Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134). С. 116-125. ISSN 1998-8443 (print)

Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2021. Issue 6 (134). P. 116-125. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 621.644.07

doi: 10.17122/ntj-oil-2021-6-116-125

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Зухра Хасановна Павлова¹, Юрий Владимирович Дудников²,
Хасан Ахметзиевич Азметов³

^{1,3}Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

²ПАО «Уфаоргсинтез», Уфа, Россия

¹zpavlova@mail.ru

²Ydudnikov@yandex.ru

³st@rusoil.net

Автор, ответственный за переписку: Зухра Хасановна Павлова, zpavlova@mail.ru

Аннотация. Эффективное функционирование трубопроводных систем нефтегазовой отрасли в значительной степени зависит от уровня надежности этих сооружений. В регионах с повышенным влиянием на окружающую среду строительства и эксплуатации трубопроводных систем нефтегазовой отрасли предъявляются повышенные требования к их надежности. Причем в условиях повышенного влияния трубопроводов на окружающую среду, в свою очередь, трубопровод испытывает действие более высоких сил по сравнению с нормальными условиями со стороны окружающей среды. Одним из основных направлений обеспечения надежной эксплуатации трубопроводных систем нефтегазовой отрасли является дальнейшее совершенствование методов их проектирова-

ния, основанных на учете реальных условий строительства и эксплуатации. При этом в исследованиях и проектах необходимо учесть особенности конструкции сооружения, которые существенно влияют на уровень механических напряжений в стенке труб нефтегазопровода и перемещений подземного трубопровода. В соответствии с требованиями СП36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы» проверка прочности труб в продольном направлении производится с определением действующих в их стенке максимальных суммарных продольных напряжений от всех нагрузок и воздействий с учетом продольных и поперечных перемещений трубопровода. Продольные и поперечные перемещения трубопровода зависят от конструктивных решений, принятых при его строительстве.

Цель работы - совершенствование методов проектирования подземных нефтегазопроводов на основе определения параметров напряженно-деформированного состояния криволинейных участков с учетом конструктивных решений и условий эксплуатации.

Получены аналитические зависимости для определения максимальных суммарных продольных напряжений в стенке подземного трубопровода на криволинейных участках с учетом конструктивных решений, сил взаимодействия трубопровода с грунтом и эксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: подземный трубопровод, криволинейный участок, конструкция криволинейного участка, механические напряжения, перемещения подземного трубопровода, снижение напряжений

Для цитирования: Павлова З. Х., Дудников Ю. В., Азметов Х. А. Определение параметров напряженно-деформированного состояния криволинейных участков подземных трубопроводов нефтегазовой отрасли // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134), С. 116-125. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-6-116-125>.

Original article

PARAMETERS DETERMINATION OF UNDERGROUND PIPELINES CURVED SECTION STRESS-DEFORMED STATE OF OIL AND GAS INDUSTRY

Zukhra Kh. Pavlova¹, Yuriy V. Dudnikov², Khasan A. Azmetov³

^{1,3}Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

²Ufaorgsintez PJSC Ufa, Russia

¹zpavlova@mail.ru

²Ydudnikov@yandex.ru

³st@rusoil.net

Corresponding author: **Zukhra Kh. Pavlova**, zpavlova@mail.ru

Abstract. The efficient operation of pipeline systems in the oil and gas industry largely depends on the level of reliability of these facilities. In regions with an increased environmental impact of the construction and

operation of pipeline systems in the oil and gas industry, increased requirements are imposed on their reliability. Moreover, in conditions of increased influence of pipelines on the environment, in turn, the pipeline experiences the ac-

tion of higher forces in comparison with normal conditions on the part of the environment. One of the main directions of ensuring reliable operation of pipeline systems in the oil and gas industry is the further improvement of methods for their design, based on taking into account the real conditions of construction and operation. At the same time, in studies and projects, it is necessary to take into account the structural features of the structure, which significantly affect the level of mechanical stresses in the pipe wall of an oil and gas pipeline and displacements of an underground pipeline. In accordance with the requirements of SP36.13330.2012 «Main pipelines», the strength of pipes in the longitudinal direction is checked with the determination of the maximum total longitudinal stresses acting

in their wall from all loads and influences, taking into account the longitudinal and transverse displacements of the pipeline. Longitudinal and transverse movements of the pipeline depend on the design solutions adopted during its construction.

