DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-3-124-134
УДК 622.692.4.074.2

Х.А. Азметов, К.В. Кожаева, Л.И. Быков (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация), **Ю.В. Дудников** (Управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования по Республике Башкортостан, г. Уфа, Российская Федерация)

АНАЛИЗ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В ПРОДОЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Khasan A. Azmetov, Kseniya V. Kozhaeva, Leonid I. Bykov
(Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation),
Yuriy V. Dudnikov (Federal Service for Supervision of Natural Resources
of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russian Federation)

ANALYSIS OF THE TOTAL RESISTANCE OF UNDERWATER PIPELINES IN LONGITUDINAL DIRECTION

Введение

Потеря устойчивости трубопроводов нефтегазовой отрасли сопровождается значительными отклонениями от проектного положения с возникновением чрезмерных, часто недопустимых механических напряжений в стенке труб и их повреждением. Повреждения трубопроводов для перекачки нефти, нефтепродуктов и газа связаны с большими затратами.

Потеря общей устойчивости подводных трубопроводов в продольном направлении и их повреждения при этом связаны с еще более повышенными затратами и требует отдельного анализа. При этом необходимо учесть возможный размыв под действием течения воды грунтовой засыпки над трубопроводом, уложенным в траншею, влияющий на устойчивость трубопровода.

Цели и задачи

Получить аналитические выражения для определения продольного сжимающего критического усилия, при котором наступает потеря продольной устойчивости подводного трубопровода, уложенного в траншею и засыпанного грунтом в условиях размыва засыпки на определенном участке.

Background

The loss of stability of oil and gas pipelines is accompanied by significant deviations from the design position with the occurrence of excessive, often unacceptable mechanical stresses in the pipe wall and their damage. Damage to pipelines for pumping oil, oil products and gas is associated with high costs.

The loss of the underwater pipelines overall stability in the longitudinal direction and their damage is associated with even higher costs and requires a separate analysis. In this case, it is necessary to take into account the possible erosion under the action of the water flow of the soil backfill over the pipeline laid in the trench, which affects the stability of the pipeline.

Aims and Objectives

Obtain analytical expressions for the determination of the longitudinal compressive critical force at which the loss of longitudinal stability of the underwater pipeline laid in a trench and covered with soil in conditions of erosion of backfill in a certain area occurs.

Результаты

Получена зависимость критического усилия, приводящего к потере продольной устойчивости подводного трубопровода, от протяженности размытого участка, геометрических характеристик труб, его веса с перекачиваемым продуктом и пригрузом и свойств грунта, контактирующего с трубопроводом.

Results

The dependence of the critical force resulting in the loss of the longitudinal stability of the underwater pipeline, on the extent of the blurred section, the geometric characteristics of the pipes, its weight with the pumped product and the load, and the properties of the soil in contact with the pipeline is obtained.

Ключевые слова: подводный трубопровод, положительный температурный перепад, устойчивость в продольном направлении, размытый участок, продольное сжимающее усилие, критическое продольное усилие, потеря устойчивости

Key words: underwater pipeline, positive temperature difference, stability in the longitudinal direction, washed out section, longitudinal compressive force, critical longitudinal force, stability loss

Потеря общей устойчивости трубопроводов нефтегазовой отрасли происходит в условиях воздействия достаточно высокого в металле труб положительного температурного перепада. Проверка общей устойчивости трубопроводов в продольном направлении производится в плоскости наименьшей жесткости. Для подземных трубопроводов, уложенных в траншею на нормативную глубину, таковой является вертикальная плоскость. При этом потеря устойчивости происходит с перемещением трубопровода вертикально вверх. Для подземных трубопроводов грунт оказывает сопротивление их перемещениям и тем самым способствует обеспечению устойчивости трубопровода.

Анализируется общая устойчивость подводного трубопровода достаточной протяженности, сооруженного с учетом требований [1, 2]. Протяженность анализируемого участка трубопровода больше участка, участвующего в выпучивании при потере продольной устойчивости. Подводный трубопровод уложен в траншею и засыпан грунтом.

Расчетная схема трубопровода приведена на рисунке 1.

The loss of the overall stability of the oil and gas industry pipelines occurs under conditions of the effect of a positive temperature difference in the pipe metal that is sufficiently high. Check of the general stability of pipelines in the longitudinal direction is carried out in the plane of the least rigidity. For underground pipelines laid in a trench to the normative depth, this is the vertical plane. The loss of stability occurs with the pipeline moving vertically upwards. For underground pipelines, the ground impedes their movement and thus contributes to the stability of the pipeline.

