

Организация производства и обеспечение безопасности и экологичности производственных процессов в нефтегазовой отрасли

Organization of production and ensuring the safety and environmental friendliness of production processes in the oil and gas industry

2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ
(технические науки)

УДК 629.10.061

DOI: 10.31660/0445-0108-2022-2-75-84

Критериальные характеристики эксплуатационного воздействия газопровода на геокриологические параметры

В. Н. Пермяков, Л. А. Казанцева, А. Н. Антипова*

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
*antipovaan@tyuiu.ru

Аннотация. Обеспечение надежности эксплуатации магистральных газопроводов с момента их строительства является важной проблемой, которая связана с аварийными ситуациями на магистральных трубопроводах и отказами в их работе. Такие ситуации приводят не только к большим экономическим потерям, но и к масштабным экологическим последствиям.

Решение проблемы возможно при правильной постановке задачи, которая заключается в количественной оценке магистральных трубопроводов и в мониторинге территории, на которой они расположены. Мониторинг территории включает в себя изучение природно-климатических условий, с помощью данных которого создается нормативная эксплуатация линейных магистралей.

Территория Крайнего Севера является наиболее уязвимой, нежели другие территории, на которых имеются месторождения углеводородов, ввиду распространения на ней многолетнемерзлых пород. Так как ресурс эксплуатации таких газопроводов не вечен, их состояние с каждым годом ухудшается, что приводит к возникновению угрозы аварий. Наибольшее количество газовых месторождений и линейных трубопроводов располагаются в районах с неустойчивыми грунтами, с буграми пучения, многолетнемерзлыми породами.

Для эффективного проектирования, строительства и эксплуатации таких объектов необходимо проведение комплексного мониторинга территории, инженерных изысканий, строительства и эксплуатации газовых объектов.

Ключевые слова: газопровод, многолетнемерзлые породы, сезонно-талый слой, грунт

Для цитирования: Пермяков, В. Н. Критериальные характеристики эксплуатационного воздействия газопровода на геокриологические параметры / В. Н. Пермяков, Л. А. Казанцева, А. Н. Антипова. – DOI 10.31660/0445-0108-2022-2-75-84 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2022. – № 2. – С. 75–84.

Criteria characteristics of the operational impact of the gas pipeline on geocriological parameters

Vladimir N. Permyakov, Lyudmila A. Kazantseva, Alena N. Antipova*

Abstract. Ensuring the reliability of operation of main gas pipelines from the moment of their construction is an important problem, which is associated with emergency situations on highways and failures in their operation. Such situations lead not only to large economic losses, but also to large-scale environmental consequences.

The solution to the problem is the correct formulation of the problem, which consists in quantifying the main pipelines and monitoring the territory in which they are located. Monitoring of the territory includes the study of natural and climatic conditions. Using the data obtained, it is possible to determine the operating standards for linear highways.

Because of the spread of permafrost on it, the territory of the Far North is the most vulnerable than other territories with hydrocarbon deposits. The condition of the pipeline decreases every year, so their resource is not eternal. It leads to the risk of accidents. The largest number of gas fields and linear pipelines are located in areas with unstable soils, heaving mounds, and permafrost.

It is necessary to conduct a comprehensive monitoring of the territory, engineering surveys, construction and operation of gas facilities in order to the design, construct and operate such facilities effectively.

Keywords: gas pipeline, permafrost, seasonal thaw depth, soil

For citation: Permiakov, V. N., Kazantseva, L. A., & Antipova, A. N. (2022). Criterial characteristics of the operational impact of the gas pipeline on geocriological parameters. *Oil and Gas Studies*, (2), pp. 75-84. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2022-2-75-84

Введение

Зоны островного распространения многолетнемерзлых пород характерны для территории криолитозоны севера России, 50 % которых — это торфяники, торфяные болота и бугры пучения. Такие районы являются экстремальными из-за наличия криогенных процессов, болотистых массивов, переходов трубопроводов через речные системы.

