
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.644;004.942

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА НА СЛАБОНЕСУЩИХ ГРУНТАХ

Арбузов Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, главный инженер – первый заместитель генерального директора, ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Звездинка, д. 11, e-mail: rbzv_r_lksvch@mail.ru, blv_srg_rsntvch@mail.ru

Белов Сергей Арсентьевич, начальник отдела по охране труда и промышленной безопасности, ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Звездинка, д. 11, e-mail: rbzv_r_lksvch@mail.ru, blv_srg_rsntvch@mail.ru

Миклуш Александр Сергеевич, ведущий инженер-конструктор 1-ой категории, ООО ПКФ «Вертикаль», 105120, Российская Федерация, г. Москва, Съезжинский переулок, д. 6, e-mail: mklsh_lksndr_srgvch@mail.ru

Ридченко Александр Николаевич, главный инженер, ООО «Стройнадзордиагностика», 142715, Российская Федерация, Московская обл., Ленинский р-он, д. Картино, Производственная база, e-mail: rdchnk_lksndr_nklvch@mail.ru

Воеводин Илья Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: vvdn_l_gnndvch@mail.ru

В статье приводится математическая модель для расчета технологических параметров закрепления магистральных газопроводов на слабонесущих грунтах анкерными устройствами. Модель использует элементы теории нечетких множеств и результаты исследований напряженно-деформированного состояния трубопроводов. Проведено математическое моделирование действующих на газопровод продольных сил, предложен способ определения меры возможности потери устойчивости объекта. Показано, что существенное влияние на критические значения продольных и поперечных нагрузок оказывает не только общая удерживающая способность всех анкеров, но и их возможное различие в несущей способности. Предложена методика оценки влияния качества выполнения строительно-монтажных работ при закреплении анкеров на эксплуатационную надежность участка магистрального газопровода на слабонесущих грунтах. Рассматриваемый подход обеспечивает подключение к задаче надежности детерминированных численных алгоритмов расчета конструкции на прочность и устойчивость.

Ключевые слова: магистральный газопровод, анкерное устройство, слабонесущий грунт, несущая способность, продольная и поперечная нагрузка

**MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE FOR A SECTION
OF THE MAIN GAS PIPELINE USED IN NON-COHESIVE SOILS**

Arbuzov Yuriy A., Ph.D. (Engineering), Chief Engineer – First Deputy General Director, “Gazprom Transgaz Nizhny Novgorod” Ltd. Co., 11 Zvezdinka St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: rbzv_r_lksvch@mail.ru, blv_srg_rsntvch@mail.ru

Belov Sergey A., Head of Department of Labor Protection and Industrial Safety, “Gazprom Transgaz Nizhny Novgorod” Ltd. Co., 11 Zvezdinka St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: rbzv_r_lksvch@mail.ru, blv_srg_rsntvch@mail.ru

Miklush Alexander S., Leading Design Engineer of the First Category, Production and Commercial Company “Vertical” Ltd., 6 Sezhinsky pereulok, Moscow, 105120, Russian Federation, e-mail: mklsh_lksndr_srgvch@mail.ru

Ridchenko Alexander N., Chief Engineer, “Stroynadzordiagnostics” Ltd. Co., Production Base, Kartino village, Leninsky district, Moscow Region, 142715, Russian Federation, e-mail: rdchnk_lksndr_nklvch@mail.ru

Voevodin Ilya G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: vvdn_l_gnndvch@mail.ru

The article presents a mathematical model for calculating the technological parameters needed to repair main gas pipelines in non-cohesive soils. The model, with the help of anchor devices, uses the elements of the 'fuzzy set' theory and relies on research covering the stress-strain state of the pipelines. The mathematical modeling relates to the longitudinal forces acting on the pipeline by presenting a methodology for measuring objective loss of stability. The study reveals that longitudinal and transverse forces have a significant effect on the critical mathematical values, affecting not only the anchors' general retention capacity but also the possible difference in their load capacity. The paper suggests methods for assessing the anchors' impact on the quality of construction and installation, and for installing devices that address the operational reliability challenges of the pipeline section located in non-cohesive soils. This approach, in conclusion, is designed to strengthen the reliability of the calculation's deterministic numerical algorithms in order to boost the overall stability of the pipeline construction.

