

EDN: BIVCAK

УДК 624.139

Thermal Performance Assessment of Pile Foundations in Permafrost Soils

Rashit A. Nazirov, Aleksei M. Zhzhonykh,
Petr Yu. Vede* and Anastasiya G. Andyuseva
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 01.03.2023, received in revised form 21.06.2023, accepted 03.07.2023

Abstract. Recent research suggests that air temperatures in the Arctic are rising, leading to thawing and degradation of permafrost soils. Studies carried out in the city of Norilsk show that the degradation of permafrost poses significant risks to existing infrastructure, particularly in relation to the bearing capacity of pile foundations and ground deformation. However, in addition to climate change, improper building operation and urban network management also play a significant role in foundation deformations and infrastructure failures.

This paper presents the results of a numerical analysis of the temperature distribution along the piles and surrounding soil after 10 years of operation of a new building. The results show that the presence of piles in the ground reduces the soil temperature due to the higher thermal conductivity of reinforced concrete, thereby contributing to soil temperature stabilisation under the building. However, the study did not confirm the melting of permafrost caused by the building's foundation. The primary cause of the degradation of the ground foundation is likely to be the violation of normal building operation and engineering systems.

Keywords: thermal analysis, pile foundation, permafrost soils, permafrost degradation, numerical simulation.

Citation: Nazirov, R. A., Zhzhonykh, A. M., Vede, P. Yu. and Andyuseva, A. G. Thermal performance assessment of pile foundations in permafrost soils. J. Sib. Fed.Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(5), 535–541. EDN: BIVCAK



Теплотехнический расчет свайного фундамента на вечномерзлых грунтах

**Р. А. Назиров, А. М. Жжоных,
П. Ю. Веде, А. Г. Андюсева**

*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Современные исследования свидетельствуют о росте температуры воздуха в арктической зоне, что приводит к увеличению протаивания и деградации вечномерзлых грунтов. Исследования несущей способности свайных фундаментов и деформаций основания зданий в городе Норильске показывают, что деградация вечномерзлых грунтов приводит к рискам для существующей инфраструктуры. Однако помимо изменений климата неправильная эксплуатация зданий и городских сетей также играет значительную роль в деформациях фундаментов и нарушении инфраструктуры. В работе приведены результаты численного расчета температурного распределения по свае и грунту вдали от свайного поля через 10 лет эксплуатации нового здания. Результаты показывают, что наличие свай в грунте снижает его температуру из-за более высокой теплопроводности железобетона и, как следствие, способствует стабилизации температуры грунта под зданием. Расчеты не подтверждают растепление многолетнемерзлых грунтов, вызванное фундаментом здания. Основной причиной деградации грунтового основания под зданием может стать нарушение нормальной эксплуатации здания и инженерных систем.

Ключевые слова: растепление грунтов, свайный фундамент, численное моделирование.

Цитирование: Назиров Р. А. Теплотехнический расчет свайного фундамента на вечномерзлых грунтах / Р. А. Назиров, А. М. Жжоных, П. Ю. Веде, А. Г. Андюсева // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(5). С. 535–541. EDN: BIVCAK

Введение

Глобальное повышение температуры в арктической зоне приводит к увеличению протаивания и деградации вечномерзлых грунтов. Согласно данным наблюдений на площадках на территории РФ в рамках Международной программы мониторинга CALM, в 21 веке происходит устойчивое увеличение глубины оттаивания вечной мерзлоты [1]. В период с 1990-х по 2020 гг. в Арктических регионах России наблюдается рост среднегодовой температуры воздуха – около 0,8 °С за 10 лет [2], а температура вечной мерзлоты растет со скоростью около 0,5 °С за 10 лет [3].

Увеличение глубины протаивания вечной мерзлоты и соответствующие процессы деградации грунтов приводят к значительным рискам для существующей инфраструктуры городов Севера. Исследования Н. С. Никифорова и А. В. Коннова [4] несущей способности свайных фундаментов и деформаций основания зданий в Норильске, возведенных по 1 принципу (многолетнемерзлые грунты основания используются в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения, или с допущением их промораживания в период строительства и эксплуатации), показали, что на текущий момент для зданий 60–80-х гг. постройки снижение несущей способности оснований свайных фундаментов достигает 25 %, а в среднем по регионам остается на уровне 10–20 %. Существуют риски снижения несущей способности до 50 % за 60 лет. Так, количе-

ство зданий в г. Норильске, получивших повреждения в последние 10 лет, оказалось выше, чем за предшествующие 50 лет. Эти изменения можно сопоставить с имевшими место изменениями температуры воздуха в криолитозоне России, региональные особенности которых рассмотрены в ряде работ [5].

