

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.13

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137

*А.А. ФИЛИМОНОВ, Д.В. ЛИПИХИН,
А.Е. МЕЛЬНИКОВ, К.В. КИРЬЯНОВА,
АО «ТомскНИПИнефть»*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫСЛОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В настоящей статье приводится опыт специалистов АО «ТомскНИПИнефть» по проектированию подземных трубопроводов в многолетнемерзлых грунтах.

Представлена последовательность выполнения комплексных теплотехнических и прочностных расчетов, освещена важность учета различных факторов при проведении расчетов, а также ограничения применения различных вариантов моделирования грунтов.

Отмечены важные пункты при проведении прочностных расчетов и используемого программного обеспечения.

Приведены компенсирующие мероприятия, применяемые при проектировании в криолитозоне, показан эффект от применения части мероприятий.

Описано разработанное техническое решение по применению намораживаемых грунтовых опор, показана суть технического решения. Описана общая блок-схема проведения комплексных теплотехнических и прочностных расчетов, сделаны выводы о применении.

Ключевые слова: подземная прокладка трубопровода; трубопровод в ММГ; комплексные расчеты; итеративный подход к расчетам подземных трубопроводов, расчет с использованием протяженных участков; профили осадок по трассе трубопровода; теплотехнические и прочностные расчеты; моделирование участков трубопровода; компенсирующие мероприятия для подземных трубопроводов; намораживаемая грунтовая опора; термостабилизация грунтов.

Для цитирования: Филимонов А.А., Липихин Д.В., Мельников А.Е., Кирьянова К.В. Проектирование промышленных подземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах с использованием современных комплексов проектирования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 127–137.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137

A.A. FILIMONOV, D.V. LIPIKHIN, A.E. MEL'NIKOV, K.V. KIR'YANOVA,
АО "TomskNIPIneft"

MODERN DESIGN SYSTEM FOR FIELD UNDERGROUND PIPELINE CONSTRUCTION IN PERMAFROST SOILS

This paper describes the experience of specialists from TomskNIPIneft in the underground pipeline laying in permafrost regions. The integrated and strength analyses are given herein, and the importance of considering the different factors for these analyses is shown as well as the limitations of conducting various scenarios of soil modeling. The important points are identified for carrying out the software-based strength analysis. Compensating measures are taken in the underground pipeline laying in the permafrost region. The technical solution is proposed for the use of frozen soil supports; its essence is described. The general block diagram of the heat engineering and strength analyses is presented in this paper.

Keywords: underground pipeline laying; permafrost; integrated calculations; iterative approach; pipeline analysis; pipeline setting profiles; heat and strength analysis; modeling of pipeline sections; compensating measures for underground pipelines; frozen ground support; thermal soil stabilization.

For citation: Filimonov A.A., Lipikhin D.V., Mel'nikov A.E., Kir'yanova K.V. Proektirovanie promyslovykh podzemnykh truboprovodov na mnogoletnemerzlykh gruntakh s ispol'zovaniem sovremennykh kompleksov proektirovaniya [Modern design system for field underground pipeline construction in permafrost soils]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 127–137.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137

Введение

В настоящий момент развитие нефтегазовой отрасли напрямую связано с освоением территорий, расположенных в криолитозоне. Нередко при проектировании объектов, расположенных в местах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ), проектные организации сталкиваются с проблемой отсутствия методологии выполнения расчетов в нормативно-технической литературе. В результате возможно появление риска, заключающегося в разработке и принятии ошибочных проектных решений, что может привести к серьезным аварийным ситуациям при эксплуатации трубопроводов.