The general stability of a submarine pipeline of sufficient length is analyzed, which was constructed taking into account the requirements [1, 2]. The length of the analyzed section of the pipeline is greater than the portion involved in buckling with a loss of longitudinal stability. Underwater piping is laid in a trench and covered with soil.

The calculation scheme of the pipeline is shown in Figure 1.

Рисунок 1. Расчетная схема подводного трубопровода

Figure 1. The calculation scheme of the underwater pipeline

Участок трубопровода, участвующий в выпучивании, опирается на достаточно жесткое основание, содержит изогнутый участок l и включает участки справа и слева от изогнутого, в которых происходят продольные перемещения трубопровода в сторону выпучивания. В соответствии с требованиями [1] при проверке продольной устойчивости подводного трубопровода допускается учитывать вес грунта засыпки толщиной 1,0 м при соблюдении заглубления в дно водоема не менее 1,0 м. Анализ технического состояния подводных трубопроводов показывает, что по разным причинам в ряде подводных переходов имеется размыв грунтовой засыпки на определенных участках трубопровода [3-5].

Проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении производится в плоскости наименьшей жесткости системы. Для подводного трубопровода с учетом возможного размыва грунта над ним проверку продольной устойчивости следует производить в вертикальной плоскости с выпучиванием вверх.

Продольно-поперечным перемещениям достаточно протяженных подземных трубопроводов в условиях действия продольных сжимающих усилий посвящены работы [6-13]. С учетом рекомендаций указанных работ, дифференциальное уравнение рав-

The section of the pipeline involved in bulging rests on a sufficiently rigid base, contains a curved section l and includes sections to the right and left of the curved, in which the longitudinal movements of the pipeline take place in the direction of buckling. In accordance with the requirements [1], when checking the longitudinal stability of a underwater pipeline it is allowed to take into account the weight of the filling soil 1.0 m thick while observing the penetration into the bottom of the reservoir at least 1.0 m. Analysis of the technical condition of underwater pipelines shows that, for various reasons, transitions there is erosion of soil backfilling at certain sections of the pipeline [3-5].

The overall stability of the pipeline in the longitudinal direction is checked in the plane of the least rigidity of the system. For the underwater pipeline, taking into account possible erosion of the soil above it, the longitudinal stability test should be carried out in a vertical plane with buckling upwards.

Longitudinal and transverse displacements of sufficiently extended underground pipelines under the action of longitudinal compressive forces are discussed in [6-13]. Taking into account the recommendations of these works, the differential equation of equilibrium of

новесия изогнутого под действием продольного сжимающего усилия подводного трубопровода с размывом его участка от грунтовой засыпки примем в виде

$$EJv^{IV} + Nv^{II} = -q, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала трубопровода, кгс/см²;

J – осевой момент инерции поперечного сечения трубопровода, см⁴;

v – поперечные перемещения (прогибы) трубопровода, см;

N – продольное сжимающее усилие, действующее на изогнутом участке трубопровода, кгс;

q – сопротивление поперечным перемещениям трубопровода на изогнутом участке, кгс/см.

Из-за симметрии расчетной схемы можно рассматривать только область $0 \leq x \leq \frac{l}{2}$.

Сопротивление поперечным перемещениям трубопровода на изогнутом участке равно:

$$q = q_1 = q_T - q_B \text{ на участке } 0 \leq x \leq \frac{b}{2};$$

$$q = q_2 = q_T + q_{rp} \text{ на участке } x \geq \frac{b}{2}.$$

Здесь q_T – вес трубопровода с продуктом и пригрузом в воздухе, кгс/см;

q_B – выталкивающая сила воды, действующая на трубопровод с пригрузом, кгс/см;

q_{rp} – сопротивление грунтовой засыпки поперечным перемещениям трубопровода, кгс/см;

b – протяженность оголенного от грунтовой засыпки участка трубопровода, см;

l – протяженность изогнутого участка трубопровода, см.

Сила q_B определяется с учетом фактического оголения трубопровода (по всему периметру или части его), плотности воды или плотности разжиженного грунта по рекомендациям [1]. Сопротивление грунтовой засыпки q_{rp} определяется по рекомендациям работ [14, 15].