В исследовании [6] видим, что натурные измерения температур для 48 жилых зданий в Норильске показали прогрессивную деградацию вечномёрзлых грунтов основания в 70 % случаев.

С другой стороны, авторы работы [7] на основании анализа собственных расчетов делают вывод о «сохранении вечной мерзлоты даже при негативном сценарии потепления климата». Также в исследовании [8] отмечается, что, несмотря на процессы повышения температуры грунтов основания в криолитозоне и соответствующее сокращение их несущей способности, деформации фундаментов и нарушения инфраструктуры во многом связаны с неправильной эксплуатацией как самих зданий, так и городских сетей, протечки на которых приводят к быстрому растеплению грунтов и значительным деформациям и разрушениям.

Таким образом, актуальной представляется задача выявления причин потери устойчивости эксплуатируемых зданий, возведенных по первому принципу на свайных фундаментах.

Основной целью работы являлась расчетная оценка температурного режима грунта под подошвой свай с учетом основных требований строительных правил и результатов последних исследований.

Методы

В качестве расчетного объекта принято свайное поле жилого дома в г. Норильске и грунт «свободный от фундамента» с теми же геологическими условиями. Моделирование осуществлялось с применением численных методов. Температурные распределения в среде описываются уравнением теплопроводности:

$$\frac{dT}{dt} - \alpha \nabla^2 T = f(r, t), \quad (1)$$

где α – коэффициент температуропроводности, м²/с; T – температура в точке r в момент времени t , К; $f(r, t)$ – функция источников тепла.

Начальные температуры областей заданы согласно мониторинговым данным. На поверхности грунта и фундамента задавалось граничное условие 3-го рода:

$$q_{\text{пов}} = h(T_{\text{ext}} - T), \quad (2)$$

где h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_{ext} – температура наружного/внутреннего воздуха, К.

В качестве наружных температур применялся годовой ход температур в г. Норильске (рис. 1). Температура внутри помещения и коэффициенты теплоотдачи приняты согласно строительным нормам.

Сопоставлением получаемого температурного градиента по глубине грунта с натурными данными мониторинга в г. Норильске была определена величина теплового потока из недр на глубине 23 м. В дальнейших расчетах это значение принято в качестве граничного условия 2-го рода.

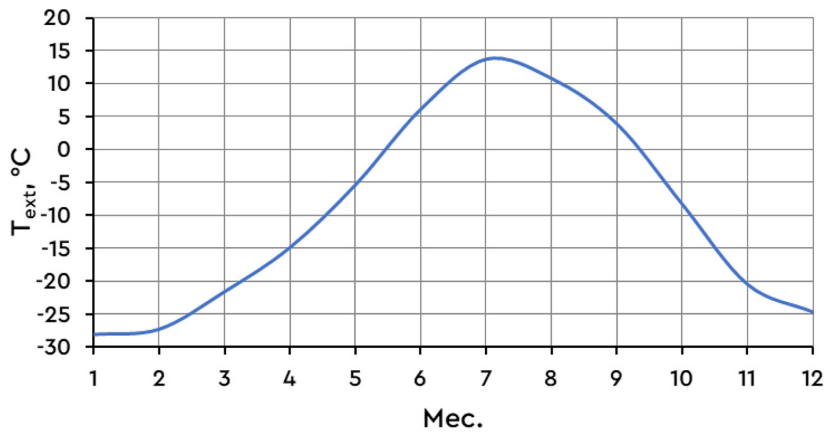


Рис. 1. Среднемесячные температуры в г. Норильске (СП 131.13330.2020)

Fig. 1. Average monthly temperatures in Norilsk (SP 131.13330.2020)

Для учета фазового состояния влаги в грунте характеристики материалов задавались как функциональные зависимости от температур. Коэффициенты теплопроводности грунтов, Вт/(м·К):

$$\lambda = if(T < -0,2[^\circ\text{C}], \lambda_1, \lambda_2), \quad (3)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности грунтов в мерзлом и талом состоянии соответственно, Вт/(м·К).

Удельные теплоемкости грунтов, Дж/(кг·К):

$$C_m = if(T < -0,2[^\circ\text{C}], C_{m1}, C_{m2}), \quad (4)$$

где C_{m1} и C_{m2} – удельные теплоемкости грунтов в мерзлом и талом состоянии соответственно, Дж/(кг·К).

Сопrotивление теплопередаче снега, R_s , м²·К/Вт, задавалось как теплоотдача поверхности грунта в зависимости от среднемесячных высот снегового покрова в г. Норильске:

$$1/R_s = h(b(t)), \quad (5)$$

где b – высота снежного покрова, м.