Магистральные трубопроводы на территории севера взаимодействуют с мерзлым и слабонесущим грунтом, к слабонесущим относят грунт периодически оттаивающий, замерзающий.

При протаивании многолетнемерзлых грунтов может произойти не только деформация газопровода, но и разгерметизация труб, что нанесет непоправимый экологический ущерб.

В таких грунтах присутствуют сжимающие продольные нагрузки, которые оказывают взаимодействие на трубу в течение теплого времени года, в результате чего происходит поперечное перемещение оси трубы. В результате труба может выпячиваться из грунта в виде арки. В холодное время на трубу оказывает влияние продольное усилие растяжений, в таких случаях на обводненных участках труба всплывает.

Магистральные газопроводы испытывают различные нагрузки, которые можно разделить на временные и постоянные, к временным относятся сила грунта, которая давит на трубу, собственный вес трубы. Также может быть сила воды, которая выталкивает трубу из траншеи при подтоплении.

Временными нагрузками могут быть давление, с которым подается продукт по трубе, климатические воздействия, сила льда, снега, давящая на трубу. Кроме того, на трубу оказывают воздействие внутренние силы, такие как кольцевое растягивающее напряжение, радиальные напряжения.

При расчете прочности и устойчивости магистральных трубопроводов в районах Крайнего Севера обязательно учитывают перепад температур. В течение всего года температура газопровода изменяется, при этом при строительстве учитывают температуру трубы как температуру воздуха, при эксплуатации температура учитывается как температура продукта, подаваемого по трубе.

Перепад температуры складывается из разности между указанными выше температурами, регламентируется нормой предельного состояния магистрального трубопровода.

Взаимодействие трубопровода с окружающей его средой — немаловажный фактор, особенно для зоны Крайнего Севера. На трубопроводы, проложенные на участках с многолетнемерзлыми породами, в обводненных территориях на трубу действует продольная сила газопровода, которая должна учитываться при мониторинге устойчивости магистрали. Поэтому необходимо учитывать состояние многолетнемерзлых грунтов.

Изменение инженерно-геологических условий территорий влияет на несущую способность магистрального трубопровода при строительстве и эксплуатации.

При строительстве трубопровода нарушаются растительный и почвенный покров, микрорельеф, что, в свою очередь, нарушает теплообмен между грунтом и воздухом и приводит к активации разных геологических процессов, к увеличению мощности сезонно-талого слоя, увеличению глубины протаивания.

Объект и методы исследования

Техногенное воздействие на территории Крайнего Севера в первую очередь оказывают объекты добычи и транспортировки углеводородного сырья.

Трубопроводные системы имеют большую протяженность в разных природных геосистемах, вызывая их изменения в период функционирования.

Наибольшие изменения при техногенных нарушениях происходят при строительстве трубопровода, при проведении ремонта и подсыпке насыпи.

Рассматриваемый газопровод Надым — Пунга введен в эксплуатацию в 1972 году. Объект располагается в подзоне северной тайги на окраине III озерно-аллювиальной равнины, в зоне распространения многолетнемерзлых пород, которые приурочены к торфяникам, буграм и грядам многолетнего пучения.

Среднегодовые температуры пород составляют от +1,0 до -2,0 °С. Район представлен большим разнообразием и высокой контрастностью почвенного покрова, который подвержен длительному промерзанию [1].

В ходе исследований в течение нескольких лет были использованы методы наблюдения, сравнения, анализа, инструментальный метод.

Результаты

Все трубопроводные системы должны быть надежными конструкциями, надежность — это свойство какого-либо объекта сохранять все параметры (безотказность, долговечность, ремонтпригодность) в предельных нормах при заданном режиме во времени.

На сохранность трубопроводных систем оказывает влияние плотность грунтов, которая уменьшается при строительстве системы. В результате зоны разуплотненного грунта заполняются влагой, затем промерзают, и развивается процесс пучения.

