

УДК 622.692.4.053

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В РАЙОНАХ СПЛОШНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Шаммазов Ильдар Айратович¹,
shammazov_ia@pers.spmi.ru

Сидоркин Дмитрий Иванович¹,
dmsidorkin@mail.ru

Батыров Артур Магомедович¹,
batyrovarthur@mail.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эксплуатационной надежности надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах. Это направление развития транспортировки нефти и газа и наращивания сырьевого потенциала является ресурсосберегающим, минимизирующим объемы эксплуатационных затрат на обследование и геомониторинг. Опоры надземных магистральных трубопроводов подвергаются нагрузкам со стороны грунта из-за опасных криогенных процессов морозного пучения, вызванных очень низкими температурами. Появляется задача повышения эксплуатационной надежности надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах.

Цель: определить и предложить конструкцию опоры для надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах, и возможность эффективного использования острой кромки опорной плиты в качестве основания надземной опоры.

Объекты: надземный магистральный трубопровод, конструкция опоры, многолетнемерзлый грунт. Грунты классифицируются по типам и характеризуются сильным пучением и высоким модулем деформации.

Методы: математическое моделирование опорной плиты с мерзлым грунтом; оценка и анализ распределения напряжения разрушения мерзлой породы; оценка эффективности применения новой конструкции опоры с острой кромкой опорной плиты в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород.

Результаты. Даны физические характеристики мерзлых вслученных грунтов; предложена опорная конструкция, защищающая надземный магистральный трубопровод от воздействий сил морозного пучения; предложен оптимальный угол острой кромки опорной плиты для эффективного резания вслученного грунта; выполнено моделирование опорной плиты с мерзлым грунтом; выполнен расчет эквивалентных напряжений острой кромки при наиболее вероятном случае резания вслученной глины от воздействий сил морозного пучения грунта.

Ключевые слова:

Надземный магистральный трубопровод, многолетнемерзлый грунт, силы морозного пучения, напряженно-деформированное состояние, напряжения разрушения.

Введение

За последнее время спрос на энергоносители значительно вырос, об этом свидетельствует ситуация на мировом энергетическом рынке [1, 2]. В связи с этим появилась огромная потребность в надежной транспортировке нефти и газа по магистральным трубопроводам [3]. Большая часть нефтегазовых месторождений России расположена в Западной Сибири. Поэтому основные трассы магистральных трубопроводов проложены в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород [4, 5]. Подземная прокладка трубопроводов в таких районах осложнена многими факторами [6–8], поэтому практичнее сооружать магистральные трубопроводы надземным способом [9]. Опоры надземных магистральных трубопроводов подвергаются нагрузкам со стороны грунта из-за опасных криогенных процессов морозного пучения, вызванных очень низкими температурами (рис. 1) [10]. Данный процесс негативно влияет на эксплуатационную надежность трубопровода и может привести к аварии, что в свою очередь негативно

скажется на окружающей среде и приведёт к большим потерям сырья [11–15]. Появляется задача повышения эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах.

Надземный магистральный трубопровод является сложной конструкцией, поэтому его невозможно построить без опор со свайными основаниями [16]. Поскольку свайные основания опоры, расположенные в глубине грунта, испытывают дефекты, для строительства опор необходимо учитывать характеристики грунта [17–19]. От характеристик грунта напрямую зависит выбор типа опор для трубопровода.

Для опоры надземного магистрального трубопровода следует с максимальной точностью рассчитать несущую способность конструкции опоры для обеспечения ее устойчивости [20].

Использование любой из типов опор при строительстве должно быть обосновано техническими и экономическими расчетами.

От точности подбора опорных конструкций зависит надежность проектного положения надземного

магистрального трубопровода. Для определения устойчивой конструкции опоры в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород и обеспечения надежной системы трубопровода необходимо рассчитать действующую нагрузку со стороны грунта в процессе воздействия сил морозного пучения и определить напряжение разрушения грунта [21, 22].

Расчет производился в программном комплексе PLAXIS. Был подобран угол острой кромки опорной плиты, также были найдены значения напряжения разрушения мерзлого грунта в зависимости от типа и температуры породы.



Рис. 1. Морозное выпучивание опор надземного магистрального трубопровода

Fig. 1. Frosty bulging of aboveground main pipeline supports

Введение в проблематику

Конструкции опор подразделяются на продольно-подвижные, свободноподвижные и неподвижные опоры [23, 24]. Существующие на данный момент опорные конструкции, применяемые для строительства магистральных трубопроводов, не справляются с морозным пучением грунта, что, в свою очередь, является причиной деформации трубопровода [25–28]. В связи с этим появляется задача о разработке конструкции опоры, защищающей трубопровод от действий сил морозного выпучивания.