Действующие нормативные документы регламентируют несколько основных способов прокладки трубопроводов на ММГ: наземный, подземный и наземный. По мнению профильных специалистов проектных институтов ПАО «НК «Роснефть», основным способом прокладки трубопроводов по участкам распространения ММГ должен быть наземный, как способ, обеспечивающий надежную эксплуатацию, возможность оперативного проведения ремонтных работ при возникновении аварийных ситуаций, а также оказывающий только локальное тепловое воздействие на ММГ в местах подземных переходов под естественными и искусственными преградами. Однако при определенных геологических и геокриологических условиях или на участках, где наземным способом проложить трубопровод нельзя, может применяться его подземная прокладка.

Применение подземного способа прокладки, согласно технико-экономическим сравнениям, способствует сокращению капитальных затрат на строи-

тельство трубопроводов в несколько раз за счет уменьшения металлоемкости и увеличения скорости строительного-монтажных работ.

При этом при подземной прокладке важен более ответственный контроль и подход к выполнению работ не только на стадиях строительства и эксплуатации, но и на этапе проектирования: более тщательное и качественное проведение инженерных изысканий, выполнение детализированных расчетов и корректный подбор защитных мероприятий.

Для нужд проектирования сотрудниками АО «ТомскНИПИнефть» был применен итеративный подход к расчетам подземных трубопроводов, эксплуатируемых в районах распространения ММГ. Выполнялись два комплексных расчета: теплотехнический – для учета влияния на основание и прочностной – с проверкой условий прочности трубопровода.

Описание объекта проектирования

В качестве объекта проектирования выступило месторождение в Ямало-Ненецком автономном округе Тюменской области. Климат района резко континентальный. Зима суровая, холодная, продолжительная, лето короткое и теплое, резкие колебания температуры в течение года и даже суток. Участок проведения работ характеризуется массивно-островным распространением многолетнемерзлых грунтов. В районе проектирования отмечаются следующие типы ландшафта: суходольные участки, тальные озера и торфяники с участками распространения мерзлых грунтов. Инженерно-геологический разрез района прохождения трасс проектируемых коммуникаций сложен как мерзлыми, так и тальными грунтами.

Проектируемый объект – промышленный нефтепровод с температурой продукта до 37 °С, проложенный подземным способом. Объект находится в сложных геологических условиях, прокладывается через многолетнемерзлые грунты, где наблюдается частое изменение положения кровли мерзлоты.

Последовательность выполнения комплексных расчетов

Подходы к расчётам подземных трубопроводов в проектных институтах различны, применяется как отдельное проведение теплотехнических расчетов для подбора защитных мероприятий без учета прочностных расчетов, так и расчет усредненных расчетных моделей, не учитывающих всех условий залегания трубопровода.

Для обоснования безопасности технического решения подземной прокладки специалистами отдела геотехнического мониторинга и прогнозного моделирования и отдела трубопроводного транспорта АО «ТомскНИПИнефть» был реализован новый подход к проектированию линейных объектов в сложных инженерно-геологических условиях – комплексное проведение теплотехнических и прочностных расчетов для подбора наиболее эффективного и безопасного технического решения.

Теплотехнический расчет подземных трубопроводов требуется выполнять в случаях, когда трубопровод прокладывается в грунтовых условиях с присутствием ММГ как сливающегося, так и несливающегося типа – с заглубленной кровлей. Суть расчета состоит в определении теплового воздей-

ствия от трубопровода на мерзлоту, т. е. в определении ореолов оттаивания грунта и значений его осадки в пределах данных ореолов.

Теплотехнические расчеты достаточно трудоемки и затратны по времени, в связи с чем авторами было рассмотрено два варианта подхода к выполнению данных расчетов применительно к линейным трубопроводам: с использованием протяженных участков и с учетом типизации инженерно-геологических условий (ИГУ).

Расчет с использованием протяженных участков предполагает проведение теплотехнических расчетов всей трассы с учетом фактического пространственного положения трубопровода (изгибы, подъемы, опуски, компенсаторы и т. д.), изменения геологических условий (учет всех инженерно-геологических скважин в пределах расчетной модели и напластования грунтов между ними), динамики изменения температур грунтов в трехмерном пространстве основания (восстановление температурного режима ММГ по всем инженерно-геологическим скважинам, входящим в расчетную модель), динамики изменения температур продукта в трубопроводе за период расчета и, по мнению авторов, является приоритетным способом осуществления теплотехнических расчетов линейных объектов.

