

УДК 622.692.4.053

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4937

Шифр специальности ВАК: 2.8.5

## Обоснование конструкции опоры надземных магистральных трубопроводов, снижающей влияние морозного пучения грунта на сваи

А.М. Батыров<sup>1✉</sup>, М.И. Королев<sup>1</sup>, А.А. Красников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, г. Санкт-Петербург

✉ batyrovartur@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность* определяется необходимостью понимания механизмов взаимодействия трубопроводного транспорта нефти и газа в условиях морозного пучения грунта в регионах Крайнего Севера для решения целого ряда научных и инженерных задач как в настоящее время, так и в перспективе. Причиной, приводящей к аварийным ситуациям и разрушению магистральных трубопроводов, является морозное пучение грунта. В процессе эксплуатации надземных магистральных трубопроводов, проложенных в мерзлых грунтах, морозное пучение вызывает движение опорной части, что приводит к возникновению опасных нагрузок на трубопроводе и, как следствие, к появлению дефектов. Основным методом устранения таких дефектов является применение различных опор, защищающих трубопровод от геологических процессов. В связи с этим необходимо разработать новый тип опорной части для магистральных трубопроводов, которые способны снизить негативное влияние морозного пучения грунта, а также разработать алгоритм расчета данной конструкции. **Цель:** определить эффективность применения клина опоры для защиты от воздействия морозного пучения грунта и разработать алгоритм расчета данной конструкции. **Методы:** статистические методы, рассчитывающие элементы конструкции опоры и определяющие опасные нагрузки линейных участков надземного магистрального трубопровода; оценка вертикальных выдергивающих сил сваи при воздействии сил морозного пучения грунта; оценка нагрузки на трубопроводе при воздействии сил морозного пучения грунта. **Результаты и выводы.** Предложен клин в конструкции опоры надземного магистрального трубопровода, потенциально уменьшающий воздействия сил морозного пучения грунта; предложена последовательность расчета, обеспечивающая подбор предлагаемых конструкций опоры; выполнен расчет нагрузок на линейном участке надземного магистрального трубопровода при условии морозного пучения грунта с клином опоры и без клина.

**Ключевые слова:** надземный магистральный трубопровод, силы морозного пучения, нагрузки на трубопроводе, вертикальная выдергивающая сила сваи, клин опоры

**Для цитирования:** Батыров А.М., Королев М.И., Красников А.А. Обоснование конструкции опоры надземных магистральных трубопроводов, снижающей влияние морозного пучения грунта на сваи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 107–116. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4937

---

UDC 622.692.4.053

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4937

## Substantiation of design of the aboveground main pipeline support reducing frost heaving effect on piles

A.M. Batyrov<sup>1✉</sup>, M.I. Korolev<sup>1</sup>, A.A. Krasnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

<sup>2</sup> Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

✉ batyrovartur@mail.ru

**Abstract. Relevance.** The need to understand the mechanisms of interaction between pipeline transport of oil and gas in conditions of frost heaving in the regions of the Far North in order to solve a number of scientific and engineering problems both now and in the future. The reason leading to emergency situations and the destruction of main pipelines is soil frosty heaving. During the operation of aboveground main pipelines laid in frozen soils, frost heaving causes movement of the supporting part, which leads to dangerous loads on the pipeline and, as a result, to the appearance of defects. The main method of eliminating such defects is the use of various supports that protect the pipeline from geological processes. In this regard, it is necessary to develop a new type of support part for the main pipelines that can reduce the negative impact of frost heaving, as well as develop an algorithm for calculating this design. **Aim.** To determine the effectiveness of using a support wedge to protect against the effects of frost heaving and to develop an algorithm for calculating this design. **Methods.** Statistical methods that calculate the parameters of individual support elements that determine the dangerous loads of linear sections of an aboveground main pipeline; assessment of vertical pile pulling forces under the impact of frost heaving forces; assessment of the load on the pipeline under the effect of frost heaving forces. **Results and conclusions.** The authors have proposed the wedge in the support structure of an aboveground main pipeline, potentially reducing the effects of frost heaving forces, the calculation sequence that ensures the selection of proposed support structures, calculated the loads on a linear section of an aboveground main pipeline under the condition of frost heaving with a support wedge and without a wedge.

**Keywords:** above-ground main pipeline, frost heaving forces, pipeline loads, vertical pile pulling force, support wedge

**For citation:** Batyrov A.M., Korolev M.I., Krasnikov A.A. Substantiation of design of the aboveground main pipeline support reducing frost heaving effect on piles. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 107–116. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4937

## Введение

В статье представлены результаты исследования, посвященные влиянию морозного пучения грунта на надземные магистральные нефтегазопроводы, расположенные на многолетнемерзлых грунтах. Разработан алгоритм расчета опорных конструкций для надземных трубопроводов с учетом нагрузок, вызванных морозным пучением грунта [1]. По итогам исследования запатентованы новые конструкции опор для надземных магистральных трубопроводов [2].

Направление развития транспортировки нефти и газа активно осваивается в северных районах [3, 4]. В процессе эксплуатации надземных магистральных трубопроводов возникает множество дефектов в теле трубы и на ее поверхности [5]. Опоры надземных магистральных трубопроводов подвергаются нагрузкам со стороны грунта из-за морозного пучения, что опасно для целостности трубопровода и окружающей среды [6, 7].

Ежегодно в северных регионах России регистрируется порядка 8 тысяч отказов магистральных трубопроводов, причиной которых становится выдергивание свай опор из-за морозного пучения грунта. На месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа происходит около 2000 аварий ежегодно. На трассе газопровода Ямбург–Ныда доля аварий составляет примерно 6 % от общей протяженности магистрального трубопровода. Кроме того, в первые годы эксплуатации газопровода Мессояха–Норильск было зафиксировано около 130 аварий [8].

