УДК 624.131
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4389
Шифр специальности: ВАК 1.6.7

Определение контролируемых параметров для проектирования сети геотехнического мониторинга подземных трубопроводов в криолитозоне

А.А. Филимонов[1,2]✉, Л.А. Строкова[1]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск
[2] АО «ТомскНИПИнефть», Россия, г. Томск

✉filimonovaa@tomsknipi.ru

Аннотация. ***Актуальность*** работы определена необходимостью проведения геотехнического мониторинга в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов для подземных трубопроводов. Геотехническая система «многолетнемерзлый грунт – подземный трубопровод» подвержена влиянию экзогенных геологических процессов во время эксплуатации, циклическому изменению состояния грунтов сезонного слоя оттаивания и промерзания, оттаиванию многолетнемерзлых грунтов от теплового воздействия трубопровода, изменяющего планово-высотное положение. Многообразие схем взаимодействия тела трубопровода с разновидностями литологического строения многолетнемерзлых грунтов по трассе должно детально прорабатываться на этапе проектирования и также детально оцениваться при проведении геотехнического мониторинга трубопровода. Отсутствие нормативных требований к контролируемым параметрам подземных трубопроводов приводит к применению нестандартизированных и разнообразных сетей мониторинга от проекта к проекту. Отсутствие нормативных значений предельных деформаций подземного трубопровода приводит к необходимости использования расчетных методов определения предельных деформаций основания и трубопровода. Авторами предложено дополнить комплексную методику расчетов подземных трубопроводов, разработанную ранее сотрудниками АО «ТомскНИПИнефть», определением предельных допустимых деформаций трубопровода в каждой точке трассы с наличием многолетнемерзлых грунтов на этапе проектирования и дальнейшим использованием полученных результатов в качестве контролируемого критерия при проведении геотехнического мониторинга. ***Целью*** является определение контролируемых параметров для геотехнического мониторинга подземных трубопроводов в криолитозоне на этапе эксплуатации на основе применения комплексной методики расчета подземных трубопроводов, а также формирование требований к системе пунктов получения информации. ***Методы:*** обзор нормативной базы по геотехническому мониторингу, анализ и оценка применяемых методов и конструкций мониторинга подземных трубопроводов, анализ комплексной методики расчетов подземных трубопроводов применительно к целям геотехнического мониторинга. ***Результаты.*** По итогам обзора нормативно-технической документации выявлено отсутствие конкретизации методов, оборудования, объема сети геотехнического мониторинга и периодичности проведения мониторинга трубопроводов; выявлено требование по применению расчетного метода предельных деформаций и отсутствие описания возможных методов. При детальном анализе комплексной методики проведения расчетов трубопроводов, разработанной в АО «ТомскНИПИнефть», обосновано ее применение для целей геотехнического мониторинга, отмечено преимущество методики в детальности получаемых предельных значений деформации с точностью до одного метра вдоль оси трассы трубопровода. Описаны методы и конструкции, применяемые для мониторинга деформаций подземных трубопроводов, установлена совместимость применения комплексной методики при любой конструкции и способе проведения мониторинга. Предложен перечень основных контролируемых параметров и обоснование объема и параметров системы геотехнического мониторинга для подземных трубопроводов.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, подземный трубопровод, многолетнемерзлые грунты, комплексная методика расчета трубопровода, численное моделирование

Для цитирования: Филимонов А.А., Строкова Л.А. Определение контролируемых параметров для проектирования сети геотехнического мониторинга подземных трубопроводов в криолитозоне // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесуросов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 112–127. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4389

UDC 624.131
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4389

Determination of controlled parameters for designing a network for geotechnical monitoring of underground pipelines in the cryolithozone

A.A. Filimonov[1,2]✉, L.A. Strokova[1]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
[2] JSC TomskNIPIneft, Tomsk, Russian Federation

✉filimonovaa@tomsknipi.ru

Abstract. ***Relevance.*** The need for geotechnical monitoring in the areas of distribution of permafrost soils for underground pipelines. The geotechnical system "permafrost soil – underground pipeline" is subject to the influence of exogenous geological processes during operation, cyclical changes in the state of soils of the seasonal layer of thawing and freezing, thawing of permafrost soils from the thermal effect of the pipeline, changing the plan-altitude position. The variety of schemes for interaction of the pipeline body with varieties of lithological structure of permafrost soils along the route should be worked out in detail at the design stage and also assessed in detail during geotechnical monitoring of the pipeline. The lack of regulatory requirements for the monitored parameters of underground pipelines leads to the use of non-standardized and varied monitoring networks from project to project. The lack of standard values for the maximum deformations of an underground pipeline leads to the need to use calculation methods for determining the maximum deformations of the base and pipeline. The authors proposed the use of a comprehensive methodology for calculating underground pipelines, developed by employees of JSC TomskNIPIneft to determine the maximum permissible deformations of the pipeline at each point of the route with the presence of permafrost soils at the design stage, with further use of the results obtained as a controlled criterion when conducting geotechnical monitoring. ***Aim.*** To determine the controlled parameters for geotechnical monitoring of underground pipelines in the cryolithozone at the operational stage based on the application of a comprehensive methodology for calculating underground pipelines, as well as the formation of requirements for the system of information points. ***Methods.*** Review of the regulatory framework for geotechnical monitoring, analysis and evaluation of the applied methods and designs for monitoring underground pipelines, analysis of a comprehensive methodology for calculating underground pipelines in relation to the purposes of geotechnical monitoring. ***Results.*** Based on the results of the review of regulatory and technical documentation, the authors have revealed a lack of specification of methods, equipment, volume of the geotechnical monitoring network and frequency of pipeline monitoring, as well as the requirement for the use of the calculation method of limiting deformations and the lack of description of possible methods. A detailed analysis of the complex methodology for pipeline calculations, developed at JSC TomskNIPIneft, substantiates its use for geotechnical monitoring purposes, and notes the advantage of the methodology in the detail of the obtained limit values of deformation with an accuracy of one meter along the axis of the pipeline route. The authors studied the methods and designs used for monitoring deformations of underground pipelines and established the compatibility of using a complex methodology with any design and method of monitoring. The paper introduces the list of the main monitored parameters and justification for the scope of the geotechnical monitoring network for underground pipelines.

Keywords: geotechnical monitoring, underground pipeline, permafrost soils, complex methodology for pipeline calculation, numerical modeling

For citation: Filimonov A.A., Strokova L.A. Determination of controlled parameters for designing a network for geotechnical monitoring of underground pipelines in the cryolithozone. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 112–127. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4389

Введение

Наличие многолетнемерзлых грунтов (ММГ) в основании зданий и сооружений является условием, при котором требуется проводить геотехнический мониторинг (ГТМ) оснований и фундаментов зданий и сооружений. В соответствии с пунктом 15.3 Свода Правил 25.13330.2020, при вскрытии ММГ мониторинг должен проводиться для всех типов зданий и сооружений, в том числе и для подземных трубопроводов.

При геотехническом мониторинге задачами является выявление состояния основания и сооружения, оценка критичности изменений и прогноз условий дальнейшей эксплуатации. Выявление состояния производится на основании натурных наблюдений по ряду контролируемых параметров,

обследования сооружения. Оценка критичности производится в формате сравнения результатов натурных наблюдений с предельными значениями контролируемых параметров, назначаемых на этапе проектирования. Прогнозирование является обязательной частью для корреляции проектных решений с фактической обстановкой геологической среды с учетом техногенных изменений на этапе эксплуатации.

Контролируемыми параметрами при проведении ГТМ являются: деформации, температура ММГ, высота снежного покрова, уровень подземных вод, наличие опасных геологических экзогенных процессов.

Геотехнический мониторинг подземных трубопроводов в криолитозоне является сложной задачей, поскольку в основании протяженных сооружений происходят разнообразные изменения геокриологических условий по всей длине профиля, изменения условий прокладки, возникают разнонаправленные перемещения трубопровода, что приводит к различным сочетаниям деформированного состояния трубопровода, в связи с чем требуется назначение варьируемых предельных деформаций и предельных температур грунтов по всей длине трубопровода.

На данный момент существует достаточное количество методов проведения мониторинга по каждому контролируемому параметру, однако не все из них допустимо использовать для подземного трубопровода [1–15]. Большой проблемой для эксплуатационных служб являются проекты, в которых применяется типизация инженерно-геологических условий (ИГУ) по трассе по ландшафтно-индикационным признакам, литологическому строению и геокриологическим особенностям, соответственно, предельные критерии для мониторинга назначаются в соответствии с типизацией либо принимаются нормативно. Проведение мониторинга и оценка изменения геологической среды по типам ИГУ не позволяют достоверно оценивать напряженно-деформированное состояние трубопровода, о фактических значениях которого можно судить только по результатам внутритрубной диагностики.