С целью повышения надежности надземного трубопровода, проложенного на участках сплошного распространения многолетнемерзлых пород, предлагается применить новую конструкцию опоры.

Нами была разработана опорная конструкция, защищающая надземный магистральный трубопровод от сил морозного пучения. Данная опора позволяет сохранить проектное положение трубопровода на протяжении всего процесса пучения при понижении температуры в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород от -3 до -8 °С и ниже.

При эксплуатации надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах, возможна потеря продольной и поперечной устойчивости от воздействия процесса криогенного пучения грунта, что приведет к изменению напря-

женно-деформированного состояния трубопровода [29–31].

Для таких условий было разработано устройство (рис. 2), сохраняющее проектное положение надземного трубопровода при эксплуатации на вспученных грунтах.

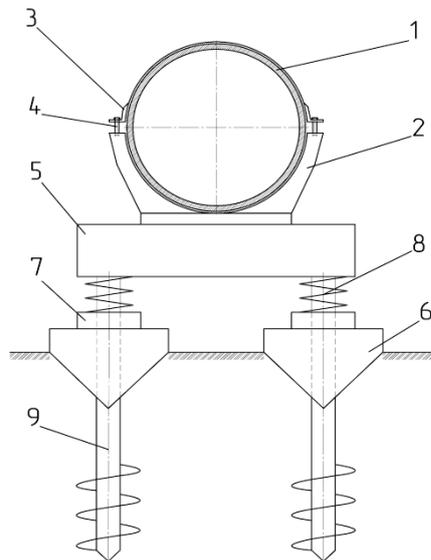


Рис. 2. Схема конструкции опоры надземного магистрального трубопровода: 1 – трубопровод; 2 – ложемент; 3 – полухомут; 4 – болтовое соединение; 5 – стол-ростверк; 6 – опорная плита; 7 – шайба; 8 – демпфер; 9 – винтовая свая

Fig. 2. Design diagram of the aboveground main pipeline support: 1 – pipeline; 2 – lodgment; 3 – half-mast; 4 – bolted connection; 5 – table-grillage; 6 – base plate; 7 – washer; 8 – damper; 9 – screw pile

Модель опорной конструкции надземного магистрального трубопровода (рис. 3) разработана в программном пакете Autodesk Inventor.

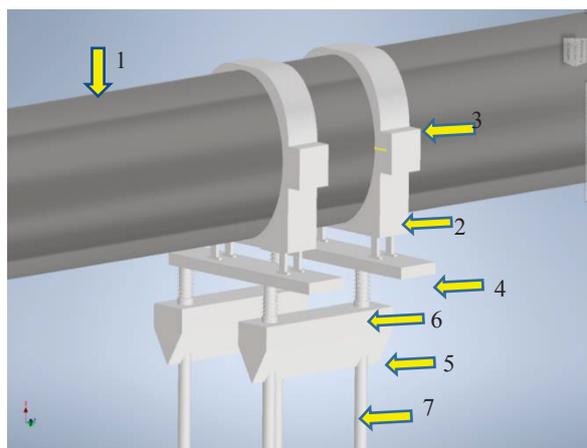


Рис. 3. Модель опорной конструкции надземного магистрального трубопровода: 1 – трубопровод; 2 – ложемент; 3 – полухомут; 4 – стол-ростверк; 5 – опорная плита; 6 – демпфер; 7 – свая

Fig. 3. Model of the aboveground main pipeline support structure: 1 – pipeline; 2 – lodgment; 3 – half-mast; 4 – table-grillage; 5 – base plate; 6 – damper; 7 – pile

Важным элементом конструкции опоры, который позволяет защитить надземный трубопровод от воздействия сил морозного пучения, является опорная железобетонная плита с острой кромкой.

Моделирование с использованием программного комплекса PLAXIS

Расчет производился в модуле Mohr-Coulomb, который представляет собой математическую модель, описывающую реакцию хрупких материалов, таких как бетон, на напряжение сдвига, а также нормальное напряжение. По результатам сбора и анализа данных произведено моделирование опорной плиты с мерзлым грунтом (рис. 4), также в программе был подобран оптимальный угол острой кромки, равный 30 градусам. Материалом плиты является железобетон марки М450. По формуле (1) была рассчитана несущая способность конструкции, которая равна 7830 кН.