При строительстве нефтегазопроводов на сезонно-мерзлых грунтах традиционные опоры теряют свою устойчивость, поскольку повышаются выдергивающие силы свай (рис. 1). Потеря устойчивости

влияет на проектное положение трубопроводов, что приводит к экологическим ущербам, человеческим жертвам и экономическим потерям [9].



**Рис. 1.** Последствия морозного выпучивания опор надземного трубопровода

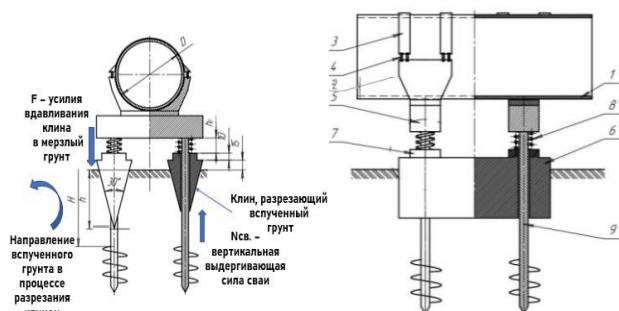
**Fig. 1.** Consequences of frosty heaving of aboveground pipeline supports

На данный момент при морозном пучении грунта применяют опоры с термостабилизаторами, появившиеся в XIX в. Изначально данный метод считался самым простым и эффективным, поскольку требовалось лишь заморозить грунт за счет циркулирующего хладагента в трубках стабилизаторов. Но спустя десятки лет на практике обнаружено, что такие опоры не всегда справляются со своей задачей, а иногда способствуют авариям. К недостаткам таких свай можно отнести то, что они сильно подмораживают грунт, тем самым увеличивается давление, оказываемое морозным пучением на опоры, также необходимо дорогостоящее обслуживание. Один из

известных мировых случаев негативного применения таких свай обнаружен на трассе Трансаляскинского нефтепровода, где эксплуатация термостабилизаторов привела к авариям [10, 11].

До сих пор во всем мире в северных регионах при эксплуатации магистральных нефтегазопроводов происходят аварии из-за морозного пучения грунта, очевидно, что спустя десятки лет проблема выпучивания опор не решена [12, 13]. Также отсутствует последовательность расчета опор надземных магистральных трубопроводов в условиях морозного пучения грунта. В этой связи появилась необходимость разработки конструкции опоры, снижающей влияние морозного пучения грунта на сваи. Предложена последовательность расчетов опор, обеспечивающих эффективный подбор предлагаемых элементов конструкций [14].

Предлагается устройство – опора надземного магистрального трубопровода, способное защитить трубопровод от воздействий сил морозного пучения грунта (рис. 2).



**Рис. 2.** Разработанная опорная конструкция надземного 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.** Developed support structure of the above-ground pipeline: 1 – pipeline; 2 – base; 3 – half-mast; 4 – bolted connection; 5 – grillwork table; 6 – base plate; 7 – washer; 8 – damper; 9 – screw pile

Опора надземного магистрального трубопровода работает следующим образом.

Наиболее важным элементом конструкции опоры, который позволяет защитить надземный трубопровод от воздействий сил морозного пучения, является клин, который начинает противодействовать грунту за счет усилий вдавливания и благодаря своей геометрии разрезает вспученный мерзлый грунт. Характеристики клина: материал клина железобетон марки М450, длина 2,2 м, ширина 0,6 м, высота 1,1 м, угол 30 градусов. Вспученный грунт расходится в разные стороны, таким образом уменьшается опасная нагрузка на опору [14].



**Рис. 3.** Последовательность расчета опор трубопроводов при условии морозного пучения грунта. Для определения силы резания грунта воспользуемся формулой доктора технических наук профессора А.Н. Зеленина, который разработал теорию резания грунтов на основе результатов экспериментальных исследований, для определения жесткости пружин воспользуемся законом Гука

**Fig. 3.** Sequence of calculation of pipeline supports under the condition of soil frost heaving. To determine the cutting force of the soil, we will use the formula of A.N. Zelenin, Dr. Sc., Professor, who developed the theory of soil cutting based on the results of experimental studies, the Hooke's law is used to determine the stiffness of springs

При проектировании предлагаемых опор предложен алгоритм расчета (рис. 3), учитывающий нагрузки морозного пучения грунта на трубопровод. Данный алгоритм позволяет определить напряжения в линейных участках надземного магистрального трубопровода в условиях морозного пучения с учетом выбранных опор, а также рассчи-

тать вертикальные выдергивающие силы свай, оптимальную длину клина и жесткость пружин демпфера опоры.

Для начала необходимо рассчитать общую силу на опору от трубопровода и веса самой трубы с учетом флюида (углеводорода), транспортируемого по трубопроводу, по формуле (1) [15]:

$$F_{\text{тр.}} = q_{\text{тр}} + q_{\text{погоды}}, \quad (1)$$

где  $q_{\text{тр}}$  – нагрузка трубопровода;  $q_{\text{погоды}}$  – нагрузка на трубопровод в зависимости от погодных условий.

Следующим этапом определяется сила морозного пучения грунта, действующая на сваи опоры, по СП 22.13330.2016 и [16].

Чтобы зафиксировать необходимую силу для резания грунтов, которая должна быть больше общей нагрузки на опору, воспользуемся формулой (2) [17]:

$$F_p = 10 \cdot C \cdot h^{1,35} \cdot (1 + 2,6 \cdot \ell) \times \\ \times (1 + 0,0075 \cdot \alpha) \cdot (1 + 0,03 \cdot b) \cdot v \cdot \mu, \quad (2)$$

где  $C$  – коэффициент крепости;  $h$  – глубина резания;  $\ell$  – длина периметра;  $\alpha$  – угол резания град;  $b$  – толщина боковых стенок клина;  $v$  – величина, учитывающая угол заострения боковых стенок;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий влияние способа резания.

