

УДК 624.131
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4345
Шифр специальности ВАК 1.6.7

Назначение начальных параметров и граничных условий при моделировании теплового состояния подземных трубопроводов в зоне распространения островных многолетнемерзлых грунтов

А.А. Филимонов^{1,2}✉, Л.А. Строкова¹

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

² *АО «ТомскНИПИнефть», Россия, г. Томск*

✉ andrey_filimonoff@list.ru

Аннотация

Актуальность работы определена важностью прогнозного моделирования теплового состояния объектов трубопроводного транспорта, расположенного в криолитозоне. Прогнозирование влияния геокриологических процессов на трубопровод возможно на основе расчетных моделей теплового и механического взаимодействия трубопровода с грунтовой средой, использующих данные о климатических, геокриологических условиях и процессах, конструктивных и технологических параметрах трубопровода, мониторинга его пространственного положения. Наличие разнообразных факторов, влияющих на процессы тепломассопереноса, а также сложность их численного моделирования могут привести к некорректно принятым проектным решениям, что в свою очередь, всегда связано с потерей механической безопасности эксплуатации подземного трубопровода. Для исключения данной проблемы проектирования предлагается учитывать и принимать наиболее релевантные методики моделирования процессов и характеристик грунтов. **Целью** является проведение аналитического сравнения результатов теплотехнических расчетов одного участка трассы с островной мерзлотой для выявления влияния входных параметров модели на напряженно-деформированное состояние трубопровода. **Методы** исследования заключаются в анализе результатов инженерных изысканий по объекту исследования, проведении ряда численных расчетов и факторного сравнения результатов расчетов. **Результаты.** На первом этапе был выбран соответствующий цели исследования участок трассы подземного трубопровода и факторы влияния на результаты теплового моделирования, которые будут рассмотрены в данном исследовании. Вторым этапом было проведено моделирование в разных программных комплексах 32 расчетных моделей одного участка трассы с различным набором входных данных, факторное сравнение влияния на результаты теплотехнического расчета. Последним этапом были выполнены прочностные расчеты всех вариантов для выбранного участка трассы трубопровода в качестве результирующего показателя влияния факторов.

Ключевые слова: газопровод, инженерно-геологические условия, численное моделирование, островная мерзлота, подземный трубопровод, многолетнемерзлые грунты.

Для цитирования: Филимонов А.А., Строкова Л.А. Назначение начальных параметров и граничных условий при моделировании теплового состояния подземных трубопроводов в зоне распространения островных многолетнемерзлых грунтов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 109–124. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4345

UDC 624.131

DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4345

Assignment of initial parameters and boundary conditions for modeling thermal state of underground pipelines in a zone of progression of island permafrost soils

A.A. Filimonov^{1,2}✉, L.A. Strokova¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² JSC TomskNIPIneft, Tomsk, Russian Federation

✉ andrey_filimonoff@list.ru

Abstract

Relevance. Determined by the importance of predictive modeling of thermal state of pipeline transport facilities located in the permafrost zone. Prediction of geocryological effects is possible through computer simulation of heat and mechanical interactions between a pipeline and a soil medium. Such simulators use data on climatic and geocryological conditions and processes, as well as the information about design and process-dependent parameters of the pipeline, data on its spatial positioning. The presence of various factors influencing heat and mass transfer, as well as the complexity of their numerical simulation, can lead to incorrect design decisions. Such decisions in their turn are always associated with a loss of mechanical safety in an underground pipeline operation. To eliminate this design problem, it is necessary to correctly take into account and adopt the most relevant methods for modeling processes and soil characteristics. **Aim.** To conduct an analytical comparison of the results of thermal engineering calculations of one section of the route with insular permafrost in order to identify the influence of the model initial parameters on the stress-strain state of the pipeline. **Methods.** Analyzing the results of engineering surveys for the object of study, conducting a number of numerical calculations, and factorial comparison of the calculation results. **Results.** At the first stage, the authors have selected the route section of the underground pipeline corresponding to the purpose of the research, the factors influencing the results of thermal modeling. These factors will be considered in this study. At the second stage, the authors carried out modeling of 30 calculation models of one route section with a different set of input data. A factorial comparison of the effect of heat engineering calculation on the results was carried out. At the last stage, the authors carried out the strength calculations of all options for the selected section of the pipeline route as a resulting indicator of the influence of factors.

Keywords: gas pipeline, engineering-geological conditions, numerical modeling, insular permafrost, underground pipeline, permafrost soils.

For citation: Filimonov A.A., Strokova L.A. Assignment of initial parameters and boundary conditions for modeling thermal state of underground pipelines in a zone of progression of island permafrost soils. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 109–124. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4345

Введение

Основной задачей при вскрытии многолетне-мерзлых грунтов (ММГ) по трассе проектируемого трубопровода является корректная оценка изменения геокриологических условий при техногенном воздействии и выбор прокладки трубопровода, обоснованный как технически, так и экономически.

Подземный способ является самым распространенным – до 95 % от общей протяженности трубопроводов запроектированы подземным способом. Наиболее крупные и инновационные магистральные трубопроводы России: проекты «Восточная Сибирь – Тихий Океан 1,2» (ВСТО) [1] и «Сила Сибири» [2], также устроены подземным способом и успешно эксплуатируются в условиях ММГ.

Преимущества подземной прокладки заключаются в возможности устройства трубопровода в различных геологических условиях и применения различных методов строительства, технологичности строительного процесса, отсутствии свайных и металлических конструкций. Среди преимуществ можно выделить также низкую стоимость строительного-монтажных работ по сравнению с надземным и наземным способами. Также плюсом является отсутствие прямого атмосферного воздействия на тело трубопровода, что позволяет исключить дополнительные мероприятия по подогреву или охлаждению продукта, а ограничиваться тепловой изоляцией в отдельных случаях.

Но также есть и ряд больших недостатков, таких как:

- 1) непосредственное температурное воздействие на многолетнемерзлые грунты с последующими осадками грунтов;
- 2) затруднительность наблюдения за положением трубопровода;
- 3) сложность проведения ремонтных работ;
- 4) высокая аварийность;
- 5) сложность проектирования системы «грунт–трубопровод».

Также к минусам можно отнести то, что для подземной прокладки, в связи с ее непосредственным контактом с грунтом на протяжении всей трассы, требуется особенный подход к проведению инженерных изысканий. Количество горных выработок по нормативу является недостаточным для учета геологической изменчивости разреза, что приводит к неточностям расчетов, которые требуется учитывать «в запасе» прочности трубопровода, но даже это не гарантирует безопасность эксплуатации по причине возможного проявления негативных геокриологических процессов в неизученном межскважинном пространстве. Проблематика проектирования трубопроводов в ММГ изучалась рядом российских и зарубежных ученых [3–20].

Несмотря на достаточно обширную изученность проблемы обеспечения безаварийной эксплуатации подземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах, наличие различных методов расчета промерзания-оттаивания грунтов вокруг трубопроводов, а также оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов, взаимное влияние трубопроводов с многолетнемерзлыми и сезонномерзлыми грунтами все еще остается недостаточно изученной темой. При этом подавляющее большинство расчетных подходов по учету теплового воздействия на мерзлый грунт рассчитывается в двумерной постановке с применением типизации грунтовых условий или выделением наиболее опасных участков протяженной трассы, что, по мнению авторов, является упущением. В связи с этим сотрудниками АО «ТомскНИПИнефть» была применена концепция комплексного подхода к расчетам подземных трубопроводов в криолитозоне, включающая в себя проведение теплотехнических расчетов всех участков трассы со вскрытыми мерзлыми скважинами с последующим использованием результатов теплотехнических расчетов в качестве исходных данных для прочностных расчетов всего трубопровода [11].

Однако для теплотехнических расчетов одной из основных проблем является неопределенность исходных данных – отсутствие измерений температуры талых грунтов, участвующих в процессах теплообмена, ограниченная глубина геологических выработок, неоднозначность положения фронта многолетнемерзлых грунтов.

Целью работы является обоснованное назначение начальных параметров и граничных условий при моделировании теплового состояния подземных линейных трубопроводов в зоне распространения островных многолетнемерзлых грунтов.