Для получения аналитической зави-

a underwater pipeline bent under the action of a longitudinal compressive force with the erosion of its section from the ground filling shall be taken in the form

where E is the modulus of elasticity of the pipeline material, kgf / cm²;

J - axial moment of inertia of the cross section of the pipeline, cm⁴;

v - lateral movements (deflections) of the pipeline, cm;

N - longitudinal compressive force acting on the curved section of the pipeline, kgf;

q - resistance to transverse movements of the pipeline on the curved section, kgf / cm.

Because of the symmetry of the calculation scheme, only the domain $0 \leq x \leq \frac{l}{2}$ can be considered.

Resistance to transverse movements of the pipeline on the curved section is:

$$q = q_1 = q_T - q_B \text{ on the section } 0 \leq x \leq \frac{b}{2};$$

$$q = q_2 = q_T + q_{rp} \text{ on the section } x \geq \frac{b}{2}.$$

Here q_T is the weight of the pipeline with the product and the load in the air, kgf / cm;

q_B – pushing force of water, acting on the pipeline with the load, kgf / cm;

q_{rp} – resistance of soil backfilling to transverse movements of the pipeline, kgf / cm;

b – length of the section of the pipeline stripped from the ground, cm;

l – extent of the curved section of the pipeline, cm.

The force q_B is determined by taking into account the actual stripping of the pipeline (along the entire perimeter or part thereof), the density of water or the density of the liquefied ground, as recommended [1]. The resistance of the soil backfill q_{rp} is determined by the recommendations [14, 15].

To obtain an analytical dependence on

симости по определению продольного сжимающего усилия, приводящего к потере продольной устойчивости подводного трубопровода, следует получить аналитическое выражение минимального значения этого усилия для равновесного состояния изогнутого трубопровода [16, 17]. При этом необходимо учесть, что в процессе изгиба трубопровода происходит снижение значения продольного сжимающего усилия от N_0 до равновесного N . Усилие N_0 соответствует условию отсутствия перемещений трубопровода.

Решением уравнения (1) с учетом изложенных условий, следуя рекомендациям [7, 8, 11-13], получена аналитическая зависимость между нагрузками, действующими на трубопровод (N, q_τ, q_{rp}, q_B), и протяженностями l и b в виде

$$\bar{q} \cdot (tga - a) - \cos(a - b_0)[tga - tg(a - b_0)] + b_0 = 0, \quad (2)$$

где

$$a = \frac{kl}{2}; k = \sqrt{\frac{N}{EJ}}; b_0 = \frac{kb}{2}; \bar{q} = \frac{1 + \xi_{rp}}{\xi_{rp} + \xi_B}; \xi_{rp} = \frac{q_{rp}}{q_\tau}; \xi_B = \frac{q_B}{q_\tau}.$$

Уравнение (2) позволяет найти первое от нуля минимальное значение параметра a для заданных величин ξ_{rp} , ξ_B и b_0 . Обозначим это значение a через a_M . Используя выше принятые условные обозначения, имеем $k = \frac{2a_M}{l}$.

Тогда для продольного усилия N можно записать

$$N = k^2 EJ = \left(\frac{2a_M}{l}\right)^2 EJ. \quad (3)$$

Примем также, что $\frac{b}{l} = \frac{b_0}{a} = \varepsilon$.

Исходя из расчетной схемы параметр ε может принимать значения от 0 до 1. При значениях $\varepsilon = 0$ (отсутствие размыва грунта) и $\varepsilon = 1$ (протяженность размыва участка равна протяженности изогнутого участка) по (2) имеем $a_M = 4,49$. В интервале значений b_0 от 0 до $b_0 = a$, то есть при значениях ε от 0

the determination of the longitudinal compressive force resulting in the loss of the longitudinal stability of the underwater pipeline, an analytical expression of the minimum value of this force should be obtained for the equilibrium state of the bent pipe [16, 17]. It should be taken into account that during the bending of the pipeline, the value of the longitudinal compressive force decreases from N_0 to the equilibrium N . The force N_0 corresponds to the condition of absence of pipeline movements.

By solving the equation (1), taking into account the above conditions, following the recommendations [7, 8, 11-13], an analytical dependence was obtained between the loads acting on the pipeline (N, q_τ, q_{rp}, q_B) and the lengths l and b in the form

where

Equation (2) allows to find the first minimum value of the parameter a for zero for the given quantities ξ_{rp} , ξ_B and b_0 . We denote this value of a by a_M . Using the above conventions, we have $k = \frac{2a_M}{l}$.

