

УДК 622.692.4

**Исследование условий опирания подземного трубопровода
и создаваемых усилий в защитном покрытии**

Р. А. Мацюк

*Российский государственный университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) им. И. М. Губкина, г. Москва, Россия
e-mail: romanmatsiuk@mail.ru*

Аннотация. При строительстве и эксплуатации подземных трубопроводов возникает необходимость разработки проектов инженерной защиты изоляционных покрытий от механического воздействия крупнообломочных грунтов. Задача наиболее актуальна при существенной изменчивости условий прокладки по протяженности трассы. В частности, к сложным условиям прокладки можно отнести прохождение трассы в районах распространения скальных, щебенистых и многолетнемерзлых грунтов.

Целесообразность применения методов инженерной защиты изоляционного покрытия от механических воздействий должна быть обоснована как экономически, так и по технико-эксплуатационным показателям. Поэтому задача исследования условий опирания подземного трубопровода и создаваемых усилий в опорной части трубопровода является весьма актуальной и характеризуется недостаточной изученностью.

В работе выполнен анализ влияния грунта подсыпки и засыпки на величину усилия, возникающего в защитном покрытии опорной части подземного трубопровода при наличии неравномерности основания и его гранулометрического состава.

Представлены результаты моделирования контактной задачи с использованием модели дискретной (зернистой) среды в основании трубопровода. Установлено, что при одинаковом размере диаметра и глубине заложения усилие будет меняться в зависимости от выбранной проектом толщины стенки трубы (для трубы 1420 мм максимальная разница составила 22 %). При наличии неравномерности основания усилие в опорной части может увеличиться в 3–5 раз.

Ключевые слова: подземный трубопровод; защитное покрытие; неравномерность основания; пенетрация

**Research of conditions of supporting underground pipeline
and loads on protective coating**

Roman A. Matsiuk

*Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
Moscow, Russia
e-mail: romanmatsiuk@mail.ru*

Abstract. During the construction and operation of underground pipelines, there is a need to develop projects for the engineering protection of insulation coatings from the mechanical effects of coarse soil. The task is most relevant with significant variability of the laying conditions along the length of the route. In particu-

lar, the difficult laying conditions include the passage of the route in the areas of distribution of rocky, gravelly and permafrost soils.

The appropriateness of applying the methods of engineering protection of the insulation coating from mechanical stress should be justified both economically and in terms of technical and operational indicators. Therefore, the task of analyzing the conditions of support of the underground pipeline and the study of the created forces in the supporting part of the pipeline is very relevant and characterized by insufficient knowledge.

The article analyzes the effect of bedding soil and backfill on the amount of force arising in the protective coating of the supporting part of the pipeline in the presence of unevenness of the base and its particle size distribution.

The results of modeling the contact problem using models of a discrete (granular) medium at the base of the pipeline are presented. The wall thickness of the pipes affects the change in created force in the supporting part of the pipeline (for pipes are 1 420 mm the maximum difference is 22 %). In the presence of unevenness of the base, the force in the supporting part can increase by 3–5 times.

Key words: underground pipelines; protective coating; uneven grounds; penetration

Введение

Надежность работы подземных магистральных трубопроводов в значительной мере зависит от состояния внешней защиты, в частности от состояния защитного покрытия, предохраняющего слой антикоррозионной защиты (изоляции). В связи с этим большое значение имеет изучение основных закономерностей взаимодействия внешних нагрузок и воздействия окружающей среды с защитным покрытием трубопровода.

На этапах погрузки и транспортирования, складирования, хранения, сварки, монтажа, испытаний и эксплуатации подземные трубопроводы испытывают целый комплекс неблагоприятных нагрузок и воздействий. Все эти операции влекут за собой поэтапное накопление дефектов покрытий. Предотвращение появления дефектов обеспечивает защиту металла трубы от коррозионно-агрессивной окружающей среды, бесперебойную работу и уменьшает технологические и финансовые риски в процессе эксплуатации.