Методика исследования

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

- 1) восстановление геологического профиля трассы трубопровода;
- 2) выбор программного обеспечения (ПО) и методик моделирования геологической обстановки (литологического строения профилей трассы, температурных полей) в ПО для проведения сравнительного анализа;
- 3) выбор проектируемого объекта с наличием ММГ островного распространения и анализ материалов инженерно-геологических изысканий участков трассы;
- 4) разработка расчетных моделей (РМ), сравнение и оценка результатов теплотехнических расчетов;
- 5) установление степени влияния начальных параметров модели на удовлетворение условий прочности путем проведения расчетов прочности трубопровода.

Для проведения теплотехнических расчетов в исследовании использовалось ПО «Frost 3D» (далее – ПО № 1) «Борей 3D» (далее – ПО № 2), для проведения прочностных расчетов трубопровода использовалось ПО «СТАРТ-Проф».

Выбор ПО и методик восстановления геологической обстановки

Теплотехнический расчет подземных трубопроводов требуется выполнять в случаях, когда трубопровод прокладывается в грунтовых условиях с присутствием ММГ. Суть расчета состоит в определении результатов теплового воздействия от трубопровода на мерзлоту, т. е. в определении ореолов оттаивания (либо промораживания) грунта за период эксплуатации сооружения и вычислении значений осадки грунтового основания в пределах данных ореолов.

Особенностью создания расчетной модели в ПО являются различные способы задания как инженерно-геологических элементов (ИГЭ), так и температурного поля в грунте, которые могут повлиять на получаемый прогноз.

Геологический профиль можно смоделировать при помощи двух способов:

- 1) Через внутренний инструмент ПО – задание «Геологических скважин»: при таком способе восстановления задается геологический разрез в выработанных геологических скважинах (реали-

зован в ПО № 1 и № 2). Изменение разреза между выбуренными скважинами назначается при помощи задания дополнительных скважин, фактически соответствующих профилю трассы, но физически не реализованных при изысканиях. Межскважинное пространство интерполируется между значениями назначенных скважин (только в ПО № 1, в ПО № 2 используется вертикализация скважин).

- 2) Через инструмент ПО – «Строительный объект» (реализован в ПО № 1): при таком способе восстановления геологический профиль может быть начерчен или обработан в полном соответствии с данными инженерных изысканий в системах автоматизированного проектирования (САПР) и черчения и импортирован в ПО в качестве типа «Строительный объект» с последующим присвоением характеристик грунтов данным объектам. Межскважинное пространство, масштабы и контуры ИГЭ также полностью соответствуют геологическому профилю (рис. 1).

Температурное поле в расчетной модели также можно задать двумя способами:

- 1) Задание фиксированной температуры ИГЭ/материала (реализован в ПО № 1) – выбранному ИГЭ/материалу в расчетной модели назначается единая температура по всей мощности, находящейся в расчетной модели, вне зависимости от ее местоположения, глубины и мощности слоев.
- 2) Задание температуры расчетной модели через тепловое распределение (реализован в ПО № 1 и № 2): в расчетной модели задается ряд температурных скважин со значениями на различных глубинах, изученных при проведении инженерных изысканий, температурное поле между данными скважинами получается при помощи математической интерполяции.

Были определены несколько основных факторов, влияющих на результаты теплотехнических расчетов: температура грунтов, габаритные размеры расчетной модели, разные мероприятия по уменьшению ореолов оттаивания, применение разных граничных условий (ГУ) на нижнюю грань расчетной модели.

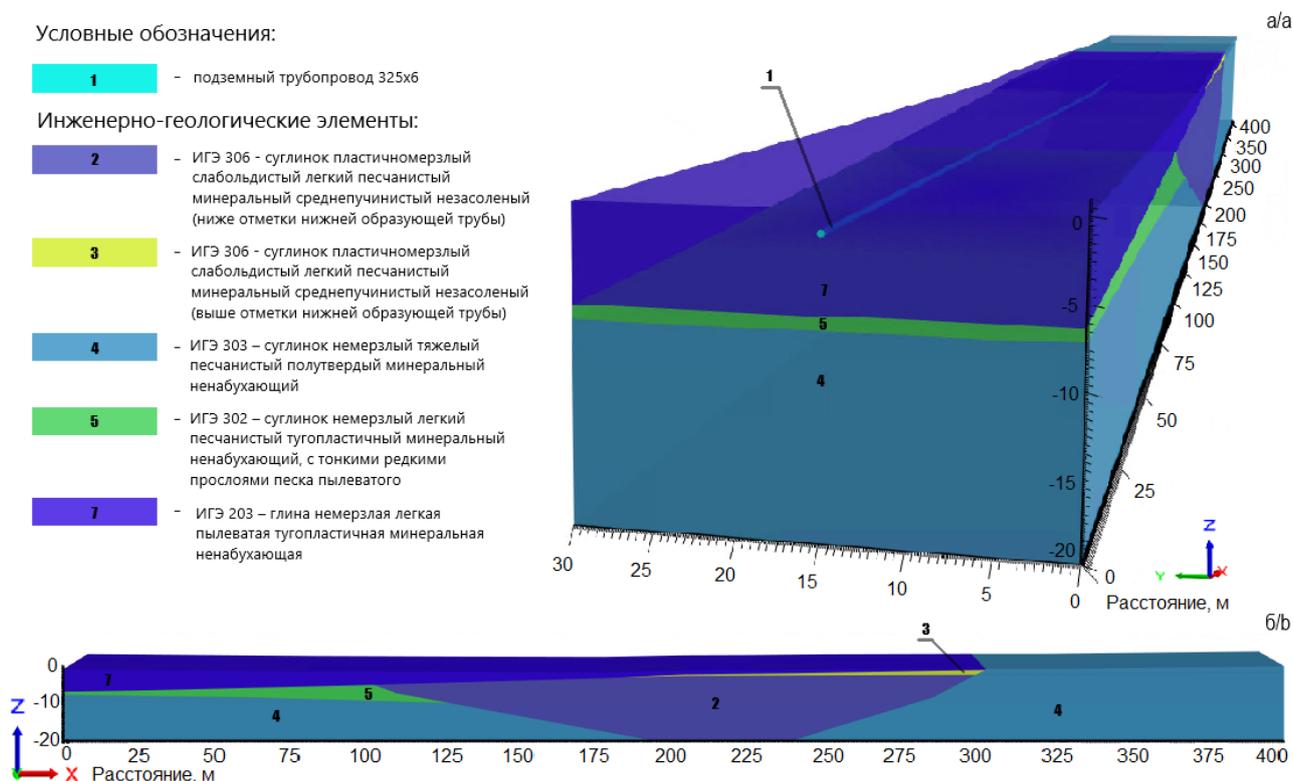


Рис. 1. Виды смоделированной расчетной модели в ПО «Frost 3D»: а) расчетная модель в перспективе; б) расчетная модель по длине профиля

Fig. 1. Types of the simulated calculation model in the Frost 3D software: а) calculation model in perspective; б) design model along the length of the profile

Температура грунтов

Во время инженерно-геологических изысканий для изучения геологического профиля производятся температурные замеры только мерзлых грунтов, возникает вопрос о том, какую температуру талых грунтов допустимо принять в расчетной модели и какое воздействие данный фактор будет иметь на изменение фронта ММГ в расчетной модели.

Для этого было определено четыре варианта задания температурных полей:

- 1) с температурой талых грунтов 1,0 °С, задаваемой фиксированно для всего массива талых грунтов (реализован только в ПО № 1);
- 2) с температурой талых грунтов 0,5 °С, задаваемой фиксированно для всего массива талых грунтов (реализован только в ПО № 1);
- 3) с температурой талых грунтов 0,05 °С, задаваемой фиксированно для всего массива талых грунтов (реализован только в ПО № 1);
- 4) с температурным распределением в зоне фронта ММГ, в котором температуры и талых, и мерзлых грунтов задаются через тепловое распределение. В данном способе температуры задаются при помощи вертикальных температурных скважин с определенными координатами в расчетной модели, температуры между которыми интерполируются для получения температурного поля всей расчетной модели (реализован в ПО № 1 и № 2).

Стоит отметить, что температуры как мерзлых, так и талых грунтов используются только для первоначального распределения температурного поля в пространстве расчетной модели, то есть для нулевой итерации, температура не является постоянной характеристикой материала, а участвует в решении уравнений теплопроводности.