На основании опыта проведения теплотехнических расчетов авторами выявлено несколько основных факторов, требуемых для учета при создании моделей для расчетов с использованием протяженных участков.

1. При выполнении расчетов с использованием протяженных участков требуется производить разбиение инженерно-геологических профилей под размеры расчетных моделей, позволяющих с максимальной эффективностью просчитать всю трассу. Длина одного выделенного участка может варьироваться в среднем от 600 до 1000 м.

2. Граница выделенного участка обязана быть проведена на однородных условиях, без резкого изменения геологических наслоений, положения кровли мерзлоты и температуры грунтов для уменьшения погрешности при анализе результатов расчетов отдельных моделей.

3. Количество граничных условий III рода для одной расчетной модели зависит от условий расположения поверхностного геологического слоя [2]. При наличии различных поверхностных условий требуется применять различные граничные условия III рода со своими расчетными характеристиками.

Расчет с учетом типизации ИГУ является упрощенным вариантом для стадии проектной документации, а также для трасс с относительно простыми и однотипными инженерно-геологическими и инженерно-геокриологическими условиями. Данный метод позволяет сократить объем трудозатрат на расчет участков с максимально схожими инженерно-геологическими и инженерно-геокриологическими условиями по трассе трубопровода. При этом следует отметить, что подход с использованием типизации ИГУ применим только в случае выполнения предварительных оценок, а также на стадии предпроектной проработки технических решений.

При расчете по типизированным ИГУ в программном комплексе авторами создавалась упрощенная расчетная трехмерная модель грунтового основания с помещенным в нее трубопроводом. Данная модель также должна учи-

тивать все утвержденные исходные данные, но результаты выделенного типа инженерно-геологических условий проецируются на участки с аналогичными условиями. Расчетная модель значительно сокращается по длине моделируемого участка (до длины 60–100 м), а решаемая тепловая задача, по сути, сводится к двумерной. При данном подходе очень важным является корректное выполнение типизации инженерно-геологических и геокриологических условий по трассе. Для выполнения качественного анализа количество выделенных типов ИГУ должно быть необходимым и достаточным.

Следует обратить особое внимание на то, что данный подход неприменим в случаях с резким изменением инженерно-геологических или инженерно-геокриологических условий, а также при резком изменении геометрического положения трубопровода, поскольку не учитывает границ переходов состояний «ММГ – талый грунт» и наоборот. Таким образом, данный подход имеет относительно небольшую область применения – на однородных, непротяженных участках без изменений глубины прокладки трубопровода, без значительных и резких изменений основных мощностей геологических наслоений, а также в отсутствие резкого изменения поверхностных условий и температуры грунтов.

Результатами теплотехнических расчетов являются температурные поля, изменяющиеся во времени от теплового воздействия трубопровода на грунт за расчетный срок эксплуатации, по которым определяются значения ореолов оттаивания грунта в его основании. По данным о распространении ореолов оттаивания определяются расчетные значения осадок грунтов при их оттаивании [1].

Для расчетов с использованием протяженных участков авторы разрабатывают профили осадок по трассе трубопровода, представляющие собой линейные графики, совмещенные с профилем трубопровода. Данные результаты далее обрабатываются в отделе трубопроводного транспорта для проведения комплекса прочностных расчетов.

Прочностные расчеты трубопровода специалисты АО «ТомскНИПИ-нефть» выполняют в специализированном программном обеспечении после получения профилей осадок. Для корректного задания модели программа должна обладать определенным функционалом: задание произвольного значения осадок на любом выбранном участке, возможность учета свойств слоев грунта основания и засыпки, разности отметок рельефа и расстановки балластирующих устройств.