В настоящее время существуют покрытия для подземных магистральных трубопроводов на основе жидких термореактивных композиций, экструдированных полиолефинов, термоусаживающихся лент, эпоксидных порошковых красок, мастично-полимерных лент холодного нанесения, на основе липких полимерных лент холодного нанесения и битумных и битумоподобных мастик горячего нанесения. Задача оценки выбора покрытия под конкретные условия объекта строительства является актуальной, особенно при прохождении трассы в скальных, щебенистых и многолетнемерзлых грунтах в силу их высокой твердости.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются защитные покрытия подземных трубопроводов. Исследование выполнено с помощью теоретических методов на основе использования анализа технических требований к защитным покрытиям, теории и моделирования взаимодействия дискретной (зернистой) среды в основании подземного трубопровода с его защитным покрытием.

В результате многочисленных обследований магистральных трубопроводов большого диаметра (820–1 420 мм) установлено, что защитное покрытие трубопровода может получить сквозное повреждение, как на опорной его части, так и в верхней половине [1–3]. Характерные повреждения защитных покрытий продемонстрированы в работе [4] на примере многолетних диагностических исследований магистральных газопроводов Западного Казахстана.

При наличии нескольких сосредоточенных или распределенных сил, влияющих на усилие, которое создается в опорной части трубопровода, следует воспользоваться законом независимости действия сил. Напряженно-деформированное состояние трубопровода¹ будет определяться характеристиками воздействующих на него нагрузок [5].

Способ опирания трубопровода на дно траншеи в большей мере определяет величину напряжений сжатия в защитном покрытии опорной части трубопровода, возникающих при его укладке и эксплуатации.

Согласно нормативным документам^{2,3}, при прокладке трубопровода в скальных, гравийно-галечниковых, щебенистых и мерзлых грунтах необходимо производить подсыпку основания из мягких грунтов. В качестве средств инженерной защиты изоляционного слоя подземного магистрального трубопровода для подсыпки используют грунты с размером частиц до 5 см путем подсыпки на дно траншеи измельченного грунта слоем 10 см. Основным недостатком является трудоемкость достижения высокой степени уплотнения материала и достижения равномерности гранулометрического состава грунта подсыпки.

Кроме дробления скального грунта допускаются к использованию мешки или геоматрицы с песком, скальный лист, а в некоторых случаях применяют сплошное обетонирование трубы. На рисунке 1 представлены возможные варианты инженерной защиты изоляционного слоя от механических воздействий при прокладке в скальных, гравийно-галечниковых, щебенистых и мерзлых грунтах.

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте по строительству, эксплуатации трубопроводов и объектов ТЭК [6] была исследована зависимость угла опирания трубопровода (зная который, нетрудно вычислить площадь опирания) от диаметра трубопровода и вертикальной нагрузки на различные постели. В результате исследований установлено, что угол опирания не зависит от диаметра труб. Результаты исследований представлены на рисунке 2 в виде функции угла опирания от линейной нагрузки.

Эта зависимость имеет асимптотический характер и результаты, полученные на трубах различного диаметра, могут быть описаны одной кривой, результаты опытов, проведенных в лессовом и глинистых грунтах, почти совпадают, что позволяет предположить справедливость установленной зависимости и для других грунтов (супесь, суглинок, чернозем) (см. рис. 2).

¹ ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – Введ. 1999-07-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 46 с.

² СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06–85*. – М., 2013. – 98 с.

³ СП 86.13330.2014. Магистральные трубопроводы. СНиП III-42–80*. – Введ. 2014-06-01. – М.: Стандартинформ.