Then for the longitudinal force N we can write

We also assume that $\frac{b}{l} = \frac{b_0}{a} = \varepsilon$.

Based on the design scheme, the parameter ε can take values from 0 to 1. For values $\varepsilon = 0$ (no erosion of the soil) and $\varepsilon = 1$ (the length of the blurred section is equal to the length of the curved section), according to (2), we have $a_M = 4,49$. In the range of values of b_0 from 0 to $b_0 = a$, that is, for values of ε from 0

до 1 значение $a_M < 4,49$.

На основе анализа аналитического выражения (2) в области реальных значений ξ_{rp} и ξ_B может быть принято, что при $\varepsilon = 0,5$ значение a имеет наименьшее значение a_M и определяется по формуле

$$a_M = 4,2878 + 0,0161\xi_{rp} - \xi_B(1,1633\xi_{rp} - 0,5016) - \xi_B^2(1,0111 - 1,0890\xi_{rp}). \quad (4)$$

Таким образом, в области значений ε больше 0 и меньше 1 в условиях $\xi_B \leq 0,9$ и $\xi_{rp} \leq 0,1$ значение a_M с достаточной точностью может быть вычислено по формуле (4).

При значениях

$$\varepsilon \neq 0, \varepsilon \neq 1, \xi_B > 0,9 \text{ и } \xi_{rp} > 0,1$$

параметр a_M определяется решением уравнения (2).

Зависимость между продольными усилиями N_0 и N и параметрами выпучивания трубопровода при потере его устойчивости имеет вид [7]:

$$N_0 = N - 0,5p_{rp}l \left[1 - \sqrt{1 + \frac{4EF\Delta}{p_{rp}l^2}} \right], \quad (5)$$

где p_{rp} – сопротивление грунта продольным перемещениям трубопровода;

F – площадь поперечного сечения трубы;

Δ – увеличение длины трубопровода при его изгибе в условиях потери продольной устойчивости.

Увеличение длины Δ равно разности длин изогнутого и начального состояния (до потери устойчивости) трубопровода на участке l . Указанное увеличение длины на участке $0 < x < 0,5l$ может быть вычислено по рекомендациям работ [8, 11] по формуле

$$\Delta = \frac{\pi^2 v_0^2}{8l}, \quad (6)$$

где v_0 – максимальный прогиб трубопровода, определяемый решением уравнения (1) с учетом анализируемых условий.

Расчетная формула для вычисления v_0 при значении $a = a_M$ имеет вид

to 1 the value $a_M < 4,49$.

On the basis of the analysis of the analytical expression (2) in the range of real values ξ_{rp} and ξ_B , it can be assumed that for $\varepsilon = 0,5$ the value of a has the smallest value a_M and is determined by the formula

Thus, in the range of values of ε is greater than 0 and less than 1 under the conditions $\xi_B \leq 0,9$ and $\xi_{rp} \leq 0,1$, the value of a_M can be calculated with sufficient accuracy by the formula (4).

For values of

$$\varepsilon \neq 0, \varepsilon \neq 1, \xi_B > 0,9 \text{ and } \xi_{rp} > 0,1$$

the parameter a_M is determined by the solution of equation (2).

The relationship between the longitudinal forces N_0 and N and the parameters of buckling of the pipeline with loss of its stability has the form [7]:

where p_{rp} is the resistance of the soil to the longitudinal movements of the pipeline;

F is the cross-sectional area of the pipe;

Δ – increase in the length of the pipeline when it is bent under conditions of loss of longitudinal stability.

The increase in length Δ is equal to the difference between the lengths of the curved and the initial state (before loss of stability) of the pipeline in section l . This increase in the length in the section $0 < x < 0,5l$ can be calculated by the recommendations of [8, 11] by the formula

where v_0 is the maximum deflection of the pipeline, determined by the solution of equation (1) with allowance for the analyzed conditions.