Габаритные размеры расчетной модели

Габаритные размеры имеют большое влияние на тепловое распределение внутри самой модели. Для исключения накопления тепла на границах расчетных моделей они должны быть удалены как друг от друга, так и от тепловыделяющих объектов. В исследовании была принята фиксированная ширина расчетной модели – 30 м, длина модели – 400 м, включает в себя центральный участок с островной мерзлотой длиной 200 м, с двух сторон ограниченный участками с немерзлыми грунтами по 100 м длиной.

Стоит отметить, что глубина выработки для подземных трубопроводов обычно не превышает 20 м. При необходимости увеличить высоту расчетной модели возникает неопределенность задания геологического разреза и температуры нижележащих слоев. При отсутствии данных экстраполируются данные нижних слоев (местоположение фронта ММГ и геологических слоев) вертикально

вниз, используются ИГЭ, вскрытые на забое скважины, продлевается вниз температура грунтов, измеренная в нижней точке геологической скважины.

Для исследования влияния глубины расчетной модели на результаты теплотехнических расчетов были рассмотрены три разных значения высоты расчетной модели: 20, 30, 40 м.

Разные мероприятия по уменьшению ореолов оттаивания

Для учета изменения температурного поля на границе фронта ММГ было рассмотрено два тепловых защитных мероприятия:

- 1) тепловая изоляция толщиной 62,5 мм;
- 2) установка локальных сезоннодействующих охлаждающих устройств на границах «ММГ – талый грунт» с шагом 2 м по обе стороны от трубопровода.

Применение разных граничных условий на нижнюю грань расчетной модели

Поскольку нижняя грань расчетной модели располагается ниже глубины нулевых амплитуд, существует постановка, что корректным условием описания теплообмена с нижней поверхностью является граничное условие 1 рода – условие с постоянной температурой, в связи с чем для расчетных моделей с глубиной 40 м было рассмотрено применение двух вариантов ГУ:

- 1) с граничным условием 2 рода на нижней границе расчетной модели – с тепловым потоком, равным нулю;
- 2) с граничным условием 1 рода на нижней границе расчетной модели – с постоянной отрицательной температурой на участках с ММГ, равной самому нижнему измеренному значению температуры, для талого грунта – в соответствии с температурой талого грунта, принятой в данной расчетной модели.

Итоговое количество разработанных расчетных моделей – 32 (30 прогнозов и 2 верификационных расчета). Варианты расчетных моделей приведены в табл. 1.

Помимо 30 прогнозных моделей с различными исходными условиями, выполненных в ПО «Frost 3D», было проведено два прогнозных расчета в ПО «Борей 3D» для верификации результатов теплотехнических расчетов.

Выбор проектируемого объекта с наличием многолетнемерзлых грунтов островного распространения

В качестве объекта исследования выбран подземный газопровод в Иркутской области, соединяющий месторождение, условно обозначенное как «Объект № 1», и месторождение, условно обозначенное как «Объект № 2».

Таблица 1. Перечень расчетных моделей и исходных условий
Table 1. List of computational models and initial conditions

Условия задания расчетной модели (PM) Conditions for setting a computational model (CM)		С граничным условием 2 рода на нижней границе PM, м With the 2 nd boundary condition at the CM bottom, m			С граничным условием 1 рода на нижней границе PM, м With the 1 st boundary condition at the CM bottom, m
		20	30	40	40
Тепловая изоляция толщиной 62,5 мм 62.5 mm thick thermal insulation	С температурой талых грунтов 1,0 °С With the temperature of thawed soils 1,0 °С	№ 1	№ 5	№ 9	№ 13
	С температурой талых грунтов 0,5 °С With the temperature of thawed soils 0,5 °С	№ 2	№ 6	№ 10	№ 14
	С температурой талых грунтов 0,05 °С With the temperature of thawed soils 0,05 °С	№ 3	№ 7	№ 11	№ 15
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ With temperature distribution in the permafrost front zone	№ 4	№ 8	№ 12	–
Установка локальных сезоннодействующих охлаждающих устройств на границах ММГ Installation of local seasonal cooling devices at the permafrost border	С температурой талых грунтов 1,0 °С With the temperature of thawed soils 1,0 °С	№ 16	№ 20	№ 24	№ 28
	С температурой талых грунтов 0,5 °С With the temperature of thawed soils 0,5 °С	№ 17	№ 21	№ 25	№ 29
	С температурой талых грунтов 0,05 °С With the temperature of thawed soils 0,05 °С	№ 18	№ 22	№ 26	№ 30
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ With temperature distribution in the permafrost front zone	№ 19	№ 23	№ 27	–



Рис. 2. Спутниковые снимки участка исследования: а) спутниковый снимок месторасположения объекта исследования; б) увеличенный вид участка, трасса газопровода выделена цветом

Fig. 2. Satellite images of the study area: a) satellite image of the location of the study object; b) enlarged view of the area, the route of the gas pipeline is highlighted in color

В геоморфологическом отношении район работ представляет собой слабовсхолмленную, осложненную криогенным микрорельефом, равнину на водоразделе рек Лены и Енисей с общим наклоном поверхности на северо-запад. Абсолютные отметки варьируют от 297 до 493 м.

В геологическом строении территории до изученной глубины 22,0 м принимают участие четвертичные отложения, перекрывающие образования юрской системы.

Изучаемая территория находится в южной подзоне высокотемпературных вечномерзлых грунтов островного и частично сплошного распространения.

В геокриологическом отношении район работ находится в области прерывистого распространения многолетнемерзлых грунтов, что способствует развитию таких опасных геокриологических процессов и явлений, как термокарст, термоэрозия, формирование многолетних бугров пучения, солифлюкция, новообразование многолетнемерзлых грунтов; преобладают процессы подтопления и болотообразования, сезонного промерзания и оттаивания грунтов, морозного пучения грунтов сезонно-талого слоя. Температура грунтов изменяется от 0 до минус 0,6 °С. Глубина влияния среднегодовых изменений температур составляет 10,0–12,0 м.

Многолетнемерзлые толщи сформированы в силу эпигенетического промерзания и поэтому представлены теми же литологическими разностями, что и талые грунты.

ММГ имеют преимущественно непрерывное распространение в вертикальном разрезе: кровля ММГ вскрыта на глубинах от 0,0 до 4,6 м, подошва ММГ не вскрыта по всей глубине скважин 20 м. Значение среднегодовой температуры ММГ на глубине 10 м от поверхности – минус 0,36 °С.

Мерзлые породы имеют преимущественно слоистую, реже массивную криотекстуру. Крупнооб-

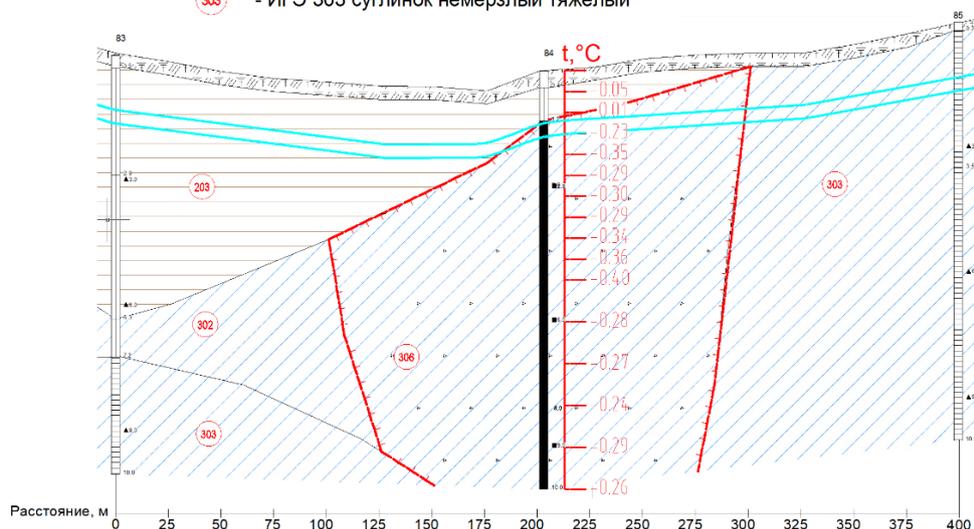
ломочные грунты с суглинистым заполнителем чаще всего имеют корковую криогенную текстуру. Криогенная текстура скальных пород пластово-трещинная и трещинная – лед по трещинам в виде пленок, ледяные жилки по трещинам напластования.