Для безопасной эксплуатации опоры рассчитываем силы  $F_{\text{rf}}$ , кН, удерживающей сваи от выпучивания, по формуле (3) [18]:

$$F_{\text{rf}} = u \sum_{i=1}^n f_i h_i, \quad (3)$$

где  $u$  – периметр сечения поверхности сдвига, м, принимаемый равным периметру сечения свай;  $f_i$  – расчетное сопротивление  $i$ -го слоя талого грунта сдвигу по поверхности свай, кПа;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя талого грунта, расположенного ниже подошвы слоя промерзания, м.

Для понимания, на какое расстояние возможно смещение опоры, рассчитываем подъем основания от пучения по формуле (4) [19]:

$$h_{\text{с.п}} = e \cdot d, \quad (4)$$

где  $e$  – относительная деформация пучения грунта;  $d$  – глубина сезонномерзлого грунта.

В связи с использованием в предлагаемой опоре пружинного демпфера для компенсации нагрузок, возникающих от колебаний клина, требуется определить нагрузку на демпфер с применением формулы (5) [20]:

$$F_{\text{пр}} = y \cdot 0,5 \cdot (l_1 + l_2) + j \cdot Y, \quad (5)$$

где  $y$  – вес трубопровода, кгс/м;  $l_1$  и  $l_2$  – пролеты опоры, м;  $Y$  – вес ростверка опоры, кгс;  $j$  – доля веса арматуры, передаваемая на эту опору.

Для расчета жесткости пружин демпфера, которые передают нагрузку от трубопровода к клину опоры с учетом подъема основания из-за морозного пучения грунта, используется формула (6) [21]:

$$K = F_{\text{тр}} / (L - h_{\text{с.п}}), \quad (6)$$

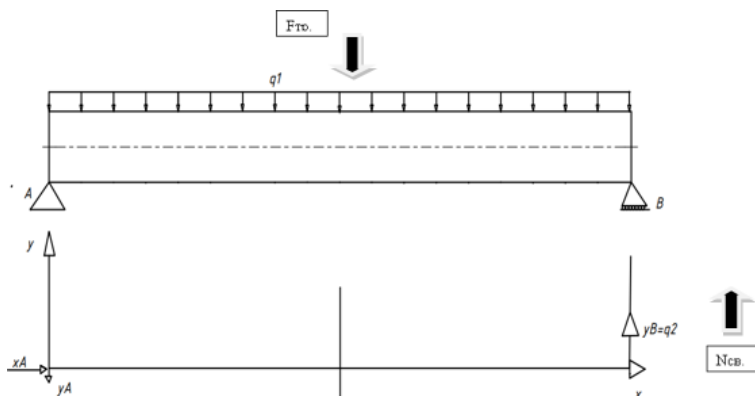
где  $h_{\text{с.п}}$  – подъем основания опоры, м;  $L$  – длина пружин, м;  $F_{\text{тр}}$  – нагрузка на пружины от трубопровода, Н.

Поскольку на трубопровод влияет сила морозного пучения грунта через сваи опоры, необходимо рассчитать вертикальные выдергивающие силы формуле (7) [22]:

$$N = \tau_{\text{пуч.}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H, \quad (7)$$

где  $r$  – радиус свай, м;  $H$  – длина свай в толщине сезонномерзлого грунта с учетом защищающей части свай клином опоры;  $\tau_{\text{пуч.}}$  – касательные силы морозного пучения грунта.

Заключительным этапом предлагаемого алгоритма является определение возникающих нагрузок на трубопроводе при воздействии сил морозного пучения грунта. Для расчета необходимой нагрузки разработана эпюра с силами, которые оказывают воздействие на трубопровод (рис. 4), с последовательностью уравнений по формулам (8)–(10):



**Рис. 4.** Нагрузки на трубопроводе при воздействии сил морозного пучения грунта  
**Fig. 4.** Loads on the pipeline under the impact of frost heaving forces

Находим  $y_b$  через момент силы

$$\Sigma M_a = -q_1 \cdot 1 \cdot 1/2 + y_b \cdot 1 + q_2 \cdot 1 \cdot 1/2, \quad (8)$$

$$y_b = (q_1 \cdot 1/2 - q_2 \cdot 1/2),$$

где  $q_1$  и  $q_2$  – распределенная нагрузка, действующая со стороны трубы и со стороны грунта, Н/м.

Перепишем это уравнение следующим образом:  
Так как

$$Q = q \cdot l. \quad (9)$$

Уравнение примет следующий вид:

$$y_b = (Q_1/2 - Q_2/2), \quad (10)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – сосредоточенная нагрузка, действующая со стороны трубы и со стороны грунта, соответственно, Н;  $y_b = (Q_1/2 - Q_2/2)$  – определяемая нагрузка на трубопроводе.

Для расчета нагрузки на трубопроводе заменим  $Q_1$  на  $F_{тр}$ , а вместо  $Q_2$  подставим  $N_{св}$  и получим необходимую формулу (11):

$$Q = (F_{тр} - N)/2, \quad (11)$$

где  $N$  – вертикальная выдергивающая сила сваи, равнозначная удельной нагрузке  $Q_2$ ;  $F_{тр}$  – нагрузка трубопровода, равнозначная удельной нагрузке  $Q_1$ .

Данная последовательность расчета позволяет вычислить вертикальные выдергивающие силы сваи и нагрузки, возникшие на трубопроводе, вызванные морозным пучением грунта, а также подобрать необходимые длину клина и жесткость пружин демпфера опорной конструкции трубопровода.

В качестве примера рассчитаем необходимую жесткость пружин и определим длину клина за счет вычислений вертикальных выдергивающих сил сваи при воздействии сил морозного пучения грунта.