Предполагается, что в долгосрочном периоде скрытая теплота фазового перехода будет давать только эффект небольшого увеличения тепловой инерции массива грунта и не будет влиять на общий тренд средних температур. В этой связи теплота фазового перехода в модели не учитывалась.

Результаты и обсуждение

В результате расчета получены распределения температур в основании и свайном фундаменте в течение 10 лет.

На рис. 3 представлены температуры на десятый год эксплуатации по свае в центре свайного поля и по «свободному» грунту вдали от свайного поля. За счет отрицательной среднего-

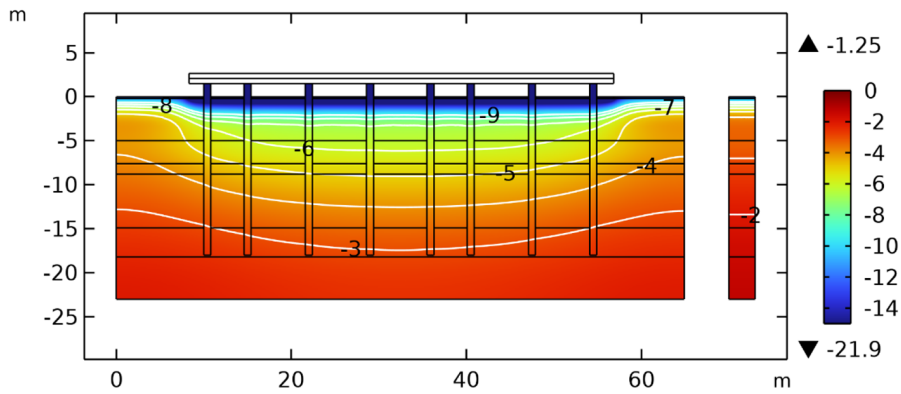


Рис. 2. Распределение температур в грунте и в свайном фундаменте в январе 10-го года эксплуатации, °С
 Fig. 2. Temperature distribution in the soil and in the pile foundations in January of the 10th year of operation, °С

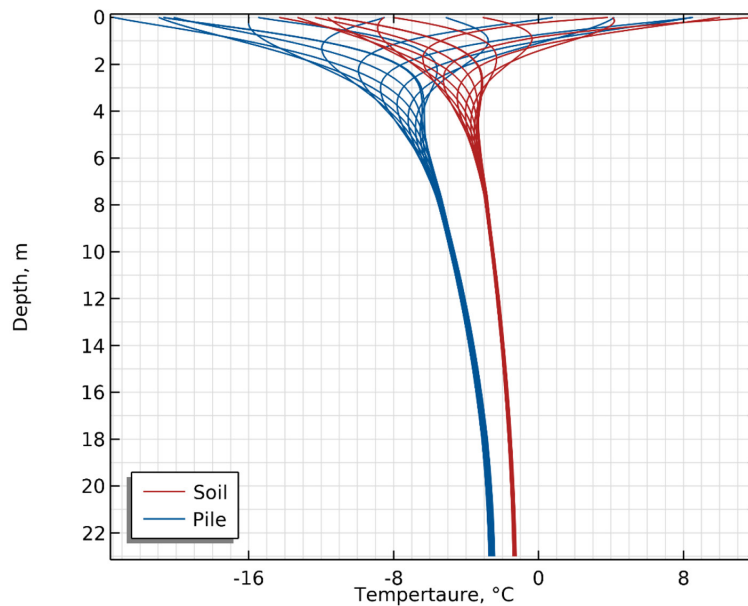


Рис. 3. Среднемесячные распределения температур по глубине грунта и сваи в течение 10-го года
 Fig. 3. Monthly average temperature distribution in the soil and in the pile during year 10

довой температуры воздуха в регионе ($-9,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) температура на глубине грунта также сохраняется отрицательной, что коррелирует с исследованием [7]. Кроме того, на графике видно, что наличие сваи в грунте снижает его температуру. Это в том числе обусловлено более высокой теплопроводностью железобетона.

На графике видно, что температура под подошвой свай ниже температуры «свободного» грунта более чем на $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 4 представлены средние температуры на глубине 18 м в течение 10 лет. Здесь температура грунта, как «свободного», так и под свайным полем, снижается при вхождении модели в квазистационарное состояние.

