DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-4-38-52
УДК 622.692.4.074.2

К.В. Кожеева, Х.А. Азметов, А.И. Валимухаметова (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)

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАТОРА ТРЕУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ В ТРУБОПРОВОДЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА

Kseniya V. Kozhaeva, Khasan A. Azmetov, Adelina I. Valimukhametova
(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)

ANALYTICAL- EXPERIMENTAL STUDY OF THE TRIANGLE SHAPE COMPENSATOR UNDER THE INFLUENCE OF A POSITIVE TEMPERATURE DROP IN THE PIPELINE

Введение

Прокладка трубопроводов в сложных природных условиях и достаточно жесткие условия их эксплуатации обуславливают особенности их конструктивных решений. Сооружение трубопроводов в условиях низких температур окружающего воздуха, укладка их в грунтах с низкой несущей способностью, перекачка при высоком рабочем давлении и температуре перекачиваемого продукта приводят к возникновению в трубопроводе значительных продольных сжимающих усилий. В этих условиях укладка трубопровода в грунтах с низкой несущей способностью, через водные преграды и на обводненных участках может привести к потере общей устойчивости трубопровода в продольном направлении. Свод правил СП 36.13330.2012 предусматривает проверку и принятие необходимых мер по обеспечению устойчивости трубопровода в процессе эксплуатации.

Background

The laying of pipelines in difficult natural conditions and fairly harsh conditions for their operation predetermine the features of their design solutions. The construction of pipelines in conditions of low ambient air temperatures, their laying in soils with low bearing capacity, pumping at high working pressure and temperature of the pumped product lead to the appearance of significant longitudinal compressive forces in the pipeline. Under these conditions, laying the pipeline in soils with low bearing capacity, through water obstacles and in watered areas can lead to loss of the overall stability of the pipeline in the longitudinal direction. SP 36.13330.2012 provides for checking and taking the necessary measures to ensure the stability of the pipeline during operation.

Одной из таких мер является установка компенсаторов различных конструкций на трубопроводе, обеспечивающих его перемещение и тем самым снижение продольного усилия до уровня, при котором потеря продольной устойчивости не происходит. В ряде случаев наиболее приемлемыми являются компенсаторы треугольной формы, сооружаемые с использованием гнутых отводов. При этом для оценки эффективности использования таких компенсаторов необходимо определить их компенсирующие свойства и рациональные геометрические характеристики.

Цели и задачи

Получить аналитические зависимости для определения характеристик компенсатора, обеспечивающих продольную устойчивость трубопровода.

Результаты

Получены аналитические зависимости рациональных геометрических характеристик компенсатора треугольной формы от эксплуатационных нагрузок, обеспечивающих продольную устойчивость трубопровода.

One of these measures is the installation of various design compensators on the pipeline, ensuring its movement and thereby reducing the longitudinal force to a level at which loss of longitudinal stability does not occur. In some cases, the most suitable are the triangular compensators, constructed with the use of bent branch. In order to evaluate the efficiency of using such compensators, it is necessary to determine their compensating properties and rational geometric characteristics.

Aims and Objectives

Obtain analytical dependencies for determining the triangle shape compensator characteristics, ensuring the longitudinal stability of the pipeline.

Results

Analytical dependences of the rational geometric characteristics of the triangle shape compensator on the operational loads providing the longitudinal stability of the pipeline are obtained.

Ключевые слова: трубопровод, положительный температурный перепад, устойчивость в продольном направлении, компенсатор треугольной формы, продольное сжимающее усилие, критическое продольное усилие, потеря устойчивости, гнутый отвод, прогиб компенсатора

Key words: pipeline, positive temperature difference, stability in the longitudinal direction, triangular compensator, longitudinal compressive force, critical longitudinal force, stability loss, bent branch, compensator flexure

Современные трубопроводные системы нефтегазовой отрасли эксплуатируются в достаточно жестком режиме, характеризующемся воздействием значительного положительного температурного перепада и повышенным рабочим давлением [1-7]. С целью надежной и эффективной эксплуатации трубопроводных систем в указанных условиях разрабатываются и применяются специальные технические решения. К таким техническим решениям относится установка

Modern pipeline systems of the oil and gas industry are operated in a sufficiently hard operation, characterized by the impact of a significant positive temperature drop and increased operating pressure [1-7]. For the purpose of reliable and efficient operation of pipeline systems, special technical solutions are developed and applied in the specified conditions. Such technical solutions include the installation of ex-

на трубопроводе компенсаторов. Компенсаторы позволяют снизить в трубопроводе высокие продольные сжимающие усилия, возникающие от действия эксплуатационных нагрузок, до уровня обеспечения общей продольной устойчивости трубопровода [8-10]. В [11] приведены параметры некоторых типов компенсаторов, а компенсаторы треугольной формы не рассмотрены.