Авторы применяют программу, использующую балочную расчетную модель трубопровода, при этом взаимодействие трубопровода с окружающим грунтом моделируется продольными и поперечными упругими опорами (билинейными пружинами), расставленными с определенным шагом. Функция учета осадки позволяет задавать предварительное перемещение трубопровода в вертикальной плоскости в каждой из таких опор.

Авторы отмечают, что для учета воздействия нагрузок от прилегающих участков при температурных расширениях расчеты должны выполняться на всю протяженность проектируемого трубопровода.

При выполнении расчета трубопровода большой протяженности может потребоваться разделение общей расчетной модели на несколько отдельных участков, это обусловлено ограничением количества степеней свободы в расчетном комплексе. Для расчета подземного трубопровода, прокладываемого на ММГ с множеством промежуточных точек для устройства термостабилизации или утяжелителей, авторы рекомендуют выполнять разбивку модели на участки не более 10 км.

Для проведения прочностных расчетов в условиях распространения ММГ было протестировано несколько программных комплексов. В результате авторы пришли к выводу, что не все программные комплексы адаптированы для пользователя и требуют навыков программирования для внесения исходных данных в расчетную модель, что увеличивает порог вхождения для использования программного обеспечения.

Фактически теплотехнические и прочностные расчеты сводятся к проверке условий прочности и устойчивости трубопровода при проведении определенных защитных мероприятий. Поэтому основной задачей проектировщиков подземных трубопроводов на ММГ является назначение эффективных и экономически обоснованных проектных защитных мероприятий для обеспечения безаварийной эксплуатации на весь срок службы трубопровода.

Компенсирующие мероприятия для подземных трубопроводов

Компенсирующие или защитные мероприятия можно разделить на две категории – мероприятия для основания и мероприятия для трубопровода.

Среди защитных мероприятий, относящихся к трубопроводу, авторы выделяют и используют следующие:

- замена упругих изгибов на гнутые отводы;
- увеличение толщины стенки проектного отвода;
- замена проектных отводов на отводы большего радиуса гнутья (5DN, 10DN, отводы холодного гнутья);
- установка подземных П-образных компенсаторов;
- устройство компенсационных матов или амортизирующих подушек.

В результате неравномерной осадки грунта в теле трубопровода возникает повышенная концентрация напряжений в тех местах, где происходит смена мерзлых и талых грунтов. Таким образом, в зависимости от реальной геологической ситуации может потребоваться применение дополнительных мероприятий для компенсации этих напряжений [3]. Исходя из опыта расчетов выявлено, что наиболее уязвимыми участками являются отводы и упругие изгибы, т. е. участки с повышенной концентрацией напряжений, вызванных температурными расширениями трубопровода.

На рис. 1 и 2 показан эффект от применения компенсирующих мероприятий. Темно-серым цветом выделена область с повышенной концентрацией напряжений, где условия прочности не выполняются.

Среди защитных мероприятий, относящихся к основанию, авторы выделяют и используют следующие:

- тепловая изоляция трубопровода;
- замена грунта в его основании на расчетную глубину;
- применение активной температурной стабилизации грунтов.



Рис. 1. Замена проектного отвода 5DN (слева) на отвод холодного гнутья (справа)



Рис. 2. Замена упругого изгиба (слева) на П-образный компенсатор (справа)

Основная задача любого из представленных защитных мероприятий основания – уменьшение осадки основания под трубопроводом до допустимых значений с целью снижения напряжений и деформаций трубопровода. Тепловая изоляция уменьшает передачу тепловой энергии от трубопровода, замена грунта производится при наличии под трубопроводом сильнопросадочных при оттаивании слоев, применение термостабилизации способствует компенсации теплового влияния трубопровода в зимний период путем понижения температуры грунта в его основании. Следует отметить, что существуют и другие традиционные компенсирующие мероприятия, например укладка тепловой изоляции на дно и стенки котлована, но они однозначно уступают в эффективности применения. Опыт эксплуатационных служб показывает, что данное мероприятие не защищает от проникновения теплового воздействия трубопровода, поскольку тепловая изоляция по дну и стенкам котлована подвижна, при эксплуатации деятельный слой совершает механические движения, возникают мостики тепла в образующихся щелях между плитами тепловой изоляции.