The purpose of the work is to improve the design methods for underground oil and gas pipelines based on determining the parameters of the stress-strain state of curved sections, taking into account design solutions and operating conditions.

Analytical relationships were obtained to determine the maximum total longitudinal stresses in the wall of an underground pipeline in curved sections, taking into account design solutions, the forces of interaction of the pipeline with the soil and operational loads.

Keywords: underground pipeline, curved section, curved section design, mechanical stresses, underground pipeline movements, stress reduction

For citation: Pavlova Z. Kh., Dudnikov Yu. V., Azmetov Kh. A. Opredeleeniye parametrov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya krivolineynykh uchastkov podzemnykh truboprovodov neftegazovoy otrasli. [Parameters Determination of Underground Pipelines Curved Section Stress-Deformed State of Oil and Gas Industry]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2021, Issue 6 (134), pp. 116-125. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-6-116-125>.

Трубопроводы нефтегазовой отрасли строятся во всех климатических и географических зонах страны. Значительная доля трубопроводов проложена в условиях равнинно-холмистой местности, порядка трех тысяч километров трубопроводов страны сооружены в горной местности.

На таких местностях с криволинейными участками укладка подземного трубопровода осуществляется упругим изгибом труб и сваркой предварительно изогнутых отводов [1-8].

Подземные эксплуатируемые трубопроводы находятся под действием рабочего давления, температурного перепада, собственного веса с продуктом, веса грунта, а также силы взаимодействия трубопровода и грунта при их перемещениях [9, 10].

В условиях строительства трубопровода при минусовой температуре воздуха трубы магистральных нефтегазопроводов находятся под действием продольного сжимающего усилия, и это усилие может достигать высоких значений. Под действием продольных

сжимающих усилий на криволинейных участках подземного трубопровода происходит его изгиб.

Дифференциальное уравнение изгиба участка подземного трубопровода на выпуклом рельефе местности с упругим его изгибом или с гнутым отводом записывается в виде [10-13]:

$$EJv^{IV} + Nv'' = -q - Nv_0'' , \quad (1)$$

где E - модуль упругости металла трубы;

J - момент инерции поперечного сечения трубы;

v^{IV}, v'' - производные прогиба второго и четвертого порядка;

N - эквивалентное продольное сжимающее усилие на изогнутом участке трубопровода;

q - сопротивление поперечному перемещению (прогибу) трубопровода, включающий сопротивление грунта и вес трубопровода с продуктом;

v_0'' - начальная кривизна на участке изгиба трубопровода по рельефу местности при строительстве.

По результатам решения дифференциального уравнения (1) с учетом граничных условий [2, 10] получены аналитические выражения, устанавливающие зависимость между продольным усилием N , наибольшим прогибом v , максимальным изгибающим моментом M и конструктивным решением криволинейного участка, а также геометрическими характеристиками трубы и свойствами ее металла, силами сопротивления перемещениям трубопровода.

Указанные зависимости для углов поворота, конструктивно выполненных гнутыми отводами, имеют вид

$$\alpha = \frac{N}{q} \left(\frac{N}{EJ} \right)^{0,5} \operatorname{tg} \varphi , \quad (2)$$

$$\bar{v} = \frac{v}{\operatorname{tg} \varphi} \left(\frac{q}{EJ \operatorname{tg} \varphi} \right)^{0,33} , \quad (3)$$

$$\bar{M} = M [q(EJ \operatorname{tg} \varphi)^2]^{-0,33} , \quad (4)$$

где α , $\bar{v}$, $\bar{M}$ - соответственно параметры продольного усилия, наибольшего прогиба и максимального изгибающего момента,

φ - половина угла поворота трубопровода на его вершине.