Keywords: main gas pipeline, anchor devices, non-cohesive soils, retention capacity, longitudinal and transverse load

Потеря устойчивости линейно-протяженного объекта, например, магистрального газопровода, проложенного на слабонесущих обводненных грунтах, может привести к нарушению проектной прочности объекта, требует значительных затрат на проведение ремонтных работ и возвращение объекта в проектное положение [2, 5]. Качество выполнения работ по закреплению магистральных газопроводов находится в прямой зависимости от правильной разработки траншеи и укладки в нее газопровода. Кроме того, практика показывает, что потеря устойчивости газопровода может быть вызвана действующими на него нагрузками, которые обусловлены изменениями температуры и давления транспортируемого по нему продукта [1, 3, 4, 6, 7].

Математическое моделирование действующих на газопровод продольных сил. Определим $\Delta t = |t_c - t|$ – положительный перепад температуры газа на данном участке магистрального газопровода (t_c – температура, при которой участок газопровода был зафиксирован на проектных отметках с помощью анкеров, t – температура транспортируемого газа) и p – давление газа на данном участке газопровода как треугольные нечеткие числа при помощи интервальной модели.

Газопровод представляется как элемент с внутренним давлением p , в котором имеются продольные напряжения $s_{пр}$ в стенках трубы, кольцевые напряжения $\sigma_{кц}$, определяемые как для безмоментной оболочки

$$\sigma_{кц} = [p \cdot D_{вн} / (2 \cdot \delta)]. \quad (1)$$

Влияние отброшенной части трубы заменяется усилием

$$p \cdot F_{вн} = 0,25 \cdot \pi \cdot p \cdot D_{вн}^2 = [p \cdot D_{вн} / (2 \cdot \delta)] \cdot [p \cdot D_{вн} \cdot \delta / 2] = 0,5 \cdot \sigma_{кц} \cdot F, \quad (2)$$

где $F_{вн}$ – площадь внутренней полости трубы; F – площадь поперечного сечения стенки трубы.

Для газопровода эквивалентным продольным усилием является равнодействующая усилия от внутреннего давления и усилия в стенке трубы N

$$S = p \cdot F_{вн} - N = 0,5 \cdot \sigma_{кц} \cdot F - \sigma_{пр} \cdot F. \quad (3)$$

Продольные напряжения $\sigma_{пр}$ определяются расчетом в соответствии с правилами строительной механики. Наибольшее напряжение в сечении в упругой стадии равно

$$\sigma_{пр} = \nu_0 \cdot \sigma_{кц} - \alpha_t \cdot E_0 \cdot \Delta t + 0,5 \cdot E_0 \cdot D_n / \rho, \quad (4)$$

где ν_0 – коэффициент Пуассона; α_t – коэффициент линейного расширения; Δt – температурный перепад; E_0 – модуль упругости; D_n – наружный диаметр газопровода; ρ – радиус кривизны.

Формула справедлива и для упруго-пластических деформаций, если под модулем упругости E_0 понимать мгновенный модуль упругости для нелинейной диаграммы $\sigma_i - \epsilon_i$.

Если последним членом в формуле (4) можно пренебречь по сравнению с вкладом двух первых членов, то эквивалентное продольное осевое усилие в сечении газопровода S определяется по формуле

$$S = [(0,5 - \nu_0) \cdot p \cdot D_{вн} / \delta + \alpha_t \cdot E_0 \cdot \Delta t] \cdot F, \quad (5)$$

т.е. усилие зависит от внутреннего давления p и температурного перепада Δt .

В дальнейшем можно отделить данные по летним и зимним перепадам и представить их разными нечеткими величинами. Очевидно, летние перепады будут больше, чем зимние, но в сочетании с давлением, которое зимой больше, чем летом, нельзя определенно сказать, какой случай более опасен с точки зрения эксплуатационной надежности.

Для давления тоже пока не будем рассматривать сезонные колебания, а запишем функцию принадлежности для всего периода наблюдения T

$$\mu(p|T) = 1 - |p_0 - p| / \Pi_p, \text{ если } p_0 - \Pi_p \leq p \leq p_0 + \Pi_p; \quad (6)$$

$$\mu(p|T) = 0 \text{ в противном случае,} \quad (7)$$

где $p_0 = 0,5 \cdot (p_{\max} + p_{\min})$; $\Pi_p = p_{\max} - p_0$; $p_{\max} = \max\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$; $p_{\min} = \min\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$.