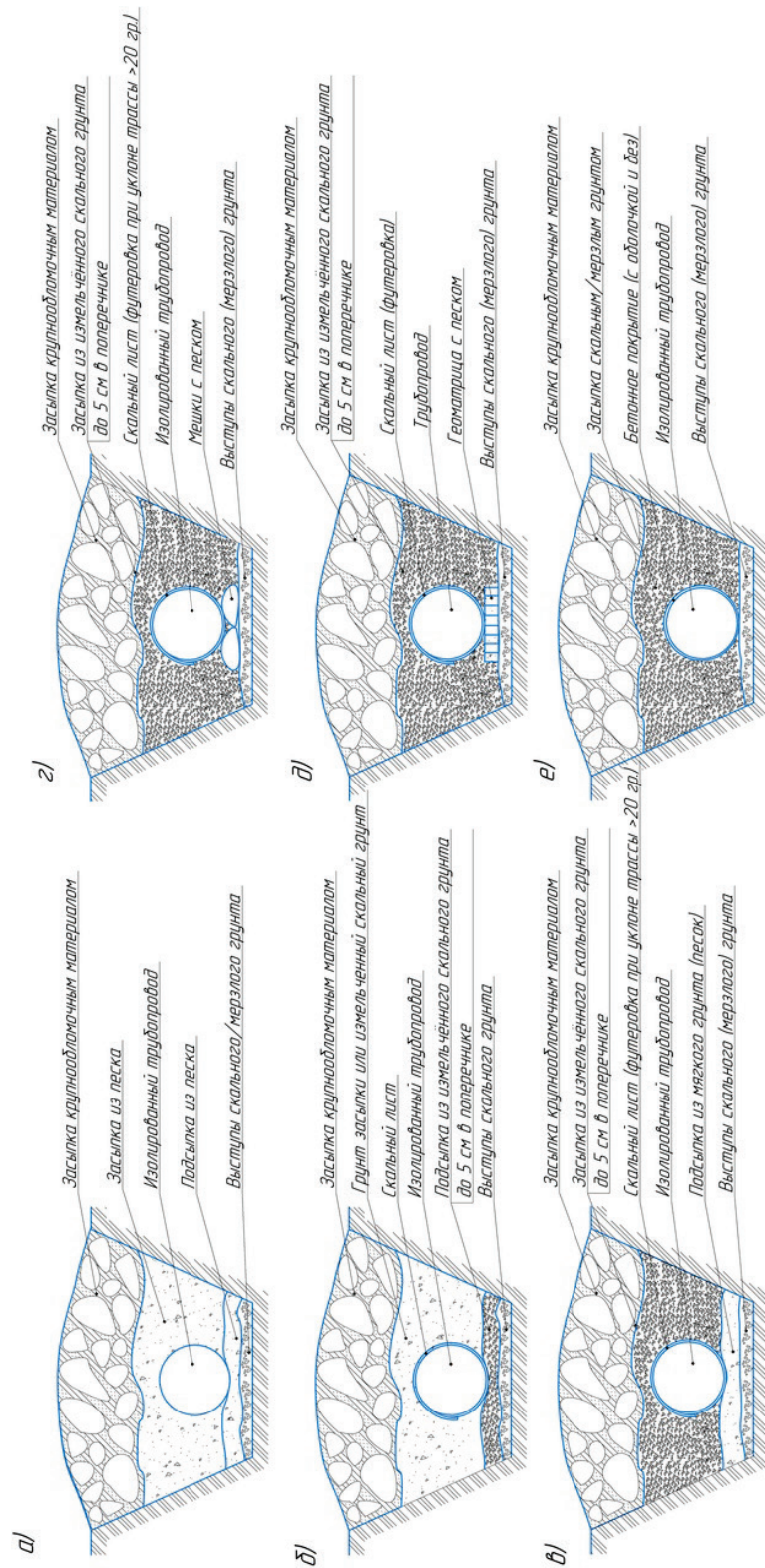


Рис. 1. Схемы устройства защиты изоляции подземного трубопровода в скальных грунтах

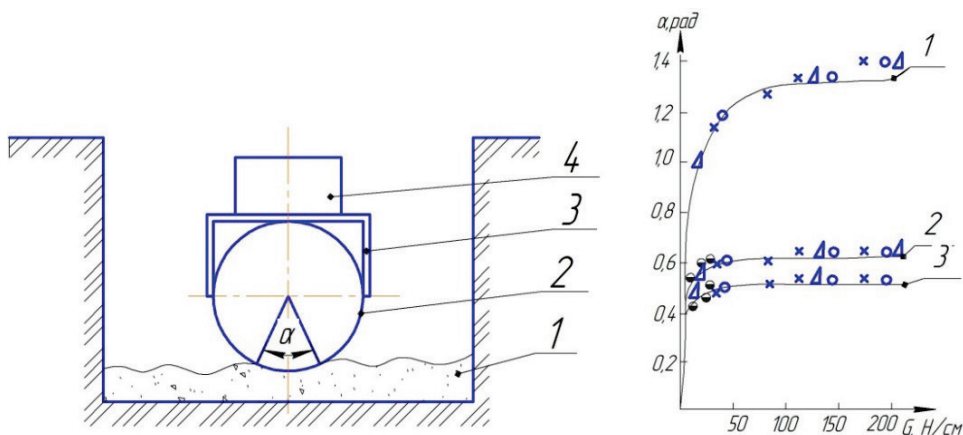


Рис. 2. Зависимость угла опирания трубопровода на различные грунты от линейной нагрузки: 1 — глинистое дно траншеи, залитое водой; 2 — разрыхленная глина, лесс; 3 — песок; диаметр труб, мм: x — 1 420; O — 1 220; Δ — 820; ● — 377