The calculation formula for computing v_0 for $a = a_M$ has the form

$$v_0 = \frac{q_T}{EJ} \left(\frac{l}{2a_M} \right)^4 \cdot \bar{v}_0, \quad (7)$$

$$\bar{v}_0 = 1 + \frac{a_M^2}{2} - \frac{1}{\cos a_M} - \xi_B \left\{ 1 + \frac{a_M^2}{2} - \frac{a_M(1-\varepsilon)^2}{2} - \frac{\cos[a_M(1-\varepsilon)]}{\cos a_M} \right\} + \xi_{rp} \left\{ \frac{\cos[a_M(1-\varepsilon)]}{\cos a_M} + \frac{[a_M(1-\varepsilon)]^2}{2} - \frac{1}{\cos a_M} \right\}. \quad (8)$$

Подставляя в уравнение (5) значение N по (3), Δ по (6) и с учетом принятых условных обозначений, получим значения сжимающего усилия для равновесных состояний изогнутого участка трубопровода в условиях потери продольной устойчивости в виде

$$N_{0\text{ }kp} = 0,5p_{rp} \cdot l \left[A_1 \frac{a_M^2}{l^3} - \left(1 + A_2 \cdot \frac{\bar{v}_0 \cdot l^5}{a_M^8} \right)^{0,5} \right], \quad (9)$$

где

$$\text{where} \\ A_1 = \frac{8EJ}{p_{rp}}; A_2 = \left(\frac{q_{rp}}{J} \right)^2 \cdot \frac{F}{25,94E \cdot p_{rp}}.$$

Минимизация выражения (9) по l позволяет получить нижнее критическое усилие N_{kp} [7].

В соответствии с требованиями [1], с целью обеспечения устойчивости трубопровода в продольном направлении должно соблюдаться условие

$$S \leq \frac{m}{1,1} \cdot N_{kp}, \quad (10)$$

где S - продольное сжимающее усилие, определяемое в зависимости от температурного перепада и расчетного внутреннего давления;

m - коэффициент условий работы трубопровода [1].

В качестве примера рассмотрим устойчивость подводного газопровода $\varnothing 529 \times 10$ мм в условиях оголения трубопровода на достаточно протяженном участке от грунтовой засыпки. С учетом данных по [14,15] имеем

$$q_T = 2,2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}; p_r = 2,42 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}; q_B = 2,0 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}; \\ F = 163 \text{ см}^2; J = 54659 \text{ см}^4.$$

Для рассматриваемого условия параметр $\varepsilon = 1$. Тогда по (2) первое от нуля значение a равно 4,49, то есть по принятому нами обозначению $a_M = 4,49$. По (8) имеем

Substituting in (5) the value of N by (3), Δ by (6) and taking into account the adopted symbols, we obtain the values of the compressive force for the equilibrium states of the curved section of the pipeline under conditions of loss of longitudinal stability in the form

Minimizing expression (9) with l makes it possible to obtain the lower critical force N_{kp} [7].

In accordance with the requirements [1], in order to ensure the stability of the pipeline in the longitudinal direction, the condition

where S is the longitudinal compressive force, determined depending on the temperature difference and the calculated internal pressure;

m - coefficient of operating conditions of the pipeline [1].

As an example, let's consider the stability of the underwater gas pipeline $\varnothing 529 \times 10$ mm in the conditions of the pipeline bare for a long stretch from the ground backfill. Taking into account the data on [14,15], we have

$$q_T = 2.2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}; p_r = 2.42 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}; q_B = 2.0 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}; \\ F = 163 \text{ cm}^2; J = 54659 \text{ cm}^4.$$

For the condition under consideration, the parameter $\varepsilon = 1$. Then, according to (2), the first value of a from zero is equal to 4.49, that is, ac-

$\bar{v}_0 = 1,57$. Минимизацией (9) по l определено нижнее критическое усилие $N_{кр} = 98980 \text{ кгс}$. Протяженность изогнутого участка при этом равна $l = 97 \text{ м}$.

Для случая отсутствия оголения рассматриваемого трубопровода от грунтовой засыпки по [15] примем $q_{гр} = 0,22 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}$. Остальные исходные данные приняты без изменений. Для этого случая $\varepsilon = 0$. По (11) получено $a_m = 4,49$, а нижнее критическое усилие $N_{кр} = 244750 \text{ кгс}$. Протяженность изогнутого участка трубопровода при потере продольной устойчивости $l = 61,5 \text{ м}$. Если $\varepsilon = 0,5$ при указанных выше остальных исходных данных имеем $N_{кр} = 149500 \text{ кгс}$, $l = 78 \text{ м}$ и $b = 39 \text{ м}$.

Таким образом, для случая оголения трубопровода на всем изогнутом участке нижнее критическое усилие в 2,47 раза меньше, чем при сохранении грунтовой засыпки.