Для вычислений нам потребуются следующие данные: нагрузка трубопровода на одну сваю 150 кН; радиус сваи 0,1 м; длина пружины 1 м; подъем основания опоры 0,05 м; длина сваи в толщине сезонно-мерзлого грунта 2,5 м; длина сваи без перекрытой части клином в толщине сезонно-мерзлого грунта (при разной длине клина в мерзлом слое грунта); удерживающая способность сваи 136 кН; касательные силы морозного пучения грунта при условии сезонного промерзания и несливающейся мерзлоты 70, 90, 110, 140, 150 кПа. Для расчета жесткости пружин демпфера воспользуемся формулой (6):

$$K = 150 / (1 - 0,05) = 157,8 \text{ кН/м.}$$

Для конструкции опоры достаточно подобрать пружины с минимальной жесткостью 157,8 кН/м, поскольку при такой жесткости пружина не будет сжиматься от вертикальных нагрузок.

Для эффективности применения опоры при максимальной силе морозного пучения грунта необхо-

димо подобрать длину клина так, чтобы выполнялись условия: удерживающая способность сваи была больше выдергивающей силы и нагрузки на трубопроводе имели положительные значения. Полученные нагрузки с отрицательным знаком означают появление опасных изгибающих напряжений стенки трубопровода, которые приводят к деформации.

Для оценки вертикальных выдергивающих сил и нагрузок, возникших на трубопроводе вследствие влияния морозного пучения грунта, предлагается сравнить силы, оказываемые на сваи как без учета предлагаемой конструкции, так и с учетом опоры с клином, используя формулы (7) и (11).

Результаты расчетов представлены в виде диаграмм, на которых показана зависимость вертикальных выдергивающих сил сваи от наличия защитного элемента в конструкции опоры и длины клина при воздействии морозного пучения грунта (рис. 5–8). Нагрузки на трубопровод при этом напрямую зависят от величины выдергивающих сил сваи.

Диаграмма расчетов с длиной клина 0,5 м представлена на рис. 5.

По полученным результатам видно, что клин длиной 0,5 м справляется при силе морозного пучения в интервале от 70 до 90 кПа, поскольку вертикальная выдергивающая сила сваи меньше удерживающей способности. На трубопроводе наблюдаются нагрузки с положительным значением только в диапазоне от 31 до 6 кН при вертикальных выдергивающих силах сваи до 138 кН, в остальных случаях нагрузка принимает отрицательное значение. Так как выполняется только одно условие, эффективность длины клина 0,5 м возможна только при силах морозного пучения до 90 кПа.

Диаграмма расчетов с длиной клина 0,7 м представлена на рис. 6.

По полученным результатам видно, что клин длиной 0,7 м справляется при силе морозного пучения в интервале от 70 до 110 кПа, поскольку вертикальная выдергивающая сила сваи меньше удерживающей способности. На трубопроводе наблюдаются нагрузки с положительным значением только в диапазоне от 35,5 до 13 кН при вертикальных выдергивающих силах сваи до 124 кН, в остальных случаях нагрузка принимает отрицательное значение. Так как выполняется только одно условие, эффективность длины клина 0,7 м возможна только при силах морозного пучения до 110 кПа.

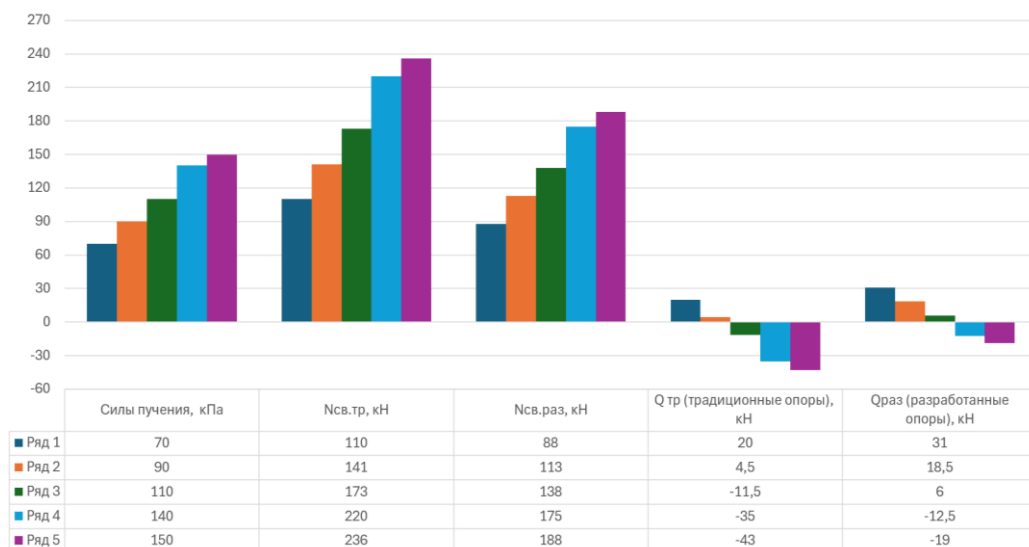
Диаграмма расчетов с длиной клина 1 м представлена на рис. 7.

По полученным результатам видно, что клин длиной 1 м справляется при силе морозного пучения в интервале от 70 до 140 кПа, поскольку вертикальная выдергивающая сила сваи меньше удержи-

вающей способности. На трубопроводе наблюдаются нагрузки с положительным значением только в диапазоне от 42 до 4,5 кН при вертикальных выдергивающих силах сваи до 141 кН, в остальных случаях нагрузка принимает отрицательное значение.