Характерной особенностью поведения оболочки в упругой среде является наличие обжимающего слоя среды, вовлекающегося в совместную работу с оболочкой [6–8]. Под действием вертикальной сжимающей силы в изоляционном покрытии возникают нормальные напряжения сжатия и касательные напряжения сдвига. В связи с этим расчет основывается на учете совместного контактно-механического взаимодействия оболочки защитного покрытия подземного трубопровода и окружающей среды [9–12].

Одним из направлений изучения распределения контактно-механического взаимодействия в зернистых грунтах является модель дискретных сред. Отличием модели дискретной среды является рассмотрение отдельных элементов ее структуры как механически взаимодействующих тел.

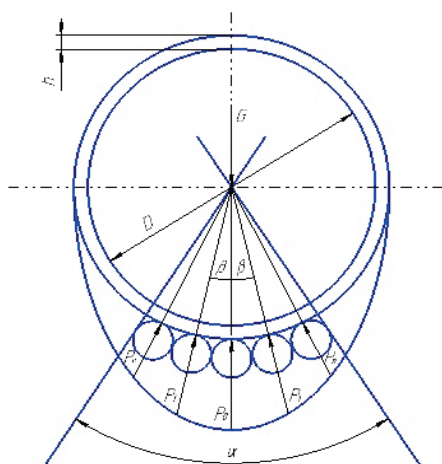


Рис. 3. Схема распределения нагрузки между грунтом подсыпки постели и покрытием подземного трубопровода

Элементами структуры являются частицы сыпучего материала, которые можно представить в виде сфер. Наиболее широко описанной работой, охватывающей и напряжения, и деформации в зернистых средах на основе вероятностных методов являются труды И. И. Кандаурова [13, 14]. Развитием теории механики зернистых сред занимались Е. Литвинишен [15, 16], Р. А. Муллер [17], В. Бжонкала [18], С. Матысяк [19, 20] и др., но какого-либо серьезного развития теории зернистых сред они не достигли.

Рассмотрим схему распределения нагрузки между грунтом подсыпки постели и покрытием подземного трубопровода (рис. 3). В таком случае в качестве параметров, влияющих на сжимающую нагрузку в нижней части трубопровода, рассматриваются собственный вес трубопровода, сила вертикального давления грунта, вес транспортируемого продукта, вес изоляции и покрытия, а также сила воздействия транспорта с поверхности грунта на трубопровод. Ранее в работе [21] рассматривался вопрос об определении равнодействующей одноосного усилия сжатия G . В качестве параметров, влияющих на сжимающую нагрузку, были рассмотрены собственный вес трубопровода, сила вертикального давления грунта, вес транспортируемого продукта и вес изоляции.

Предполагается, что трубопровод засыпан грунтом и находится на глубине H . Составим условие равновесия системы

$$G = F_0 + 2F_1 \cos \beta + 2F_2 \cos 2\beta + 2F_3 \cos 3\beta \dots + 2F_n \cos n\beta,$$

$$F_1 = F_0 \cos^2 \beta, F_2 = F_0 \cos^2 2\beta, F_3 = F_0 \cos^2 3\beta \dots F_n = F_0 \cos^2 n\beta$$

$$\text{Тогда} \quad F_0 = \frac{G}{\left(1 + 2 \cos^2 \beta + 2 \cos^2 2\beta + 2 \cos^2 3\beta + \dots + 2 \cos^2 n\beta\right)};$$

$$\beta = 2 \arcsin \frac{d}{2\left(\frac{D}{2} + \frac{d}{2}\right)},$$

где G — вертикальная сжимающая сила, Н; D — диаметр трубопровода, м; d — диаметр частиц грунта, м; β — угол между точкой контакта частицы и вертикальной осью трубопровода, град.; $F_0, F_1, F_2, F_3, \dots F_n$ — силы реакции в контакте частиц грунта и покрытия, Н.