Процесс пучения приводит к неблагоприятным ситуациям, вызывающим изгибные деформации:

- происходит проседание трубы вниз под действием сил снега и льда, находящихся на верхней образующей трубы;
- в период оттепели нижних талых грунтов создается давление на нижнюю образующую, и трубопровод выпучивается из грунтов.

При эксплуатации трубопроводов в зоне мерзлых грунтов необходим детальный мониторинг взаимодействия газопроводов и мерзлых грунтов, лучшим методом для такого мониторинга является математическое моделирование.

Рассматриваемый участок повсеместно занят буграми пучения, количество которых с каждым годом растет.

Бугры пучения бывают сформированными при промерзании замкнутого талика без притока воды и образованными при движении воды из водоносного пласта к горизонтам промерзания.

Воздействуя на газопроводы, первые оказывают локальное воздействие, а образованные при движении воды из водоносного пласта к горизонтам промерзания взаимодействуют с трубопроводом.

Вдоль трасс газопроводов часто образуются подтопления, вызванные последовательным протаиванием бугров пучения и поступлением воды с ближайших территорий.

На территории встречается локальное распространение многолетнемерзлых пород, которые можно обнаружить только при инженерных изысканиях.

На рисунках 1–3 приведены графики сезонной динамики изменения положения трубопровода в течение зимнего и летнего периодов эксплуатации на расстоянии 1, 2, 3, 4 километров в первые два года [2].

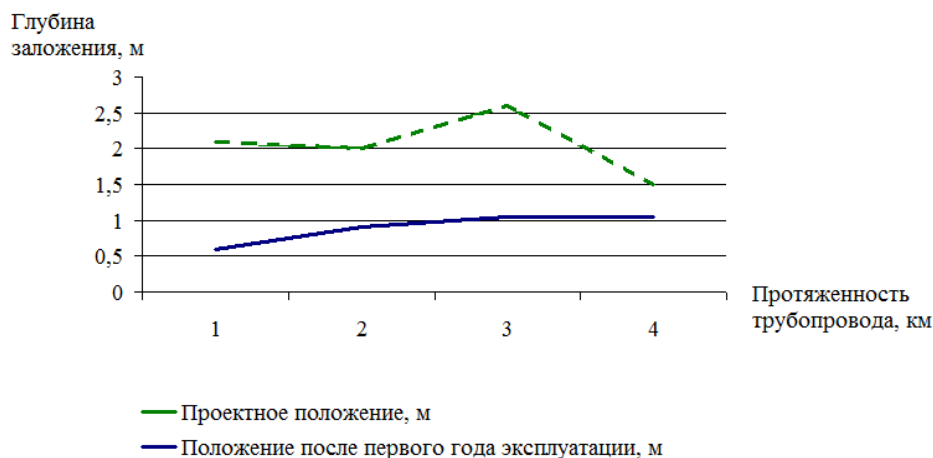


Рис. 1. Изменение расположения газопровода (первый год эксплуатации, зима)

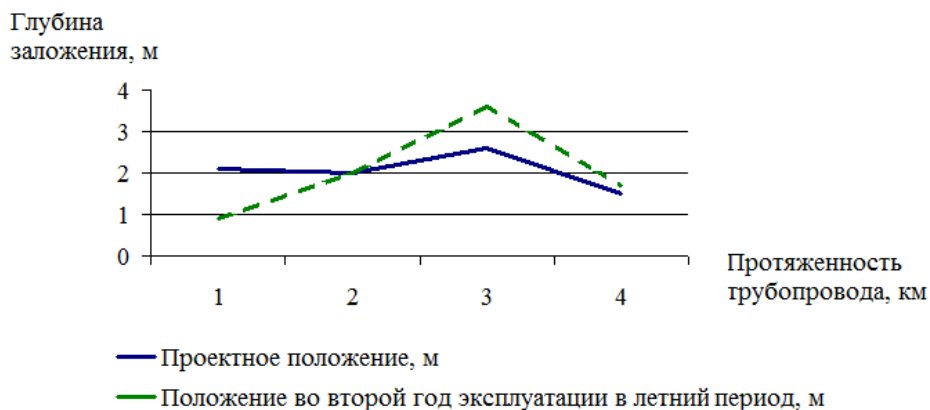


Рис. 2. Изменение расположения газопровода (второй год эксплуатации, лето)



Рис. 3. Изменение расположения газопровода (второй год эксплуатации, зима)

На графиках видно, что отклонение положения газопровода в летний и зимний периоды составляет 2,3 м, отклонение от положения по проекту составляет 1,45 м.