Принятая сотрудниками АО «ТомскНИПИнефть» концепция комплексного подхода к расчетам подземных трубопроводов в криолитозоне, включающая в себя выполнение теплотехнических расчетов всех участков трассы с ММГ с последующим проведением прочностных расчетов всего трубопровода, позволяет детально прогнозировать изменения основания трубопровода, выявлять максимальные расчетные деформации основания и изменения температурных полей во времени, при которых будет удовлетворено условие прочности и устойчивости трубопровода [16].

Целью работы является определение контролируемых параметров для геотехнического мониторинга подземных трубопроводов в криолитозоне на этапе эксплуатации на основе применения комплексной методики расчета подземных трубопроводов, а также формирование требований к системе пунктов получения информации.

Методика исследования

Исследование проведено в 2022–2023 гг. в АО «ТомскНИПИнефть» и включало в себя:

1) анализ нормативной документации по подземным трубопроводам в Российской Федерации для определения требований по мониторингу;
2) оценку применимости методов проведения геотехнического мониторинга для подземного трубопровода;
3) детальный анализ комплексной методики расчетов подземных трубопроводов и получаемых результатов для обоснования их применения при геотехническом мониторинге;
4) разработку и обоснование перечня основных контролируемых параметров при проведении мониторинга подземных трубопроводов.

Состояние нормативно-технической документации по геотехническому мониторингу подземных трубопроводов в криолитозоне

Для проведения анализа состояния нормативной базы была сделана подборка основных федеральных нормативно-технических документов (НТД) – сводов правил и государственных стандартов по проектированию и эксплуатации подземных трубопроводов в ММГ (табл. 1).

Основные требования к проведению геотехнического мониторинга в зоне распространения ММГ описываются СП 25.13330.2020. Необходимость проведения ГТМ для подземных трубопроводов обоснована в пунктах 15.3 СП 25.13330.2020, пункте 8.7.2 СП 305.1325800.2017 и пункте 11.46 СП 410.1325800.2018. Таблица М.1 СП 25.13330.2020 определяет основные контролируемые параметры при ГТМ – температура грунта, уровень подземных вод, деформация, температура охлаждающих устройств. Конструктивно устройства для наблюдения за указанными параметрами не зависят от типа сооружения и аналогичны как для площадных сооружений, так и для подземного трубопровода.

Область применения СП 497.1325800.2020 не распространяется на линейные объекты, СП 22.13330.2016 не распространяется на проектирование сооружений на ММГ, а СП 305.1325800.2017 не распространяется на мониторинг магистральных трубопроводов.

Таблица 1. *Перечень нормативно-технической документации для подземных трубопроводов в РФ*

Table 1. *List of regulatory and technical documentation for underground pipelines in the Russian Federation*

Область применения Application area	Нормативная документация Normative documents	Область нормирования Normalization area
Проектирование оснований и фундаментов сооружений в криолитозоне Design of grounds and foundations facilities in cryolithozone	СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями № 1, 2, 3)» Set of rules 25.13330.2020 "Soil bases and foundations on permafrost soils"	Общие принципы проектирования сооружений на ММГ; Выбор принципа проектирования на ММГ General principles for the design of structures on permafrost; Choice of design principle on permafrost
Проектирование подземных трубопроводов Design of underground pipelines	СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85* (с Изменениями № 1, 2)» Set of rules 36.13330.2012 "Trunk pipelines"	Основные требования при проектировании магистральных трубопроводов: конструктивные требования, требования к трассе, требования при разных видах прокладки и другие Basic requirements for the design of main pipelines: design requirements, requirements for the track, requirements for different types of laying, and others.
	СП 86.13330.2014 «Магистральные трубопроводы» Set of rules 86.13330.2014 "Main (Trunk) pipelines"	Правила производства строительных работ при укладке трубопроводов Rules for production of construction work when laying pipelines
	СП 284.1325800.2016 «Трубопроводы промысловые для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ» Set of rules 284.1325800.2016 "Field pipelines for oil and gas. Rules for the design and production of works"	Основные требования при проектировании промысловых трубопроводов Basic requirements for the design of field pipelines
	СП 410.1325800.2018 «Трубопроводы магистральные и промысловые для нефти и газа. Строительство в условиях вечной мерзлоты и контроль выполнения работ» Set of rules 410.1325800.2018 "Main and field pipelines for oil and gas. Construction in permafrost conditions and control of works"	Правила производства строительных работ при укладке трубопроводов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов Rules for the production of construction work when laying pipelines in the conditions of the spread of permafrost soils
	ГОСТ 34737-2021 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Перекачивающие станции. Проектирование» State standart 34737-2021 "Trunk pipeline transport of oil and oil products. Pumping stations. Design"	Основные требования при проектировании магистральных трубопроводов и перекачивающих станций Basic requirements for the design of main pipelines and pumping stations
Геотехнический мониторинг зданий и сооружений в период строительства и эксплуатации Geotechnical monitoring of buildings and structures during construction and operation	СП 497.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила эксплуатации» Set of rules 497.1325800.2020 "Soil bases and foundations of buildings and structures on permafrost soils. Operating rules"	Указания по проведению геотехнического мониторинга при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, в том числе подземных Guidelines for conducting geotechnical monitoring during construction and operation of buildings and structures, including underground ones
	СП 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве» Set of rules 305.1325800.2017 "Buildings and structures. The rules of geotechnical monitoring under construction"	
	СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83» Set of rules 22.13330.2016 "Soil bases of buildings and structures"	Основные требования к основаниям зданий и сооружений, основные требования к геотехническому мониторингу, предельные деформации основания фундаментов Basic requirements for the foundations of buildings and structures, basic requirements for geotechnical monitoring, limiting deformations of foundations

Перечень НТД для проектирования трубопроводов достаточно обширен и разделен в основном по типам трубопроводов. В каждом из нормативных документов табл. 1 содержатся отдельные требования по необходимости мониторинга ММГ и состояния трубопровода, но без определения объема и состава работ, перечня элементов сети ГТМ и иных требований, за исключением СП 410.1325800.2018, который содержит информацию о необходимости «установки маркировочных стоек-реперов для оценки просадки трубопровода».

Для зданий и сооружений с наличием фундаментов предельное значение контролируемых параметров устанавливает проектная организация в соответствии с требованиями НТД: для температур грунтов – расчетный температурный режим в зоне устройства фундамента по теплотехническому прогнозу, для деформаций – предельные деформации основания фундаментов в соответствии с приложением Г СП 22.13330.2016. Для подземных трубопроводов предельные значения не определены нормативно и должны быть получены расчетным способом, о чем гласит пункт 8.5.4 ГОСТ 34737-2021 и пункт 5.4.1 СП 305.1325800.2017, при этом отсутствует перечень допускаемых методов и требования, предъявляемые к методам, результатам расчетов и их точности. Таким образом, все расчетные методы, определяющие механику взаимодействия трубы и вмещающего грунта только в определенных сечениях, либо с типизированием геологических условий, являются допустимыми с точки зрения требований федеральных норм, но, по мнению авторов, не являются релевантными для всей протяженности трассы линейного сооружения по причине несоответствия точности результатов и сложности геотехнической системы «ММГ – подземный трубопровод».

Резюмируя, можно выделить две основные проблемы современного состояния нормативной документации по геотехническому мониторингу подземных трубопроводов:

- отсутствие требований по методам определения и точности предельных значений контролируемых параметров для подземных трубопроводов в криолитозоне;
- отсутствие требований по составу, объему, типовым конструкциям, расположению элементов сети ГТМ и применяемым методам измерения контролируемых параметров для подземных линейных сооружений в ММГ.

В качестве решения выявленных проблем авторами предлагается к применению комплексная методика расчета подземного трубопровода в ММГ, основные черты которой предложены в [16].

Комплексная методика расчета подземного трубопровода и ее применение для целей геотехнического мониторинга

Подземный трубопровод располагается в разнообразных геологических и геокриологических условиях: сменяющиеся типы распространения ММГ по трассе, от сплошного до редкоостровного распространения ММГ, наличие перелетков, сквозных и несквозных таликов, разнообразная литология, широкие диапазоны температур ММГ – от температур, близких к температурам фазовых переходов, до температур перехода в твердомерзлое состояние – все перечисленные условия можно встретить на инженерно-геологическом профиле одного трубопровода. Транспортирование углеводородов на протяженные расстояния должно производиться при соответствии требованиям к поддержанию и изменению температур продукта. Смена технологических режимов и изменение объемов перекачки приводят к наличию диапазона температурных режимов. Изменяющийся ландшафт и рельеф поверхности, изменение высотных отметок поверхности, водные и иные преграды приводят к смене положений трубопровода в грунте, применению отводов, компенсаторов, балластировки и иных элементов разной номенклатуры.

Все вышеперечисленное имеет непосредственное взаимное воздействие в геотехнической системе «ММГ – подземный трубопровод» и должно быть учтено при прогнозировании изменений системы. Таким образом, типизирование геологических условий и применение двумерного расчета в поперечном сечении одного типа ИГУ не учитывают всего диапазона возможных сочетаний геологических, геокриологических и технических условий прокладки в системе.