Формула расчетной нагрузки несущей способности, допускаемой на железобетонную опорную плиту:

$$N = \gamma_{b3} \gamma_{cb} R_b A_b + R_{sc} A_s, \quad (1)$$

где A_s – площадь сечения, m^2 ; R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию, Па; R_{sc} – расчетное сопротивление арматуры сжатию, Па; γ_{b3} – коэффициент условий работы бетона; γ_{cb} – коэффициент, учитывающий влияние способа производства свайных работ.

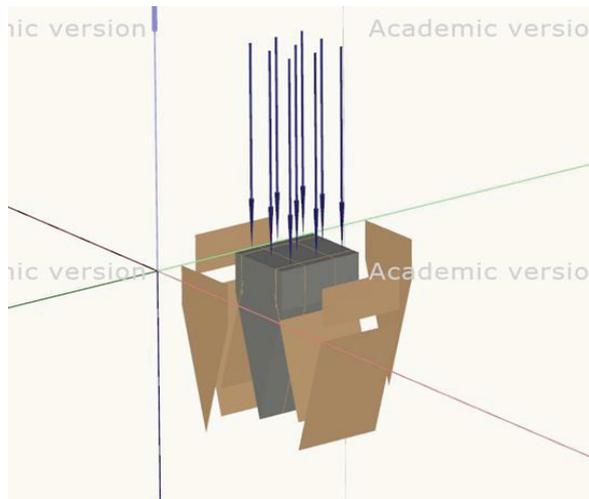


Рис. 4. Модель нагруженной опорной плиты, разрезающей вспученный мерзлый грунт. Параметры модели: длина 2 м, ширина 0,5 м, высота 0,8 м, угол острой кромки 30 градусов

Fig. 4. Model of a loaded base plate cutting through swollen frozen soil. Model parameters: length 2 m, width 0,5 m, height 0,8 m, sharp edge angle 30 degrees

Известно, что грунты многолетнемерзлых пород различаются характеристиками, которые зависят от типов грунтов. Поэтому в качестве модели грунта были выбраны основные часто встречающиеся типы грунтов: глина, песок и супесь. Значения грунтов, моделирующие мерзлый грунт, принимали из имеющихся данных в литературе. В зонах сплошного распространения многолетнемерзлых пород температура грунта колеблется от –

3 до –8 °С. Поскольку для построения модели недостаточно данных при –3 °С, в качестве расчетной температуры примем –4 °С ближайшую к начальной температуре в зоне сплошной мерзлоты. Важным фактором для процесса пучения многолетнемерзлых пород является низкая температура грунта, из-за которой увеличивается объем грунта и растут силы морозного пучения, что приводит к выдергиванию опорной конструкции, поскольку при понижении температуры вода в грунте начинает расширяться [32–35].

Таблица 1. Характеристики мерзлого вспученного грунта при температуре –4 °С

Table 1. Characteristics of frozen swollen soil at –4 °С

Характеристики Specifications	Песок (сильнопучинистый) Sand (strong-heaving)	Глина Clay	Супесь Sandy loam
Модуль деформации, кН/м ² Deformation modulus, kN/m ²	8825985	1176798	5883990
Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	0,3	0,4	0,35
Сцепление, кПа Cohesion, kPa	195	275	300
Угол внутреннего трения Internal friction angle	38	14	32
Удельный вес грунта, кН/м ³ Soil specific gravity, kN/m ³	26,09	26,87	26,48
Коэффициент пористости, д. ед. Porosity coefficient, d. units	0,55	0,55	0,55

Для расчета нагрузок, действующих на опору надземного трубопровода, определено минимальное напряжение острого наконечника и предел прочности грунта, при котором происходит разрушение вспученного грунта от острой кромки опорной конструкции при воздействии сил морозного пучения глины (рис. 5), песка (рис. 6) и супеси (рис. 7).