В статье представлено исследование рациональных параметров компенсирующего устройства треугольной формы с помощью расчетно-экспериментальных методов. Предлагаемое компенсирующее устройство с применением гнутых отводов обладает более жесткой конструкцией, чем компенсирующее устройство в виде ломаного ригеля. Расчетно-экспериментальным методом получен коэффициент уточнения формы компенсатора, конструктивно выполненного с применением гнутых отводов, используемого для снижения продольного сжимающего усилия до уровня обеспечения общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

Рассмотрим планирование и моделирование эксперимента. Наиболее приемлемой для магистрального трубопровода является треугольная форма компенсирующего устройства, где соединение прямых частей компенсатора осуществляется отводами холодного гнутья, обеспечивающими пропуск внутритрубных устройств и приборов.

В связи с этим встает задача определения рациональных параметров предлагаемого компенсатора для снижения продольного сжимающего усилия до безопасного уровня при заданном продольном критическом усилии, при котором происходит потеря продольной устойчивости трубопровода $N_{кр}$, внутреннем давлении p и температурном перепаде Δt .

Выбор параметров компенсатора и их расчет подробно рассмотрены в работах [8, 10].

На рисунке 1 приведена расчетная схема компенсатора треугольной формы.

pansion joints on the pipeline. Compensators allow to reduce in the pipeline high longitudinal compressive forces, arising from the operational loads action, to the level of ensuring the overall longitudinal stability of the pipeline [8-10]. In [11], the parameters of some types of compensators are given, and the triangular compensators are not considered.

The paper presents an investigation of the rational parameters of a triangular compensating device using computational and experimental methods. The proposed compensating device with the use of bent branch has a more hard design than the broken bolt compensating device. The coefficient of correction of the compensator shape, constructively executed with the use of bent branch, used to reduce the longitudinal compressive force to the level of ensuring the overall stability of the pipeline in the longitudinal direction, is obtained using the calculation and experimental method.

Let's consider the planning and simulation of the experiment. The most acceptable for the main pipeline is the compensating device triangular shape, where the connection of the compensator straight parts is carried out by cold bends, which ensure the passage of in-tube devices.

In this connection, the task arises of determining the rational parameters of the proposed compensator to reduce the longitudinal compressive force to a safe level for a given longitudinal critical force, at which the longitudinal stability of the pipeline $N_{кр}$, the internal pressure p and the temperature difference Δt .

The choice of compensator parameters and their calculation are considered in detail in [8, 10].

The calculation scheme of the triangular compensator is shown in Figure 1.

l – длина компенсатора;
 f – стрела прогиба компенсатора;
 l_n – длина плеча компенсатора

l is the compensator length;
 f is the deflection arrow of the compensator;
 l_n is length of the compensator's arm

Рисунок 1. Расчетная схема компенсатора треугольной формы
Figure 1. The calculation scheme of the triangular compensator

Величину эквивалентного продольного осевого усилия S с учетом компенсации продольных перемещений, вызванных изменением температуры стенок труб и внутренним давлением, примем по [8] в виде:

The value of the equivalent longitudinal axial force S , taking into account the compensation of the longitudinal displacements caused by the change in the temperature of the pipe walls and the internal pressure, is taken in accordance with [8] in the form:

$$S = \frac{3 \cdot \cos \varphi \cdot J \cdot (\alpha \cdot E \cdot \Delta t + 0,2 \cdot \sigma_{\text{кц}})}{f^2}, \quad (1)$$

где φ – угол между осью плеча компенсатора и прямой, соединяющей концы компенсатора, град;

where φ is the angle between the compensator arm axis and the straight line connecting the compensator ends, deg.;

J – момент инерции поперечного сечения трубы, м^4 ;

J – moment of inertia of the pipe cross-section, m^4 ;

α – температурный коэффициент линейного расширения металла трубы, $1/^\circ\text{C}$;

α – temperature coefficient of linear expansion of the pipe metal, $1/^\circ\text{C}$;

E – модуль упругости металла трубопровода, Па;

E – modulus of elasticity of the pipeline metal, Pa;

Δt – положительный температурный перепад, $^\circ\text{C}$;

Δt – positive temperature difference, $^\circ\text{C}$;

$\sigma_{\text{кц}}$ – кольцевые напряжения в стенке трубы от расчетного внутреннего давления, Па;

$\sigma_{\text{кц}}$ – annular stresses in the pipe wall from the calculated internal pressure, Pa;

f – стрела прогиба компенсатора, м.

f – arrow of the compensator flexure, m.