Комплексная методика, основанная на итерационном тепломеханическом расчете всей протяженности трассы подземного трубопровода, применяется сотрудниками АО «ТомскНИПИнефть» в своих проектах с 2020 г. Методика заключается в объединении теплотехнического и прочностного расчетов, проведении анализа их результатов и итерационного подбора экономически эффективных защитных мероприятий, как основания трубопровода, так и самого трубопровода, по определенному алгоритму.

Основные положения методики заключаются в следующем:

1. Расчеты теплового режима грунтового основания и расчеты на прочность и устойчивость трубопровода должны проводиться численными методами в специализированном программном обеспечении.
2. Для подземных трубопроводов, по трассе которых были вскрыты ММГ, должны быть рассчитаны тепловые режимы и изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) полностью по всей длине трассы, а не для отдельных типовых участков.
3. При проведении расчетов должны быть учтены условия, наиболее близкие к параметрам эксплуатации трубопровода, с восстановлением инженерно-геологических профилей с учетом положений границ ММГ, изменения температурного режима продукта.

Основные этапы проведения расчетов подземных трубопроводов отражены в блок-схеме (рис. 1).

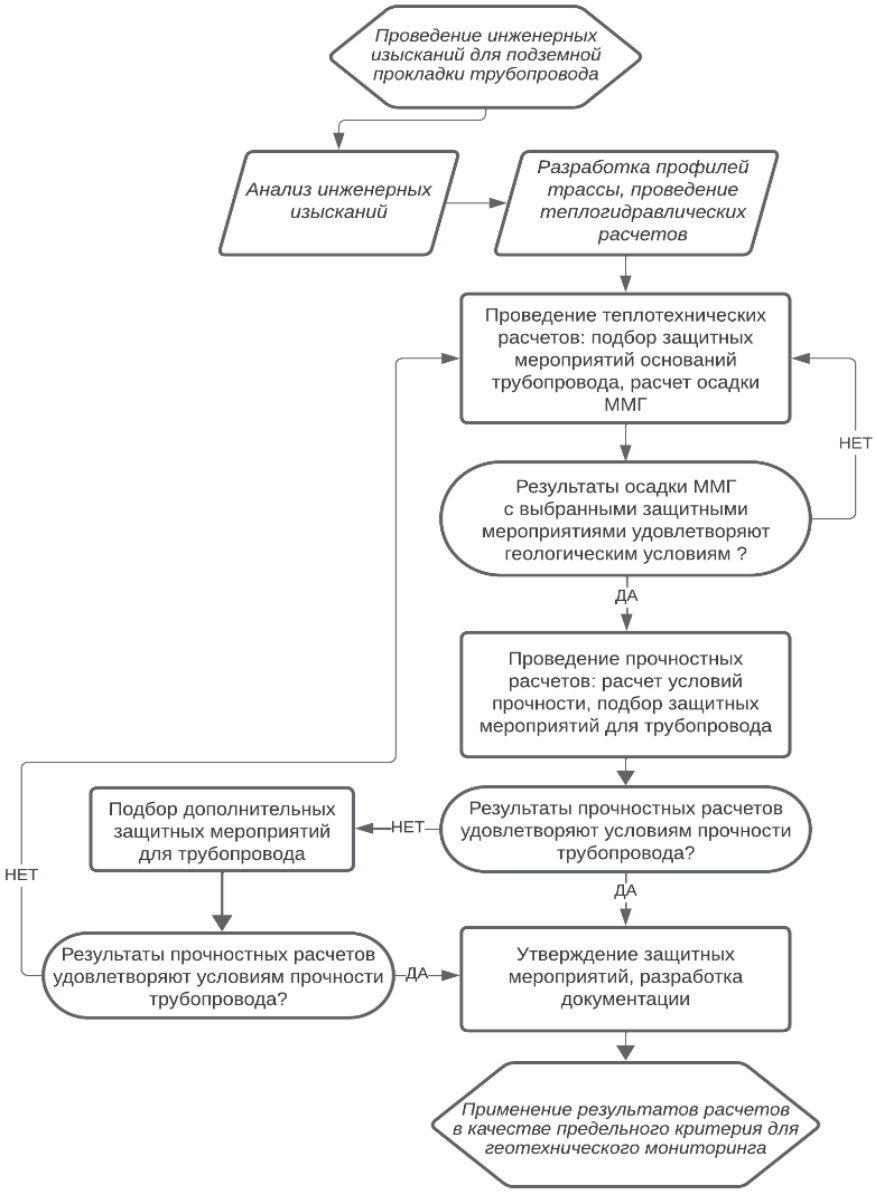

Рис. 1. *Блок-схема применения комплексной методики расчета подземного трубопровода для нужд геотехнического мониторинга*

Fig. 1. *Flowchart of application of an integrated methodology for calculating an underground pipeline for the needs of geotechnical monitoring*

К изысканиям для подземной прокладки трубопровода должны предъявляться особые требования, так как количество и объем исходных данных для расчетов является важным для корректности прогнозирования и результатов расчетов [17].

После того как проведены изыскания в достаточном объеме, специалистами трубопроводного транспорта разрабатывается профиль трассы, формируется вертикальная планировка прокладки трубопровода, при необходимости намечаются пикеты срезки или досыпки грунта, обозначаются места переходов через преграды. Также проводится комплексный гидравлический расчет для группы объектов или отдельного трубопровода, при котором подбираются параметры трубопровода – определяется диаметр трубопровода и толщина стенок, оцениваются параметры давления, пропускной способности, определяется температурный режим перекачки продукта и падение температуры флюидов по трассе трубопровода при неизотермическом движении жидкости. Для тепловых расчетов грунтов основания наиболее значимым результатом гидравлического расчета является график падения температуры флюида от протяженности трассы в течение всего периода эксплуатации. Современное программное обеспечение позволяет детализировать изменение температуры продукта не только по протяженности, но и во времени, что позволяет

учесть разное тепловое воздействие от трубопровода на грунты основания в любой точке трассы за исследуемый прогнозный период. На основании результатов гидравлического расчета определяется необходимость в тепловой изоляции для сохранения необходимого температурного режима углеводородов при транспортировании. Учет неизотермического движения жидкости в трубопроводе обязателен при длинах трубопровода от нескольких километров, а также при широком диапазоне температур, как по длине трассы, так и по годам эксплуатации, поскольку температура продукта является основным техногенным тепловым воздействием на вмещающие многолетнемерзлые грунты.

Сформированный профиль трассы, гидравлические расчеты, совместно с результатами инженерных изысканий, являются исходными данными для проведения начальной итерации теплотехнических расчетов. В специализированном программном обеспечении для всех участков трассы, находящихся в ММГ, создается трехмерная расчетная модель, в которой воссоздается профиль трассы с его литологическим строением, моделируется температурное поле по исследованным термометрическим изысканиям, обозначается местоположение фронта мерзлоты, выделяются немерзлые грунты.

Трубопровод моделируется с изменением пространственного положения в грунте, в соответствии с профилем трассы, с динамическим изменением температуры флюида в трубопроводе по длине трассы и по времени эксплуатации.

Цель первой итерации расчета – рассчитать изменение температурных полей и спрогнозировать оттаивание ММГ с первоначальными техническими мероприятиями – только с учетом мероприятий, заложенных по результатам теплогидравлического расчета или задания на проектирование.

Поскольку при теплотехнических расчетах рассчитывается весь массив ММГ, то и протаивание ММГ можно просчитать для всей длины трубопровода. Результатом теплотехнического расчета является прогнозируемый профиль осадки трубопровода – график максимальной осадки ММГ за весь период эксплуатации по длине расчетного участка (рис. 2, *а*).