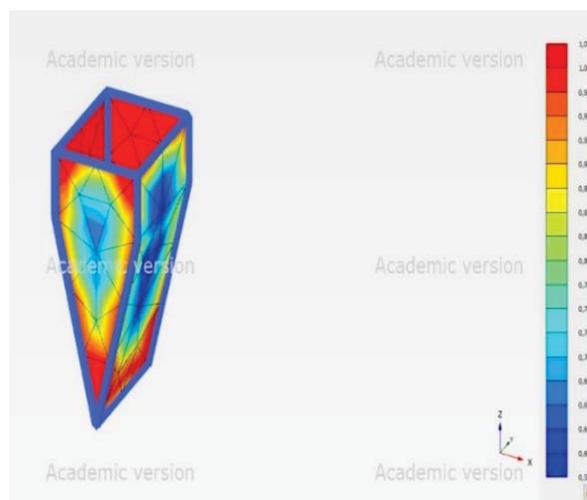


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений острой кромки при наиболее вероятном случае резания вспученной глины, при воздействии сил морозного пучения грунта

Fig. 5. Distribution of equivalent stresses of the sharp edge in the most likely case of cutting of expanded clay when exposed to the forces of frost heaving of the soil

Резание грунта – это пластическая деформация под наконечником, важным являются касательные напряжения на интерфейсе наконечника, когда τ_{gel} (относительное напряжение сдвига) будет равно 1 (представлено красным цветом) по всем боковым граням, произойдет резание грунта. Для определения напряжения разрушения вспученного грунта необходимо постепенно увеличивать нагрузку.

В данной модели произошло резание вспученной глины на 14 фазе при напряжении разрушения мерзлой глины равном 250 кН.

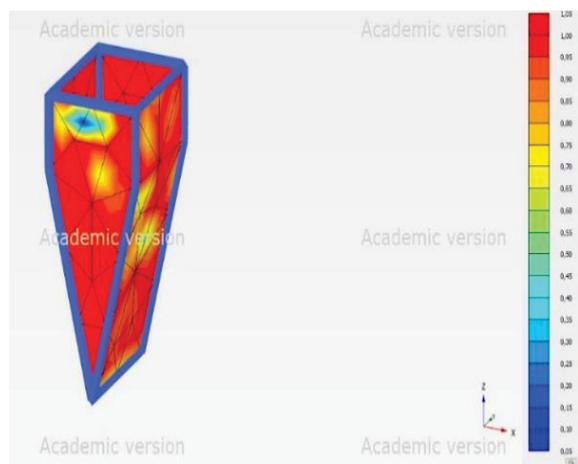


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений острой кромки при наиболее вероятном случае резания вспученного песка, при воздействии сил морозного пучения грунта

Fig. 6. Distribution of equivalent stresses of the sharp edge in the most likely case of cutting of swollen sand when exposed to the forces of frost heaving of the soil

В данной модели произошло резание вспученного песка на 16 фазе при напряжении разрушения мерзлого песка равном 17 кН.

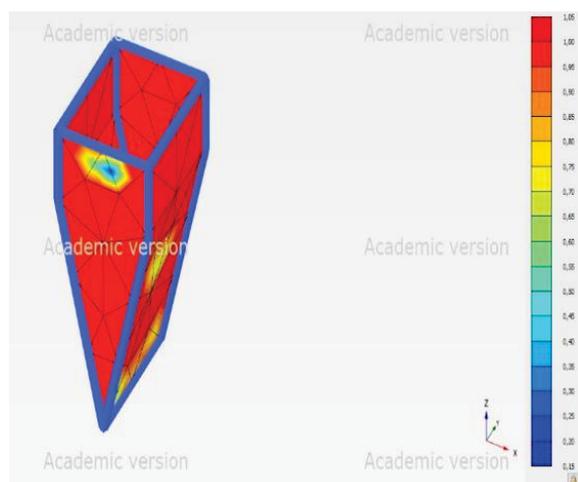


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений острой кромки при наиболее вероятном случае резания вспученной супеси, при воздействии сил морозного пучения грунта

Fig. 7. Distribution of equivalent stresses of the sharp edge in the most likely case of cutting of swollen sandy loam when exposed to the forces of frost heaving of the soil

В данной модели произошло резание вспученной супеси на 15 фазе при напряжении разрушения мерзлой супеси равном 16 кН.

Таблица 2. Результаты расчетов математической модели

Table 2. Results of calculations in the proposed mathematical model

Тип грунта Soil type	Песок (сильнопучинистый) Sand (strong-heaving)	Глина Clay	Супесь Sandy loam
Напряжение разрушения грунта, кН Soil fracture stress, kN	250	17	16

По результатам математического моделирования выявлено:

1. Острая кромка опорной плиты разрезает мерзлый вспученный грунт.
2. В зависимости от типа породы, взаимодействующей с опорной плитой, получены разные значения напряжения разрушения мерзлого вспученного грунта.
3. Моделирование позволяет спрогнозировать рост или падение напряжения разрушения грунта в зависимости от его характеристик.