Аналогичные зависимости для углов поворота, конструктивно выполненных упругим изгибом трубы, имеют вид

$$\alpha = N \left(\frac{A_0}{EJq} \right)^{0,5} , \quad (5)$$

$$\bar{v} = \frac{v}{A_0} , \quad (6)$$

$$\bar{M} = M(EJA_0q)^{-0,33} , \quad (7)$$

где A_0 - амплитуда начального прогиба трубопровода при его укладке по рельефу выпуклого участка трассы.

В процессе изгиба происходят поперечные перемещения (прогиб) трубопровод перпендикулярно продольной оси трубопровода на изогнутом участке, а также продольные перемещения трубопровода на изогнутом участке и на прилегающих участках к изогнутому.

Продольное перемещение трубопровода представляет из себя его удлинение на расчетном участке.

В результате продольных перемещений происходит уменьшение начального сжимающего усилия от первоначального эквивалентного N_0 до равновесного N . Начальное усилие N_0 вычисляется по расчетной формуле, приведенной в [14].

Указанные продольные перемещения являются удлинением трубопровода в связи с уменьшением продольного сжимающего уси-

лия от N_0 до N , которое может быть определено по известным соотношениям [1, 10].

Это же удлинение может быть вычислено из-за искривлений продольной оси трубопровода на расчетном участке, которое происходит в процессе изгиба трубопровода под действием продольного усилия [1, 9].

Приравняв между собой удлинения трубопровода вследствие снижения продольного сжимающего усилия и из-за искривления трубопровода, получена зависимость между параметрами продольного усилия и перемещений трубопровода.

Эта зависимость при изгибе подземного трубопровода с гнутым отводом на выпуклом рельефе местности в безразмерных параметрах записывается в виде:

$$\beta = \sqrt[3]{\alpha^2} + Z \sqrt{\bar{v} \left(1 + \frac{\pi^2 (\bar{v})^3 \sqrt{\alpha}}{16a} \right) + \left(\frac{a\bar{p}}{\sqrt[3]{\alpha}Z} \right)^2} - \frac{a}{\sqrt[3]{\alpha}} \bar{p} \quad (8)$$

где β - параметр сжимающего усилия N_0 и определяется по формуле:

$$\beta = \frac{N_0}{EJ} \sqrt[3]{\left(\frac{EJ}{q} \operatorname{tg} \varphi \right)^2}; \quad (9)$$

где Z , $\bar{p}$ - параметры, характеризующие диаметры труб, конструкцию угла поворота, сил сопротивления продольным и поперечным сопротивлениям трубопровода;

a - параметр, характеризующий протяженность изогнутого участка трубопровода.

Аналогичная зависимость при изгибе трубопровода с начальным упругим изгибом имеет вид:

$$\beta = \sqrt{\alpha} + Z \left[\frac{\bar{v} \sqrt[4]{\alpha}}{a_0} (\bar{v} + 2) + \left(\frac{16aZ}{\pi^2 (\bar{A}_0)^2 \sqrt[4]{\alpha}} \right)^2 \right]^{0.5} - \frac{a}{\sqrt[4]{\alpha}} \left(\frac{4Z}{\pi A_0} \right)^2 \quad (10)$$

$$\text{где } \beta = \frac{N_0}{EJ} \sqrt{\frac{A_0 EJ}{q}}, \quad (11)$$

Z , a_0 , $\bar{A}_0$ - параметры, характеризующие диаметр труб, конструкцию угла поворота, сил сопротивления продольным и поперечным перемещением трубопровода при применении на угле поворота упругого изгиба труб.