Исследования, изложенные в [8,10], и анализ аналитического выражения (1) показывают, что при малых значениях стрелы прогиба f продольное усилие S достигает значительных величин. Таким образом, при малых значениях f компенсирующая способность компенсатора (то есть способность уменьшить продольное усилие) незначительна. Увеличение f приводит к монотонному снижению S и повышению компенсирующей способности.

С целью обеспечения общей продольной устойчивости трубопровода с применением компенсатора должно соблюдаться условие [11]

$$S \leq \frac{m}{1,1} N_{кр}, \quad (2)$$

где m – коэффициент условия работы трубопровода.

Используя (1), (2) и с учетом того, что $\cos \varphi = \frac{l}{l_n}$, можно записать

$$\left(\frac{l}{f}\right)^2 \cdot \frac{3,3 \cdot J}{m \cdot l_n l} \leq \frac{N_{кр}}{\alpha \cdot E \cdot \Delta t + 0,2 \cdot \sigma_{кц}}. \quad (3)$$

Условие (3) позволяет принимать геометрические параметры компенсатора исходя из значения критического усилия $N_{кр}$, температурного перепада Δt и рабочего давления p .

Анализ известной методики расчета исследуемой конструкции по [8] показывает, что соединение труб в вершине угла поворота, где стрела прогиба f наибольшая, выполняется без применения гнутых отводов. А на границах компенсатора трубопроводы соединены прямолинейно, без угла поворота. Предлагаемая конструкция компенсатора на вершине угла поворота и на концах имеет соединение труб с гнутыми отводами. Эти конструктивные отличия вносят некоторое изменение в значение продольного усилия S . С целью определения величины этих изменений проведены экспериментальные исследования.

The studies described in [8,10] and the analysis of the analytical expression (1) show that for small values of the deflection boom f the longitudinal force S reaches significant values. Thus, for small values of f , the compensating capacity of the compensator (i.e., the ability to reduce the longitudinal force) is negligible. The increase in f leads to a monotonic decrease in S and an increase in the compensating power.

In order to ensure the overall longitudinal stability of the pipeline with the use of a compensator, the condition [11]

where m is pipeline operation conditions coefficient.

Using (1), (2) and taking into account the fact that $\cos \varphi = \frac{l}{l_n}$, we can write

Condition (3) allows to take the geometric parameters of the compensator, based on the value of the critical force $N_{кр}$, the temperature difference Δt and the working pressure p .

An analysis of the known calculation procedure for the structure under study according to [8] shows that the connection of pipes at the top of the angle of rotation, where the deflection arrow f is greatest, is performed without the use of bent taps. And at the boundaries of the compensator, the pipelines are connected rectilinearly, without the angle of rotation. The proposed construction of the compensator at the top of the angle of rotation and at the ends has a connection of pipes with bent outlets. These design differences introduce some variation in the value of the longitudinal force S . Experimental studies have been carried out to determine the magnitude of these changes.

Согласно рекомендациям [12] при проверке теоретических зависимостей и выявлении общего характера работы системы под нагрузкой нет необходимости решения вопроса об условиях перехода от модели к натуре. В таких случаях рекомендуется рассчитать собственно модель, а затем сопоставить теоретические результаты с соответствующими данными экспериментальных исследований.

При выборе параметров физической модели с целью обеспечения в процессе эксперимента продольно-поперечных перемещений, достаточных по величине для измерений компенсирующего устройства, приняты условия:

$$\frac{3 \cdot E \cdot J \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot \cos \varphi}{f^2} < N_0; \quad \frac{3 \cdot J \cdot \cos \varphi}{f^2} < F, \quad (4)$$

где N_0 – продольное усилие от температурного перепада для прямых участков трубопровода, $H, N_0 = \alpha \cdot E \cdot \Delta t \cdot F$.