Отметим, что с учетом требований [1] для анализируемого примера при рабочем давлении в трубопроводе 3,0 МПа положительный температурный перепад, который может привести к потере продольной устойчивости подводного перехода, составляет:

- при $N_{кр} = 98980 \text{ кгс}$ – $\Delta t = 15^\circ \text{C}$;
- при $N_{кр} = 149500 \text{ кгс}$ – $\Delta t = 30^\circ \text{C}$;
- при $N_{кр} = 244750 \text{ кгс}$ – $\Delta t = 50^\circ \text{C}$.

Как известно, положительный температурный перепад в области до 30°C соответствует многим трубопроводам.

Результаты расчета показывают, что в условиях оголения достаточно протяженного участка (для рассматриваемого трубопровода 97 м) подводного трубопровода даже при обеспечении условия п. 12.4.4 по [1] на стадии проектирования, устойчивость трубопровода из-за размыва грунта над трубопроводом не обеспечивается.

Объясним это на основе выше приведенных примеров. В соответствии с [1], запас устойчивости n_y при проектировании трубопроводов равен $n_y = \frac{1,1}{m}$, где m – коэффициент условий работы трубопровода. Значение n_y , например, для категории трубопровода I при $m = 0,825$ составляет 1,33.

Согласно нашему назначению $a_m = 4,49$. По (8), мы имеем $\bar{v}_0 = 1,57$. По минимизации (9) по l , нижнее критическое усилие $N_{кр} = 98980 \text{ кгс}$ определено. Длина изогнутого участка $l = 97 \text{ м}$.

Для случая отсутствия оголения трубопровода от грунтовой засыпки, согласно [15], мы берем $q_{гр} = 0,22 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}$. Остальные исходные данные приняты без изменений. Для этого случая, $\varepsilon = 0$. Согласно (11), $a_m = 4,49$ получено, а нижнее критическое усилие $N_{кр} = 244750 \text{ кгс}$. Длина изогнутого участка трубопровода при потере продольной устойчивости $l = 61,5 \text{ м}$. Если $\varepsilon = 0,5$ для вышеупомянутых других исходных данных, мы имеем $N_{кр} = 149500 \text{ кгс}$, $l = 78 \text{ м}$ и $b = 39 \text{ м}$.

Таким образом, в случае оголения трубопровода на всем изогнутом участке нижнее критическое усилие в 2,47 раза меньше, чем при сохранении грунтовой засыпки.

Мы отмечаем, что с учетом требований [1] для анализируемого примера при рабочем давлении в трубопроводе 3,0 МПа, положительный температурный перепад, который может привести к потере продольной устойчивости подводного перехода, составляет:

- при $N_{кр} = 98980 \text{ кгс}$ – $\Delta t = 15^\circ \text{C}$;
- при $N_{кр} = 149500 \text{ кгс}$ – $\Delta t = 30^\circ \text{C}$;
- при $N_{кр} = 244750 \text{ кгс}$ – $\Delta t = 50^\circ \text{C}$.

Как известно, положительный температурный перепад в области до 30°C соответствует многим трубопроводам.

Результаты расчета показывают, что в условиях оголения достаточно протяженного участка (для рассматриваемого трубопровода 97 м) подводного трубопровода даже при обеспечении условия п. 12.4.4 по [1] на стадии проектирования, устойчивость трубопровода из-за размыва грунта над трубопроводом не обеспечивается.

Объясним это на основе выше приведенных примеров. В соответствии с [1], запас устойчивости n_y при проектировании трубопроводов равен $n_y = \frac{1,1}{m}$, где m – коэффициент условий работы трубопровода. Значение n_y , например, для категории трубопровода I при $m = 0,825$ составляет 1,33.

Как показали наши конкретные расчеты, размыв трубопровода может привести к снижению нижнего критического усилия до 2,47 раза, что значительно больше наибольшего проектного запаса устойчивости.

Анализ показал, что размыв грунта над подводным трубопроводом, уложенным в траншею в условиях действия положительного температурного перепада, может привести к потере продольной устойчивости. Кроме того, размыв и оголения подводного трубопровода, как показано в работе [3], создает проблему обеспечения его прочности. В связи с этим при сооружении и эксплуатации должны быть разработаны и приняты необходимые меры по исключению размыва и оголения подводных трубопроводов.