Формула (10) соответствует случаю $l = l_0$, где l - длина изогнутого участка трубопровода под действием продольного сжимающего усилия; l_0 - начальная длина волны упругого изгиба трубопровода при строительстве.

Для вычисления α , $\bar{v}$, $\bar{M}$ в зависимости от параметра a и параметров укладки трубопровода получены также расчетные формулы.

Наибольший изгибающий момент и наибольший прогиб возникают на вершине угла поворота.

Анализ зависимостей параметра длины изогнутого участка α по формуле (8) и (10) от параметра β с учетом исходных данных по геометрическим характеристикам и действующим нагрузкам на трубопроводы нефтегазовой отрасли показывает, что с увеличением β происходит монотонное увеличение a .

Исходя из того, что β характеризует продольное усилие N_0 по (9) и (11) можно заключить, что закономерности изменения параметров α , $\bar{v}$, $\bar{M}$ от a соответствуют закономерностям изменений этих параметров от начального продольного сжимающего усилия N_0 .

На рисунке 1 приведены зависимости параметров $\bar{M}$ и $\bar{v}$ от a для углов поворота, конструктивно выполненных крутоизогнутым отводом. Такие конструкции при действии начального усилия N_0 из-за положительного температурного перепада характеризуются значительными перемещениями трубопровода.

С целью снижения перемещений используется, например, разбивка одного угла на два. Вместе с тем при этом происходит увеличение параметра продольного усилия α и самого усилия N .

На рисунке 2 приведен график изменения параметра α при разбивке угла поворота. Здесь c_0 - параметр длины прямой вставки, использованной при разбивке угла поворота и равенство 0 параметра c_0 соответствует отсутствию разбивки угла.

Рисунок 1. Зависимости параметров изгибающего момента (1) и прогиба (2) от параметра a

Figure 1. Dependences of the parameters of the bending moment (1) and deflection (2) on the parameter a

Рисунок 2. Изменение параметра продольного усилия на изогнутом участке при разбивке угла поворота

Figure 2. Changing the longitudinal force parameter on a curved section when staking out the angle of rotation

На рисунке 3 и на рисунке 4 приведены зависимости параметров α и $\bar{M}$ от a при конструктивном выполнении угла поворота упругим изгибом трубопровода, где a_0 - безразмерный параметр начальной длины l_0 волны упругого изгиба.

Необходимо отметить, что для упруго-искривленных участков прогиб трубопровода на вершине угла под действием продольного сжимающего усилия незначителен. Однако при этом возникают изгибающий момент M и напряжения изгиба, которые следует учесть при расчетах. Суммарные максимальные продольные напряжения в вершине угла поворота на выпуклом рельефе местности могут достигать значительных величин, которые в соответствии с требованиями [14] вычисляются по формуле:

$$\sigma_{np}^H = 0,3\sigma_{кц}^H - \sigma_N \pm \left(\frac{E D_H}{2\rho} + \sigma_H \right), \quad (12)$$

где $\sigma_{кц}$ - кольцевые напряжения от рабочего давления;

ρ - радиус упругого изгиба на вершине угла поворота;

D_H - наружный диаметр трубопровода;

$\sigma_N = \frac{N_P}{F}$ - продольное напряжение от

усилия $N_P = N - 0,2\sigma_{кц}^H \cdot F$,

F - площадь поперечного сечения трубы;

$\sigma_H = \frac{M}{W}$;

W - момент сопротивления поперечного сечения трубы.

Рисунок 3. Графики зависимостей параметра α от a

Figure 3. Graphs of dependences of the parameter α on a

Рисунок 4. Графики зависимостей параметра $\bar{M}$ от a

Figure 4. Graphs of dependences of the parameter $\bar{M}$ on a

Суммарные максимальные продольные напряжения при строительстве угла поворота на выпуклом рельефе местности с использованием гнутого отвода вычисляются по формуле (12), принимая напряжения от упругого изгиба $\frac{E D_H}{2\rho}$ равным нулю.