Исходя из рекомендаций [8, 10], условия (4), а также с учетом условия пропуск средств очистки и диагностики (радиус изгиба отводов не менее $5 \cdot D_H$, где D_H – наружный диаметр трубопровода) были приняты следующие параметры физической модели компенсирующего устройства: диаметр трубы – 25 мм, толщина стенки – 2 мм, а длине 2,05 м будут соответствовать прогибы от 0,02 до 0,08 м. Максимальный температурный перепад $\Delta t = 50^\circ\text{C}$ выбрали исходя из реально существующих и часто встречающихся условий эксплуатации.

Измеряемое продольное усилие от удлинения трубопровода, вызванного изменением температуры стенок труб, сравнивается с расчетным усилием, определяемым по формуле:

$$S_{расч} = \frac{3 \cdot E \cdot J \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot \cos \varphi}{f^2}. \quad (5)$$

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 2.

На металлический лист – основание 1 длиной 2,5 м и шириной 0,5 м укладываются поддерживающие элементы 2, на которые

According to the recommendations of [12], when testing theoretical dependencies and revealing the general nature of the system's operation under load, there is no need to solve the problem of the conditions of the transition from model to nature. In such cases, it is recommended to calculate the actual model, and then to compare the theoretical results with the corresponding experimental data.

When choosing the parameters of the physical model in order to ensure longitudinally transverse displacements sufficient for measuring the compensating device during the experiment, conditions are adopted:

where N_0 is the longitudinal force from the temperature drop for the pipeline straight sections, $H, N_0 = \alpha \cdot E \cdot \Delta t \cdot F$.

Taking into account recommendations [8, 10], condition (4), and also the condition of cleaning facilities skipping and diagnostics (radius of bent branch no less than $5 \cdot D_H$, where D_H is the pipeline outer diameter), the following parameters of the physical model of the compensating device were adopted: the pipe diameter is 25 mm, the wall thickness is 2 mm, and the length of 2.05 m will correspond to flexures from 0.02 to 0.08 m. The maximum temperature difference $\Delta t = 50^\circ\text{C}$ was chosen based on actual and frequently encountered operating conditions.

The measured longitudinal force from the pipeline elongation caused by the change in the wall temperature of the pipes is compared with the design force determined by the formula:

The scheme of the experimental setup is shown in Figure 2.

On the metal sheet – the base 1, 2.5 m long and 0.5 m wide, support elements 2 are

устанавливается компенсатор 3. Делается это для того, чтобы во время эксперимента труба не соприкасалась с металлическим основанием, так как при нагреве трубы может произойти деформация листа из-за нагрева, что даст погрешность в измерениях. Также для жесткого закрепления трубы во время эксперимента необходимо предусмотреть ограничители перемещений 4, которые также изготавливаются из металлических пластин и привариваются к основанию 1. Для надежного закрепления динамометра 5 во время эксперимента изготавливаем специальную систему закрепления 6 на основе резьбовых соединений. Индикатор перемещения 7 крепится с помощью хомута на сварной конструкции (система закрепления индикатора перемещения 8) и соприкасается с компенсатором так, чтобы во время нагрева трубы происходил достаточно точный замер перемещений.

laid and the compensator 3 is mounted. This is done so that during the experiment the tube does not come in contact with the metal base. There is a deformation of the sheet due to heating, which will give an error in the measurements. Also, in order to rigidly fix the pipe during the experiment, it is necessary to provide stop limiters 4, which are also made of metal plates and welded to base 1. To secure the dynamometer 5 during the experiment, we make a special fastening system 6 on the basis of threaded connections. The movement indicator 7 is fixed by means of a clamp on a welded structure (the fixing system of the movement indicator 8) and comes into contact with the compensator so that during the heating of the pipe a rather accurate measurement of movements takes place.

- 1 - металлическое основание;
- 2 - поддерживающие элементы;
- 3 - компенсатор;
- 4 - ограничитель перемещений;
- 5 - динамометр сжатия;
- 6 - система закрепления динамометра;
- 7 - индикатор перемещения;
- 8 - система закрепления индикатора перемещения

- 1 - metal base;
- 2 - supporting elements;
- 3 - compensator;
- 4 - restriction of movement;
- 5 - compression dynamometer;
- 6 - dynamometer fastening system;
- 7 - displacement indicator;
- 8 - fixation system of the displacement indicator

Рисунок 2. Схема экспериментальной установки
Figure 2. The scheme of the experimental setup

Методика проведения эксперимента, обработка результатов опытов осуществлялась и проводилась в соответствии с работами [13-15] и содержит:

- замер температуры (контактным термометром) по всей длине трубы до начала эксперимента;
- проверка показания динамометра (должно быть выставлено начальное значение);
- равномерный нагрев с помощью газовых горелок;
- замер усилия (показания динамометра) и замер температуры (показания контактного термометра) по мере нагревания;
- контрольное измерение температуры (показания контактного термометра) по всей длине трубы после окончания нагрева и фиксирование показания динамометра;
- анализ полученных результатов.

