алексей Анатольевич, профессор, доктор технических наук, профессор, кафедра «Нефтегазового дела», ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», тел.:83452201931, адрес для переписки: zemenkov@tsogu.ru