В уравнение входят только те члены, для которых угол $n\beta$ будет входить в предполагаемую зону опирания, сам же полный угол $\alpha = (n\beta + \beta)$ (порядка $27\text{--}32^\circ$ для труб большого диаметра), так как нас интересует именно реакция опорной части постели.

Результаты

На рисунке 4 приведены результаты анализа возможных видов неравномерности опирания в основании подземного трубопровода в траншее как в продольном, так и в поперечном направлении. Выявлено наиболее опасное сочетание.

К основным причинам образования неравномерностей оснований из дробленного скального, щебенистого или вечномёрзлого грунта можно отнести сложность достижения равномерности гранулометрического состава грунта (одного размера частиц); скалывание менее прочных частиц при укладке и засыпке; различие в поверхностной конфигурации частиц и их стремление принять наиболее устойчивое положение; стремление конструкции опереться на самые твердые и выступающие частицы; вынос грунта из основания поверхностными водами при значительном уклоне и т. д.

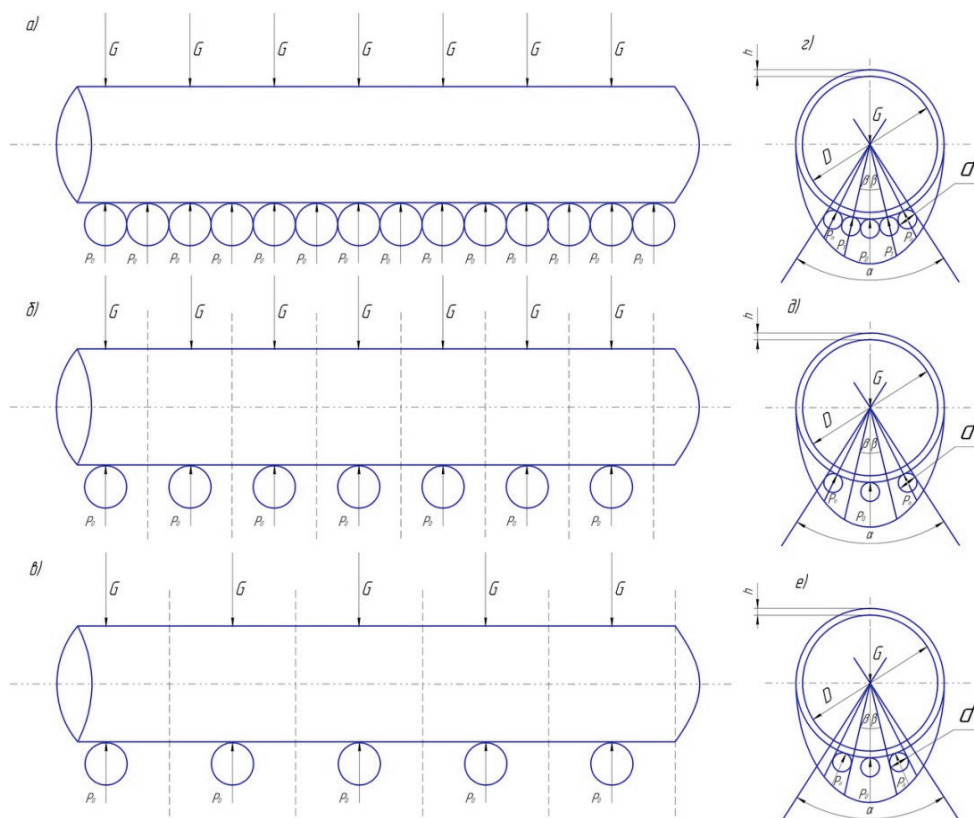


Рис. 4. Схемы неравномерности оснований подземных трубопроводов в траншее:

а) и з) — равномерное основание в продольном и поперечном направлении соответственно; б) и в) — варианты неравномерности в продольном направлении; д) и е) — варианты неравномерности в поперечном направлении

Рассматривая детальные схемы возможных неравномерностей в основании дна траншеи подземного трубопровода, можно прийти к выводу, что сочетание схем в) и д) будет самым опасным.