Нагрев экспериментальных отрезков трубы осуществлялся одновременно несколькими газовыми горелками с максимально возможным равномерным нагревом (от 0 °C до + 50 °C). Контрольные замеры температуры по длине трубы показали разность температур ± 3 °C.

В ходе эксперимента, как и предполагалось, при нагревании трубы были зафиксированы продольные усилия по показаниям динамометра. Данный эксперимент был проведен для всех физических моделей с геометрическими характеристиками, приведенными выше.

При проведении эксперимента использовались термометр контактный ТК-5.01, динамометры сжатия ДОСМ-3-1У, ДОСМ-3-2У, ДОСМ-3-10У.

Согласно теории математической статистики и рекомендациям [13-15] для уменьшения случайной ошибки измерений до доверительного интервала с заданной надежностью было определено необходимое количество измерений. Принято решение провести по 8 измерений при доверительной вероятности $\alpha = 0,9$.

Приведем анализ полученных экспериментальных данных. Графики изменения экспериментального и расчетного значений продольного усилия S от температурного перепада Δt компенсирующего устройства приведены на рисунках 3-6.

The procedure for carrying out the experiment, processing the results of the experiments was held in accordance with [13-15] and contains:

- measurement of temperature (contact thermometer) along the entire length of the tube prior to the start of the experiment;
- verification of the dynamometer reading (initial value must be set);
- uniform heating with gas burners;
- measurement of force (dynamometer reading) and temperature measurement (contact thermometer readings) as it is heated;
- control measurement of temperature (indication of the contact thermometer) along the entire length of the pipe after the end of heating and fixing the indication of the dynamometer;
- analysis of the results obtained.

Heating of the experimental pieces of the pipe was carried out simultaneously by several gas burners with the greatest possible uniform heating (0 °C to + 50 °C). The control measurements of temperature along the length of the pipe showed a temperature difference of ± 3 °C.

In the course of the experiment, as it was supposed, longitudinal heating of the pipe was recorded according to the indications of the dynamometer. This experiment was carried out for all physical models with the geometric characteristics given above.

During the experiment we used a contact thermometer TK-5.01, compression dynamometers DOSM-3-1U, DOSM-3-2U, DOSM-3-10U.

According to mathematical statistics and recommendations [13-15], to reduce the random measurement error to a confidence interval with a given reliability, the required number of measurements was determined. It was decided to conduct 8 measurements with a confidence level of $\alpha = 0,9$.

We present an analysis of the experimental data obtained. The graphs of the experimental and calculated values of the longitudinal force S from the temperature difference Δt of the compensating device are shown in Figures 3-6.

Рисунок 3. График изменения продольного усилия S от температурного перепада Δt компенсирующего устройства со стрелой прогиба $f = 0,02$ м

Figure 3. The graph of the variation of the longitudinal force S from the temperature difference Δt of the compensating device with the deflection arrow $f = 0.02$ m

Рисунок 4. График изменения продольного усилия S от температурного перепада Δt компенсирующего устройства со стрелой прогиба $f = 0,04$ м

Figure 4. The graph of the variation of the longitudinal force S from the temperature difference Δt of the compensating device with the deflection arrow $f = 0.04$ m

Рисунок 5. График изменения продольного усилия S от температурного перепада Δt компенсирующего устройства со стрелой прогиба $f = 0,06$ м

Figure 5. The graph of the variation of the longitudinal force S from the temperature difference Δt of the compensating device with the deflection arrow $f = 0.06$ m

Рисунок 6. График изменения продольного усилия S от температурного перепада Δt компенсирующего устройства со стрелой прогиба $f = 0,08$ м

Figure 6. The graph of the variation of the longitudinal force S from the temperature difference Δt of the compensating device with the deflection arrow $f = 0.08$ m

В результате *корреляционного анализа* экспериментальных данных установлено следующее [13-15]:

- корреляционное поле показало положительную корреляцию между значением температурного перепада и полученным экспериментально продольным усилием, то есть с возрастанием одной величины другая в среднем возрастает;
- для анализа была выбрана аппроксимирующая кривая в виде линейной функции;
- выборочный коэффициент корреляции варьируется $r_{xy} = 0,93 - 0,96$, что говорит о сильной связи между значением температурного перепада и полученным экспериментально продольным усилием.