Положение трубопровода изменяется по сезонам, в летний период, согласно графику, трубопровод всплывает примерно на 1,2 м [2].

Бугры пучения оказывают серьезное влияние на трубопровод, в течение трех лет эксплуатации вдоль газопровода образовалось несколько новых пучинистых бугров. Радиусы кривизны бугров составляли примерно 200 м, на расстоянии 22 и 33 метров.

Возникновение бугров пучения вдоль трассы газопровода нарушило его проектное положение, газопровод сместился, во время эксплуатации образовалась чаша оттаивания, глубина которой 6 м [2].

Образование новых бугристых массивов подтверждает интенсивное воздействие на трубопровод на границе талых и мерзлых площадей, в результате которого могут возникнуть дополнительные нагрузки на трубопровод, что может привести к аварийной ситуации [3].

К буграм пучения, особенно тундровым, необходимо относиться более внимательно. Бугры пучения образуются в процессе разложения газовых гидратов, в результате которого происходит под землей взрыв смесей из льда и газа, что связано с потеплением климата.

Высоты бугров могут достигать десятков метров, а в диаметре — 2 км. При проведении инженерных изысканий нужно также учитывать «боковое» воздействие бугра пучения, которое происходит от наземной и подземной его составляющих.

Существует классификация деформаций магистральных трубопроводов, разработанная на основе комплексных инженерных работ (рис. 4) [3].



Рис. 4. Классификация деформаций магистральных трубопроводов

Для устойчивого развития таких районов необходимо проводить комплексный мониторинг, одним из показателей которого является температура поверхности и верхних слоев почвы.

На рисунке 5 приведено изменение среднегодовой температуры сезонно-талого слоя и воздуха на торфянике в течение пяти лет.

Построенные линии тренда на графике показывают, что среднегодовая температура сезонно-талого слоя зависит от температуры воздуха, подтверждают реакции геосистем на изменения климата.

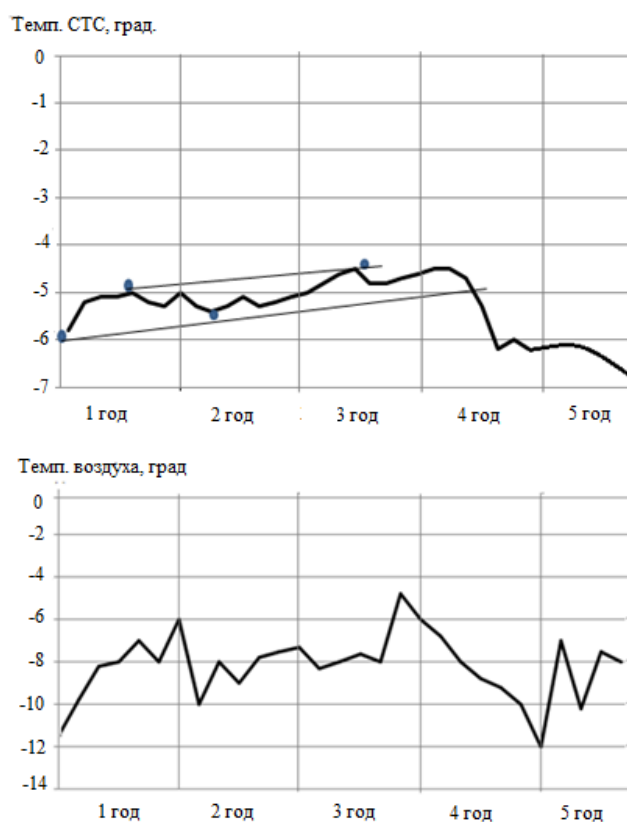


Рис. 5. Изменение среднегодовой температуры сезонно-талого слоя и воздуха по годам

В разных ландшафтных условиях повышение температуры пород изменяется от 0,4 до 1,3 °С. Тренд повышения температур составлял 0,01–0,03 °С в год [4].