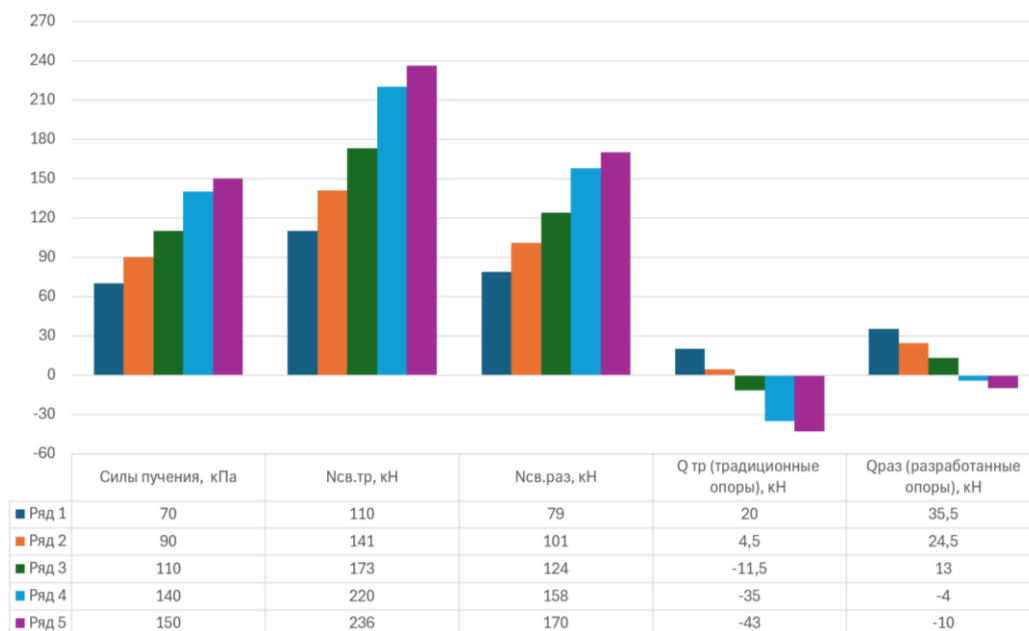
Так как выполняется только одно условие, эффективность длины клина 1 м возможна только при силах морозного пучения до 140 кПа.

Диаграмма расчетов с длиной клина 1,1 м представлена на рис. 7.



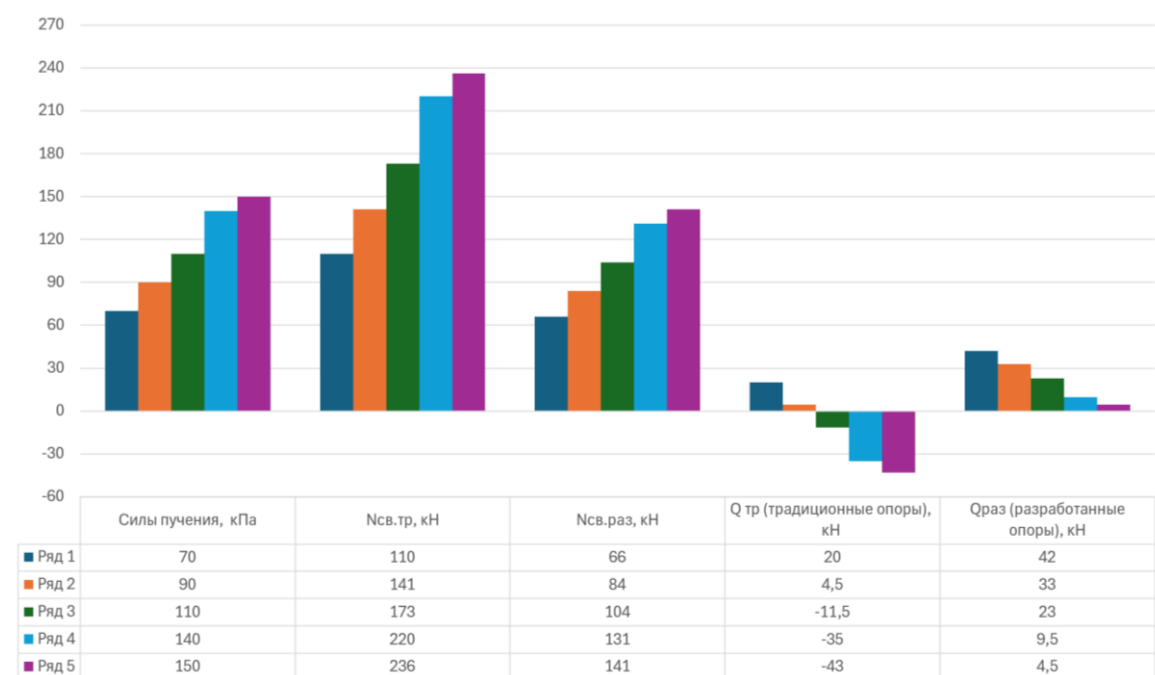
**Рис. 5.** Диаграмма морозного пучения грунта в интервале от 70 до 150 кПа, вертикальных выдергивающих сил сваи без клина в интервале от 110 до 236 кН и с клином в интервале от 88 до 188 кН, нагрузки на трубопроводе с опорами без клина в интервале от 20 до -43 кН и с клином в интервале от 31 до -19 кН

**Fig. 5.** Diagram of soil frost heaving in the range from 70 to 150 kPa, vertical pulling forces of a pile without a wedge in the range from 110 to 236 kN and with a wedge in the range from 88 to 188 kN, loads on a pipeline with supports without a wedge in the range from 20 to -43 kN and with a wedge in the range from 31 to -19 kN