Можно сформулировать следующее условие устойчивости основания трубопровода при равномерности измельченной подсыпки: максимальный размер частиц грунта в подсыпке при заданном угле опирания должен обеспечивать минимум две точки контакта с покрытием. А это значит, что для труб малого диаметра (114–121 мм) максимальный размер частиц должен составлять 40–45 мм в поперечнике.

На рисунке 5 выведены результаты расчета усилия в защитном покрытии подземного трубопровода на глубине 1,2 м и при диаметре трубы 1 420 мм. Значения усилий указаны в зависимости от размера основных частиц в подсыпке и толщины стенки трубопровода.

При равных условиях, а именно глубине заложения трубопровода, размера частиц подсыпки, материала трубы, разница между создаваемыми усилиями между минимальной толщиной стенки и максимальной составила порядка 22 %.

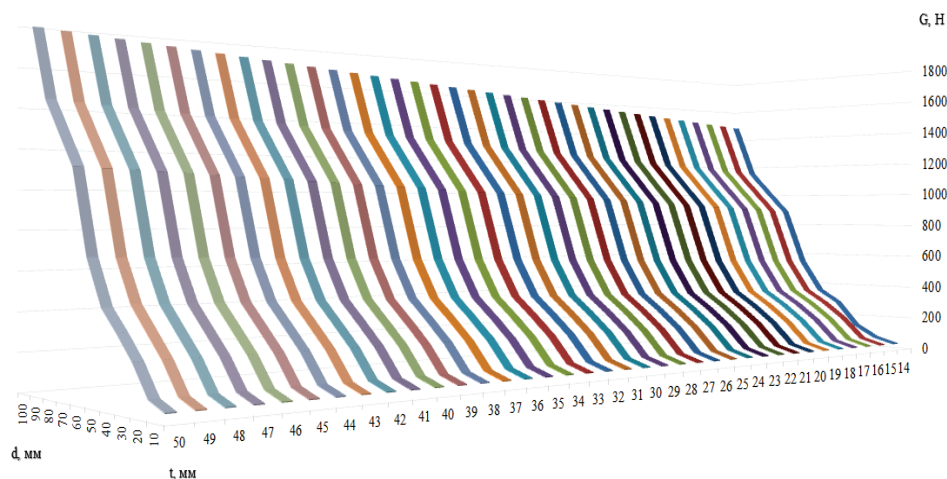


Рис. 5. Зависимость создаваемого усилия в защитном покрытии подземного трубопровода в зависимости от размера частиц грунта подсыпки d и толщины стенки трубы t (диаметр трубы = 1420 мм, $H = 1,2$ м)

Выводы

При оценке защитного покрытия или конструкции, необходимо учитывать изменение значения усилий сжатия в основании трубопровода в зависимости от его диаметра, толщины стенки, глубины заложения, а также гранулометрического состава грунта основания.

При наличии неравномерности в основании подземного трубопровода по схемам *в*) и *д*) (см. рис. 4) при прокладке в скальных, щебенистых и многолетнемерзлых грунтах усилие в покрытии может увеличиваться до 5 раз. В зависимости от выбора толщины стенки в трубах большого диаметра и при прочих равных условиях, разница в создаваемом усилии в основании может достигать 22 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что при оценке применимости того или иного вида покрытия при отсутствии подсыпки из мягкого мелкодисперсного грунта в скальных, щебенистых и многолетнемерзлых грунтах, необходимо применять методы инженерной защиты или защитные конструкции. Выбор конструктивного решения должен учитывать воспринимаемые нагрузки со стороны основания.

Библиографический список

1. Воронин В. И., Воронина Т. С. Изоляционные покрытия подземных нефтепроводов. – М., ВНИИОЭНГ, 1990. – 200 с.
2. Гиззатуллин Р. Р. Усовершенствование метода защиты магистральных трубопроводов от коррозии в трассовых условиях на основе разработанных новых изоляционных материалов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Уфа, 2004. – 40 с.
3. Попов В. А., Лукин Е. С., Истомин А. И. Методы и технические средства контроля качества защитных покрытий объектов нефтегазовой отрасли на разных стадиях их жизненного цикла // Коррозия территории нефтегаз. – 2013. – № 2 (25). – С. 42–44.
4. Хасанов Р. Р. Проблемы защитных покрытий трубопроводов на примере магистральных трубопроводов Западного Казахстана // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12, № 1 – С. 97–102.