Исходные данные по участку, учтенные при формировании расчетных моделей, – климатические условия, термометрия скважины, геологический разрез профиля участка трассы трубопровода (рис. 3).

Условные обозначения:

- - газопровод 306 - ИГЭ 306 суглинок пластичномерзлый
 - - - - фронт ММГ 203 - ИГЭ 203 глина немерзлая легкая
 - 302 - ИГЭ 302 суглинок немерзлый легкий
 - 303 - ИГЭ 303 суглинок немерзлый тяжелый
- t, °C - термометрические измерения
□ 0.05

a/a



Среднемесячная температура воздуха, °С													б/в																								
Месяцы	I			II			III			IV			V			VI			VII			VIII			IX			X			XI			XII			Год
Температура	-28,5			-25,4			-15,2			-3,8			5,8			15			17,3			13,6			5,7			-4,2			-19			-27			-5,5
Средняя месячная и годовая скорость ветра (м/с)																																					
Месяцы	I			II			III			IV			V			VI			VII			VIII			IX			X			XI			XII			Год
Скорость ветра	2			1,8			2,2			2,8			2,8			2,3			1,9			1,8			2			2,5			2,2			2			2,2
Средняя декадная высота снежного покрова (см) по постоянной рейке.																																					
Месяцы	I			II			III			IV			V			VI			VII			VIII			IX			X			XI			XII			Год
Декады	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	-	-	-	-	-	-	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	-			
Средняя декадная	38	41	44	46	48	49	49	50	49	46	27	39	11	0	0	-	-	-	-	-	-	2	4	8	12	17	22	26	31	35	-						
Коэффициент конвективного теплообмена с поверхностью грунта, Вт/м²*С																																					
Месяцы	I			II			III			IV			V			VI			VII			VIII			IX			X			XI			XII			Год
Температура	14,54			13,7			15,38			17,89			17,89			16			14,1			13,7			14,5			16,64			15,38			14,54			-

Рис. 3. Условия участка трассы: а) геологический разрез профиля; б) климатические условия района исследования по метеостанции Преображенка

Fig. 3. Conditions of the route section: a) geological section of the profile; б) climatic conditions of the study area according to the weather station Preobrazhenka

Разработка расчетных моделей, сравнение и оценка результатов теплотехнических расчетов

Разработка расчетных моделей для теплотехнических расчетов предполагает моделирование выделенного участка трассы с учетом пространственного положения трубопровода – изгибы, подъемы, опуски, изменения литологии – учет всех инженерно-геологических скважин в пределах расчетной модели и напластования грунтов между ними, температур грунтов в трехмерном пространстве – задание температурного режима ММГ и талых грунтов, динамики изменения температур продукта в трубопроводе за период расчета.

Результатом являются изменяющиеся во времени температурные поля от теплового воздействия трубопровода и атмосферного влияния на грунт, по которым определяются значения ореолов оттаивания грунта в его основании. По данным о распространении ореолов оттаивания определяются расчетные значения осадок грунтов при их оттаивании. Далее определяется максимальное значение ореола оттаивания и, соответственно, максимальные осадки грунта за период эксплуатации. Результаты расчетов осадки формируются в профили осадки – линейные графики максимальной осадки ММГ за период эксплуатации для всего расчетного участка. Следующим этапом численные значения профилей осадки используются в качестве дополнительной нагрузки на НДС трубопровода при проведении расчетов на прочность трубопровода.

Всего было проведено 32 расчета для сравнения воздействия различных условий на результаты теплотехнических расчетов. Декомпозируя результаты теплотехнических расчетов, сравним отдельно каждый из факторов, влияющих на результаты расчетов.

Для начала были сравнены методики задания температурного распределения в теле расчетной модели – с фиксированной температурой талых грунтов и через температурное распределение в зоне фронта ММГ. Первоначальное распределение формируется при помощи интерполяции в горизонтальном направлении между вертикальными температурными скважинами. При недостаточном количестве дополнительных вертикальных температурных скважин в расчетной модели искажается положение фронта ММГ, что приводит к возникновению нефизических (аномальных) зон с большим значением оттаивания на профилях осадки (рис. 4), несмотря на различные мероприятия по снижению осадки ММГ при оттаивании. Задание дополнительных, или фиктивных, скважин является трудоемкой задачей, количество дополнительных скважин зависит от сложности формы фронта ММГ. Поскольку этот способ показал результаты с нерелевантными осадками, а также существуют более простые методики задания

начальных температур грунтов с точным восстановлением положения фронта ММГ, далее он в данном исследовании не использовался.

В расчете в ПО № 2 – «Борей 3D», возникновение аномальных зон осадки на фронте ММГ не выявлено, однако выявлено смещение фронта ММГ и распределение температур в сложной форме перехода «талый–мерзлый» по причине вертикализации интерполированных температурных скважин, в связи с чем осадка на границах островной мерзлоты смещена, но в зоне сливающейся мерзлоты оба программных комплекса показывают хорошую сходимость результата, разница между значениями осадок минимальна и составляет порядка 5 см.

Далее проведено сравнение результатов расчетов с различной температурой талых грунтов – были сравнены РМ с одинаковой глубиной расчетной модели (20, 30, 40 м), но с разными температурами. Результаты сравнения осадки показывают, что основное различие возникает на границах «ММГ – талый грунт», причем чем выше заданная температура талого грунта, тем больше фронт оттаивания проникает вглубь островного ММГ. При этом максимальная разница в значениях осадки на границе «ММГ – талый грунт» составляет от 9,8 до 16,9 см, в зависимости от глубины модели.

Также при сравнении температурных полей на конец эксплуатации для расчетных моделей глубиной 20 м было отмечено смещение фронта ММГ в сторону талого грунта (промерзание талого грунта) на расстояние до 30 м, а по мере увеличения температуры талого грунта смещение фронта ММГ становится меньше, так как для смещения фронта через высокие температуры талых грунтов требуются большие тепловые затраты на перераспределение отрицательных температур.

Стоит заметить, что такое перераспределение хоть и не имеет критичного влияния на результаты осадки ММГ при оттаивании, но предпосылка наличия глубины нулевых теплооборотов и неизменяемости отрицательных температур ниже определенных глубин должна соблюдаться, фронт ММГ не должен смещаться в нижних горизонтах РМ, что говорит о неправильном тепловом распределении на нижней грани модели при глубине 20 м.

Учитывая данный фактор, были сравнены температурные поля для РМ глубиной 30 и 40 м. Результаты говорят о том, что на расчетных моделях глубиной 30 м при любых температурах талых грунтов наблюдается аналогичное распределение с наличием смещения фронта ММГ в сторону талых грунтов. Однако при увеличении глубины расчетной модели до 40 м фронт ММГ остается неизменным относительно границы, принятой при инженерных изысканиях, в связи с чем 40 м – предпочтительная минимальная глубина расчетных моделей.