Заключение

Расчеты для разработанной конечно-элементной модели опорной плиты с мерзлым грунтом доказывают возможность использования в качестве основания надземной опоры железобетонную плиту с острой кромкой (для многолетнемерзлых грунтов). Для исключения возможности смещения опоры и образования разрывов надземных магистральных трубопроводов при воздействии криогенных процессов морозного пучения предлагается разрезать мерзлый вспученный грунт путем установки при строительстве новой конструкции опоры, где ее нижняя часть выполнена в форме острой кромки, заглубленной в грунт.

Совокупность таких факторов, как температура, морозное пучение, тип грунта и прогнозируемые изменения грунта в зависимости от климатических условий района, может привести к образованию бугров пучения, смещению опоры и повреждению надземного магистрального трубопровода и конструкции опоры. Следует также учитывать, что для различных типов грунтов с разной степенью морозного пучения нагрузка на опорную плиту должна быть подобрана так, чтобы происходил эффект резания вспученного грунта. Поэтому необходимо для резания вспученного грунта приложить расчетную нагрузку на наконечник острой кромки опорной плиты. Однако не стоит забывать, что модуль деформации грунта и содержание воды в грунте при более низких температурах могут значительно увеличить предел прочности грунта, что в свою очередь приведет к тому, что острая кромка не справится со своей задачей и выдергивающая сила начнет поднимать вверх опорную плиту. Для предотвращения данного последствия в опорной конструкции предлагается ис-

пользовать демпферный элемент между опорной плитой и ростерком.

Предложенная конструкция опоры надземного магистрального трубопровода позволяет защитить трубопровод от воздействия сил морозного пучения грунта, исключить необходимость использования дополнительных технологий, таких как термостабилизаторы, что во много раз снижает затраты на эксплуатацию (обследо-

вание, геомониторинг). На основании полученных результатов на текущем этапе можно сделать вывод:

При проектировании надземных магистральных трубопроводов, прокладываемых в условиях распространения сплошной многолетнемерзлой породы, следует рассмотреть вариант прокладки без использования термостабилизаторов грунта, с применением предлагаемой конструкции опоры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратов Д.И. Вызовы для России на мировом рынке природного газа // Экономика. Налоги. Право. – 2022. – Т. 15. – № 1. – С. 35–44. DOI: 10.26794/1999-849X-2022-15-1-35-44.
2. Болобов В.И., Попов В.И. Методика испытаний трубопроводных сталей на стойкость к «ручейковой» коррозии // Записки Горного института. – 2021. – № 6. – С. 854–860. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.7.
3. Щипачев А.М., Ли Д.Д. Перспективы газопровода между КНР и Республика Корея // Neftegaz.ru. – 2020. – № 1. – С. 92–95.
4. Череповицын А.Е., Цветков П.С., Евсеева О.О. Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов // Записки Горного института. – 2021. – № 3. – С. 463–478. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15.
5. Wei Wang. An open frozen–heave test on the pipeline foundation soils in the permafrost regions // Natural Gas Industry B. – 2018. – № 1 – P. 219–225. DOI: 10.1016/j.ngib.2018.04.009
6. Potapov A.I., Shikhov A.I., Dunaeva E.N. Geotechnical monitoring of frozen soils: problems and possible solutions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – № 2. – P. 24.
7. Гендлер С.Г., Фазылов И.Р., Абашин А.Н. Результаты экспериментальных исследований теплового режима нефтяных шахт при термическом способе добычи нефти // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 248–262.
8. Lin Chen et al. Characteristics of heat fluxes of an oil pipeline armed with thermosyphons in permafrost regions // Applied Thermal Engineering. – 2021. – № 1. – P. 146–149.
9. Поталов А.И., Шихов А.И., Дунаева Е.Н. Определение динамического модуля упругости вечномёрзлых грунтов при оттаивании по кинематическим характеристикам упругой волны // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24. – № 3 (273). – С. 16–23. – DOI: 10.14489/td.2021.03.pp.016-023.
10. Onyebuchi V.E. et al. A systematic review of key challenges of CO2 transport via pipelines // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – № 81. – P. 2563–2583.
11. Shchipachev A.M., Nazyrlov A.D. A study of the pipeline in emergency operation and assessing the magnitude of the gas leak // Energies. – 2022. – № 15. – P. 1–15. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/14/5294> (01.09.2022).
12. Gendler S., Prokhorova E. Risk-based methodology for determining priority directions for improving occupational safety in the mining industry of the arctic zone // Resources. – 2021. – V. 10. – № 3. – P. 1–14. DOI: 10.3390/resources10030020.
13. Пашкевич М.А., Коротаяева А.Э. Анализ биологических методов для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 170–182. DOI: 10.46698/VNC.2021.87.18.014.
14. Evaluation on consequences prediction of fire accident in emergency processes for oil-gas storage and transportation by scenario deduction / Changfeng Yuan, Yichao Hu, Yulong Zhang et al. // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2021. – № 5. – P. 4222–4240.
15. Mariusz Laciak et al. Impact of flood water on the technical condition of natural gas transmission pipeline valves // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2020. – № 1. – P. 1–9.
16. Шаммазов И.А., Сидоркин Д.И., Батыров А.М. Анализ существующих конструкций опор надземных магистральных трубопроводов в арктических условиях // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 2 (136). – С. 103–117.
17. Loseva E., Lozovsky I., Zhostkov R. Identifying small defects in cast-in-place piles using low strain integrity testing // Indian Geotechnical Journal. – 2022. – V. 52. – № 2. P. – 270–279.
18. Shchipachev A.M., Method for determining fatigue limit taking into account the effect of a surface layer // Chemical and Petroleum Engineering – 2017. – № 53. – P. 340–346.
19. Bo Liu et al. Seismic response of underground structure–soil–aboveground structure coupling system: current status and future prospects // Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research. – 2022. – № 122. – P. 24.
20. Stetjuha V.A., Zheleznyak I.I. Methodology for calculating the stability of the polymer operating string in permafrost // Journal of Mining Institute. – 2020. – V. 241. – № 1. – P. 22–28. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.22.
21. Syasko V., Shikhov A. Soil deformation model analysis in the processing of the geotechnical results // E3S Web of Conference. – 2021. – V. 266. – № 1. – P. 1–6.
22. Абжалимов Р.Ш. Гипотеза о распределении нормальных сил морозного пучения по подошве твердомерзлого слоя грунта под // Промышленное и гражданское строительство. – 2003. – № 12. – С. 23–26.
23. Васильев Г.Г., Джалыбов А.А., Леонович И.А. Анализ причин возникновения деформаций инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – № 3. – С. 377–385. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.6.
24. Кузнецов О.Ф., Миронов Н.А. Определение деформаций инженерных сооружений // Технические науки – от теории к практике. – 2013. – № 26. – С. 115–123.
25. Колоколова Н.А., Гаррис Н.А. О выборе способа прокладки трубопроводов в районах вечной мерзлоты // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2013. – № 1. – С. 13–17.
26. Jianming Zhang, Guangzhou Qu, Huijun Jin. Estimates on thermal effects of the China–Russia crude oil pipeline in permafrost regions // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – № 64. – P. 243–247. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.10.001
27. Wei Qi et al. Warming winter, drying spring and shifting hydrological regimes in Northeast China under climate change // Journal of Hydrology. – 2022. – V. 606. – № 1. – P. 1–14.
28. Walsha J.E. et al. Extreme weather and climate events in northern areas: a review // Earth-Science Reviews. – 2020. – № 1. – P. 1–19. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103324
29. Fei Wang et al. Pipeline–permafrost interaction monitoring system along the China–Russia crude oil pipeline // Engineering Geology. – 2019. – № 254. – P. 113–122. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.03.013.
30. Ellwood J.R., Nicon J.F. Observations of soil and ground ice in pipeline trench excavations in the South Yukon // Permafrost: 4th int. conf. – Washington, 2016. – № 1. – P. 278–282.
31. Jun Bi et al. A generalized model for calculating the thermal conductivity of freezing soils based on soil components and frost heave // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – № 1. – P. 1–7.
32. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: АН СССР, 1973. – 482 с.
33. Механика мерзлых грунтов и принципы строительства нефтегазовых объектов в условиях севера / Н.Н. Карнаухов, С.Я. Кушнир, А.С. Горелов, Г.М. Долгих. – М.: Изд-во ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 218 с.
34. Yao Zhang et al. Thermal-hydro-mechanical analysis of frost heave and thaw settlement // Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2015. – № 141. – P. 1–11.
35. Selvadurai et al. Computational modelling of frost heave induced soil–pipeline interaction I. Modelling of frost heave // Procedia Engineering. – 1999. – № 29. – P. 229–257.

Поступила 09.09.2022 г.

Прошла рецензирование 19.09.2022 г.

Информация об авторах

Шаммазов И.А., доктор технических наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета.

Сидоркин Д.И., кандидат технических наук, директор Научного центра «Арктика» Санкт-Петербургского горного университета.