Пусть для Δt имеется ряд наблюдений, соответствующих максимальному положительному перепаду за период времени τ : $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$. Тогда считаем, что функция принадлежности для Δt отнесенная к временному интервалу $T = n \cdot \tau$ будет иметь следующий вид:

$$\mu(\Delta t|T) = 1 - |\Delta t_0 - \Delta t| / \Pi_{\Delta t}, \text{ если } \Delta t_0 - \Pi_{\Delta t} \leq \Delta t \leq \Delta t_0 + \Pi_{\Delta t}; \quad (8)$$

$$\mu(\Delta t|T) = 0 \text{ в противном случае,} \quad (9)$$

где $\Delta t_0 = 0,5 \cdot (\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min})$; $\Pi_{\Delta t} = \Delta t_{\max} - \Delta t_0$; $\Delta t_{\max} = \max\{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n\}$; $\Delta t_{\min} = \min\{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n\}$.

Функцию принадлежности эквивалентной продольной силы

$$S = A \cdot p + B \cdot \Delta t \quad (10)$$

находим, применяя принцип обобщения

$$\mu(S|T) = \max_S \{ \mu_p(p) \wedge \mu_{\Delta t}(\Delta t) \}, \quad (11)$$

где $A = (0,5 - v_0) \cdot F \cdot D_{BH} / \delta$, $B = \alpha_t \cdot E_0 \cdot F$.

Нетрудно показать, что если $\mu_p(p)$ и $\mu_{\Delta t}(\Delta t)$ – треугольные функции принадлежности, то и $\mu(S)$ тоже будет треугольной функцией принадлежности

$$\mu(S|T) = 1 - |S_0 - S| / \Pi_S, \text{ если } S_0 - \Pi_S \leq S \leq S_0 + \Pi_S; \quad (12)$$

$$\mu(S|T) = 0 \text{ в противном случае,} \quad (13)$$

где $S_0 = A \cdot p_0 + B \cdot \Delta t_0$; $\Pi_S = A \cdot \Pi_p + B \cdot \Pi_{\Delta t}$.

Отметим, что большему интервалу времени T соответствует более широкая функция принадлежности, так как прибавляются новые наблюдения и интервал наблюдаемых величин может только увеличиться или остаться таким же. Это вполне согласуется с тем фактом, что возможность отказа за более длинный интервал времени увеличивается.

Рассмотрим численный пример. Интервал времени считаем равным $T = 30$ годам. Исходные характеристики и параметры: $D_H = 1420$ мм; $\delta = 16,5$ мм; $F = 0,25 \cdot p \cdot (D_H^2 - D_{BH}^2) = 727,52 \text{ см}^2$; $E_0 = 2,1 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2$; $v_0 = 0,3$; $\alpha_t = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$. Введенные выше константы A и B тогда равны $A = 12377 \text{ Н/МПа}$, $B = 183335 \text{ Н/град}$.

Итак, температурный перепад Δt и давление газа p (причем это может быть вызвано нарушениями режима в виде перегрузок; многие газопроводы недогружены, и неопределенность максимального значения давления может находиться в пределах допустимых значений) определены как нечеткие числа

$$\Delta t(\alpha) = (1 - \alpha) \cdot \Delta t_{\max} + 0,5 \cdot \alpha \cdot (\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}); \quad (14)$$

$$p(\alpha) = (1 - \alpha) \cdot p_{\max} + 0,5 \cdot \alpha \cdot (p_{\max} + p_{\min}), \quad (15)$$

где $0 \leq \alpha \leq 1$ – мера неопределенности; $\Delta t_{\min} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\max} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_{\min} = 6,5 \text{ МПа}$; $p_{\max} = 7,5 \text{ МПа}$.

Таким образом, функция принадлежности для продольной силы S будет представлять собой нечеткое число

$$S(\alpha) = (1 - \alpha) \cdot S_{\max} + 0,5 \cdot \alpha \cdot (S_{\max} + S_{\min}), \quad (16)$$

где $S_{\min} = 5580 \text{ кН}$; $S_{\max} = 12926 \text{ кН}$.

Определение меры возможности потери устойчивости объекта. Пусть имеются две нечеткие величины, определенные на одном базовом пространстве – это нагрузка $S(t)$ и несущая способность рассматриваемой системы $N(t)$. Условие безотказной работы системы в каждый момент времени $t \in [0, T]$: $S(t) < N(t)$.