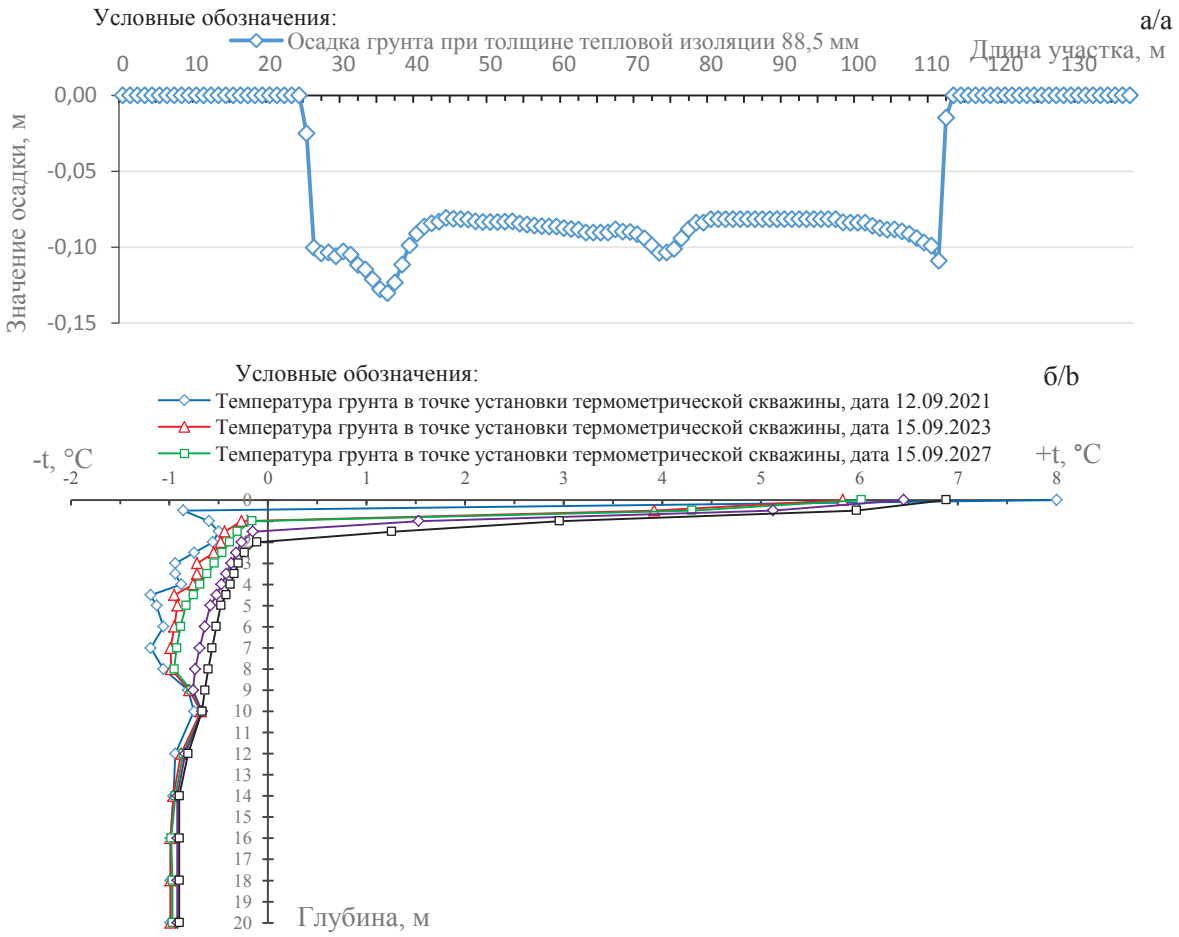

Рис. 2. *Результаты теплотехнического расчета: а) профиль осадки расчетной модели длиной 135 м; б) прогнозные температуры грунта в термометрической скважине по трассе трубопровода*

Fig. 2. *Results of thermal engineering calculations: a) settlement profile of the design model with a length of 135 m; b) predicted ground temperatures in a thermometric well along the pipeline route*

Поскольку для подземных трубопроводов отсутствуют нормативные ограничения по осадке грунтов основания, при проведении первоначальных теплотехнических расчетов требуется исключать высокие значения просадки грунтов в коридоре трассе трубопровода для недопущения значительного понижения отметок естественного рельефа. Термопросадка в зоне прокладки трубопровода с образованием ложбины вдоль оси трубы во время эксплуатации может привести к развитию экзогенных геологических процессов, процессов обводнения и заболачивания, стока поверхностных вод в зону траншеи трубопровода с понижением высотной отметки рельефа, развитию процессов пучения и ускорения процессов деградации ММГ. В зависимости от инженерно-геологического строения и характеристик грунтов приповерхностного слоя требуется ограничивать значение максимальной осадки грунтов, которое можно нивелировать при помощи защитных мероприятий по отведению поверхностных вод от траншеи – формированию кюветов у подошвы откоса, надтраншейного валика, высота которого определяется с учетом осадки.

После анализа результатов первой итерации теплотехнического расчета при высоких значениях осадки производится дополнительный теплотехнический расчет с подбором защитных мероприятий по уменьшению оттаивания – рассматривается увеличение тепловой изоляции трубопровода и/или реализация тепловой изоляции котлована, проведение замены грунта на непучинистые грунты и иные мероприятия. Таким образом, цикл теплотехнических расчетов продолжается до удовлетворения условий по исключению высоких значений осадок и возможного развития опасных геологических процессов (в блок-схеме данные условия названы «геологическими»).

В результате формируется окончательный профиль осадки ММГ при оттаивании, который используется в качестве исходных данных для задания дополнительных условий нагрузки на трубопровод при проведении следующего этапа – прочностного расчета.

Прочностной расчет проводится в специализированном программном обеспечении на всю длину трубопровода, как в ММГ, так и в немерзлых грунтах. В прочностных расчетах учитываются все пространственные изменения трубопровода, применение балластировки, тип вмещающего грунта, характеристики продукта и трубы и другие параметры [16]. При неудовлетворении результатов прочностных условий подбираются защитные мероприятия к трубопроводу – от замены отводов и изменения радиусов изгиба до увеличения класса прочности стали. При повторном неудовлетворении прочностных условий отмечаются пикеты трубы с превышением напряжений и направляются в качестве исходных данных на повторную итерацию теплотехнического расчета для подбора и применения дополнительных мероприятий основания на конкретном участке трассы, далее – повторный прочностной расчет. При удовлетворении условий прочности трубы защитные мероприятия основания трубопровода и тела трубопровода утверждаются как окончательные, на основании данных результатов разрабатывается рабочая документация по трубопроводам.

По нашему мнению, принятые проектные решения по конструкции трубопровода служат базой для проектирования сети ГТМ для его безопасной эксплуатации.

Для разработки рабочей документации по геотехническому мониторингу подземного трубопровода требуется не только применение специальных конструкций деформационных марок, но и наличие предельного критерия по деформациям, который может быть получен только расчетным путем, так как нормативное значение отсутствует, а предел должен быть динамическим, отражая изменяемость системы по трассе. Именно эту задачу и решает комплексный подход к проектированию объекта – профиль осадки трубопровода характеризует максимальную осадку ММГ при оттаивании в течение периода эксплуатации с высокой плановой и высотной точностью, при которой будут удовлетворены условия прочности, в связи с чем обеспечивается безопасная эксплуатация объекта.

Таким образом, профиль осадки обоснованно является расчетным предельным критерием по деформациям, за превышением которого и должен производиться контроль, что полностью отвечает требованиям нормативной документации.

Комплексный расчет позволяет получить прогнозные расчетные значения температур ММГ, а также значения перемещений кровли ММГ. В теплотехнических расчетах моделируется весь геологический массив по трассе, что позволяет формировать графики прогнозного изменения температур грунтов в любой точке трассы, который может отслеживаться во время эксплуатации в термометрических скважинах (ТС), установленных по трассе трубопровода с проектным шагом (рис. 2, *б*).

Применяемые методы и конструкции для измерения деформаций подземного трубопровода

Поскольку нормативная документация по геотехническому мониторингу не оговаривает конкретных методов и конструкций элементов сети ГТМ по параметру деформаций трубопровода, рассмотрим уже применяемые методы и конструкции для измерения деформаций подземного трубопро-

вода. Классическим методом измерения деформаций или вертикальных перемещений является геометрическое нивелирование. Для него применяются конструкции, именуемые реперной маркой, или деформационной маркой, для подземных трубопроводов.

В конструкцию марки входит металлический хомут для крепления к трубопроводу с тепловой изоляцией. К конструкции хомута крепится стойка деформационной марки. Основная проблема данной конструкции – отсутствие устойчивого планового и высотного положения оголовка марки [18]. Высотное положение заглубленного трубопровода в грунте может достигать нескольких метров, высота надземной части также может достигать 1–1,5 м, таким образом стойка за счет общей длины может терять жесткость и собственное устойчивое положение. Также нельзя пренебрегать и иными процессами, возникающими в грунтах, – смерзание стойки с грунтом, пучение грунта, смещение грунтов, температурное линейное расширение трубопровода, приводящее к излому защемленной грунтом марки. Однако, несмотря на все перечисленные минусы, марка для геодезических методов измерения деформаций позволяет отслеживать вертикальное перемещение трубопровода при оттаивании или пучении ММГ в основании, конструкция может изменяться под различные требования эксплуатирующих служб, для измерения деформаций не требуется дополнительного оборудования, кроме геодезического. При частом шаге установки марок по трассе трубы и совместном анализе с результатами внутритрубной диагностики могут достигаться удовлетворительные результаты по определению планово-высотного положения подземного трубопровода.

Также стоит отметить разработку автоматизированной системы геотехнического мониторинга подземного трубопровода, запатентованной сотрудниками ПАО «Транснефть» [19]. Устройство автоматизированного геотехнического мониторинга трубопровода обеспечивает получение данных температуры окружающего воздуха в районе размещения марки, температуры по периметру наружной поверхности трубопровода или теплоизоляции на границе с грунтом, пространственного положения подземного трубопровода при помощи установленной деформационной марки, а также возможность использования дистанционного метода – воздушного лазерного сканирования (ВЛС) с использованием пластины-отражателя. Положительными сторонами применения данного решения является получение температурного распределения в основании трубопровода в автоматизированном режиме, возможность применения более быстрых и современных методов измерений по перемещению трубопровода в пространстве. Несмотря на это, минусом является сложность конструкции системы, приводящая к общему удорожанию проекта и ограничению ее применения на трубопроводах повышенного уровня ответственности, магистральных трубопроводах.