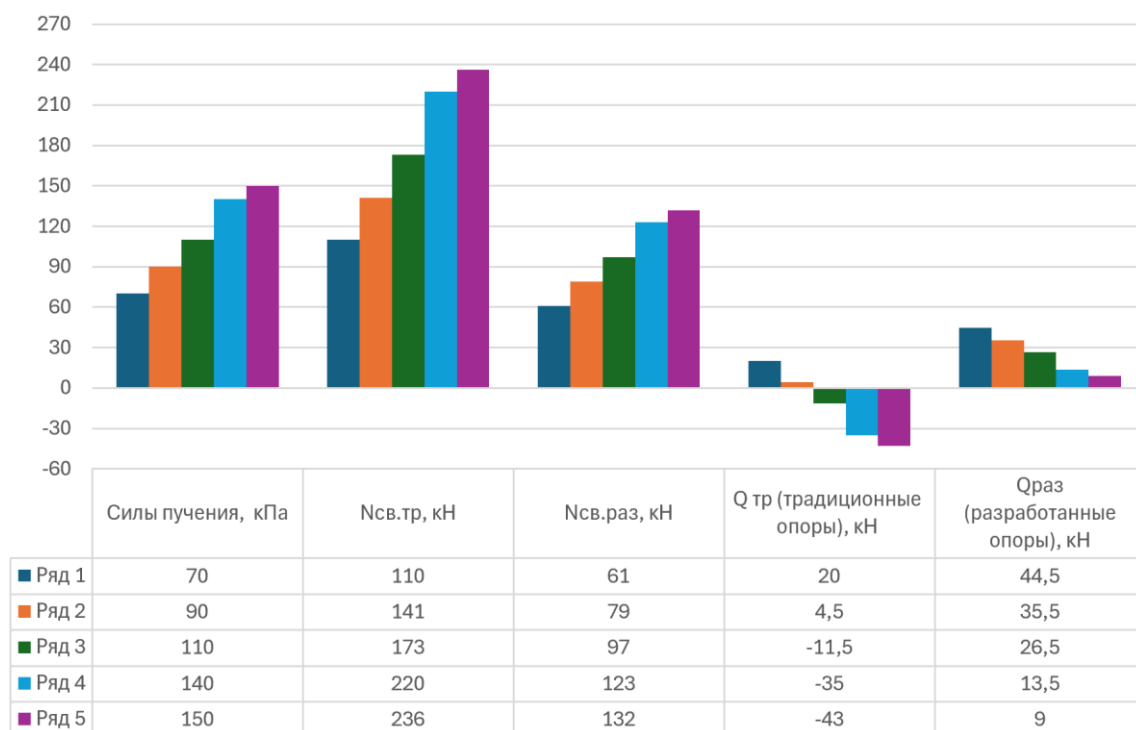
**Рис. 6.** Диаграмма морозного пучения грунта в интервале от 70 до 150 кПа, вертикальных выдергивающих сил сваи без клина в интервале от 110 до 236 кН и с клином в интервале от 79 до 170 кН, нагрузки на трубопроводе с опорами без клина в интервале от 20 до -43 кН и с клином в интервале от 35,5 до -10 кН

**Fig. 6.** Diagram of soil frost heaving in the range from 70 to 150 kPa, vertical pulling forces of a pile without a wedge in the range from 110 to 236 kN and with a wedge in the range from 79 to 170 kN, loads on a pipeline with supports without a wedge in the range from 20 to -43 kN and with a wedge in the range from 35.5 to -10 kN



**Рис. 7.** Диаграмма морозного пучения грунта в интервале от 70 до 150 кПа, вертикальных выдерживающих сил сваи без клина в интервале от 110 до 236 кН и с клином в интервале от 66 до 141 кН, нагрузки на трубопроводе с опорами без клина в интервале от 20 до –43 кН и с клином в интервале от 42 до 4,5 кН

**Fig. 7.** Diagram of soil frost heaving in the range from 70 to 150 kPa, vertical pulling forces of a pile without a wedge in the range from 110 to 236 kN and with a wedge in the range from 66 to 141 kN, loads on a pipeline with supports without a wedge in the range from 20 to –43 kN and with a wedge in the range from 42 to 4.5 kN



**Рис. 8.** Диаграмма морозного пучения грунта в интервале от 70 до 150 кПа, вертикальных выдерживающих сил сваи без клина в интервале от 110 до 236 кН и с клином в интервале от 61 до 132 кН, нагрузки на трубопроводе с опорами без клина в интервале от 20 до –43 кН и с клином в интервале от 44,5 до 9 кН

**Fig. 8.** Diagram of soil frost heaving in the range from 70 to 150 kPa, vertical pulling forces of a pile without a wedge in the range from 110 to 236 kN and with a wedge in the range from 61 to 132 kN, loads on a pipeline with supports without a wedge in the range from 20 to –43 kN and with a wedge in the range from 44.5 to 9 kN

По полученным результатам видно, что клин длиной 1,1 м справляется при силе морозного пучения в интервале от 70 до 150 кПа, поскольку вертикальная выдерживающая сила сваи меньше удерживающей способности. На трубопроводе наблюдаются нагрузки с положительным значением в диапазоне от 44,5 до 9 кН при вертикальных выдерживающих силах сваи до 132 кН. Выполняется два условия, следовательно, эффективность длины клина 1,1 м возможна при максимальной силе морозного пучения 150 кПа.

Таким образом, клин опоры с длиной 1,1 м за счет своей длины перекрывает необходимую площадь сваи, чтобы обеспечить устойчивость опоры, тем самым сохранить проектное положение трубопровода. Данный расчет показывает потенциальную возможность снижения влияния морозного пучения на трубопровод путем уменьшения вертикальных выдерживающих сил свай.

По результатам вычислений выявлено:

1. Вертикальные выдерживающие силы сваи снижаются в зависимости от длины клина опоры.
2. Нагрузки на трубопроводе начинают возрастать в зависимости от сил морозного пучения грунта.
3. Нагрузки на трубопроводе, возникающие при морозном пучении грунта, напрямую зависят от вертикальных выдерживающих сил сваи, что в свою очередь позволяет спрогнозировать рост или падение опасных нагрузок в зависимости от длины клина опоры.

## Заключение

Основная часть современной научной литературы фокусируется на изучении процессов пучения грунта при эксплуатации трубопроводов в северных регионах. В то же время в доступных источниках отсутствуют работы, посвященные исследованию устойчивости опор надземных магистральных трубопроводов под воздействием сил морозного пучения грунта.