Если предположить, что несущая способность $N(t)$ от времени не зависит, то указанное условие для $t \in [0, T]$ можно переписать в виде

$$S < N; S = \max \{S(t)\}. \quad (17)$$

Соответственно, запишем условия принадлежности: для нагрузки $(S) - \mu_S(x|T)$ и для несущей способности $(N) - \mu_N(x)$.

За меру возможности отказа системы в течение промежутка времени T примем величину $\mu(T)$, равную

$$\mu(T) = \max_{x=y} \{ \mu_S(x) \wedge \mu_N(y) \}. \quad (18)$$

Отметим, что функции принадлежности $\mu_S(x)$ и $\mu_N(y)$, как правило, неизвестны и находятся, в свою очередь, из решения независимых задач. Например, можно считать, что

$$S = f_S(M_1, M_2, \dots, M_m); N = f_N(W_1, W_2, \dots, W_w; R_1, R_2, \dots, R_r), \quad (19)$$

где $M_1, M_2, \dots, M_m$ и $W_1, W_2, \dots, W_w$ – некоторые первичные нечеткие величины, а $R_1, R_2, \dots, R_r$ – некоторые параметры системы, выбираемые при проектировании.

Пусть функции принадлежности нечетких величин $M_1, M_2, \dots, M_m$ и $W_1, W_2, \dots, W_w$ известны – это $k \cdot M_1(x), k \cdot M_2(x), \dots, k \cdot M_m(x)$ и $k \cdot W_1(x), k \cdot W_2(x), \dots, k \cdot W_w(x)$. Тогда $m_S(x|T)$ и $m_N(x)$ находятся в результате применения принципа обобщения

$$\mu_S(x|T) = \max_{i \in S} \{k \cdot M_1(x_1) \wedge k \cdot M_2(x_2) \wedge \dots \wedge k \cdot M_m(x_m)\}; \quad (20)$$

$$\mu_N(x) = \max_{i \in N} \{k \cdot W_1(x_1) \wedge k \cdot W_2(x_2) \wedge \dots \wedge k \cdot W_w(x_w)\}. \quad (21)$$

После подстановки (20) и (21) в (18) получим, что показатель надежности $\mu(T)$ является функцией от параметров системы $R_1, R_2, \dots, R_r$

$$\mu(T) = \mu(T; R_1, R_2, \dots, R_r). \quad (22)$$

Таким образом, задача сводится к такому выбору величин $R_1, R_2, \dots, R_r$, чтобы обеспечить некоторое наперед заданное значение α , т.е.

$$\alpha = \mu(T; R_1, R_2, \dots, R_r). \quad (23)$$

Оперируя понятием α -среза, можно теперь перейти к следующей формулировке рассматриваемой задачи: так как α -срезы для нечетких величин S и N должны совпадать $S(\alpha) = N(\alpha)$, то это условие становится уравнением и набор проектируемых параметров $R_1, R_2, \dots, R_r$ должен этому уравнению удовлетворять. Отметим, что именно такой подход обеспечивает подключение к задаче надежности детерминированных численных алгоритмов расчета конструкции на прочность и устойчивость.

Список литературы

1. Анохин Н. Н. Строительная механика в примерах и задачах. Статически неопределимые системы / Н. Н. Анохин. – Москва : Ассоциация строительных вузов (АСВ), 2000. – Ч. 2. – 464 с.
2. Быков Л. И. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов / Л. И. Быков, Ф. М. Мустафин, С. К. Рафиков и др. – Санкт-Петербург : Недра, 2006. – 824 с.
3. ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – Москва : Минстрой РФ, 1996. – 26 с.
4. Колотилов Ю. В. Особенности эффективного использования анкерных устройств при сооружении магистральных газопроводов / Ю. В. Колотилов, А. М. Короленок, Е. И. Федоров и др. – Москва : Нефтяник, 1998. – 86 с.
5. Колотилов Ю. В. Функционально-технологический мониторинг системы обслуживания и ремонта газопроводов / Ю. В. Колотилов, М. Ю. Митрохин, А. Д. Решетников и др. – Москва : Известия, 2009. – 512 с.
6. Решетников А. Д. Технологические процессы строительства и капитального ремонта магистральных газопроводов в сложных природно-климатических условиях / А. Д. Решетников. – Москва : СИП РИА, 2004. – 320 с.
7. СТО Газпром 2-2.3-231-2008. Правила производства работ при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром». – Москва : ИРЦ Газпром, 2008. – 72 с.