Деформационные марки для подземных трубопроводов имеют существенные минусы – по ним можно судить только о локальном изменении пространственного положения трубопровода в точке установки марки, результаты мониторинга дискретны во времени, нормативной периодичности измерений деформаций может быть недостаточно для отслеживания изменений положения трубопровода. При этом количество марок должно обеспечивать получение данных по вертикальным перемещениям не только самых опасных участков трассы, но и всей протяженности трассы, для возможности заключения о безопасном состоянии трубопровода, что приводит к увеличению объема работ и стоимости мониторинга.

Для того чтобы непрерывно измерять деформации в трубопроводе по всей его протяженности, применяются волоконно-оптические системы, состоящие из набора распределенных датчиков (сенсоров) и анализатора распределенных датчиков [20–24]. Данные системы в качестве датчиков используют само волокно, за счет чего измерение температур и деформаций производится по всей длине трубопровода, при этом данные сенсоры имеют широкий диапазон рабочих температур, они устойчивы к химическим и механическим воздействиям, не требуют обслуживания (при отсутствии дефектов), а также дополнительного электропитания. Принцип действия распределенных волоконно-оптических сенсоров основан на эффекте рассеивания Мандельштама–Бриллюэна, при котором сдвиг частоты отраженного оптического сигнала зависит от температуры и деформации. Оптическое волокно размещено в распределенном датчике деформации таким образом, чтобы максимально точно передать деформацию объекта мониторинга на волокно, не допуская его разрушения в широком диапазоне деформаций. Для разного типа задач сенсоры температуры и деформации могут применяться как совместно, так и раздельно. Важным условием для определения перемещения трубопровода в пространстве является размещение датчиков по трем направлениям от оси трубопровода [25]. Сенсоры крепятся к трубопроводу при помощи металлических хомутов, пластиковых стяжек, либо при помощи иной обмотки с определенным расчетным шагом, обеспечивая плотное прилегание сенсоров к телу трубопровода. Преимущества системы состоят в непрерывности получения данных, высокой точности определения деформаций по всей

длине трассы, исключении человеческого фактора при измерениях деформаций, уменьшении трудозатрат на проведение мониторинга. Тем не менее недостатками системы являются ее крайне высокая стоимость, длительный процесс пусконаладки и калибровки сенсоров, сложность интерпретации напряжений, полученных от сенсора в физическое перемещение объекта, необходимость в специализированном программном обеспечении для анализа и хранения информации по мониторингу. Также система является уязвимой с точки зрения ремонтопригодности – при наличии разрыва волокна, процесс мониторинга невозможен до момента ремонта волокна, для которого потребуются повторные земляные работы, восстановление линии оптоволокна и повторной пусконаладки системы.

Процесс мониторинга заключается в сравнении фактической и предельной расчетной деформации трубопровода. Поскольку результатом комплексной методики проведения расчетов подземных трубопроводов является максимальная осадка ММГ при оттаивании за период эксплуатации по всей трассе трубопровода, являющаяся расчетной предельной деформацией геотехнической системы «ММГ–трубопровод», любой из перечисленных методов проведения геотехнического мониторинга подземного трубопровода совместим с изложенной комплексной методикой.

Обоснование критериев для назначения состава, объема сети и расположения элементов сети ГТМ для подземных линейных сооружений в ММГ

Геотехническая система «ММГ – подземный трубопровод» во время эксплуатации имеет внутреннее взаимодействие: функционирование трубопровода приводит к изменению всех компонент геологической среды, и наоборот, изменение среды имеет воздействие на тело трубопровода, поэтому проведение натурных наблюдений требуется для всех основных параметров системы – температура многолетнемерзлого грунта, уровень подземных вод, деформация ММГ, высота и плотность снежного покрова, температура охлаждающих устройств, целостность и контроль НДС трубопровода.

Для решения проблемы отсутствия требований НТД по составу, объему и расположению элементов сети ГТМ для подземных трубопроводов авторами было проведено исследование требований к видам наблюдений при мониторинге, проанализированы результаты собственных расчетов подземных трубопроводов по комплексной методике, публикации по мониторингу подземных трубопроводов и сформированы предложения по назначению контролируемых параметров в продолжение таблицы М.1 СП 25.13330.2020 (табл. 2) с приведением краткого обоснования в примечании таблицы.

Температура грунта. Расстановка термометрических скважин нормативно не ограничена, поэтому критерием для подбора объема сети термометрических скважин является возможность отслеживать критичные температурные изменения по трассе, при этом шаг конструкций должен быть экономически целесообразен. Это приводит к необходимости расстановки ТС с определенным шагом и дополнительным сгущением сети на наиболее «опасных» пикетах трассы с наибольшей вероятностью отклонения от проектных температурных значений – в понижениях рельефа, на участках вблизи водных переходов, на пересечениях с иными трубопроводами, изменениях типа распространения ММГ, вблизи с фронтом мерзлоты.

Поскольку на данный момент требования норм для геологических изысканий являются достаточными для проведения теплотехнических расчетов трассы подземного трубопровода и прогнозирования изменений, на основании которых принимаются технические решения и назначаются защитные мероприятия, обоснованным является применение шага геологических выработок для подземных трубопроводов для целей натурных наблюдений. Шаг по сгущению сети также принят в соответствии с шагом по инженерно-геологическим изысканиям для водных переходов.

Уровень подземных вод. Стационарные наблюдения за гидрогеологическим режимом необходимо проводить в случаях, когда подземные воды распространены или могут образовываться в зоне взаимодействия эксплуатируемого объекта с ММГ, прогнозируется процесс затопления, а также, если подземные воды могут влиять на изменение свойств грунта и интенсивность развития опасных геологических процессов, таких, как термокарст или морозное пучение. Количество элементов сети, периодичность и продолжительность наблюдений должны быть обоснованы при разработке программы мониторинга с учетом сложившихся природных условий. Продолжительность наблюдений должна составлять не менее одного гидрологического года или периода проявления процесса, периодичность наблюдений должна гарантировать регистрацию максимальных и минимальных значений изменений компонентов геологической среды за период наблюдений.

Для I принципа использования ММГ с сохранением мерзлого состояния на период эксплуатации применение гидрогеологических скважин нецелесообразно. Шаг в 1–2 км для II принципа использования ММГ для установки гидрогеологического режима при оттаивании ММГ обоснован наличием малоизменяемого температурного режима продук-

та в трубопроводе в диапазоне шага гидрогеологических скважин. При этом основное решение по выбору шага и установке одиночных наблюдательных скважин должно приниматься и описываться в программе мониторинга с учетом конкретных условий проекта трубопровода и анализа его гидрологических условий.

Температура охлаждающих устройств. При наличии сезоннодействующих или постоянно действующих охлаждающих устройств, применяемых при I принципе использования ММГ, требуется проверять работоспособность всех устройств при помощи тепловизионной съемки надземной части термостабилизатора, при помощи пирометра или визуально по наличию конденсата на оребрении.

Высота и плотность снежного покрова. Снежный покров является важным параметром, изменяющим естественный приток тепла и холода от атмосферы в грунт. Для проведения уточняющих или поверочных теплотехнических расчетов должно учитываться фактическое значение данных параметров, для чего требуется их наблюдение совместно с термометрическими наблюдениями для наилучшей взаимосвязанности в прогнозе.

Деформация. Для определения деформаций подземного трубопровода авторами предложено внесение двух наиболее распространенных методов измерения – при помощи геодезической марки и с применением волоконно-оптических систем.

По причине экономической целесообразности и необходимости оптимизации стоимости геотехнического мониторинга максимальный шаг деформационной марки принят в соответствии с шагом термометрических скважин – 100 м. Это позволит иметь минимальную информацию о пространственном положении подземного трубопровода с учетом изменения геокриологических условий на пикете с совместным измерением температур, высоты и плотности снежного покрова, сравнивать полученные результаты с прогнозными значениями и видеть динамику изменения многолетнемерзлых грунтов и положения трубы, соответственно. Однако для получения полноценной информации о планово-высотном положении трубопровода требуется сгущение шага марок по трубопроводу. Минимальный диапазон шага в 10–30 м обосновывается локальностью изменений геологической среды и необходимостью отслеживания деформаций в данном диапазоне.