В качестве примера приведем результаты расчета подземного нефтепровода с наружным диаметром 720 мм с толщиной стенки 10 мм, проложенного в песчаном грунте на глубине 0,8 м от верхней образующей. Рабочее давление 5,0 МПа, положительный температурный перепад 60 °С.

С использованием [1], а также полученных нами в [8] и в данной работе расчетных формул при угле поворота 6° конструктивно выполненного холодногнутом отводом с радиусом кривизны 25 м имеем $a = 2,134$; $\beta = 1,445$; $\alpha = 1,297$; $\bar{\nu} = 0,273$ и $\bar{M} = 0,616$. Максимальные суммарные продольные напряжения $\sigma_{np}^H = 308,0$ МПа.

При значениях рабочего давления 4,0 МПа, температурного перепада +60 °С и угле поворота 6° для нефтепровода диаметром 1220 м с толщиной стенки 14 мм, проложенного в песчаном грунте на глубине 1,0 м, и радиусе кривизны отвода 60 м получены $a = 1,384$; $\beta = 1,044$; $\alpha = 0,902$; $\bar{\nu} = 0,2058$ и $\bar{M} = 0,250$. Максимальные суммарные продольные напряжения $\sigma_{np}^H = 195,0$ МПа. Расчеты показали, что увеличение угла поворота трубопровода, например для трубопровода 1020 × 11 мм от 3° до 9° при температурном перепада 40 °С приводят к увеличению параметра a в 2,3 раза, α в 2,3 раза, $\bar{M}$ в 6,6 раза и напряжения σ_{np}^H в 2,9 раза. Увеличение положительного температурного перепада от 40 °С до 60 °С для этого трубопровода при угле поворота 9° связано с ростом a в 1,5 раза, α в 1,4 раза, $\bar{M}$ в 1,8 раза и напряжения σ_{np}^H в 1,9 раза. Для других диаметров труб закономерности аналогичны. Указанные закономерности рекомендуется учесть при выборе конструкции криволинейных выпуклых участков подземных трубопроводов. Следует принимать такие конструкции, при которых достигается для заданных нагрузок возможное минимальное напряжение, которое обеспечит повышение безопасности и

ресурса трубопроводных систем нефтегазовой отрасли [15-18].

Таким образом, определение безразмерных параметров напряженно-деформированного состояния α , $\bar{\nu}$ и $\bar{M}$ позволяет вычислить максимальные суммарные продольные напряжения в зависимости от конструкции укладки трубопровода на выпуклых участках профиля трубопровода в вертикальной плоскости и от условий эксплуатации.

Выводы

Теоретическими исследованиями напряженно-деформированного состояния подземных действующих трубопроводов на криволинейных участках получены аналитические зависимости параметров напряжений и перемещений трубопровода в зависимости от геометрических характеристик конструкции криволинейного участка на выпуклых участках продольного профиля. Проведен анализ влияния характеристик конструкции на параметры перемещений трубопровода и возникающих при этом напряжений в стенке труб. Полученные зависимости и параметры позволяют принимать технические решения при строительстве трубопроводных систем нефтегазовой отрасли, повышающие надежность их эксплуатации.

Список источников

1. Азметов Х.А., Матлашов И.А., Гумеров А.Г. Прочность и устойчивость подземных трубопроводов. СПб.: Недра, 2005. 247 с.
2. Бородавкин П.П. Подземные трубопроводы. М.: Недра, 1973. 304 с.
3. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1977. 407 с.
4. Бородавкин П.П., Таран В.Д. Трубопроводы в сложных условиях. М.: Недра, 1986. 304 с.
5. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. М.: Недра, 1986. 224 с.
6. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство). М.: Недра, 1982. 384 с.
7. СП 86.13330.2012. Магистральные трубо-