References

1. Anokhin N. N. *Stroitel'naya mekhanika v primerakh i zadachakh. Staticheski neopredelimye sistemy* [Structural mechanics in examples and tasks. Statically indeterminate systems]. Moscow, Association of Engineering Universities, 2000, part 2. 464 p.
2. Bykov L. I., Mustafin F. M., Rafikov S. K. et al. *Tipovye raschety pri sooruzhenii i remonte gazonefteprovodov* [Model calculations at the construction and repair of oil and gas pipelines]. Saint-Petersburg, Nedra, 2006. 824 p.
3. *GOST 20522-96. Grunty. Metody statisticheskoy obrabotki rezultatov ispytaniy* [State Standard 20522-96. Soils. The method of statistical treatment of test results]. Moscow, Russian Ministry of Construction, 1996. 26 p.

4. Kolotilov Yu. V., Korolenok A. M., Fedorov E. I. et al. *Osobennosti effektivnogo ispolzovaniya ankernykh ustroystv pri sooruzhenii magistralnykh gazoprovodov* [Features of effective use of anchorages when constructing main gas pipelines]. Moscow, Oilman, 1998. 86 p.

5. Kolotilov Yu. V., Mitrokhin M. Yu., Reshetnikov A. D. et al. *Funktsionalno-tekhnologicheskii monitoring sistemy obsluzhivaniya i remonta gazoprovodov* [Functional and technological monitoring of gas pipelines repair and maintenance system]. Moscow, Izvestiya, 2009. 512 p.

6. Reshetnikov A. D. *Tekhnologicheskie protsessy stroitelstva i kapitalnogo remonta magistralnykh gazoprovodov v slozhnykh prirodno-klimaticheskikh usloviyakh* [Technological processes of construction and general repair of main gas pipelines in difficult natural and climatic conditions]. Moscow, 2004. 320 p.

7. *STO Gazprom 2-2.3-231-2008. Pravila proizvodstva rabot pri kapitalnom remonte lineynoy chasti magistralnykh gazoprovodov OAO «Gazprom»* [Organization Standard Gazprom 2-2.3-231-2008. Work production rules at major overhaul of linear part of main gas pipelines of JSC "Gazprom"]. Moscow, Information and Advertising Center Gazprom, 2008. 72 p.

УДК 621.644; 52-17

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ НА СЛАБОНЕСУЩИХ ГРУНТАХ

Арбузов Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, главный инженер – первый заместитель генерального директора, ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Звездинка, д. 11, e-mail: rbzv_r_lksvch@mail.ru, blv_srg_rsntvch@mail.ru

Белов Сергей Арсентьевич, начальник отдела по охране труда и промышленной безопасности, ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Звездинка, д. 11, e-mail: rbzv_r_lksvch@mail.ru, blv_srg_rsntvch@mail.ru

Воеводин Илья Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: vvdn_l_gnndvch@mail.ru

Миклуш Александр Сергеевич, ведущий инженер-конструктор 1-ой категории, ООО ПКФ «Вертикаль», 105120, Российская Федерация, г. Москва, Съезжинский переулок, д. 6, e-mail: mkls_hksndr_srgvch@mail.ru

Ридченко Александр Николаевич, главный инженер, ООО «Стройнадзордиагностика», 142715, Российская Федерация, Московская обл., Ленинский р-он, д. Картино, Производственная база, e-mail: rdchnk_lksndr_nklvch@mail.ru

Кузнецов Петр Александрович, доктор технических наук, генеральный директор, Научно-производственное объединение ООО «Инвестстройэкология», 142717, Российская Федерация, Московская обл., Ленинский р-он, д. Картино, e-mail: kzncv_ptr_lksndrvch@mail.ru

Предложен алгоритм анализа устойчивости закрепленного анкерами магистрального газопровода на слабонесущих обводненных грунтах, основанный на использовании элементов теории нечетких множеств, математической модели и методики оценки влияния качества выполнения строительно-монтажных работ на эксплуатационную надежность участка магистрального газопровода. Определено, что существенное влияние на величину предельной поперечной нагрузки оказывает не только качество установки анкеров, но и их количество. Показано, что наибольшее значение для обеспечения устойчивости газопровода имеет качество анкеров, наиболее близко расположенных к середине участка. Построенный алгоритм позволяет оценить возможность обеспечения продольной устойчивости при неравномерной установке анкеров по длине газопровода. Разработанные алгоритмы многовариантных автоматизированных расчетов создают методологическую базу обоснования и выбора основных требований к технологическим пара-