В зависимости от условий на трассе трубопровода, а также интенсивности воздействия на грунт рекомендуется выбирать либо одиночное компенсирующее мероприятие, либо их сочетание, например совместное применение ППУ и замена грунта под трубопроводом.

Термостабилизация не является традиционным защитным мероприятием для подземных линейных трубопроводов. К тому же её реализация требует значительных расходов при использовании мерзлых грунтов по I принципу, т. е. с сохранением их состояния, поэтому применяется она довольно редко. Тем не менее существует возможность снизить общую стоимость применения ТСТ с обеспечением безопасности эксплуатации.

Для выбранного объекта проектирования применить традиционные защитные мероприятия не удалось из-за высоких значений осадки трубопровода и наличия осаживаемых грунтов большой мощности под трубопроводом. В связи с этим специалистами группы геотехнического мониторинга АО «ТомскНИПИ-

нефть» было разработано и осуществлено компенсирующее мероприятие, которое ранее не применялось в качестве технического решения – прокладка подземного трубопровода на намораживаемых грунтовых опорах.

Намораживаемая грунтовая опора представляет собой практически неосаживаемый грунтовый массив, небольших размеров в плане, намороженный при помощи отдельностоящих термостабилизаторов. Установка таких опор для трубопровода производится с определенным расчетным шагом вдоль трассы.

При использовании намораживаемых опор принцип применения ММГ является комбинированным – II принцип применения ММГ с использованием намораживаемых грунтовых опор по I принципу.

Для намораживания каждой грунтовой опоры предусмотрено устройство от 3 до 5 термостабилизаторов, устанавливаемых по обе стороны трубопровода, в соответствии с конкретными грунтовыми условиями и расчетами. Схема устройства намораживаемых опор приведена на рис. 3.

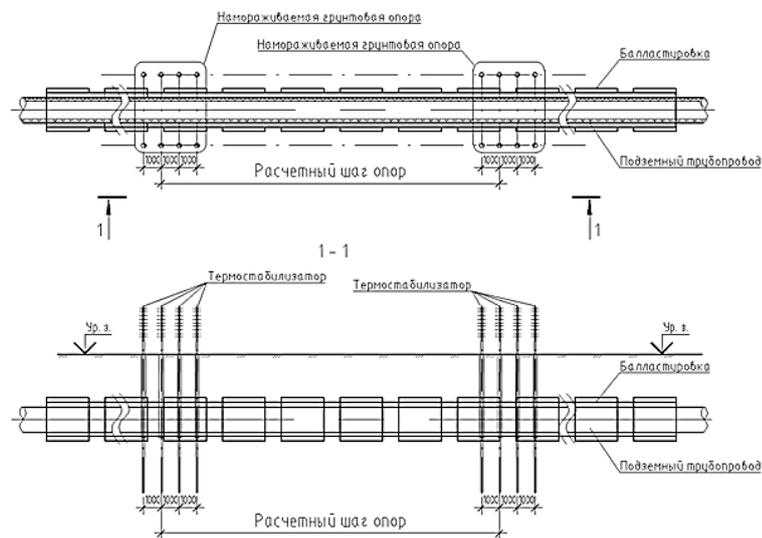


Рис. 3. Схема установки намораживаемых грунтовых опор

Суть данного мероприятия заключается в поддержании в мерзлом состоянии определенных опорных точек трубопровода при помощи термостабилизации грунтов, благодаря этому максимально снижаются осадки грунтового основания в месте их установки, при этом жесткость трубопровода на участках, расположенных между опорами, обеспечивается за счет прочностных характеристик самой трубы. Таким образом, удастся сохранить пространственное положение трубопровода в соответствии с проектом, не прибегая к сплошному расположению термостабилизации и переходу на I принцип использования ММГ, тем самым значительно сокращая капитальные затраты. Применение намораживаемых опор особенно целесообразно при прокладке через осаживаемые грунты, в которых большие значения осадок грунтового основания в пролете нивелируются за счёт сохранения положения трубопровода на местах расположения опор, а также собственной жесткости трубопровода.