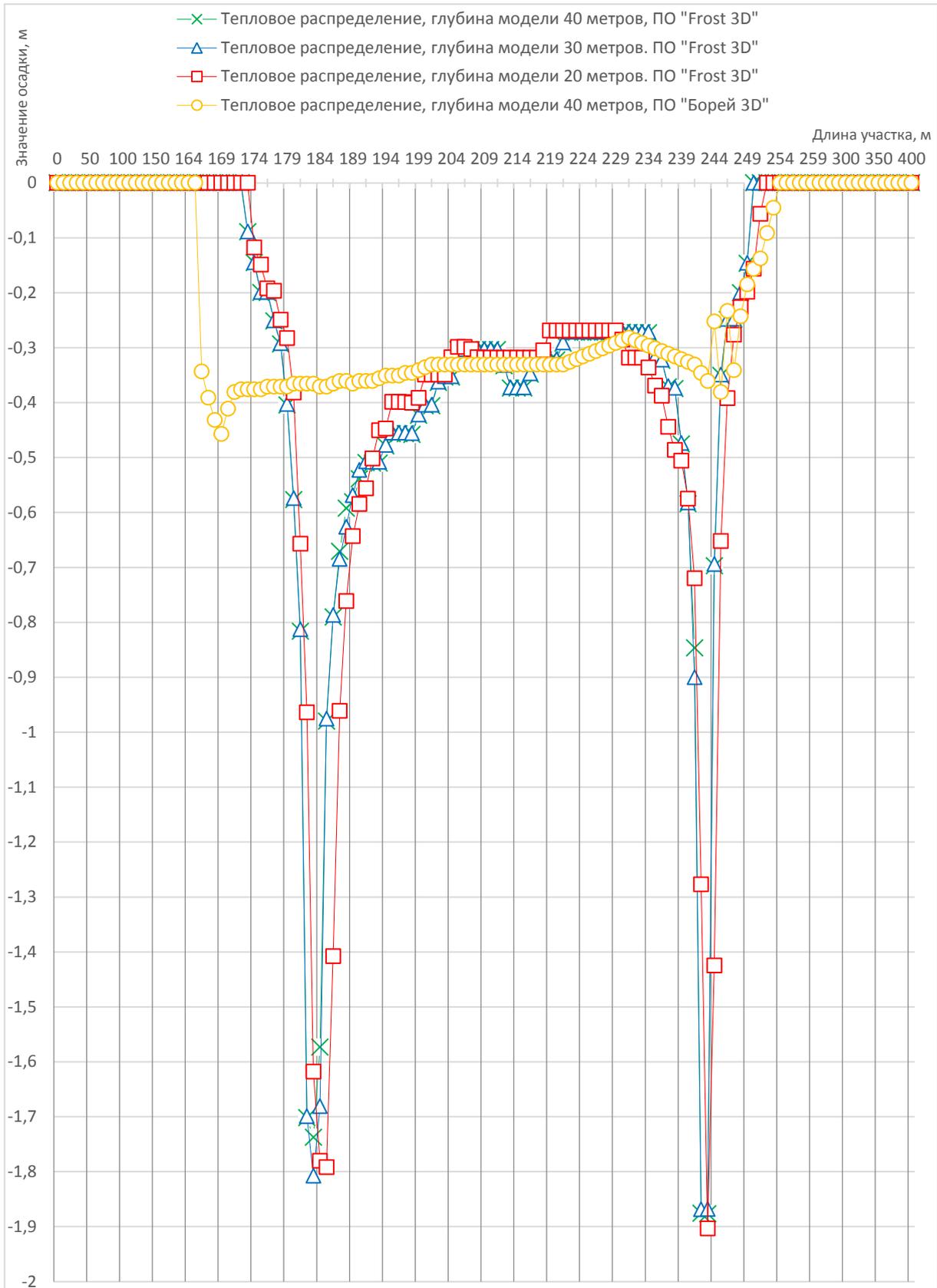


Рис. 4. Результаты расчета осадки с методикой температурного распределения на переходе «талый–ММГ» в ПО № 1 и ПО № 2

Fig. 4. Calculation results of settlement with the temperature distribution method at the transition "thawed ground – permafrost" in software № 1 and software № 2

По результатам анализа была отмечена РМ № 9, с температурой талых грунтов 1,0 °С и глубиной РМ 40 м, с наиболее корректным температурным распределением в теле модели.

Следующим этапом проведено сравнение РМ с разными глубинами, но одинаковыми температурами талых грунтов для выявления влияния глубины расчетной модели на результат осадки. На всех трех типах заданной температуры результаты осадки грунтов находятся в одном диапазоне, при этом у расчетных моделей с глубинами 30 и 40 м отмечено совпадение результатов осадки на 88 % протяженности участка мерзлого грунта, РМ с глубиной 20 м имеет расхождения как в большую, так и в меньшую сторону до 12,2 см.

Общее поле осадок для 9 вариантов РМ и 1 верификационного расчета показывает расхождения на глубинах расчетных моделей 20 м с расчетной разницей от 4,7 см в мерзлом грунте, до 16,3 см на границе талый–ММГ. Наибольшая осадка по участку проявляется на границах ММГ–талый, самая большое значение осадки отмечено у РМ № 9, ранее выявленной как предпочтительная по фактору температур талых грунтов и корректного температурного распределения. Верификационный расчет в ПО «Борей 3D» показал в целом усредненные значения осадки на участке 170–240 м со сливающейся островной мерзлотой, однако распределение по фронту ММГ рассчитывается с погрешностью и смещением фронта на 40–60 м.

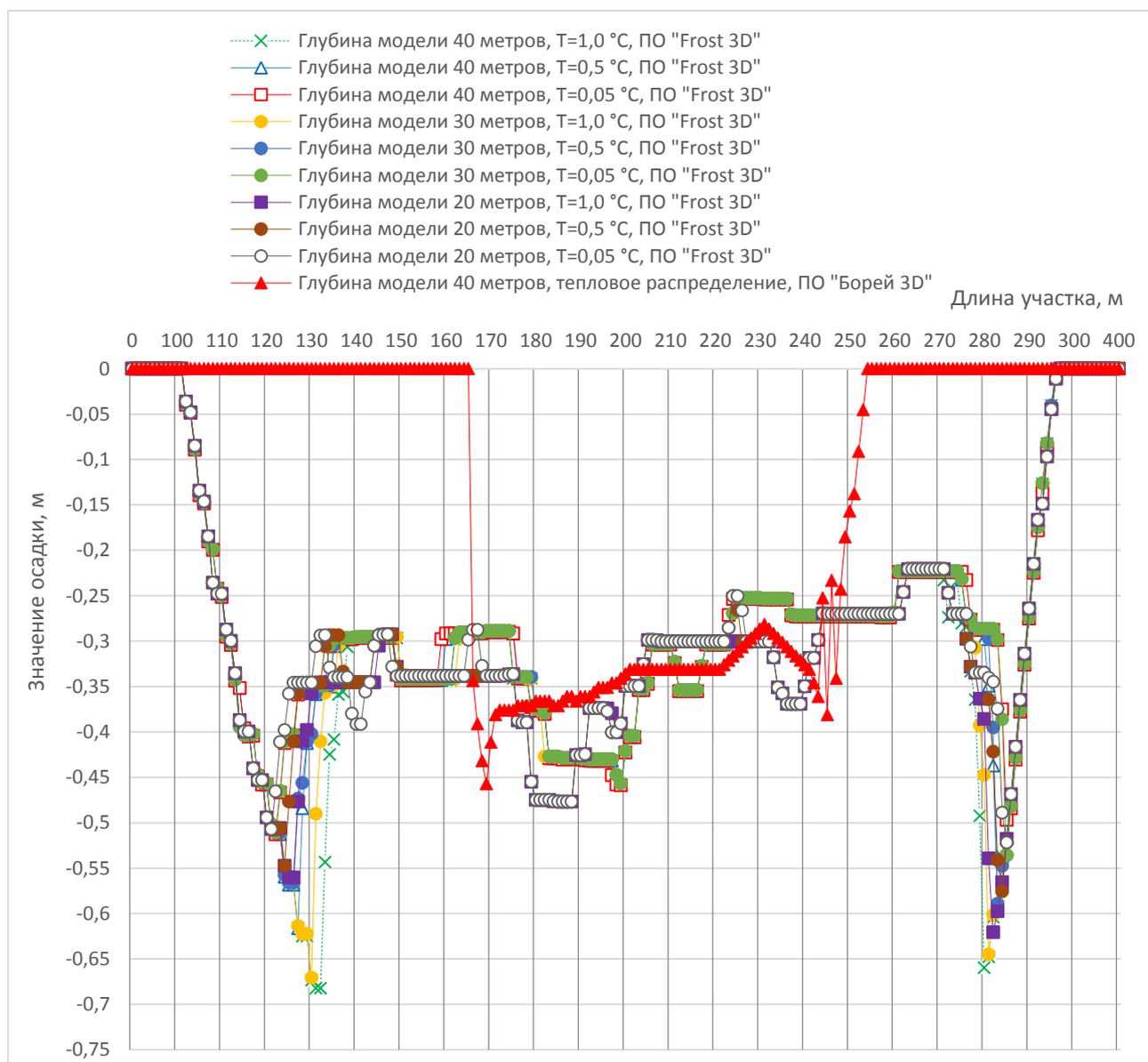


Рис. 5. Профили осадки РМ с глубинами 20–40 м и температурами 0,05–1,0 °С, верификационная РМ
Fig. 5. Settlement profiles of design models with depths of 20–40 m and temperatures of 0.05–1.0°C, verification model