Для обеспечения надежной эксплуатации надземных магистральных нефтепроводов на сезонномерзлых грунтах необходимо учитывать воздействие морозного пучения грунта. Для различных типов грунтов с разной степенью морозного

пучения длина клина опоры должна быть выбрана так, чтобы минимизировать контакт вспученного грунта со сваями. Таким образом, необходимо подобрать оптимальные размеры клина опоры, чтобы снизить влияние морозного пучения на магистральный трубопровод. Стоит добавить, что для эффективного подбора элементов конструкции опоры, особенно клина, важным является определение нужной длины в зависимости от сил морозного пучения и глубины промерзания грунта, так как при сильном морозном пучении грунта клин с недостаточной длиной не полностью справится со своей задачей и вертикальная выдерживающая сила сваи начнет оказывать негативное воздействие на трубопровод. В этой связи предложена последовательность расчета опор надземных магистральных трубопроводов. Также в предлагаемой опорной конструкции предусмотрен демпфер, который необходим для передачи нагрузки от трубопровода на клин для усилий вдавливания клина в грунт в момент оказываемой нагрузки грунта в процессе морозного пучения. Для определения оптимальной жесткости пружин предложен расчет, который предусмотрен в предлагаемом алгоритме.

Предложенный алгоритм расчета для разработанной опоры надземного магистрального трубопровода позволяет на стадии проектирования рассчитать опасные нагрузки на трубопроводе при воздействии сил морозного пучения грунта, исключить возможные дефекты и аварии, также аргументирует применение разработанных конструкций опор в отличие от традиционных. На основании полученных результатов на текущем этапе можно сделать вывод:

1. Результаты расчетов опоры, выполненные для разработанного алгоритма, подтверждают потенциальную возможность использования клина в качестве основания для надземной опоры при условиях морозного пучения грунта.
2. При проектировании надземных магистральных трубопроводов, прокладываемых в условиях Крайнего Севера, используя разработанные конструкции опор с клином, следует применить данный алгоритм для эффективного расчета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № RU 2023663247 Российская Федерация. Программа расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения. № 2023661892: заявл. 08.06.2023, дата регистрации: 21.06.2023 / 194 кб.
2. Патент РФ на изобретение № 2781733 C1. Опора надземного магистрального трубопровода / МПК F16L 3/10, F16L 3/205. Оpubл. 17.10.2022.
3. Fetisov V. Analysis of numerical modeling of steady-state modes of methane–hydrogen mixture transportation through a compressor station to reduce CO<sub>2</sub> emissions // Scientific Reports. – 2024. – 10605. – P. 1–21. DOI: 10.1038/s41598-024-61361-3
4. Wong P.K., Thevaragavan M. Lateral deformation and stability of embankments supported on controlled modulus columns // International Conference on Ground Improvement & Ground Control. – 2012. – P. 1–6. DOI: 10.3850/978-981-07-3559-3\_02-0226
5. Основания и фундаменты сооружений на вечноммерзлых грунтах. 2-е изд. доп. и перераб. / С.А. Кудрявцев, Т.Ю. Вальцева, А.В. Кажарский и др. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – 43 с.

6. Оптимизация проектных решений при прокладке магистральных трубопроводов в условиях островной и прерывистой мерзлоты / Х.Ш. Шамилов, Р.М. Каримов, А.К. Гумеров, А.Р. Валеев, Р.Р. Ташбулатов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – № 11 (2). – С. 136–144.
7. Suebsuk J., Horpibulsuk S., Liu D. Modified structured cam clay: a generalised critical state model for destructured, naturally structured and artificially structured clays // Computers and Geotechnics. – 2010. – Vol. 37 (7). – P. 956–968.
8. Новичков А.В., Токарев А.П., Гаррис Н.А. Улучшение условий эксплуатации трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 4 (138). – С. 76–88.
9. Оценка потенциального ущерба почвам от аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на территории Арктического региона / М.А. Невская, В.В. Беляев, С.Н. Пастернак, В.В. Виноградова, Д.И. Шагидулина // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2024. – № 3. – С. 107–122. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2024.85.007
10. Ruixia He, Jin Huijun. Permafrost and cold-region environmental problems of the oil product pipeline from Golmud to Lhasa on the Qinghai–Tibet Plateau and their mitigation // Cold Regions Science and Technology. – 2014. – Vol. 64. – P. 279–288.
11. Shakeel M., Ng C.W.W. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay // Computers and Geotechnics. – 2018. – Vol. 96. – P. 55–72.
12. Comparison of coupled flow-deformation and drained analyses for road embankments on CMC improved ground / H. Mahdavi, B. Fatahi, H. Khabbaz, P. Vincent, R. Kelly // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 143. – P. 462–469. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.058
13. Nguyen L.D., Fatahi B., Khabbaz H. A constitutive model for cemented clays capturing cementation degradation // International Journal of Plasticity. – 2014. – Vol. 56. – P. 1–18.
14. Батыров А.М. Разработка опорных конструкций надземных магистральных трубопроводов, снижающих влияние морозного пучения грунта: дис. ... канд. тех. наук. – СПб, 2024. – 128 с.
15. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85\* Актуализированная редакция / Минрегион России. Введ. 01.01.2013. – М., 2012. – 92 с.
16. СП 22.13330.2016. Свод правил по основаниям зданиям и сооружениям. – М.: Минрегион России, 2016. – 160 с.
17. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 1968. – 198 с.
18. СП 24.13330.2021. Свод правил по свайным фундаментам. – М.: Минстрой России, 2022. – 82 с.
19. Алексеев А.Г., Виноградов С.А. Проектирование оснований фундаментов на пучинистых грунтах. – М.: Изд-во АО «КТБ ЖБ», АО «НИЦ «Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсегова, 2019. – 56 с.
20. РТМ 24.038.12-72. Руководящий технический материал по выбору упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения. – М.: Минтяжмаш, 1973. – 26 с.
21. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines / I.A. Shammazov, A.M. Batyrov, D.I. Sidorkin, T. Van Nguyen // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – P. 1–18. DOI: 10.3390/app13053139.
22. ОДМ 218.3.103-2018. Отраслевой дорожный методический документ рекомендации по применению винтовых свай на автомобильных дорогах. – М.: 2018. – 105 с.