Шаг расстановки опор необходимо подбирать в ходе выполнения прочностного расчета, он зависит от класса прочности, диаметра и толщины трубопровода, а также длины самой намораживаемой опоры.

Схема моделирования участка подземной прокладки трубопровода с устройством намораживаемых грунтовых опор в программе для проведения прочностных расчетов показана на рис. 4.

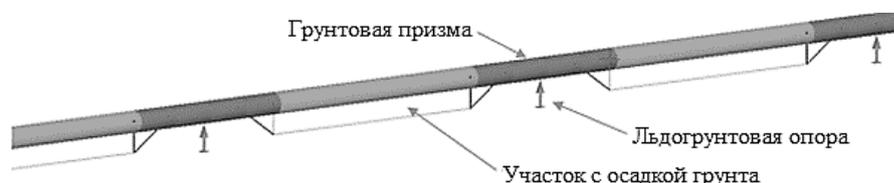


Рис. 4. Схема моделирования участка подземной прокладки трубопровода с устройством намораживаемых грунтовых опор

В качестве намораживаемых опор авторы принимают нестандартные крепления, ограничивающие перемещения в вертикальной плоскости. В точке установки намораживаемой грунтовой опоры моделируется грунтовая призма, в которой задаются нулевые значения осадки. Длина грунтовой призмы зависит от количества последовательно установленных в грунтовой опоре термостабилизаторов.

Все описанные этапы проектирования подземного трубопровода, принятые в АО «ТомскНИПИнефть», можно представить в виде блок-схемы (рис. 5).

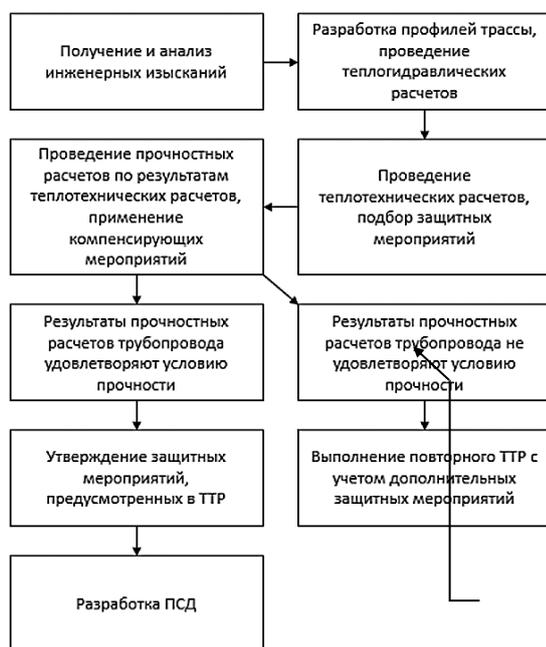


Рис. 5. Блок-схема проведения комплексных теплотехнических и прочностных расчетов подземного трубопровода, прокладываемого через ММГ

Особое внимание в схеме следует обратить на блоки подбора защитных мероприятий. Каждое компенсирующее мероприятие для основания или для трубопровода должно выбираться в соответствии с технико-экономическим анализом стоимости в каждом конкретном случае. Дорогостоящие мероприятия допустимо использовать только при невозможности применения иных компенсирующих мероприятий.

Заключение

Из-за отсутствия конкретных методик и нормативной документации специалистами АО «ТомскНИПИнефть» был сформирован новый подход к проектированию подземных трубопроводов на ММГ с определением четкой последовательности процессов проектирования, распределением ответственности за проведение требуемых расчетов с учетом всех нюансов проектирования в сложных условиях.