References

1. Azmetov Kh.A., Matlashov I.A., Gumerov A.G. *Prochnost' i ustoychivost' podzemnykh truboprovodov* [Strength and Stability of Underground Pipelines]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2005. 247 p. [in Russian].
2. Borodavkin P.P. *Podzemnye truboprovody* [Underground Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 304 p. [in Russian].
3. Borodavkin P.P., Berezin V.L. *Sooruzhenie magistral'nykh truboprovodov* [Construction of Trunk Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 407 p. [in Russian].
4. Borodavkin P.P., Taran V.D. *Truboprovody v slozhnykh usloviyakh* [Pipelines in Difficult Conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 304 p. [in Russian].
5. Borodavkin P.P. *Mekhanika gruntov v truboprovodnom stroitel'stve* [Soil Mechanics in Pipeline Construction]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 224 p. [in Russian].

проводы. Актуализированная редакция СНиП III-42-80. М.: Госстрой, 2013. 51 с.

8. Азметов Х.А., Дудников Н.В., Павлова З.Х. Прочность и устойчивость подземных трубопроводов на переходах через естественные и искусственные препятствия. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. 280 с.

9. 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. 30-35.

10. Ясин Э.М., Черников В.И. Устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 1968. 120 с.

11. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Наука, 1971. 807 с.

12. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 2018. 544 с.

13. Филоненко-Бородич М.М., Изюмов С.М., Олисов Б.А. Курс сопротивления материалов. М.: Гостехиздат, 1956. Ч. 2. 540 с.

14. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85. М.: Госстрой, 2013. 97 с.

15. Зайнуллин Р.С., Гумеров А.Г. Повышение ресурса нефтепроводов. М.: Недра, 2000. 494 с.

16. Махутов Н.А., Пермьяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. Новосибирск: Наука, 2005. 515 с.

17. Гумеров А.Г., Азметов Х.А., Григорьева Н.В., Павлова З.Х. Обеспечение безопасной эксплуатации магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов оптимальным размещением линейной запорной арматуры // Безопасность жизнедеятельности. 2008. № 3 (87). С. 44-46.

18. Хафизов А.М., Павлова З.Х., Баширов М.Г., Крышко К.А. Совершенствование информационно-управляющей системы обеспечения безопасности трубчатых печей нефтегазовых производств с использованием генетических алгоритмов // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 1. С. 104-124. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2019/ogbus_1_2019_p104-124.pdf (дата обращения: 02.10.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2019-1-104-124.

provodnom stroitel'stve [Soil Mechanics in Pipeline Construction]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 224 p. [in Russian].

6. Borodavkin P.P. *Podzemnye magistral'nye truboprovody (proektirovanie i stroitel'stvo)* [Underground Trunk Pipelines (Design and Construction)]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 384 p. [in Russian].

7. SP 36.13330.2012. *Magistral'nye truboprovody. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP III-42-80* [SP 36.13330.2012. Trunk Pipelines. Updated Edition of SNiP III-42-80]. Moscow, Gosstroj Publ., 2013. 51 p. [in Russian].

8. Azmetov Kh.A., Dudnikov N.V., Pavlova Z.Kh. *Prochnost' i ustoychivost' podzemnykh truboprovodov na perekhodakh cherez estestvennye i iskusstvennye prepyatstviya* [Strength and Stability of Underground Pipelines at Crossings over Natural and Artificial Obstacles]. Ufa, UGNTU Publ., 2016. 280 p. [in Russian].

9. Azmetov Kh.A., Pavlova Z.Kh. *Opreделение prodol'nykh usilii v podzemnom deistvuyushchem truboprovode v usloviyakh ego prodol'no-poperechnogo izgiba* [Determination of Longitudinal Forces in an Underground Operating Pipeline under Conditions of its Longitudinal-Transverse Bending]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2014, Issue 1 (95), pp. 30-35. [in Russian].