На взгляд авторов, обоснование количества элементов и уплотнения наблюдательной сети должно основываться на расчетных значениях хотя бы одного из следующих условий:

1. Профиль осадки и относительная разница осадок. При применении комплексной методики расчета подземного трубопровода проектировщику фактически доступны номера пикетов и протяженность участков со значениями осадок ММГ, из которых можно выделить участки: с максимальными осадками, с относительной небольшими осадками и с отсутствием осадок ММГ, анализ которых и позволить спроектировать оптимальную сеть деформационных марок.
2. Жесткость трубопровода при рассмотрении трубопровода в балочной интерпретации. При рассмотрении трубопровода в виде балки можно расчетным способом определить пролет между опорами, при котором теряется прямолинейность трубопровода и возникает прогиб. Расстояние пролета между опорами допускается принять в качестве минимального шага марок, обеспечивающего прямолинейность трубопровода между марками, что позволит получать действительную информацию о положении трубопровода в пространстве. Однако при небольших диаметрах и толщинах трубопровода данный метод может быть неприменим по причине небольшой длины пролета между опорами.
3. Учет трубопроводных элементов в качестве точек изменения системы. Любые элементы в виде отводов различной номенклатуры, плановые и высотные углы поворота трубопровода, компенсаторы, фитинги являются наиболее опасными точками, в которых могут возникать изменения положения трубопровода. В данных точках предлагается сгущать сеть геодезических марок, а на остальных прямолинейных участках трассы применять типовой шаг.
4. Увеличение объема сети при уменьшении класса точности. Поскольку требований по предельным деформациям к подземному трубопроводу нормативной документацией не предъявляется, при наличии обоснования точности измерений геодезическими методами предлагается понижать класс точности нивелирования для уменьшения общей стоимости измерений, при этом позволяя увеличить количество геодезических марок – точек измерения деформации.

При применении волоконно-оптических систем конкретные требования к сети: протяженность линий, точки выхода кабелей на поверхность для подключения анализаторов, общее количество точек выхода, и иные дополнительные требования должны прорабатываться проектировщиком в рамках конкретного объекта и указываться в программе мониторинга.

Состояние трубопровода и планово-высотное положение. Внутритрубная диагностика (ВТД) – метод неразрушающего контроля, являющийся самым информативным методом оценки состояния НДС трубопровода, его планово-высотного положения и вида, количества и местоположения де-

фектов. Данный вид диагностики должен быть учтен в качестве одного из способов проведения геотехнического мониторинга, поскольку по его результатам можно косвенно судить и об изменении геологической среды.

Стоит отметить, что ВТД, волоконно-оптические системы (ВОС) и геодезические методы измерения деформаций имеют свои погрешности измерений и грубые ошибки, результаты ВТД должны проверяться и подтверждаться дополнительным методом измерения деформаций (или планово-высотного положения) и быть комплексным способом измерения деформаций и выявления планово-высотного положения трубопровода [26].

Таблица 2. *Основные контролируемые параметры при геотехническом мониторинге подземных трубопроводов*
Table 2. *The main controlled parameters in geotechnical monitoring of underground pipelines*

<table>
<tr><td rowspan="2">Контролируемый параметр
Controlled parameter</td><td rowspan="2">Устройство для наблюдения за контролируемым параметром
Device for monitoring the controlled parameter</td><td rowspan="2">Параметры устройств контроля
Monitoring device parameters</td><td colspan="2">Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружений
Principles of using permafrost soils as the foundation of structures</td></tr>
<tr><td>I принцип
I principle</td><td>II принцип с допущением оттаивания грунтов в период эксплуатации сооружения[1]
II principle with the assumption of soil thawing during the operation of the structure[1]</td></tr>
<tr><td>Температура грунта
Ground temperature</td><td>Термометрическая скважина
Thermometric well</td><td>Количество
Quantity</td><td>С шагом 100 м
In steps of 100 m</td><td>С шагом 100 м, с уменьшением шага до 30–50 м на участках с изменением геокриологической обстановки[2]
In increments of 100 m, with a decrease in step to 30–50 m in areas with changes in geocryological conditions[2]</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Температура грунта
Ground temperature</td><td rowspan="2">Термометрическая скважина
Thermometric well</td><td>Расположение
Location</td><td colspan="2">На расстоянии 1,0–1,5 м от оси трубопровода
At a distance of 1.0–1.5 m from the axis of the pipeline</td></tr>
<tr><td>Глубина заложения
Laying depth</td><td>Не менее 10 м
At least 10 m</td><td>На 2 м ниже прогнозной глубины оттаивания ММГ, но не менее 10 м
2 m below the predicted depth of permafrost thawing, but not less than 10 m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Уровень подземных вод
Groundwater level</td><td rowspan="3">Гидрогеологическая скважина
Hydrogeological well</td><td>Количество
Quantity</td><td>Допускается не устраивать
It is allowed not to arrange</td><td>С шагом 1000–2000 м[3]
In increments of 1000–2000 m[3]</td></tr>
<tr><td>Расположение
Location</td><td>–</td><td>На расстоянии 1,0–1,5 м от оси трубопровода, на расстоянии 1 м от термометрической скважины
At a distance of 1.0–1.5 m from the axis of the pipeline, at a distance of 1 m from the thermometric well</td></tr>
<tr><td>Глубина заложения
Laying depth</td><td colspan="2">Не менее 10 м
At least 10 m</td></tr>
<tr><td>Температура охлаждающих устройств
Cooling device temperature</td><td>Конденсатор охлаждающих устройств
Cooling condenser</td><td>Количество
Quantity</td><td colspan="2">100 % охлаждающих устройств
100% of cooling devices</td><td>–</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Высота и плотность снежного покрова
Snow depth and density</td><td rowspan="2">Снегомерная рейка (снегомерный щуп)
Snow gauge</td><td>Количество
Quantity</td><td colspan="3">Равное количеству термометрических скважин[4]
Equal to the number of thermometric wells[4]</td></tr>
<tr><td>Расположение
Location</td><td colspan="3">На расстоянии не более 1,0 м от оси трубопровода
At a distance of no more than 1.0 m from the axis of the pipeline</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Деформация
Deformation</td><td>Марка для подземного трубопровода
Mark for underground pipeline</td><td>Количество
Quantity</td><td colspan="3">С шагом 50–100 м с уменьшением шага до 10–30 м на участках с изменением условий залегания[5]
In increments of 50–100 m with a decrease in step to 10–30 m in areas with changing conditions[5]</td></tr>
<tr><td>Волоконно-оптическая система
Fiber optic system</td><td>Расположение
Location</td><td colspan="3">Датчик температуры и датчик деформации в трех направлениях (по боковым образующим трубопровода по горизонтали, на верхней образующей по вертикали) вдоль тела трубопровода
Temperature sensor and strain sensor in three directions (along the side generatrices of the pipeline horizontally, on the upper generatrix vertically) along the body of the pipeline</td></tr>
<tr><td>Состояние трубопровода и планово-высотное положение
Pipeline condition and planned altitude position</td><td>Средства внутритрубной диагностики и дефектоскопии
In-line diagnostics and flaw detection tools</td><td>Периодичность
Periodicity</td><td colspan="3">Проведение внутритрубной диагностики не менее 1 раз в 5 лет[6]
Carrying out in-line diagnostics at least once every 5 years[6]</td></tr>
</table>

Примечания/Notes

1) II принцип использования ММГ с предварительным оттаиванием не рассматривается по причине нецелесообразности метода для линейных сооружений/The second principle of using permafrost with pre-thawing is not considered due to the inappropriateness of the method for linear structures.

2) В соответствии с примечанием 1 к таблице 8.3 «СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов», шаг горных выработок для подземных трубопроводов, находящихся в сложных инженерно-геологических условиях, в которых производятся термометрические изыскания, назначается минимальным – 100 м. При изменении геокриологической обстановки по трассе трубопровода: наличие вертикального фронта ММГ (переход «немерзлый грунт – мерзлый грунт»), изменение глубины кровли залегания ММГ, наличие водных преград, требуется уменьшать количество термометрических скважин до шага не менее 30–50 м/In accordance with Note 1 to Table 8.3 "SP 11-105-97 Engineering and geological surveys for construction. Part IV. Rules for the performance of work in areas of permafrost distribution", the mine opening spacing for underground pipelines located in difficult engineering and geological conditions in which thermometric surveys are carried out is assigned a minimum of 100 m. When the geocryological situation along the pipeline route changes: the presence of a vertical permafrost front (transition "unfrozen soil – frozen soil"), a change in the depth of the permafrost roof, the presence of water barriers, it is necessary to reduce the number of thermometric wells to the increments of at least 30–50 meters.

3) При строительстве по принципу I при наличии в основании сооружений многолетнемерзлых грунтов сливающегося типа гидрогеологические скважины допускается не устраивать. При наличии в основании сооружений многолетнемерзлых грунтов несливающегося типа, в зонах оттаивания ММГ сливающегося типа, на участках с наличием подземных вод, устраивать гидрогеологические скважины с шагом 1000–2000 м. При необходимости установления гидрогеологического режима в соответствии с ландшафтно-климатическими и топографическими условиями допускается устройство как одиночных скважин, так и устройство с иным шагом при дополнительном обосновании/When constructing according to principle I, if there are confluent permafrost soils at the base of the structures, hydrogeological wells may not be installed. If there are permafrost soils of the non-merging type at the base of the structures, in the thawing zones of the permafrost soils of the merging type, in areas with the presence of groundwater, hydrogeological wells with a step of 1000–2000 m are installed. If it is necessary to establish a hydrogeological regime in accordance with landscape, climatic and topographic conditions, installation of single wells or wells with a different step with additional justification is possible.