В результате *регрессионного анализа* установлено следующее:

- с помощью метода наименьших квадратов получены параметры линейных уравнений регрессии;
- оценка качества уравнений регрессии показала среднюю относительную ошибку аппроксимации, не превышающую $\bar{A} = 1,18\%$, что свидетельствует о хорошем подборе уравнений регрессии для исходных данных.

В результате *проверки адекватности математической модели* установлено следующее:

- поскольку экспериментальный критерий Фишера больше табличного значения для всех экспериментальных кривых, то коэффициент детерминации статистически значим, и уравнение регрессии адекватно описывает экспериментальные данные;
- проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии по t-критерию Стьюдента показывает, что статистическая значимость коэффициентов подтверждается.

На графиках (рисунки 3-6) прослеживается систематическое отклонение измеренной величины продольного усилия $S_{\text{эсп}}$ от расчетной $S_{\text{расч}}$. С учетом всех погрешностей экспериментальных измерений установлено, что исследуемая конструкция компенсирующего устройства изменяет величину продольного усилия $S_{\text{расч}}$, определяемого по формуле (5) для конструкции ломаного

As a result of the experimental data *correlation analysis*, the following is established [13-15]:

- the correlation field showed a positive correlation between the temperature drop value and the longitudinal force obtained experimentally, that is, with an increase in one value, the other increases on average;
- for the analysis, an approximating curve was chosen in the form of a linear function;
- selective correlation coefficient varies $r_{xy} = 0,93 - 0,96$, which indicates a strong relationship between the temperature difference value and the experimentally obtained longitudinal force.

As a result of the *regression analysis*, the following is established:

- using the method of least squares, the linear regression equations parameters are obtained;
- quality estimate of the regression equations showed an average relative error of approximation not exceeding $\bar{A} = 1,18\%$, which indicates a good choice of regression equations for the initial data.

As *checking the adequacy of the mathematical model* result, the following is established:

- since the experimental Fisher test is larger than the tabulated value for all experimental curves, the determination coefficient is statistically significant, and the regression equation adequately describes the experimental data;
- checking the significance of the regression equations coefficients in the Student's t-test shows that the coefficients statistical significance is confirmed.

On the graphs (Figures 3-6), measured magnitude systematic deviation of the longitudinal force S_{exp} from the calculated S_{calc} . Taking into account all the errors in the experimental measurements, it is established that the investigated design of the compensating device changes the value of the longitudinal force S_{calc} , determined by formula (5) for the broken

ригеля, на определенное значение, которое варьируется в пределах 0,851-0,902.

На основе такого анализа можно записать, что значение продольного усилия для предлагаемой конструкции компенсирующего устройства:

$$S_{расч} = k \cdot S_{эсп}, \quad (6)$$

где k – коэффициент уточнения, полученный в результате экспериментальных измерений.

Этот факт объясняется тем, что предлагаемое компенсирующее устройство с применением гнутых отводов обладает более жесткой конструкцией, чем компенсирующее устройство в виде ломаного ригеля.

Обозначив полученную величину отклонения как коэффициент уточнения формы компенсатора, предлагается принять его равным $k = 0,85$, учитывая в расчетах наиболее неблагоприятный случай нагружения.

Таким образом, рациональные параметры предлагаемого компенсирующего устройства для трубопроводов с целью повышения общей устойчивости в продольном направлении необходимо определять по формуле

$$\left(\frac{l}{f}\right)^2 \cdot \frac{3,3 \cdot J}{m \cdot l_H \cdot l} \leq \frac{k \cdot N_{кр}}{\alpha \cdot E \cdot \Delta t + 0,2 \cdot \sigma_{кц}}. \quad (7)$$

Для удобства анализа выражение (7), приняв $k = 0,85$, можно привести к виду

$$\frac{f}{l} \geq K \cdot \bar{N}, \quad (8)$$

$$\bar{N} = \left[\frac{J(\alpha \cdot E \cdot \Delta t + 0,2 \cdot \sigma_{кц})}{N_{кр} l_H^2 \cos \varphi} \right]^{0,5}. \quad (9)$$

Безразмерный параметр K зависит от категории участка трубопровода и в зависимости от значений коэффициента условия работы m по [11] имеет значения:

- 2,42 – для категории В;
- 2,17 – для категорий I и II;
- 1,98 – для категорий III и IV.