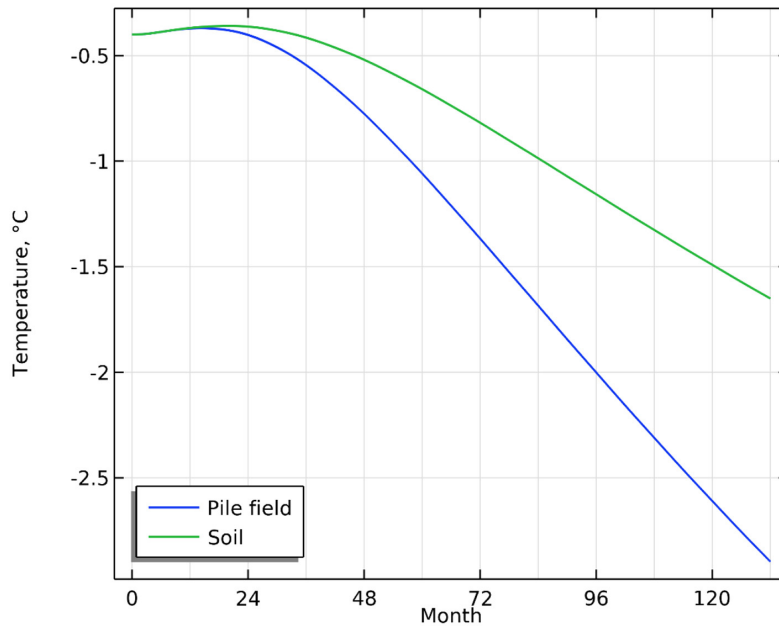


Рис. 4. Средняя температура за расчетный период на глубине 18 м

Fig. 4. Soil and the pile average temperature over the design period at a depth of 18 m

Таким образом, можно сделать вывод, что устройство конструкции свайного фундамента при принятых к расчету характеристиках грунта и граничных условиях способствует снижению температуры грунтового основания и, как следствие, его стабилизации. Растепления многолетнемерзлых грунтов, вызываемого фундаментом здания, расчетом не установлено.

Основными факторами, влияющими на изменение температурного поля под подошвой свайного фундамента, являются коэффициенты конвективной теплоотдачи от окружающего воздуха к поверхности строительных конструкций и грунта, температуры в подвальном помещении, которые могут регулироваться реализацией строительно-технических мероприятий и правилами эксплуатации подвальных помещений.

Возможная потеря устойчивости зданий может быть обусловлена в первую очередь деятельностью людей: изменением окружающего ландшафта, связанного со строительством новых зданий; отсутствием аварийных стоков систем водоснабжения и водоотведения в подвальных помещениях; уменьшением проветриваемости последних и другими факторами неправильной эксплуатации зданий.

Заключение

В работе был произведен численный расчет температурных полей основания свайного фундамента на многолетнемерзлых грунтах. Расчетом установлено, что свайный фундамент не способствует растеплению вечной мерзлоты. Для гарантированного обеспечения несущей способности оснований рекомендуется снижение температуры в подпольном пространстве при среднемесячных положительных температурах наружного воздуха.

Список литературы / References

[1] Судаков И. А., Бобылёв Л. П., Береснев С. А. Моделирование термического режима вечной мерзлоты при современных изменениях климата, *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*, 2011, № 1, 81–88 [Sudakov I. A., Bobylev L. P., Beresnev S. A. Permafrost Thermal Regime Simulation in response to modern Climate Change, *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*, 2011, № 1, 81–88 (In Russian)].

[2] НИУ Росгидромета Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год, 2022 [ROSHYDROMET A Report on Climate Features on the Territory Of the Russian Federation in 2021, 2022].

[3] Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Badina S.V., Sadurtdinov et. al. Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure. *Energies* 2022, 15, 3190.

[4] Никифорова Н., Коннов А. Прогноз деформаций основания и снижения несущей способности свайных фундаментов в криолитозоне, *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 18(1), 2022, 141–150 [Nadezhda Nikiforova N, Konnov A. Forecast of the Soil Deformations and Decrease of the Bearing Capacity of Pile Foundations operating in the Cryolithozone, *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 18(1), 2022, 141–150 (In Russian)].

[5] РОСГИДРОМЕТ «Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации», 2017 (стр. 45).

[6] Shiklomanov N. I., Streletskiy D, A., Grebenets V. I., Suter (2017). *Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia, Polar Geography*, 2017.

[7] Федотов А. А., Канибер В. В., Храпов П. В. Анализ и прогнозирование изменений температурного режима грунта в районе города Норильска, *International Journal of Open Information Technologies*, 8(10), 51–65, 2020 [Fedotov A. A., Kaniber V. V., Khrapov P. V. Analysis and forecasting of changes in the soil temperature distribution in the area of the city of Norilsk, *International Journal of Open Information Technologies*, 8(10), 51–65, 2020].

[8] Groisman P., Gutman G. (eds) *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Springer Environmental Science and Engineering, Dordrecht, 2012. 17 p.