5. Виноградов С. В. Расчет подземных трубопроводов на внешние нагрузки. – М.: Стройиздат, 1980. – 135 с.
6. Изоляция трубопроводов: сб. науч. тр. / ВНИИ по строительству магистральных трубопроводов; под ред. В. К. Семенченко. – М.: ВНИИСТ, 1982. – 154 с.
7. Велиюлин И. И., Хасанов Р. Р. Влияние разных типов изоляционных покрытий на устойчивость газопроводов к стресс-коррозионным процессам // Территория Нефтегаз. – 2019. – № 1–2. – С. 52–56.
8. Брыков Э. Е. Применение геосинтетических материалов для защиты наружного противокоррозионного покрытия трубопроводов от механических повреждений // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2008. – № 1 (11). – С. 38–45.
9. Мацюк Р. А. Оценка эффективности испытаний защитных покрытий трубопроводов методом пенетрации / Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. тезисов IX Междунар. науч.-техн. конф. (Новополоцк, 18–20 декабря 2018 г.); под общей ред. В. К. Липского. – Новополоцк, 2018. – С. 51–52.
10. Медведева М. Л., Мурадов А. В., Прыгаев А. К. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров: учеб. пособие для вузов нефтегазового профиля. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2013. – 250 с.
11. Pouraria H., Sea J. K., Palk J. K. CFD Simulation of the Effect of Different Oils on Water Wetting and Internal Corrosion of Oil Pipelines // Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – 2016. – Vol. 5. – UNSP V005T04A023. DOI: 10.1115/OMAE2016-54755
12. Datta Sh., Sarkar Sh. A review on different pipeline fault detection methods // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2016. – Vol. 41. – P. 97–106. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.03.010
13. Кандауров И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. – Л.: Стройиздат, 1966. – 320 с.
14. Кандауров И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. – 2-е изд., испр. и перераб. – Л.: Стройиздат, 1988. – 280 с.
15. Литвинишн Е. Перемещения сыпучих сред как стохастический процесс // Бюллетень Польской академии наук. – 1955. – № 4. – 59 с.
16. Litwiniszyn J. Stochastic methods in mechanics of granular bodies. – Wien: Springer, 1974. – 113 p.
17. Муллер Р. А. К статистической теории распределения напряжений в зернистом грунтовом основании // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1962. – № 4. – С. 4–6.
18. Brzakala W. On propagation of shear stress in Kandaurov granular medium // Bulletin of the Polish Academy of sciences. Technical sciences. – 1988. – Vol. 36, Issue 7–9. – P. 407–413.
19. Matysiak S. J. Distribution of stresses in the Kandaurov granular solid due to a rigid punch // Studia geotechnical etmechanica. – 1984. – Vol. 6, Issue 4. – P. 3–9.
20. Matysiak S. J., Pusz P. Axisymmetric Boussinesq problem for granular half-space // Bulletin of the Polish Academy of sciences. Technical sciences. – 1985. – Vol. 33, Issue 7–8. – P. 351–358.
21. Мацюк Р. А. Оценка влияния неравномерности основания на защитное покрытие подземного трубопровода // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – № 6 (64). – С. 56–59.

References

1. Voronin, V. I., & Voronina, T. S. (1990) Izolyatsionnye pokrytiya podzemnykh nefteprovodov, Moscow, VNIIOENG Publ., 200 p. (In Russian).
2. Gizzatullin, R. R. (2003) Usovershenstvovanie metoda zashchity magistral'nykh truboprovodov ot korrozii v trassovykh usloviyakh na osnove razrabotannykh novykh izolyatsionnykh materialov. Avtoref. dis. ... dokt.tekhn. nauk. Ufa, 40 p. (In Russian).
3. Popov, V. A., Lukin, E. S., & Istomin, A. I. (2013). Metody i tekhnicheskie sredstva kontrolya kachestva zashchitnykh pokrytiy ob"ektov neftegazovoy otrasli na raznykh stadiyakh ikh zhiznennogo tsikla. Korroziya territorii neftegaz, 2(25)), pp. 42–44. (In Russian).
4. Khasanov, R. R. (2014) Problems of protective coatings of pipelines on the example of gas trunk pipelines of Western Kazakhstan. Neftegazovoe delo, 12(1), pp. 97–102 pp. (In Russian).