Сформированный подход к выполнению комплекса теплотехнических и прочностных расчетов при проектировании подземных трубопроводов, прокладываемых в ММГ, а также применение современного высокопроизводительного ПО позволило специалистам АО «ТомскНИПИнефть» принять и обосновать наиболее эффективные и экономически целесообразные проектные решения по прокладке трубопроводов подземным способом на представленном объекте проектирования.

Накопленный опыт выполнения прогнозных расчетов подземных трубопроводов способствовал формированию упрощенных методик, таких как применение расчетов с типизацией ИГУ, способных сократить трудозатраты на выполнение теплотехнических расчетов на этапе предварительной оценки проектных решений, без существенного влияния на полученные результаты.

Опыт проведения прочностных расчетов в разном программном обеспечении с анализом результатов позволил в условиях ограниченного времени проектирования выбрать оптимальную программу и выполнить моделирование трубопровода на всю протяженность с учетом влияния опасных геологических процессов на напряженно-деформированное состояние трубы.

Фактически результатом настоящего комплексного подхода к выполнению теплотехнических и прочностных расчетов является разработка новых технических решений по повышению устойчивости подземных трубопроводов, таких как применение намораживаемых грунтовых опор. Такие технические решения способствуют оптимизации капиталовложений, а также развитию отрасли в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *СП 25.13330.2012*. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88 (с Изменениями № 1–4).
2. *РСН 67-87*. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами.
3. *Лисин Ю.В., Сощенко А.Е., Суриков В.И., Павлов В.В., Зотов М.Ю.* Технические решения по способам прокладки нефтепровода Заполярье – НПС «Пурпе» // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. № 1. С. 24–28.

REFERENCES

1. SP 25.13330.2012. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.04-88 (s Izmeneniyami N 1-4) [Foundations and footings on permafrost soils. Amended]. (rus)
2. RSN 67-87. Respublikanskije stroitel'nye normy. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Sostavlenie prognoza izmenenij temperaturnogo rezhima vechnomerzlykh gruntov chislennymi metodami [Republican construction norms. Engineering surveys for construction. Prediction of temperature changes in permafrost soils by numerical methods]. (rus)
3. *Lisin U.V., Soschenko A.E., V.I. Surikov, Pavlov V.V., Zotov M.Yu.* Tekhnicheskie resheniya po sposobam prokladki nefteprovoda Zapolyar'e – "NPS Purpe" [Technical solutions for Zapolyar'e – "Purpe" pipeline laying]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov.* 2014. No. 1. Pp. 24–28. (rus)

Сведения об авторах

Филимонов Андрей Алексеевич, ведущий инженер, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, FilimonovAA@tomsknipi.ru

Липихин Дмитрий Владимирович, начальник отдела, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, LipihinDV@tomsknipi.ru

Мельников Александр Евгеньевич, ведущий инженер, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, MelnikovAE@tomsknipi.ru

Кирьянова Ксения Владимировна, начальник отдела, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, KiryanovaKV@tomsknipi.ru

Authors Details

Andrei A. Filimonov, Lead Engineer, AO "TomskNIPIneft", 72, Mira Str., 634027, Tomsk, Russia, FilimonovAA@tomsknipi.ru

Dmitrii V. Lipihin, Department Head, AO "TomskNIPIneft", 72, Mira Str., 634027, Tomsk, Russia, LipihinDV@tomsknipi.ru

Aleksandr E. Mel'nikov, Lead Engineer, AO "TomskNIPIneft", 72, Mira Str., 634027, Tomsk, Russia, MelnikovAE@tomsknipi.ru

Kseniya V. Kir'yanova, Department Head, AO "TomskNIPIneft", 72, Mira Str., 634027, Tomsk, Russia, KiryanovaKV@tomsknipi.ru