Коэффициент корреляции 0,42–0,45, полученный в результате исследований подтверждает зависимость между температурой грунта и глубиной сезонного протаивания [5].

На температуру грунта оказывают влияние многие показатели: температура воздуха (T_v), температура газа (T_r), температура трубопровода, теплофизические параметры теплоизоляции и устройств термостабилизации.

Рабочие показатели температуры транспортируемого газа, которые зависят от физических условий движения и от теплового обмена с воздушной средой, оказывают влияние на температуру газопровода [6]. Исходя из таких данных, возможно построить модель изменения теплопроводности многолетнемерзлых грунтов.

$$T_{\text{грунта}} = F(T_{\text{в}}; T_{\text{г}}(T_{\text{в ср}}; T_{\text{г-вх}}; P_{\text{сргазопр}}; K_{\text{теплопроводности}});$$

$$T_{\text{труб}}(T_{\text{г}}; T_{\text{изол}}; T_{\text{термостабил}}).$$

Для построения модели также важен такой показатель, как глубина сезонного протаивания многолетнемерзлых пород под газопроводом.

$$\Delta Z (H_{\text{гр}}) = F(T_{\text{грунта}}; V_{\text{грунта(влажность)}}; h_{\text{снежного покрова}}).$$

Мощность сезонно-талого слоя, температура многолетнемерзлых грунтов зависят от многих параметров, поэтому необходимо оценивать изменение их современными методами прогнозирования геокриогенных рисков, такими как многолетний мониторинг, расчетные методы, численные методы, имитационное моделирование.

Недостаток их в том, что многие из них могут быть использованы для расчета на небольших участках протяженности газопровода.

Более высокую точность прогнозирования глубины протаивания дает вероятностно-статистическая модель мощности сезонно-талого слоя [6].

Количественную оценку влияния рассмотренных выше параметров на глубину сезонно-талого слоя дает метод расчета индекса криологического риска, который определяется от 0 до 100, делится на двенадцать категорий различного уровня опасности.

$$I_e = \Delta Z \cdot W \cdot S,$$

где I_e — индекс геокриологической опасности; ΔZ — глубина сезонного протаивания; W — процентное содержание льда в мерзлом грунте; S — коэффициент засоленности грунта.

Использование методов прогнозирования изменения глубины сезонно-талого слоя дает возможность прогнозировать антропогенный ущерб окружающей среде в местах строительства и эксплуатации газопровода.

Выводы

Эксплуатация газопроводов характеризуется механическим и тепловым взаимодействием между трубой и мерзлыми грунтами, которое приводит к активации геокриологических процессов. В свою очередь развитие геокриологических процессов влияет на надежность и устойчивость созданной технической системы.

Тепловое воздействие на грунт является основным фактором, который оказывает негативное влияние на геокриологические процессы, поэтому при создании инженерных проектов на территории Крайнего Севера необходимо учитывать данный фактор.

Многолетний геокриологический мониторинг северных территорий позволил установить, что техногенные нарушения бугров в результате изменения геокриологических условий максимально происходят на буграх пучения.

Глубина промерзания почвы увеличивается из-за нарушенного микрорельефа при снятии верхнего почвенного горизонта.

Межгодовая изменчивость сезонно-талого слоя составляет в среднем 20 %.

Значительную роль в изменении глубин сезонно-талого слоя играют магистральные газопроводы. В результате проведенных исследований выявлено воздействие температурного режима газопровода на почвенный покров.