Выводы

Получены аналитические выражения для определения критического продольного сжимающего усилия, при котором наступает потеря продольной устойчивости подводного трубопровода, уложенного в траншею и засыпанного грунтом в условиях размыва засыпки на определенном участке. Показано, что размыв грунта существенно снижает величину критического продольного сжимающего усилия. Указано на необходимость разработки и принятия достаточных мер при строительстве и эксплуатации по исключению размыва и оголения подводных переходов трубопроводов.

Список литературы

1. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. М.: Минрегион России, 2013. 99 с.
2. СП 86.13330.2014. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП III-42-80*. М.: Минстрой России, 2014. 223 с.
3. Бородавкин П.П., Таран В.Д. Трубопроводы в сложных условиях. М.: Недра, 1968. 304 с.
4. Гумеров А.Г., Азметов Х.А., Гумеров Р.С. Техническая эксплуатация подводных переходов трубопроводов. М.: Недра, 2003. 346 с.
5. Бородавкин П.П. Подземные трубопроводы. М.: Недра, 1973. 304 с.
6. Филоненко-Бородич М.М., Изюмов С.М., Олисов Б.А. и др. Курс сопротивления

1.33. According to our calculations the specific erosion of the pipeline can lead to a decrease in the lower critical efforts to 2.47 times, which is significantly larger than the largest project stability margin.

The analysis showed that erosion of the soil over a underwater pipeline laid in a trench under the conditions of a positive temperature difference may lead to a loss of longitudinal stability. In addition, erosion and exposure of the underwater pipeline, as shown in [3], creates the problem of ensuring its strength. In this connection, in the course of construction and operation, the necessary measures should be developed and adopted to eliminate erosion and denudation of underwater pipelines.

Conclusions

Analytical expressions are obtained for the determination of the critical longitudinal compressive force at which the loss of longitudinal stability of the underwater pipeline laid in a trench and grounded under erosion conditions of the seizure in a certain area occurs. It is shown that erosion of soil significantly reduces the magnitude of the critical longitudinal compressive force. It is pointed out that it is necessary to develop and take sufficient measures for the construction and operation to exclude erosion and denudation of underwater pipeline crossings.

References

1. SP 36.13330.2012. *Magistral'nye truboprovody. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.06-85** [SP 36.13330.2012. Trunk Pipelines. The Updated Version of SNiP 2.05.06-85*]. Moscow, Minregion Rossii, 2013. 99 p. [in Russian].
2. SP 86.13330.2014. *Magistral'nye truboprovody. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP III-42-80** [SP 86.13330.2014. Trunk Pipelines. The Updated Version of SNiP III-42-80*]. Moscow, Minstroj Rossii, 2014. 223 p. [in Russian].
3. Borodavkin P.P., Taran V.D. *Truboprovody v slozhnykh usloviyakh* [Pipelines in Complicated Conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 304 p. [in Russian].
4. Gumerov A.G., Azmetov Kh.A., Gumerov R.S. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya podvodnykh*

материалов. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. Ч. II. 540 с.

7. Ясин Э.М., Черников Э.М. Устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 1968. 120 с.

8. Азметов Х.А., Матлашов И.А., Гумеров А.Г. Прочность и устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 2005. 248 с.

9. Березин В.Л., Ясин Э.М., Азметов Х.А. Выбор конструкции поворотных участков подземных трубопроводов // Строительство трубопроводов. 1976. № 3. С. 17-19.

10. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1984. 245 с.

11. Азметов Х.А., Павлова З.Х. Определение продольных усилий в подземном действующем трубопроводе в условиях его продольно-поперечного изгиба // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. Вып. 1 (95). С. 30-36.

12. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: справ. пособие. М.: Недра, 1991. 287 с.

13. Кожаева К.В. Обеспечение стабилизации проектного положения подводных переходов газонефтепроводов: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. 139 с.

14. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. М.: Недра, 1976. 224 с.

15. Бородавкин П.П. Механика грунтов: учебник для вузов. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 349 с.

16. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Соппротивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.

17. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.

perekhodov truboprovodov [Technical Operation of Underwater Pipeline Crossings]. Moscow, Nedra Publ., 2003. 346 p. [in Russian].

5. Borodavkin P.P. *Podzemnye truboprovody* [Underground Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 304 p. [in Russian].

6. Filonenko-Borodich M.M., Izyumov S.M., Olisov B.A. e.a. *Kurs soprotivleniya materialov* [Course of Resistance of Materials]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoi literatury, 1956. Ch. II. 540 p. [in Russian].