Параметр $\bar{N}$ содержит эксплуатационные нагрузки, включающие температурный перепад и рабочее давление, геометрические характеристики трубопровода и ком-

bolt construction, by a certain value, which varies 0,851-0,902.

On the basis of this analysis, it can be written that the value of the longitudinal force for the proposed design of the compensating device:

where k is the refinement coefficient obtained as a result of experimental measurements.

This fact is explained by the fact that the proposed compensating device with the use of bent branch has a more rigid design than the compensating device in the form of a broken bolt.

Denoting the obtained deviation value as the coefficient of correction of the form of the compensator, it is proposed to take it equal to $k = 0,85$, taking into account in the calculations the most unfavorable loading case.

Thus, the rational parameters of the proposed compensating device for pipelines in order to increase the overall stability in the longitudinal direction must be determined by the formula

For convenience of analysis, the expression (7), assuming $k = 0,85$, can be reduced to the form

The dimensionless parameter K depends on the category of the pipeline section and, depending on the operating condition factor values m , according to [11] has the following values:

- 2.42 for category B;
- 2.17 for categories I and II;
- 1.98 for categories III and IV.

Parameter $\bar{N}$ contains operational loads, including temperature drop and working pressure, geometric characteristics of the pipeline

пенсатора и их металла ($E, \alpha, l_n \cos \varphi$). Кроме того, через $N_{кр}$ параметр $\bar{N}$ включает свойства грунта по [16], контактирующего с трубопроводом. Для конкретного трубопровода изменение параметра $\bar{N}$ зависит только от изменений температурного перепада и рабочего давления, остальные величины постоянны. Как видно из (9), повышение значений температурного перепада и рабочего давления связано с необходимостью увеличения величины $\frac{f}{l}$ для обеспечения продольной устойчивости трубопровода. Расчеты по (8) и (9) с использованием принятого на основе экспериментальных исследований коэффициента k позволяют определить конкретные значения геометрических характеристик компенсатора треугольной формы, с помощью которого достигается общая продольная устойчивость трубопровода.

Выводы

На основе экспериментальных исследований установлено значение коэффициента уточнения определения отпора компенсатора треугольной формы, конструктивно выполненного с применением гнутых отводов.

Получены аналитические зависимости геометрических характеристик компенсатора треугольной формы, конструктивно выполненного с применением гнутых отводов, обеспечивающих продольную устойчивость трубопровода в условиях действия продольных сжимающих усилий.

Выполнен анализ влияния рабочего давления и положительного температурного перепада на геометрические характеристики компенсатора.

and compensator and their metal ($E, \alpha, l_n \cos \varphi$). In addition, through N_{cr} , the parameter $\bar{N}$ includes the properties of the soil [16], which is in contact with the pipeline. For a particular pipeline, the change in the parameter $\bar{N}$ depends only on changes in the temperature drop and working pressure, the remaining values are constant. As can be seen from (9), an increase in the values of the temperature drop and operating pressure is associated with the need to increase the value of $\frac{f}{l}$ to ensure the pipeline longitudinal stability. Calculations according to (8) and (9) using the coefficient k made on the basis of experimental studies make it possible to determine specific values of the geometric characteristics of the triangular compensator, by means of which the overall pipeline longitudinal stability is achieved.

Conclusions

On the basis of experimental studies, the refinement coefficient of the triangular compensator deflection determination, constructively made using bent branches, was established.

Analytical dependences of triangular compensator geometrical characteristics, constructively executed with application of bent branches, providing pipeline longitudinal stability in conditions of longitudinal compressive efforts action are received.

The effect of working pressure and positive temperature drop on the compensator geometric characteristics is analyzed.

Список литературы

1. Бородавкин П.П., Таран В.Д. Трубопроводы в сложных условиях. М.: Недра, 1968. 304 с.
2. Азметов Х.А., Матлашов И.А., Гумеров А.Г. Прочность и устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 2005. 248 с.
3. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство). М.: Недра, 1982. 384 с.