5. Vinogradov, S. V. (1980) Raschet podzemnykh truboprovodov na vneshnie nagruzki. Moscow, Stroyizdat Publ., 135 p. (In Russian).
6. Semenchko, V. K. (Ed.) (1982). Izolyatsiya truboprovodov. Moscow, VNIIST, 154 p. (In Russian).
7. Veliyulin, I. I., & Khasanov R. R. (2019). The Effect of Gas-Line Wrapping Alternatives on Stress-Corrosion Resistance. Oil and Gas Territory, (1-2), pp. 52-56. (In Russian).
8. Brykov, E. E. (2008) The application of geosynthetical materials for protection of pipelines corrosion-resistant coating from galling. Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika, (1(11)). pp. 38-45. (In Russian).
9. Matsyuk, R. A. Otsenka effektivnosti icpytaniy zashchitnykh pokrytiy truboprovodov metodom penetratsii. (2018). Nadezhnost' i bezopasnost' magistral'nogo truboprovodnogo transporta. Sbornik tezisev IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Novopolotsk, December 18-20, 2018). Novopolotsk, pp. 51-52. (In Russian).
10. Medvedeva, M. L., Muradov, A. V., & Prygaev, A. K. (2013). Korroziya i zashchita magistral'nykh truboprovodov i rezervuarov Moscow, 250 p. (In Russian).
11. Pouraria, H., Sea, J. K., & Palk, J. K. (2016). CFD Simulation of the Effect of Different Oils on Water Wetting and Internal Corrosion of Oil Pipelines. Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 5. UNSP V005T04A023. (In English). DOI: 10.1115/OMAE2016-54755
12. Datta, Sh., & Sarkar, Sh. (2016). A review on different pipeline fault detection methods. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 41, pp. 97-106. (In English). DOI: 10.1016/j.jlp.2016.03.010
13. Kandaurov, I. I. (1966). Mekhanika zernistyykh sred i ee primeneniye v stroitel'stve. Leningrad, Stroyizdat Publ., 320 p. (In Russian).
14. Kandaurov, I. I. (1988). Mekhanika zernistyykh sred i ee primeneniye v stroitel'stve. 2nd edition, revised and supplemented. Leningrad, Stroyizdat, 280 p. (In Russian).
15. Litvinishen, E. (1955). Displacement of bulk media as a stochastic process. Bulletin of the Polish Academy of sciences. Technical sciences, (4). (In English).
16. Litwiniyszyn, J. (1974). Stochastic methods in mechanics of granular bodies. Wien, Springer, 113 p. (In English).
17. Muller, R. A. (1962). K statisticheskoy teorii raspredeleniya napryazheniy v zernistom gruntovom osnovanii. Soil Mechanics and Foundation Engineering, (4). (In Russian), pp. 4-6.
18. Brzakala, W. (1988). On propagation of shear stress in Kandaurov granular medium. Bulletin of the Polish Academy of sciences. Technical sciences, 36(7-9), pp. 407-413. (In English).
19. Matysiak, S. J. (1984). Distribution of stresses in the Kandaurov granular solid due to a rigid puuch. Studia geotechnical et mechanica, 6(4), pp. 3-9. (In English).
20. Matysiak, S. J., Pusz, P. (1985). Axisymmetric Boussinesq problem for granular half-space. Bulletin of the Polish Academy of sciences. Technical sciences, 33(7-8), pp. 351-358. (In English).
21. Matsyuk, R. A. (2017). Evaluation of the influence of the uneven base on a protective coating of underground pipeline. Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika. (6(64)). pp. 56-59. (In Russian).

Сведения об авторе

Мацюк Роман Анатольевич, аспирант кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и хранилищ, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И. М. Губкина, г. Москва, e-mail: romanmatsiuk@mail.ru

Information about the author

Roman A. Matsiuk, Postgraduate at the Department of Construction and Repair of Gas and Oil Pipelines and Storage, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, e-mail: romanmatsiuk@mail.ru