7. Yasin E.M., Chemikin E.M. *Ustoichivost' podzemnykh truboprovodov* [Stability of Underground Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 120 p. [in Russian].

8. Azmetov Kh.A., Matlashov I.A., Gumerov A.G. *Prochnost' i ustoichivost' podzemnykh truboprovodov* [Strength and Stability of Underground Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 2005. 248 p. [in Russian].

9. Berezin V.L., Yasin E.M., Azmetov Kh.A. *Vybor konstruktssii povorotnykh uchastkov podzemnykh truboprovodov* [Choice of Design of Turning Sections of Underground Pipelines]. *Stroitel'stvo truboprovodov - Pipeline Construction*, 1976, No. 3, pp. 17-19. [in Russian].

10. Borodavkin P.P., Sinyukov A.M. *Prochnost' magistral'nykh truboprovodov* [Strength of Main Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 245 p. [in Russian].

11. Azmetov Kh.A., Pavlova Z.Kh. *Opreделение prodol'nykh usilii v podzemnom deistvuyushchem truboprovode v usloviyakh ego prodol'no-poperechnogo izgiba* [Longitudinal Force in Underground Pipelines under the Longitudinal and Transverse Bending during Operation]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2014, Issue 1 (95), pp. 30-36. [in Russian].

12. Ainbinder A.B. *Raschet magistral'nykh i promyslovykh truboprovodov na prochnost' i ustoichivost': sprav. posobie* [Calculation of Main and Field Pipelines for Strength and Stability. Reference Book]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 287 p. [in Russian].

13. Kozhaeva K.V. *Obespechenie stabilizatsii proektnogo polozheniya podvodnykh perekhodov gazonefteprovodov: diss. kand. tekhn. nauk* [Ensuring the Stabilization of the Project Position of Underwater Transitions of Gas and Oil Pipelines. Diss. Cand. Engin. Sci.]. Ufa, UGNTU Publ., 2017. 139 p. [in Russian].

14. Borodavkin P.P. *Mekhanika gruntov v truboprovodnom stroitel'stve* [Soil Mechanics in Pipeline Construction]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 224 p. [in Russian].

15. Borodavkin P.P. *Mekhanika gruntov* [Soil Mechanics]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2003. 349 p. [in Russian].

16. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of Materials]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 560 p. [in Russian].

17. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of Materials]. 10th ed. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 1999. 592 p. [in Russian].

Авторы

• Азметов Хасан Ахметзиевич, д-р техн. наук, профессор
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Сооружение и ремонт
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 8/3
тел. (347) 242-08-14
e-mail: st@rusoil.net

• Кожаева Ксения Валерьевна, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Старший преподаватель кафедры «Сооружение
и ремонт газонефтепроводов
и газонефтехранилищ»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 8/3
тел. (347) 242-08-14
e-mail: msjealous@mail.ru

• Быков Леонид Иванович, д-р техн. наук,
профессор
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Сооружение и ремонт
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 8/3
тел. (347) 242-08-14
e-mail: st@rusoil.net

• Дудников Юрий Владимирович, д-р техн. наук
Управление Федеральной службы по надзору
в сфере природопользования по Республике
Башкортостан
Руководитель
Российская Федерация, 450080, г. Уфа,
ул. Менделеева, 148
тел. (347) 228-57-10
e-mail: alina-rpnrb@mail.ru

The Authors

• Azmetov Khasan A., Doctor of Engineering
Sciences, Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Construction and Repair of Gas and Oil
Pipelines and Gas and Oil Storage Department
8/3, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
tel: (347) 242-08-14
e-mail: st@rusoil.net

• Kozhaeva Kseniya V., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Senior Lecturer of Construction and Repair of Gas
and Oil Pipelines and Gas and Oil Storage
Department
8/3, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
tel: (347) 242-08-14
e-mail: msjealous@mail.ru

• Bykov Leonid I., Doctor of Engineering
Sciences, Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Construction and Repair of Gas and Oil
Pipelines and Gas and Oil Storage Department
8/3, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
tel: (347) 242-08-14
e-mail: st@rusoil.net

• Dudnikov Yuriy V., Doctor of Engineering
Sciences
Administration of the Federal Service for Supervision
of Natural Resources in the Republic
of Bashkortostan
Director of Administration
148, Mendeleev str., Ufa, 450080,
Russian Federation
tel: (347) 228-57-10
e-mail: alina-rpnrb@mail.ru