Мерзлотные процессы постоянно активированы, поэтому необходим комплексный инженерный подход к строительству и эксплуатации магистральных трубопроводов в северных регионах.

Методы прогнозирования изменения глубины сезонно-талого слоя позволяют прогнозировать экологические и геокриологические риски при строительстве и эксплуатации газопроводов.

Список источников

1. Казанцева, Л. А. Экологические проблемы инженерного освоения Тюменского региона : учебное пособие / Л. А. Казанцева ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2015. – 67 с. – Текст : непосредственный.
2. Репин, А. С. О методике геопространственного мониторинга бугров пучения многолетнемерзлых пород / А. С. Репин. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-3-28-35. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГИТ). – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 28–35.
3. Васильчук, А. К. Особенности инженерных изысканий для строительства трубопроводов в пределах бугристых ландшафтов зоны спорадического распространения многолетнемерзлых пород / А. К. Васильчук, Ю. К. Васильчук. – Текст : непосредственный // Инженерные изыскания. – 2014. – № 9–10. – С. 4–12.
4. Васильчук, Ю. К. Миграционные бугры пучения в заполярной части криолитозоны Средней Сибири / Ю. К. Васильчук, А. К. Васильчук, Т. Ю. Репкина. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 2013. – № 2. – С. 28–45.
5. Комплексный мониторинг северотаежных геосистем Западной Сибири = Complex monitoring of northern taiga geosystems in the Western Siberia : монография / Н. Г. Москаленко, Т. А. Бляхарчук, О. Е. Пономарева [и др.]. – Новосибирск : ГЕО, 2012. – 207 с. – Текст : непосредственный.
6. Анисимов, О. А. Вероятностно-статистическое моделирование мощности сезонно-талого слоя в условиях современного и будущего климата / О. А. Анисимов. – Текст : непосредственный // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13, № 3. – С. 36–44.

References

1. Kazantseva, L. A. (2015). *Ekologicheskie problemy inzhenernogo osvoeniya Tyumenskogo regiona*. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University Publ., 67 p. (In Russian).
2. Repin, A. S. (2021). Methods of geospatial monitoring of permafrost heave mounds. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 26(3), pp. 28-35. (In Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-28-35
3. Vasil'chuk, A. C., & Vasil'chuk, Yu. K. (2014). Features of engineering surveys for construction of pipelines in palsa landscapes of the sporadic permafrost zone. *Engineering survey*, (9-10), pp. 4-12. (In Russian).
4. Vasilchuk, Yu. K., Vasilchuk, A. C., & Repkina, T. Yu. (2013). Palsas in the polar part of the middle Siberia permafrost zone. *Engineering geology world*, (2), pp. 28-45. (In Russian).
5. Moskalenko, N. G., Blyakharchuk, T. A., Ponomareva, O. E., Ustinova, E. V., Matyshak, G. V., Emel'yanova, L. G.,... Gravis, A. G. (2012). *Complex monitoring of northern taiga geosystems in the Western Siberia*. Novosibirsk, GEO Publ., 207 p. (In Russian).
6. Anisimov, O. A. (2009). Veroyatnostno-statisticheskoe modelirovanie moshchnosti sezonno-talogo sloya v usloviyakh covremennogo i budushchego klimata. *Earth's Cryosphere*, 13(3), pp. 36-44. (In Russian).

Информация об авторах

Пермяков Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Казанцева Людмила Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией кафедры техносферной безопасности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Антипова Алена Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, antipovaan@tyuiu.ru

Information about the authors

Vladimir N. Permyakov, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen

Lyudmila A. Kazantseva, Candidate of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory at the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen

Alena N. Antipova, Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor at the Department of Motor Transport, Construction and Road Machinery, Industrial University of Tyumen, antipovaan@tyuiu.ru

Статья поступила в редакцию 05.02.2022; одобрена после рецензирования 21.03.2022; принята к публикации 29.03.2022.

The article was submitted 05.02.2022; approved after reviewing 21.03.2022; accepted for publication 29.03.2022.