4) Высота и плотность снежного покрова являются параметрами, влияющими на тепловое состояние грунтов. Для поверочного теплотехнического расчета во время эксплуатации требуется фактическое значение высоты и плотности снежного покрова для сравнения прогнозного и фактического значения/Snow cover height and density are the parameters that influence the thermal state of soils. For calibration thermal calculations during operation, the actual value of the height and density of the snow cover is required to compare the predicted and actual values.

5) Геодезические марки устраиваются с расчетным шагом, исходя из условий 5.1–5.4, но не менее 100 м/Geodetic marks are arranged with a calculated step based on conditions 5.1–5.4, but not less than 100 m.

5.1 Расположение марок должно обеспечивать информацию о перемещении трубопровода в зонах с локальным проявлением пиковых прогнозных деформаций грунтового основания (профиля осадок) в сравнении со смежными участками/Location of the marks should provide information on the pipeline movement in areas with local manifestations of peak predicted deformations of the soil foundation (settlement profile) in comparison with adjacent areas;

5.2 Должна обеспечиваться прямолинейность участка трубопровода между марками за счет собственной жесткости трубопровода/The straightness of the pipeline section between grades must be ensured due to the pipeline own rigidity;

5.3 На участках изменений пространственного положения трубопровода, влияющих на параметры перемещения: наличие отводов, компенсаторов, участков изменения прокладки с подземной на надземную и другие, должно обеспечиваться получение информации о динамике перемещений трубопровода/In areas of changes in the spatial position of the pipeline that affect the movement parameters: the presence of bends, compensators, areas of change in laying from underground to above-ground and others, it must be possible to obtain information about the dynamics of pipeline movements;

5.4 Выбранный метод измерения деформаций, класс точности измерений должны быть экономически обоснованы в соответствии с уровнем ответственности подземного трубопровода, а также объемом сети геодезических марок The chosen method for measuring deformations, the measurement accuracy class must be economically justified in accordance with the level of responsibility of the underground pipeline, as well as the volume of the network of geodetic marks.

6) При сложных инженерно-геокриологических условиях, повышенном уровне ответственности сооружения рекомендуется более частое проведение исследование состояния трубопровода для своевременного обнаружения критических деформаций состояния трубопровода, а также для корреляции результатов проведения мониторинга деформаций при помощи геодезических марок или волоконно-оптических систем и результатов ВТД /Under complex engineering and geocryological conditions, an increased level of responsibility of the structure, it is recommended to carry out more frequent studies of the pipeline condition for timely detection of critical deformations in the pipeline condition, as well as for correlating the results of monitoring deformations using geodetic marks or fiber-optic systems and the results of in-line diagnostics.

Выводы

1. Выявлено нормативное требование о необходимости проведения геотехнического мониторинга подземных трубопроводов, при этом условия проектирования сети геотехнического мониторинга и контролируемые параметры отсутствуют.
2. Контролируемый параметр по предельным деформациям подземного трубопровода допускается получать расчетным способом, в соответствии с требованиями ГОСТ 34737-2021 и СП 305.1325800.2017.

3. Комплексная методика расчетов подземных трубопроводов позволяет получать детальные прогнозируемые осадки трубопровода, при которых обеспечиваются прочностные условия трубопровода. Результаты теплотехнических расчетов – профиль осадки, может являться расчетным предельным значением по деформации трубопровода для целей проведения геотехнического мониторинга; прогнозные температурные поля позволяют контролировать конкретные расчетные температуры, изменение положения кровли в термометрических скважинах, расположенных по длине трассы подземного трубопровода.
4. Использование профилей осадки в качестве предельных параметров по деформациям и температурам не зависит от способа проведения мониторинга и конструктивных решений по сети геотехнического мониторинга.
5. Сформулированы и обоснованы основные контролируемые параметры при геотехническом мониторинге подземных трубопроводов: виды наблюдений, устройства, объем сети и расположение элементов сети геотехнического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Великоднев В.Я., Голубин С.И., Каленский В.С. Тепловое и механическое взаимодействие подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами и методы его геотехнического мониторинга // Инженерные изыскания. – 2011. – № 9. – С. 54–60. EDN OWHJGB.
2. Опыт применения автоматизированных станций мониторинга на уникальных строительных объектах / В.В. Гурьев, В.В. Гранев, А.Н. Дмитриев, В.М. Дорофеев, Н.Г. Келасьев, Д.А. Лысов // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 12. – С. 6–14. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.12.06-14.
3. Иваницкая Е.В. Опыт мониторинга уникального Трансаляскинского нефтепровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 1. – С. 96–101. EDN NTZUUR.
4. Марахтанов В.П., Топчиев А.Г. Технология геотехнического мониторинга магистральных газопроводов на территории криолитозоны Западной Сибири // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 9. – С. 131–136. EDN WKYMXD.
5. Скапинцев А.Е. Геоэкологическое обоснование инженерной защиты и геотехнического мониторинга строительства трубопроводов в криолитозоне: автореф. дис. … канд. техн. наук. – М., 2013. – 20 с. EDN ZPBAKN.
6. Johnson E.R. Permafrost-related performance of the Trans-Alaska oil pipeline // Proc., 9th Int. Conf. on Permafrost. – Fairbanks, AK, USA, 2008. – P. 857–864.
7. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – Vol. 78. – № 2. – P. 723–742. DOI: 10.1007/s10064-017-1166-5
8. Troncone A. Numerical analysis of a landslide in soils with a strained softening behavior // Geotechnique. – 2005. – Vol. 55. – № 8. – P. 585–596.
9. Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. Groundwater in geologic processes. 2nd ed. – New York: Cambridge Univ. Press, 2006. – 536 p.
10. Lee S., Thalib J.A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis // Environmental Geology. – 2005. – Vol. 47. – P. 982–990. DOI: 10.1007/s00254-005-1228-z
11. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau / W.-Z. Guo, L. Luo, W.-L. Wang, Z.-Y. Liu, Z.-X. Chen, H.-L. Kang, B. Yang // Geomorphology. – 2019. – Vol. 337. – P. 69–78. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006
12. Active Optical Sensors (LASERS) / A. Abellán, M. Jaboyedoff, C. Michoud, M.H. Derron, T. Oppikofer // Deliverable 4.1 of the European project SafeLand: Review of Techniques for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring / Eds. C. Michoud, A. Abellán, M.H. Derron, M. Jaboyedoff. – 2012. – P. 65–102. URL: http://www.safelandfp7.eu (дата обращения 19.11.2021).
13. Man D.C., Phan A. Digital earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables // Big Earth Data. – 2021. – Vol. 5. – № 1. – P. 1–47. DOI: 10.1080/20964471.2021.1948677 EDN: MZXTVY
14. Pipeline–permafrost interaction monitoring system along the China–Russia crude oil pipeline / Fei Wang, Guoyu Li, Wei Ma, Qingbai Wu, Mihaela Serban, Samsonova Vera, Fedorov Alexandr, Ningshan Jiang, Bo Wang // Engineering Geology. – 2019. – Vol. 254. – P. 113–125. URL: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.013 (дата обращения 05.09.2023).
15. Proposal of a new method for controlling the thaw of permafrost around the China–Russia crude oil pipeline and a preliminary study of its ventilation capacity / Y. Cao, G. Li, G. Wu, D. Chen, K. Gao, L. Tang, H. Jia, F. Che // Water. – 2021. – Vol. 13. – № 2. – P. 2908. URL: https://doi.org/10.3390/w13202908 (дата обращения 05.09.2023).
16. Проектирование промысловых подземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах с использованием современных комплексов проектирования / А.А. Филимонов, Д.В. Липихин, А.Е. Мельников, К.В. Кирьянова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 127–137. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137. EDN QRGQDC.
17. Филимонова О.М., Филимонов А.А. Проблемы прогнозных теплотехнических расчетов подземных трубопроводов, расположенных в русловой части рек, в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященный 90-летию со дня рождения Н.М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л.Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М.А. Усова. – Томск, 4–8 апреля 2022. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – Т. 1. – С. 212–214. EDN MKWNIC.