Батыров А.М., аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.692.4.053

ENSURING THE STABILITY OF ABOVEGROUND TRUNK PIPELINES IN AREAS OF CONTINUOUS PERMAFROST DISTRIBUTION

Ildar A. Shammazov¹,
shammazov_ia@pers.spmi.ru

Dmitry I. Sidorkin¹,
dmsidorkin@mail.ru

Artur M. Batyrov¹,
batyrovartur@mail.ru

¹ St. Petersburg Mining University,
21 line 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to improve the operational reliability of trunk pipelines laid on permafrost soils. This direction of development of oil and gas transportation and building up the raw material potential is resource-saving, minimizing the amount of operating costs for survey and geomonitoring. Supports of aboveground main pipelines are subjected to loads from the ground due to dangerous cryogenic processes of frost heaving caused by very low temperatures.

The main aim of the research is to determine and propose a support structure for aboveground main pipelines laid on permafrost soils and the possibility of effective use of the sharp edge of the base plate as the aboveground support.

Objects: aboveground main pipeline, permafrost. Soils are characterized by strong heaving and high modulus of deformation.

Methods: modeling of a base plate with frozen soil, assessment and analysis of the fracture stress of frozen rock.

Results. A supporting structure protecting the aboveground main pipeline from the forces of frost heaving is proposed, a base plate with frozen soil is simulated, equivalent stresses of the sharp edge are calculated in the most likely case of cutting expanded clay from the effects of the forces of frost heaving of the soil.

Key words:

Aboveground trunk pipelines, permafrost soil, frost heaving forces, stress-strain state, stress of destruction.

REFERENCES

- Kondratov D.I. Challenges for Russia in the global natural gas market. *Economy. Taxes. Pravo*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 35–44. In Rus. DOI: 10.26794/1999-849X-2022-15-1-35-44.
- Bolobov V.I., Popov V.I. Method of testing pipeline steels for resistance to «stream» corrosion. *Notes of the Mining Institute*, 2021, no. 6, pp. 854–860. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.7.
- Shchipachev A.M., Li D.D. Perspektivy gazoprovoda mezhdru KNR i Respublikoy Koreya [Prospects of gas pipe line between PR China and Korea Republic]. *Neftegaz.ru*, 2020, no. 1, pp. 92–95.
- Cherepovitsyn A.E., Tsvetkov P.S., Evseeva O.O. Critical analysis of methodological approaches to assessing the sustainability of Arctic oil and gas projects. *Notes of the Mining Institute*, 2021, no. 3, pp. 463–478. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15.
- Wei Wang. An open frozen-heave test on the pipeline foundation soils in the permafrost regions. *Natural Gas Industry B*, 2018, no. 1, pp. 219–225. DOI: 10.1016/j.ngib.2018.04.009
- Potapov A.I., Shikhov A.I., Dunaeva E.N. Geotechnical monitoring of frozen soils: problems and possible solutions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, no. 2, pp. 24.
- Gendler S.G., Fazylov I.R., Abashin A.N. Results of experimental studies of the thermal regime of oil mines in the thermal method of oil production. *Mining information and analytical bulletin*, 2022, no. 6, pp. 248–262. In Rus.
- Lin Chen. Characteristics of heat fluxes of an oil pipeline armed with thermosyphons in permafrost regions. *Applied Thermal Engineering*, 2021, no. 1, pp. 146–149.
- Potapov A.I., Shikhov A.I., Dunaeva E.N. Determination of the dynamic modulus of elasticity of permafrost soils during thawing by the kinematic characteristics of an elastic wave. *Control. Diagnostics*, 2021, vol. 24, no. 3 (273), pp. 16–23. In Rus. DOI: 10.14489/td.2021.03.pp.016-023.
- Onyebuchi V.E. A systematic review of key challenges of CO₂ transport via pipelines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, no. 81, pp. 2563–2583.
- Shchipachev A.M., Nazirov A.D. A study of the pipeline in emergency operation and assessing the magnitude of the gas leak. *Energies*, 2022, no. 15, pp. 1–15. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/14/5294> (accessed 1 September 2022).
- Gendler S., Prokhorova E. Risk-based methodology for determining priority directions for improving occupational safety in the mining industry of the arctic zone. *Resources*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 1–14. DOI: 10.3390/resources10030020.
- Pashkevich M.A., Korotaeva A.E. Analysis of biological methods for the purification of quarry wastewater from nitrogen compounds. *Geology and geophysics of the South of Russia*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 170–182. In Rus. DOI: 10.46698/VNC.2021.87.18.014.
- Changfeng Yuan, Yichao Hu, Yulong Zhang et al. Evaluation on consequences prediction of fire accident in emergency processes for oil-gas storage and transportation by scenario deduction. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, no. 5, pp. 4222–4240.
- Mariusz Laciak. Impact of flood water on the technical condition of natural gas transmission pipeline valves. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, no. 1, pp. 1–9.
- Shammazov I.A., Sidorkin D.I., Batyrov A.M. Analysis of existing structures of aboveground main pipelines in arctic conditions. *Problems of collection, preparation and transportation of oil and petroleum products*, 2022, no. 2 (136), pp. 103–117. In Rus.
- Loseva E., Lozovsky I., Zhostkov R. Identifying small defects in cast-in-place piles using low strain integrity testing. *Indian Geotechnical Journal*, 2022, vol. 52, no. 2, pp. 270–279.
- Shchipachev A.M. Method for determining fatigue limit taking into account the effect of a surface layer. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2017, no. 53, pp. 340–346.
- Bo Liu. Seismic response of underground structure–soil–aboveground structure coupling system: current status and future prospects. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2022, no. 122, pp. 24.
- Stetjuha V.A., Zheleznyak I.I. Methodology for calculating the stability of the polymer operating string in permafrost. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, no. 1, pp. 22–28. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.22.
- Syasko V., Shikhov A. Soil deformation model analysis in the processing of the geotechnical results. *E3S Web of Conference*, 2021, vol. 266, no. 1, pp. 1–6.