10. Yasin E.M., Chernikin V.I. *Ustoychivost' podzemnykh truboprovodov* [Stability of Underground Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 120 p. [in Russian].

11. Timoshenko S.P. *Ustoychivost' stержней, пластин i obolochek* [Stability of Rods, Plates and Shells]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 807 p. [in Russian].

12. Feodosev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Nauka Publ., 2018. 544 p. [in Russian].

13. Filonenko-Borodich M.M., Izyumov S.M., Olishov B.A. *Kurs soprotivleniya materialov* [Strength of Materials Course]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1956. Part 2. 540 p. [in Russian].

14. SP 36.13330.2012. *Magistral'nye truboprovody. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.06-85* [SP 36.13330.2012. Trunk Pipelines. Updated Edition of SNiP 2.05.06-85]. Moscow, Gosstroj Publ., 2013. 97 p. [in Russian].

15. Zainullin R.S., Gumerov A.G. *Povyshenie resursa nefteprovodov* [Increasing the Resource of Oil Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 494 p. [in Russian].

16. Makhutov N.A., Permyakov V.N. *Resurs bezopasnoi ekspluatatsii sosudov i truboprovodov* [Resource for the Safe Operation of Vessels and Pipelines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 515 p. [in Russian].

17. Gumerov A.G., Azmetov Kh.A., Grigoreva N.V., Pavlova Z.Kh. *Obespechenie bezopasnoi ekspluatatsii magistral'nykh nefte- i nefteproduk-*

toprovodov optimal'nym razmeshcheniem lineinoi zapornoj armatury [Ensuring the Safe Operation of Oil and Oil Product Pipelines by Optimal Placement of Linear Shut-Off Valves]. *Bezopasnost' zhiznedeatel'nosti - Bezopasnost' Zhiznedeatel'nosti*, 2008, No. 3 (87), pp. 44-46. [in Russian].

18. Khafizov A.M., Pavlova Z.Kh., Bashirov M.G., Kryshko K.A. Sovershenstvovanie informatsionno-upravlyayushchei sistemy obespecheniya bezopasnosti trubchatykh pechei neftegazovykh proizvodstv s ispol'zovaniem geneticheskikh algoritmov [Improvement Information-Control System for Ensuring Safety of Tube Furnaces Oil and Gas Production Using Genetic Algorithms]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» - Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2019, No. 1, pp. 104-124. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2019/ogbus_1_2019_p104-124.pdf (accessed 02.10.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2019-1-104-124. [in Russian].

Информация об авторах

• Павлова Зухра Хасановна, д-р техн. наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Директор института цифровых систем, автоматизации и энергетики
Профессор кафедры «Электротехника и оборудование предприятий»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: zpavlova@mail.ru

• Дудников Юрий Владимирович, д-р техн. наук
ПАО «Уфаоргсинтез»
Генеральный директор
Россия, 450037, г. Уфа, Бирский тракт, 2, корп. 5
e-mail: Ydudnikov@yandex.ru

• Азметов Хасан Ахметзиевич, д-р техн. наук, профессор
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Профессор кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 8/3
тел. (347) 242-08-14
e-mail: azmetov1939@yandex.ru

Information about the authors

• Pavlova Zukhra Kh., Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Director of Institute of Digital Systems, Automation and Energy
Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: zpavlova@mail.ru

• Dudnikov Yuriy V., Doctor of Engineering Sciences
Ufaorgsintez PJSC
General Director
bldg. 5, 2, Birskiy Tract, Ufa, 450037, Russia
e-mail: Ydudnikov@yandex.ru

• Azmetov Khasan A., Doctor of Engineering Sciences, Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Gas and Oil Pipelines and Storage Facilities Construction and Repair Department
8/3, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
tel: (347) 242-08-14
e-mail: azmetov1939@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 08.08.2021; одобрена после рецензирования 28.08.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 08.08.2021; approved after reviewing 28.08.2021; accepted for publication 01.11.2021.