References

1. Borodavkin P.P., Taran V.D. *Truboprovody v slozhnykh usloviyakh* [Pipelines in Difficult Conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 304 p. [in Russian].
2. Azmetov Kh.A., Matlashov I.A., Gumerov A.G. *Prochnost' i ustoychivost' podzemnykh truboprovodov* [Strength and Stability of Underground Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 2005. 248 p. [in Russian].
3. Borodavkin P.P. *Podzemnye magistral'nye truboprovody (proektirovanie i stroitel'stvo)*. [Under-

4. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1984. 245 с.
5. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1977. 407 с.
6. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: справ. пособие. М.: Недра, 1991. 287 с.
7. Ясин Э.М., Черникин Э.М. Устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 1968. 120 с.
8. Петров И.П., Спиридонов В.В. Надземная прокладка трубопроводов. М.: Недра, 1973. 472 с.
9. Кожаева К.В. Обеспечение стабилизации проектного положения подводных переходов газонефтепроводов: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. 139 с.
10. Камерштейн А.Г., Рождественский В.В., Ручимский М.Н. Расчет трубопроводов на прочность. М.: Недра, 1969. 440 с.
11. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. М.: Минрегион России, 2013. 99 с.
12. Питлюк Д.А. Испытание строительных конструкций на моделях. Л.: Стройиздат, 1971. 160 с.
13. Ашихмина Т.В. Методы математической статистики обработки результатов выпускной квалификационной работы. Киров: Изд-во ВятГГУ, 2014. 113 с.
14. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. Л.: Наука, 1985. 112 с.
15. Мухачев В.А. Планирование и обработка результатов эксперимента. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. 118 с.
16. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. М.: Недра, 1976. 224 с.
- ground Pipelines (Design and Construction)]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 384 p. [in Russian].
4. Borodavkin P.P., Sinyukov A.M. *Prochnost' magistral'nykh truboprovodov* [Strength of Main Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 245 p. [in Russian].
5. Borodavkin P.P., Berezin V.L. *Sooruzhenie magistral'nykh truboprovodov* [Construction of Main Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 407 p. [in Russian].
6. Ainbinder A.B. *Raschet magistral'nykh i promyslovyykh 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].
7. Yasin E.M., Chernikin E.M. *Ustoichivost' podzemnykh truboprovodov* [Stability of Underground Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 120 p. [in Russian].
8. Petrov I.P., Spiridonov V.V. *Nadzemnaya prokladka truboprovodov* [Aboveground Laying Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 472 p. [in Russian].
9. Kozhaeva K.V. *Obespechenie stabilizatsii proektnogo polozheniya podvodnykh perekhodov gazonafteprovodov: diss. kand. tekhn. nauk* [Ensuring the Stabilization of the Design Position of Underwater Transitions of Gas and Oil Pipelines: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2017. 139 p. [in Russian].
10. Kamershtein A.G., Rozhdestvenskii V.V., Ruchimskii M.H. *Raschet truboprovodov na prochnost'* [Calculation of Pipelines for Strength]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 440 p. [in Russian].
11. 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].
12. Pitlyuk D.A. *Ispytanie stroitel'nykh konstrukttsii na modelyakh* [Testing of Building Constructions on Models]. Leningrad, Stroiizdat Publ., 1971. 160 p. [in Russian].
13. Ashikhmina T.V. *Metody matematicheskoi statistiki obrabotki rezul'tatov vypusknnoi kvalifikatsionnoi raboty* [Methods of Mathematical Statistics for Processing the Results of Final Qualification Work]. Kirov, VyatGGU Publ., 2014. 113 p. [in Russian].
14. Zaidel' A.N. *Pogreshnosti izmerenii fizicheskikh velichin* [Error of Measurement of Physical Quantities]. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 112 p. [in Russian].
15. Mukhachev V.A. *Planirovanie i obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Planning and Processing of Experimental Results]. Tomsk, Tomskii gosudarstvennyi universitet sistem upravleniya i radioelektroniki, 2007. 118 p. [in Russian].
16. Borodavkin P.P. *Mekhanika gruntov v truboprovodnom stroitel'stve* [Soil Mechanics in Pipeline Construction]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 224 p. [in Russian].

Авторы

• Кожеева 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

• 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

• Валимухаметова Аделина Ильдаровна
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Студент кафедры «Транспорт и хранение
нефти и газа»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 8/3
e-mail: adelinka1998v@mail.ru

• 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

• 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

• 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

• Valimukhametova Adelina I.
Ufa State Petroleum Technological University
Student of Transportation and Storage of Oil and Gas
Department
8/3, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: adelinka1998v@mail.ru

• 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