22. Abzhlimov R.S. Hypothesis on the distribution of normal forces of frost heaving on the sole of a frozen layer of soil under. *Industrial and civil construction*, 2003, no. 12, pp. 23–26. In Rus.
23. Vasiliev G.G., Dzhalayabov A.A., Leonovich I.A. Analysis of the causes of deformations of engineering structures of gas complex facilities in the cryolithozone. *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 249, no. 3, pp. 377–385. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.6. In Rus.
24. Kuznetsov O.F., Mironov N.A. Determination of deformations of engineering structures. *Technical sciences – from theory to practice*, 2013, no. 26, pp. 115–123. In Rus.
25. Kolokolova N.A., Harris N.A. On the choice of the method of laying pipelines in permafrost areas. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2013, no. 1, pp. 13–17. In Rus.
26. Jianming Zhang, Guangzhou Qu, Huijun Jin. Estimates on thermal effects of the China–Russia crude oil pipeline in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, no. 64, pp. 243–247. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.10.001
27. Wei Qi. Warming winter, drying spring and shifting hydrological regimes in Northeast China under climate change. *Journal of Hydrology*, 2022, vol. 606, no. 1, pp. 1–14.
28. Walsh J.E. Extreme weather and climate events in northern areas: a review. *Earth-Science Reviews*, 2020, no. 1, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103324
29. Fei Wang. Pipeline–permafrost interaction monitoring system along the China–Russia crude oil pipeline. *Engineering Geology*, 2019, no. 254, pp. 113–122. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.03.013.
30. Ellwood J.R., Nicon J.F. Observations of soil and ground ice in pipeline trench excavations in the South Yukon. *Permafrost: 4th int. conf.* Washington, 2016. No. 1, pp. 278–282.
31. Jun Bi. A generalized model for calculating the thermal conductivity of freezing soils based on soil components and frost heave. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, no. 1, pp. 1–7.
32. Tsytoich N.A. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1973. 482 p.
33. Karnaukhov N.N., Kushnir S.Ya., Gorelov A.S., Dolgikh G.M. *Mekhanika merzlykh gruntov i printsipy stroitelstva neftegazovykh obektov v usloviyakh severa* [Mechanics of frozen soils and principles of building oil-and-gas objects in the condition of north]. Moscow, CentrLitNefteGaz Publ. House, 2008. 218 p.
34. Yao Zhang. Thermal-hydro-mechanical analysis of frost heave and thaw settlement. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, no. 141, pp. 1–11.
35. Selvadurai. Computational modelling of frost heave induced soil–pipeline interaction I. Modelling of frost heave. *Procedia Engineering*, 1999, no. 29, pp. 229–257.

Received: 9 September 2022.
Reviewed: 19 September 2022.

Information about the authors

Ildar A. Shammazov, Dr. Sc., professor, St. Petersburg Mining University.

Dmitry I. Sidorkin, Cand. Sc., director of the Scientific centre «Arktika», St. Petersburg Mining University.

Artur M. Batyrov, graduate student, St. Petersburg Mining University.