### Информация об авторе

**Артур Магомедович Батыров**, кандидат технических наук, доцент Высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; batyrovartur@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9864-2475>

**Максим Игоревич Королев**, кандидат технических наук, руководитель Высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; m\_korolev@ugrasu.ru

**Антон Андреевич Красников**, аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия 2; anton.krasnikov.97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3632-9345>

Поступила в редакцию: 24.12.2024

Поступила после рецензирования: 14.01.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

### REFERENCES

1. Batyrov A.M., Sidorkin D.I., Boikov A.V. A program for calculating the supports of aboveground main pipelines laid on permafrost soils under conditions of frost heaving. No. 2023661892, 2023. (In Russ.)
2. Shammazov I.A., Sidorkin D.I., Batyrov A.M. Aboveground main pipeline support. Patent RF, no. 2781733, 2022. (In Russ.)
3. Fetisov V. Analysis of numerical modeling of steady-state modes of methane–hydrogen mixture transportation through a compressor station to reduce CO<sub>2</sub> emissions. *Scientific Reports*, 2024, 10605, pp. 1–21. DOI: 10.1038/s41598-024-61361-3
4. Patrick W., Thevaragavan M. Lateral deformation and stability of embankments supported on controlled modulus columns. *International Conference on Ground Improvement & Ground Control*, 2012, pp. 1–6. DOI: 10.3850/978-981-07-3559-3\_02-0226
5. Kudryavtsev S.A., Vyaltseva T.Y., Kozharsky A.V. *Foundations and bases of structures on permafrost soils*. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2015. 43 p. (In Russ.)
6. Shamilov H.S., Karimov R.M., Gumerov A.K., Valeev A.R., Tashbulatov R.R. Optimization of design solutions for laying main pipelines in conditions of island and intermittent permafrost. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 136–144. (In Russ.) DOI: 10.28999/2541-9595-2021-11-2-136-144.

7. Suebsuk J., Horpibulsuk S., Liu M. Modified structured cam clay: a generalised critical state model for destructured, naturally structured and artificially structured clays. *Computers and Geotechnics*, 2010, vol. 37 (7), pp. 956–968. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.08.002
8. Novikov A.V., Tokarev A.P., Harris N.A. Improving the operating conditions of pipelines on permafrost soils. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and petroleum products*, 2022, no. 4 (138), pp. 76–88. DOI: 10.17122/ntj-oil-2022-4-76-8
9. Nevskaya M.A., Belyaev V.V., Pasternak S.N., Vinogradova V.V., Shagidullina D.I. Assessment of potential damage to soils from accidental oil and petroleum product spills in the Arctic region. *North and market: the formation of an economic order*, 2024, no. 3, pp. 107–122. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2024.85.007
10. Ruixia H., Huijun J. Permafrost and cold-region environmental problems of the oil product pipeline from Golmud to Lhasa on the Qinghai–Tibet Plateau and their mitigation. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, vol. 64, pp. 279–288.
11. Shakeel M., Ng W. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay. *Computers and Geotechnics*, 2018, vol. 96, pp. 55–72.
12. Mahdavi1 H., Fatahi B., Khabbaz H., Vincent P., Kelly R. Comparison of coupled flow-deformation and drained analyses for road embankments on CMC improved ground. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 143, pp. 462–469. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.058.
13. Nguyen L., Fatahi B., Khabbaz H. A constitutive model for cemented clays capturing cementation degradation. *International Journal of Plasticity*, 2014, vol. 56, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.01.007
14. Batyrov A.M. *Development of support structures of aboveground main pipelines that reduce the effect of frost heaving of soil*. Cand. Dis. St. Petersburg, 2024. 128 p. (In Russ.)
15. SP 36-13330-2012. *Code of rules for main pipelines*. Moscow, Standartinform of Russia Publ., 2012. 92 p. (In Russ.)
16. SP 22-13330-2016. *Code of rules for foundations of buildings and structures*. Moscow. Standartinform of Russia Publ., 2019. 160 p. (In Russ.)
17. Zelenin A.N. *Fundamentals of soil destruction by mechanical methods*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 375 p. (In Russ.)
18. SP 24-13330-2021. *Set of rules on pile foundations*. Moscow, Ministry of Regional Development Publ., 2022. 82 p. (In Russ.)
19. Alekseev A.G., Vinogradov S.A. *Designing the foundations of foundations on deep soils*. Moscow, KTB ZhB Publ., 2019. 56 p. (In Russ.)
20. RTM 24.038-12-72. *Technical guidance on the selection of elastic supports for pipelines of thermal and nuclear power plants*. Moscow, Ministry of Heavy, Energy and Transport Engineering of Russia Publ., 1973. 26 p. (In Russ.)
21. Shammazov I.A., Batyrov A.M., Sidorkin D.I., Van Nguyen T. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, DOI: 10.3390/app13053139.
22. ODM 218.3-103-2018. *Industry Road guidance document recommendations for the use of screw piles on highways*. Moscow, Rosavtodor of Russia Publ., 2018. 105 p. (In Russ.)

#### Information about the author

**Artur M. Batyrov**, Cand. Sc., Associate Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; batyrovartur@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9864-2475>

**Maxim I. Korolev**, Cand. Sc., Head of the High Oil School, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; m\_korolev@ugrasu.ru

**Anton A. Krasnikov**, Post-graduate Student, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, Vasilyevsky Island, 21 line, 2, St. Petersburg, 199106, Russian Federation; anton.krasnikov.97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3632-9345>

Received: 24.12.2024

Revised: 14.01.2024

Accepted: 19.03.2025