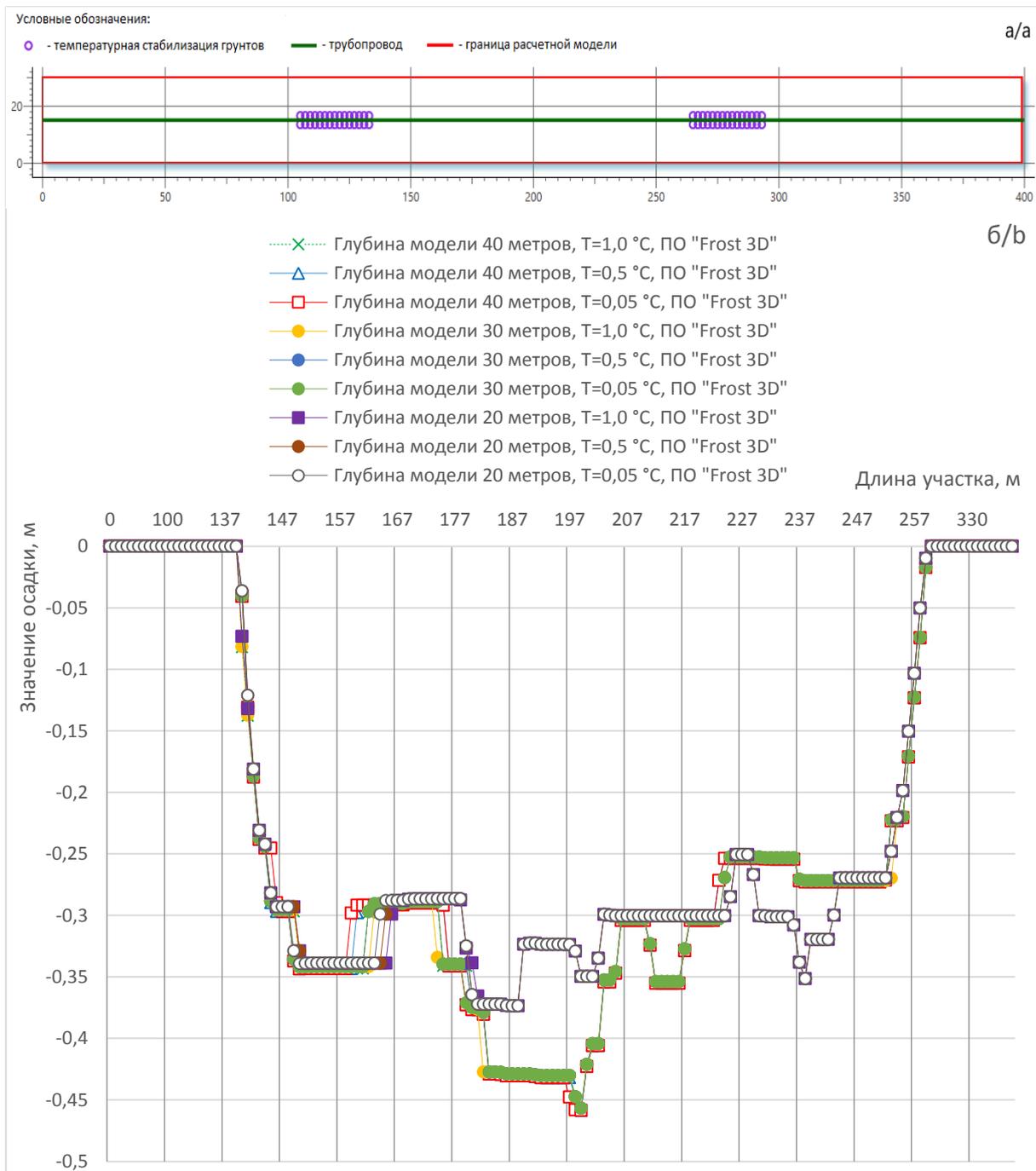


Рис. 6. Расчетные модели с температурной стабилизацией грунтов: а) вид расчетной модели в плане; б) профили осадки расчетных моделей с применением температурной стабилизации грунтов

Fig. 6. Calculation models with temperature stabilization of soils: а) view of the calculation model in plan; б) settlement profiles of calculation models using temperature stabilization of soils

Поскольку при анализе было отмечено возникновение смещения фронта ММГ на глубинах ниже глубины нулевых амплитуд, следующим этапом были рассмотрены варианты изменения ГУ на нижнюю грань расчетной модели – применение ГУ 1 рода с постоянной температурой (условие Дирихле). Однако поскольку ММГ на участке встречается

локально и внутри расчетной модели имеются участки немерзлых грунтов, появляется необходимость задавать два ГУ – для мерзлого участка, с постоянной отрицательной температурой, равной самой глубокой исследованной температуре мерзлого участка, и для талого участка – с установленной температурой, в соответствии с вариантом рас-

четной модели. Поскольку было отмечено, что наиболее корректное распределение температурных полей выявлено для глубин 40 м, сравнение производилось только для аналогичной глубины.

Результаты сравнения моделей с разными температурами показывают, что при применении ГУ 1 рода на нижней границе расчетной модели образуется дополнительное температурное накопление на вертикальном переходе талый–ММГ в области нижней грани, что приводит к искажению результатов расчетов и дополнительному оттаиванию ММГ в нижних зонах модели без присутствия теплового воздействия от атмосферы либо теплового воздействия трубопровода, что можно отметить на профилях осадки для температур талых грунтов 1,0 и 0,5 °С. При этом данное накопление уменьшается по мере уменьшения постоянной температуры ГУ нижней границы для талых грунтов. При задании температуры талых грунтов 0,05 °С дополнительные искажения нивелируются, температурные изополюсы распределяются корректно, фронт ММГ остается неизменным по сравнению с исходным положением.

При использовании НГУ 1 рода предпочтительной расчетной моделью с корректным распределением температурных изополюсов определена РМ № 15 – с температурой талых грунтов 0,05 °С и глубиной расчетной модели 40 м. Однако при детальном рассмотрении участка границы талый–ММГ выявлено смещение наклонного фронта ММГ в РМ № 15, что говорит о недостаточно высокой температуре талых грунтов для исключения «замораживающего» эффекта в сторону талых грунтов в зоне границы талый–ММГ. При этом если рассмотреть РМ № 14, отличающуюся только температурой талых грунтов, в ней наклонная граница талый–ММГ остается неизменной. Таким образом, при применении ГУ 1 рода на нижней границе при назначении температуры талого грунта 0,05 °С вертикальные границы фронта ММГ за период эксплуатации не изменяют своего местоположения, а вот наклонный фронт изменяется. При назначении температуры талого грунта 0,5 °С, наоборот, наклонный фронт ММГ не изменяет своего положения, но вертикальная граница ММГ изменяется. Из этого можем сделать вывод о возможности выборочного применения ГУ 1 рода на нижней границе расчетной модели с постоянной температурой в зависимости от условий наличия переходной границы талый–ММГ в теле расчетной модели, а также расположения фронта ММГ – вертикального, наклонного или нелинейной формы.

Помимо мероприятий с тепловой изоляцией, были рассмотрены иные мероприятия по уменьшению осадки ММГ при оттаивании, а именно температурная стабилизация грунтов (ТСГ) в зоне пере-

хода талый–ММГ. На всех расчетных моделях были применены идентичные мероприятия по ТСГ с одинаковыми характеристиками и объемом замораживающих устройств.

На рис. 6 представлены профили осадки для всех расчетных моделей с применением температурной стабилизации грунтов, а также схема установки ТСГ.

Общий визуальный график осадок для 9 вариантов РМ показывает расхождения результатов осадки от 5,4 до 13,2 см. По всей протяженности мерзлого участка совпадения результатов осадки для РМ с глубинами моделей 30 и 40 м – до 95 %, различия встречены для РМ глубиной 20 м, которые ранее отмечены как модели, искажающие температурные поля, т. е. являющиеся некорректными. При применении ТСГ на участках перехода талый–ММГ исключаются максимальные расчетные осадки, в зоне ММГ различия в задании исходных данных в расчетных моделях не являются критичными.