18. Карнаухов М.Ю. Разработка методики мониторинга пространственного положения магистрального газопровода в сложных геологических условиях: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Тюмень, 2013. – 16 с. EDN ZPCRAP.
19. Устройство автоматизированного геотехнического мониторинга для подземных трубопроводов: пат. № 2672243 C1 Российская Федерация, МПК F17D 5/00. № 2017144882: заявл. 20.12.2017: опубл. 12.11.2018. – 12 с. EDN GPLEMH.
20. Кучумов Р.Р., Голубин С.И., Николаев М.Л. Экспериментальная оценка инновационного метода геотехнического мониторинга магистральных газопроводов на основе волоконнооптических систем // Газовая промышленность. – 2013. – № S (700). – С. 32–37. EDN RSDMOZ.
21. Голубин С.И., Великоднев В.Я., Николаев М.Л. Геотехнический мониторинг состояния трубопроводов с помощью волоконно-оптических кабельных систем // Геотехника. – 2011. – № 5. – С. 22–29.
22. Исламов Р.Р., Агиней Р.В., Исупова Е.В. Анализ средств и методов мониторинга напряженного состояния подземных магистральных нефтегазопроводов, работающих в сложных инженерно-геологических условиях // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 6. – С. 31–40. EDN UQEAHC.
23. Исламов Р.Р., Агиней Р.В. Стендовые испытания волоконно-оптического метода оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – № 4 (62). – С. 39–42. EDN ZRTMPV.
24. Nikles M. Long-distance fiber optic sensing solutions for pipeline leakage, intrusion and ground movement detection // Lightwave Technology. – 2009. – Vol. 15. – P. 142–151.
25. Исламов Р.Р. Совершенствование системы мониторинга технического состояния протяженных участков магистральных нефтегазопроводов применением волоконно-оптических сенсоров деформации: дис. … канд. техн. наук. – Ухта, 2018. – 168 с. EDN DRPTMG.
26. Анализ точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы магистральных трубопроводов / Д.В. Долгополов, Е.И. Аврунев, В.А. Мелкий, Д.А. Веретельник, Е.В. Жидиляева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 168–180. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3454. EDN DAXZYR.

Информация об авторах

Филимонов А.А., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; главный специалист отдела геотехнического мониторинга и прогнозного моделирования АО «ТомскНИПИнефть», Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72. filimonovaa@tomsknipi.ru; https://orcid.org/0009-0000-4750-1724

Строкова Л.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. sla@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0001-9302-0630

Поступила в редакцию: 12.09.2023
Поступила после рецензирования: 30.10.2023
Принята к публикации: 13.12.2023

REFERENCES

1. Velikodnev V.Y., Golubin S.I., Kalensky V.S. Thermal and mechanical interaction of an underground gas pipeline with permafrost soils and methods of its geotechnical monitoring. *Engineering surveys*, 2011, no. 9, pp. 54–60. (In Russ.) EDN OWHJGB.
2. Guryev V.V., Granev V.V., Dmitriev A.N., Dorofeev V.M., Kelasyev N.G., Lysov D.A. Experience in the use of automated monitoring stations at unique construction sites. *Industrial and civil construction*, 2021, no. 12, pp. 6–14. (In Russ.) DOI: 10.33622/0869-7019.2021.12.06-14. EDN HUZXPJ.
3. Ivanickaya E.V. Experience in monitoring the unique Trans-Alaska oil pipeline. *Science and technology of oil and oil products pipeline transport*, 2011, no. 1, pp. 96–101. (In Russ.) EDN NTZUUR.
4. Marakhtanov V.P., Topchiev A.G. Technology of geotechnical monitoring of main gas pipelines in the permafrost zone of Western Siberia. *Successes of modern natural sciences*, 2016, no. 9, pp. 131–136. (In Russ.) EDN WKYMXD.
5. Skapintsev A.E. *Geoecological substantiation of engineering protection and geotechnical monitoring of pipeline construction in the permafrost zone*. Cand. Diss. Abstract. Moscow, 2013. 20 p. (In Russ.) EDN ZPBAKN.
6. Johnson E.R. Permafrost-related performance of the Trans-Alaska oil pipeline. *Proc., 9th Int. Conf. on Permafrost*. Fairbanks, AK USA Publ., 2008. pp. 857–864.
7. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modeling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no 2, pp. 723–742. DOI: 10.1007/s10064-017-1166-5.
8. Troncone A. Numerical analysis of a landslide in soils with a strained softening behavior. *Geotechnique*, 2005, vol. 55, no. 8, pp. 585–596.
9. Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. *Groundwater in geologic processes*. 2nd ed. New York, Cambridge Univ. Press, 2006. 536 p.
10. Lee S., Thalib J.A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis *Environmental Geology*, 2005, vol. 47, pp. 982–990. DOI: 10.1007/s00254-005-1228-z

11. Guo W.-Z., Luo L., Wang W.-L., Liu Z.-Y., Chen Z.-X., Kang H.-L., Yang B. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2019, vol. 337, pp. 69–78. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006
12. Abellán A., Jaboyedoff M., Michoud C., Derron M.H., Oppikofer T. Active Optical Sensors (LASERS). *Deliverable 4.1 of the European project SafeLand: Review of Techniques for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring*. Eds. C. Michoud, A. Abellán, M.H. Derron, M. Jaboyedoff, 2012. pp. 65–102. Available at: http://www.safelandfp7.eu (accessed 19 November 2021).
13. Man D.C., Phan A. Digital earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables variables. *Big Earth Data*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 1–47. DOI: 10.1080/20964471.2021.1948677. EDN: MZXTVY
14. Fei Wang, Guoyu Li, Wei Ma, Qingbai Wu, Serban M., Samsonova V., Fedorov A., Ningshan Jiang, Bo Wang. Pipeline–permafrost interaction monitoring system along the China–Russia crude oil pipeline. *Engineering Geology*, 2019, vol. 254, pp. 113–125. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.013 (accessed 5 September 2023).
15. Cao Y, Li G, Wu G, Chen D, Gao K, Tang L, Jia H, Che F. Proposal of a New Method for Controlling the Thaw of Permafrost around the China–Russia Crude Oil Pipeline and a Preliminary Study of Its Ventilation Capacity. *Water*, 2021, vol. 13 (20), pp. 2908. Available at: https://doi.org/10.3390/w13202908 (accessed 5 September 2023).
16. Filimonov A.A., Lipikhin D.V., Mel'nikov A.E., Kir'yanova K.V. Modern design system for field underground pipeline construction in permafrost soils. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*, 2021, no. 23 (4), pp. 127–137. (In Russ.) Available at: https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137 (accessed 5 September 2023).
17. Filimonova O.M., Filimonov A.A. Problems of predictive temperature analysis of underground pipelines in river over-water length in permafrost. *Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXVI International Symposium named after academician M.A. Usov of students and young scientists, dedicated to the 90th anniversary of the birth of N.M. Rasskazov, the 120th anniversary of the birth of L.L. Khalfin, the 50th anniversary of scientific youth conferences named after Academician M.A. Usov*. Tomsk, April 4–8, 2022. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2022. Vol. 1, pp. 212–214. (In Russ.) EDN MKWNIC.
18. Karnaukhov M.Yu. *Development of the technique for monitoring space position of the main pipeline in complex geological conditions*. Cand. Diss. Abstract. Tyumen, 2013. 16 p. (In Russ.) EDN ZPCRAP.
19. Revel-Muroz P.A., Voronov A.G., Chuzhinov S.N. *Automated geotechnical monitoring device for underground pipelines*. Patent no. 2017144882, 2018. (In Russ.) EDN GPLEMH.
20. Kuchumov R.R., Golubin S.I., Nikolaev M.L. Experimental evaluation of an innovative method of geotechnical monitoring of main gas pipelines based on fiber-optic systems. *Gas industry*, 2013, no. S (700), pp. 32–37. (In Russ.) EDN RSDMOZ
21. Golubin S.I., Velikodnev V.Ya., Nikolaev M.L. Geotechnical monitoring of the state of pipelines using fiber-optic cable systems. *Geotechnics*, 2011, no. 5, pp. 22–29. (In Russ.)
22. Islamov R.R., Aginei R.V., Isupova E.V. Analysis of means and methods for monitoring the stress state of underground oil and gas pipelines operating in difficult engineering and geological conditions. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2017, no. 6, pp. 31–40. (In Russ.) EDN UQEAHC.
23. Islamov R.R., Aginey R.V. Bench tests of the fiber-optic method for assessing the stress-strain state of pipelines. *Pipeline transport: theory and practice*, 2017, no. 4 (62), pp. 39–42. (In Russ.) EDN ZRTMPV.
24. Nikles M. Long-distance fiber optic sensing solutions for pipeline leakage, intrusion and ground movement detection. *Lightwave Technology*, 2009, vol. 15, pp. 142–151.
25. Islamov R.R. *Improving the system for monitoring the technical condition of extended sections of main oil and gas pipelines using fiber-optic strain sensors*. Cand. Diss. Abstract. Ukhta, 2018. 168 p. (In Russ.) EDN DRPTMG.
26. Dolgopolov D.V., Avrunev E.I., Melkiy V.A., Veretelnik D.A., Zhidilyaeva E.V. Analysis of accuracy of initial data used in modeling relief and profile of the main pipelines route. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 168–180. (In Russ.)

Information about the authors

Andrey A. Filimonov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; JSC TomskNIPIneft, 72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russian Federation. filimonovaa@tomsknipi.ru; https://orcid.org/0009-0000-4750-1724

Lyudmila A. Strokova, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. sla@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0001-9302-0630

Received: 12.09.2023
Revised: 30.10.2023
Accepted: 13.12.2023