Резюмируя, проведя сравнительный анализ результатов теплотехнических расчетов по различным факторам, можно сделать ряд выводов:

1. Задание температурного распределения в расчетной модели через температурные скважины требует детального восстановления местоположения фронта ММГ и применения большого количества дополнительных температурных скважин и не рекомендуется к использованию в качестве способа задания температур грунтов для линейных сооружений при наличии островной ММГ по причине искажения исходных данных термометрических замеров и положения фронта ММГ, отмеченного на профилях трассы трубопровода.
2. Применение ГУ 1 рода (условие Дирихле) на нижней границе с наличием внутри расчетной модели границ талый–ММГ требует предварительного анализа и вариантного расчета по подбору температуры талых грунтов для удовлетворения предпосылки о неизменности положения фронта ММГ в зоне отсутствия теплового воздействия ниже глубины нулевых амплитуд. Предпочтительно использование ГУ 2 рода на нижней границе расчетной модели.
3. По результатам факторного анализа результатов теплотехнических расчетов предпочтительной является РМ № 9 с температурой талых грунтов 1,0 °С и глубиной расчетной модели не менее 40 м.
4. Применение температурной стабилизации грунтов для исключения участков с наибольшими осадками на переходах талый–ММГ приводит к практически 100 % совпадению результатов расчетов осадки для зоны сливающейся сплошной мерзлоты.

Таблица 2. Перечень расчетных моделей и результаты удовлетворительных прочностных расчетов расчетных моделей
Table 2. List of design models and results of satisfactory strength calculations of design models

Условия задания РМ Conditions for setting CM		С граничным условием 2 рода на нижней границе РМ, м With the 2 nd boundary condition at the CM bottom, m			С граничным условием 1 рода на нижней границе РМ, м With the 1 st boundary condition at the CM bottom, m
		20	30	40	40
		РМ/CM			
Тепловая изоляция толщиной 62,5 мм 62.5 mm thick thermal insulation	С температурой талых грунтов 1,0 °С With the temperature of thawed soils 1,0 °С	1	5	9	13
	С температурой талых грунтов 0,5 °С With the temperature of thawed soils 0,5 °С	2	6	10	14
	С температурой талых грунтов 0,05 °С With the temperature of thawed soils 0,05 °С	3	7	11	15
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ With temperature distribution in the permafrost front zone	4	8	12	-
Установка локальных сезоннодействующих охлаждающих устройств на границах ММГ Installation of local seasonal cooling devices at the permafrost border	С температурой талых грунтов 1,0 °С With the temperature of thawed soils 1,0 °С	16	20	24	28
	С температурой талых грунтов 0,5 °С With the temperature of thawed soils 0,5 °С	17	21	25	29
	С температурой талых грунтов 0,05 °С With the temperature of thawed soils 0,05 °С	18	22	26	30
	С температурным распределением в зоне фронта ММГ With temperature distribution in the permafrost front zone	19	23	27	-
условия прочности удовлетворены/the strength conditions are satisfied					
условия прочности не удовлетворены/the strength conditions are not satisfied					
расчет на прочность не проводился/strength calculation was not carried out					

Влияние результатов теплотехнических расчетов на напряженно-деформированное состояние трубопровода

Для проведения комплексного сравнения влияния результатов теплотехнических расчетов на НДС трубопровода было сформировано 30 расчетных моделей в ПО «СТАРТ-Проф» для проведения прочностных расчетов трубопровода.

Итоговый вывод говорит о том, что вне зависимости от выбранного способа, наличие границ перехода талый–ММГ с аномальными «скачками» осадки является наихудшим условием, влияющим на прочностные характеристики трубопровода. При исключении осадок при оттаивании на границах талый–ММГ при помощи мероприятий по температурной стабилизации грунтов все расчетные модели с ТСГ удовлетворяют условиям прочности. Можно заключить, что результаты теплотехнических расчетов, заданные с изменением части характеристик при прочих равных условиях, имеют относительно небольшие отклонения и не несут критичного значения для удовлетворения условий прочности трубопровода. Основные различия представлены на границах талый – мерзлый грунт, что говорит о необходимости полноценного расчета участков ММГ островного распространения при особенном внимании моделированию переходов, с последующим подтверждением прочности трубопровода с использованием результатов расчетов осадки грунтов. Несмотря на наличие множества допущений и

неопределенностей при проведении теплотехнических расчетов основным расчетом стоит считать расчет на прочность, и основной целью комплексных расчетов подземных трубопроводов является удовлетворение условий прочности трубопровода.

Выводы

1. Отмечены различия в профилях осадки мерзлого грунта при оттаивании на участках трассы с островной мерзлотой, в основном на границах перехода талых и мерзлых грунтов.
2. Использование граничного условия 1 рода для нижней грани расчетной модели применимо, но требует дополнительного анализа первичных результатов теплотехнических расчетов. Предпочтительно использование граничного условия 2 рода на нижней границе расчетной области.
3. Высоту расчетной модели стоит принимать не менее 40 м для исключения дополнительных теплонакоплений в пространстве расчетной модели. При применении температуры талых грунтов 1,0 °С распространение температурных изолиний в пространстве расчетной модели удовлетворяет предпосылкам о неизменности температур ниже глубины нулевых амплитуд.
4. Любые полученные результаты теплотехнических расчетов подземного трубопровода требуется учитывать при последующей проверке прочностных условий трубопровода для подтверждения механической безопасности объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железняк М.Н., Сериков С.И., Шац М.М. Современное состояние и расширение нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» (геоэкологические и геотехнические аспекты) // Территория Нефтегаз. – 2019. – № 5. – С. 76–83.
2. Шац М.М., Нерадовский Л.Г. Проблемы контроля состояния и надежности нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» на стадии эксплуатации // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – № 4 (108). – С. 3–11.
3. Азметов Х.А., Матлашов И.А., Гумеров А.Г. Прочность и устойчивость подземных трубопроводов. – СПб.: Недра, 2005. – 248 с.
4. Опыт применения программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния нефтепроводов, прокладываемых на вечномёрзлых грунтах / М.Ю. Зотов, И.В. Ушаков, И.Л. Димов, А.О. Олейникова // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 2 (6). – С. 61–65.
5. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода "Сила Сибири" на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей / О.В. Трифионов, В.М. Силкин, В.П. Черный, И.Ю. Морин, П.А. Володин, В.М. Ефимов, К.Н. Большев // Вести газовой науки. – 2020. – № 2 (44). – С. 34–50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-magistralnogo-gazoprovoda-sila-sibiri-na-uchastkah-razvitiya-opasnyh> (дата обращения: 07.07.2023).
6. Pipeline–permafrost interaction monitoring system along the China–Russia crude oil pipeline / Fei Wang, Guoyu Li, Wei Ma, Qingbai Wu, M. Serban, V. Samsonova, A. Fedorov, Ningshan Jiang, Bo Wang // Engineering Geology. – 2019. – V. 254. – P. 113–125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.013> (дата обращения: 07.07.2023).
7. Modeling the heat transfer processes in the pipe–soil system / V.V. Golik, Yu.D. Zemenkov, A.A. Gladenko, I.V. Seroshtanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – V. 663. – № 1. – P. 012012. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/663/1/012012/pdf> (дата обращения 07.07.2023).
8. 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. – № 13 (20). – P. 2908. URL: <https://doi.org/10.3390/w13202908> (дата обращения 07.07.2023).
9. Rapid permafrost thaw induced by heat loss from a buried warm–oil pipeline and a new mitigation measure combining seasonal air–cooled embankment and pipe insulation / M. Yanhu, L. Guoyu, M. Wei, S. Zhengmin, Z. Zhiwei, F. Wang // Energy. – 2020. – № 203. – P. 117–119.
10. Проектирование промышленных 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.
11. Numerical evaluation of the effectiveness of frost heave mitigation strategies for chilled arctic gas pipelines / XinZe Li, QingBai Wu, HuiJun Jin, Rui Shi, Gang Wu, YaPeng Cao. // Research in Cold and Arid Regions. – 2022. – V. 14. – № 5. – P. 338–345. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2022.12.002> (дата обращения 07.07.2023).
12. Changes in near–surface permafrost temperature and active layer thickness in Northeast China in 1961–2020 based on GIPL model / Shuai Huang, Qian Ding, Kezheng Chen, Zheng Hu, Yanjie Liu, Xiaodong Zhang, Kai Gao, Kaichi Qiu, Yang Yang, Lin Ding // Cold Regions Science and Technology. – 2023. – V. 206. – P. 103709. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103709> (дата обращения 07.07.2023).
13. Assessment of permafrost disturbances caused by two parallel buried warm–oil pipelines: A case study at a high–latitude wetland site in Northeast China / Fei Wang, Guoyu Li, Wei Ma, Dun Chen, Gang Wu, Yapeng Cao, Yanhu Mu, Yuncheng Mao, Jun Zhang, Kai Gao, Xinbin Wang, Hongyuan Jing, Fuqiang Che // Cold Regions Science and Technology – 2023. – V. 206. – P. 103753. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103753> (дата обращения 07.07.2023).
14. Thermal and mechanical analysis of the China–Russia Crude Oil Pipeline suffering settlement disaster in permafrost regions / Jiawei Zhou, Zheng Liang, Liang Zhang, Ting Zheng, Jiyu Zheng // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2022. – V. 199. – P. 104729. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104729> (дата обращения 07.07.2023).
15. Xinze Li, Qingbai Wu, Huijun Jin. Mitigation strategies and measures for frost heave hazards of chilled gas pipeline in permafrost regions: a review // Transportation Geotechnics. – 2022. – V. 36. – P. 100786. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100786> (дата обращения 07.07.2023).
16. Xinze Li, Qingbai Wu, Huijun Jin. New methods for predicting strain demand of Arctic Gas Pipelines across permafrost under frost heave displacement // Geofluids. – 2022. – V. 2022. – P. 909489. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/9094890> (дата обращения 07.07.2023).
17. Vladova A.Y. Remote geotechnical monitoring of a buried oil pipeline // Mathematics. – 2022. – V. 10 (11). – P. 1813. URL: <https://doi.org/10.3390/math10111813> (дата обращения 07.07.2023).
18. Monitoring the permafrost conditions along pipeline routes in Central Yakutia, Russia / S. Varlamov, P. Skryabin, A. Zhirkov, Z. Wen // Land. – 2022. – V. 11. – P. 2331. URL: <https://doi.org/10.3390/land11122331> (дата обращения 07.07.2023).
19. Реутских Н.В., Бережной М.А., Дуденко И.А. Геотехнический мониторинг для магистральных трубопроводов в различных типах многолетнемерзлых пород // Научный журнал российского газового общества. – 2016. – № 2. – С. 22–26.
20. Гишкелюк И.А., Станиловская Ю.В., Евланов Д.В. Прогнозирование оттаивания многолетнемерзлых грунтов вокруг подземного трубопровода большой протяженности // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 1 (17). – С. 20–25.

REFERENCES

1. Zheleznyak M.N., Serikov S.I., Shats M.M. Current state and expansion of the Eastern Siberia–Pacific Ocean oil pipeline (geocological and geotechnical aspects). *Neftgaz Territory*, 2019, no. 5, pp. 76–83. In Rus.
2. Shats M.M., Neradovsky L.G. Problems of monitoring the condition and reliability of the oil pipeline "Eastern Siberia – Pacific Ocean" at the stage of operation *Mine surveying and subsoil use*, 2020, no. 4 (108), pp. 3–11. In Rus.

3. Azmetov Kh.A., Matlashov I.A., Gumerov A.G. *Prochnost i ustoychivost podzemnykh truboprovodov* [Strength and stability of underground pipelines]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2005. 248 p.
4. Zotov M.Yu., Ushakov I.V., Dimov I.L., Oleinikova A.O. Application of software solutions to calculate stress-strain behaviour of pipelines laid on permafrost soils. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2012, no. 2 (6), pp. 61–65. In Rus.
5. Trifonov O.V., Silkin V.M., Cherniy V.P., Morin I.Yu., Volodin P.A., Efimov V.M., Bolshev K.N. Predictive mathematical modelling of stress-strain behavior for Power of Siberia pipeline sections subject to dangerous engineering-geocryological processes. *News of gas science*, 2020, no. 2 (44), pp. 34–50. In Rus.
6. 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 7 July 2023).
7. Golik V.V., Zemenko Yu.D., Gladenko A.A., Seroshtanov I.V. Modeling the heat transfer processes in the pipe-soil system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2019, vol. 663, no. 1, pp. 012012. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/663/1/012012/pdf> (accessed 7 July 2023).
8. 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, no. 13 (20), pp. 2908. Available at: <https://doi.org/10.3390/w13202908> (accessed 7 July 2023).
9. Yanhu M., Guoyu L., Wei M., Zhengmin S., Zhiwei Z., Wang F. Rapid permafrost thaw induced by heat loss from a buried warm-oil pipeline and a new mitigation measure combining seasonal air-cooled embankment and pipe insulation. *Energy*, 2020, no. 203, pp. 117–119.
10. Filimonov A.A., Lipikhin D.V., Melnikov A.E., Kiryanova 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 Rus. Available at: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-4-127-137> (accessed 7 July 2023).
11. XinZe Li, QingBai Wu, HuiJun Jin, Rui Shi, Gang Wu, YaPeng Cao. Numerical evaluation of the effectiveness of frost heave mitigation strategies for chilled arctic gas pipelines. *Research in Cold and Arid Regions*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2022.12.002> (accessed 7 July 2023).
12. Shuai Huang, Qian Ding, Kezheng Chen, Zheng Hu, Yanjie Liu, Xiaodong Zhang, Kai Gao, Kaichi Qiu, Yang Yang, Lin Ding. Changes in near-surface permafrost temperature and active layer thickness in Northeast China in 1961–2020 based on GIPL model. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, vol. 206, no. 103709. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103709> (accessed 7 July 2023).
13. Fei Wang, Guoyu Li, Wei Ma, Dun Chen, Gang Wu, Yapeng Cao, Yanhu Mu, Yuncheng Mao, Jun Zhang, Kai Gao, Xinbin Wang, Hongyuan Jing, Fuqiang Che. Assessment of permafrost disturbances caused by two parallel buried warm-oil pipelines: a case study at a high-latitude wetland site in Northeast China. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, vol. 206, no. 103753. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103753> (accessed 7 July 2023).
14. Jiawei Zhou, Zheng Liang, Liang Zhang, Ting Zheng, Jiyu Zheng. Thermal and mechanical analysis of the China–Russia Crude Oil Pipeline suffering settlement disaster in permafrost regions. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, vol. 199, no. 104729. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104729> (accessed 7 July 2023).
15. Xinze Li, Qingbai Wu, Huijun Jin. Mitigation strategies and measures for frost heave hazards of chilled gas pipeline in permafrost regions: a review. *Transportation Geotechnics*, 2022, vol. 36, no. 100786. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100786> (accessed 7 July 2023).
16. Xinze Li, Qingbai Wu, Huijun Jin. New methods for predicting strain demand of Arctic Gas Pipelines across permafrost under frost heave displacement. *Geofluids*, 2022, vol. 2022, no. 9094890. Available at: <https://doi.org/10.1155/2022/9094890> (accessed 7 July 2023).
17. Vladova A.Y. Remote geotechnical monitoring of a buried oil pipeline. *Mathematics*, 2022, vol. 10 (11), pp. 1813. Available at: <https://doi.org/10.3390/math10111813> (accessed 7 July 2023).
18. Varlamov S., Skryabin P., Zhirkov A., Wen Z. Monitoring the permafrost conditions along pipeline routes in Central Yakutia, Russia. *Land*, 2022, no. 11, pp. 2331. Available at: <https://doi.org/10.3390/land11122331> (accessed 7 July 2023).
19. Reutskikh N.V., Bereznoy M.A., Dudenko I.A. Geotechnical monitoring for main pipelines in various types of permafrost. *Scientific Journal of the Russian Gas Society*, 2016, no. 2, pp. 22–26. In Rus.
20. Gishkelyuk I.A., Stanilovskaya Yu.V., Evlanov D.V. Prediction of permafrost thawing around a long underground pipeline. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2015, no. 1 (17), pp. 20–25. In Rus.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Алексеевич Филимонов, 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. andrey_filimonoff@list.ru; <https://orcid.org/0009-0000-4750-1724>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Людмила Александровна Строкова, 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>

Lyudmila A. Strokov, 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>

Поступила в редакцию: 01.08.2023
Поступила после рецензирования: 14.09.2023
Принята к публикации: 30.11.2023

Received: 01.08.2023
Revised: 14.09.2023
Accepted: 30.11.2023