Экспериментальное определение температурной поправки наклонной поверхности

Моисеева Ирина Сергеевна
аспирант, кафедра «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог», Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), is_moiseeva@mail.ru

Температура поверхности откосов земляного полотна значительно отличается от температуры на горизонтальной поверхности основной площадки насыпи и дневной поверхности основания у её подошвы, причем на нее влияет не только альбедо, но и экспозиция. Южные откосы железнодорожных насыпей нагреваются значительно больше, чем основная площадка. Существующие методы определения температурной поправки позволяют достоверно определить значения для горизонтальных и вертикальных поверхностей, когда как для наклонных поверхностей отсутствуют эмпирические данные. В данной работе представлены результаты натурных измерений за период 2023 – 2025 гг. в летний период на широте 55° с.ш. Получены количественные значения температурной поправки для скального крупнообломочного грунта, широко применяемого при сооружении земляного полотна Байкало-Амурской магистрали, при углах наклона, соответствующих типовым откосам железнодорожных насыпей. Для откосов крутизной 1:1,5, 1:1,75 и 1:2 поправка составляет соответственно 8,95°С, 8,52°С и 8,13°С. Установлено, что зависимость температурной поправки от угла наклона носит нелинейный характер с максимумом при 45°. Полученные значения температурной поправки для горизонтальной поверхности (4,8°С и 7,5°С) коррелируют с результатами измерений, проведенных в июле-августе 2019 г., что подтверждает достоверность результатов и позволяет рекомендовать их для практического использования при задании граничного условия первого рода в численных моделях при прогнозировании температурного режима мерзлых грунтов основания земляного полотна железной дороги на откосах насыпи в криолитозоне для климатических условий БАМ.

Ключевые слова: криолитозона, температурная поправка, наклонная поверхность, скальный грунт, солнечная радиация, откос земляного полотна.

Введение

Повышение надежности транспортной сети в криолитозоне является одной из актуальных задач в условиях глобального потепления. При проектировании железных дорог в криолитозоне возможно использование мерзлых грунтов в качестве основания по одному из двух принципов строительства: первый принцип требует сохранять грунты основания в мерзлом состоянии в процессе строительства и эксплуатации, а второй принцип допускает их использование в оттаявшем состоянии. Учитывая, что строительство протяженных транспортных сооружений значительно нарушает естественный теплообмен и способствует деградации многолетнемерзлых грунтов, при строительстве по первому принципу необходимо предусматривать различные противодеформационные мероприятия: установку сезонно-охлаждающих устройств, защитных экранов, снеговыдувающих устройств, отсыпку каменных набросок на откосы и др. [1].

Для предупреждения развития деформаций при строительстве, реконструкции и эксплуатации транспортных сооружений требуется выполнять качественный прогноз температурного режима грунтов основания земляного полотна. Одним из основных граничных условий в теплофизической задаче является температура внешней среды.

В математической постановке теплофизической задачи по прогнозированию температурного режима грунтов основания земляного полотна железной дороги температура дневной поверхности, как правило, задается граничным условием первого рода, когда на границе расчетной области задается значение среднемесячной температуры воздуха или непосредственно измеренное значение температуры поверхности. Также, допускается использование граничного условия второго рода, когда на поверхности задается плотность теплового потока. При этом на практике преимущественно используется граничное условие первого рода, так как данные о среднемесячной температуре воздуха приведены в СП 131.13330.2025 «СНиП 23-01-99 * Строительная климатология» для любого района строительства.

При этом, для корректного задания температуры дневной поверхности необходимо учитывать солнечную радиацию за счет введения температурной поправки ΔT, что регламентируется требованиями СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования»:

$$T_{пов} = T_{воз} + \Delta T. \quad (1)$$

При этом необходимо отметить, что данные о суммарной солнечной радиации, приведенные в СП 131.13330.2025 «СНиП 23-01-99 * Строительная климатология», позволяют аналитически определить температурной поправку по существующим методикам [4, 5, 6] только для горизонтальных и вертикальных поверхностей.

При этом температура поверхности откосов земляного полотна значительно отличается от температуры на горизонтальной поверхности основных площадки. В Северном полушарии угол падения солнечных лучей в летний период на южные склоны максимален, и, как следствие, наблюдается наибольший приток суммарной солнечной радиации. При этом тепловой режим откосов, обращенных на север, формируется за счет рассеянной солнечной радиации, так как они практически не получают приток прямой солнечной радиации (солнечные лучи проходят по касательной или вовсе не достигают поверхности), поэтому температура поверхности таких откосов будет близка к температуре воздуха. Основываясь на данных 11-летнего мониторинга, в исследованиях [2, 3] отмечается снижение эффективности каменной наброски на откосах железнодорожной насыпи, обращенных на юг, что позволяет сделать вывод о значительном влиянии экспозиции откоса земляного полотна на температурный режим грунтов. Таким образом, определение температурной поправки для откосов, обращенных на юг, представляет наибольший практический интерес.

Цель настоящей работы – экспериментально определить температурную поправку для южно-ориентированного откоса железнодорожной насыпи с типовым заложением 1:1,5, 1:1,75 и 1:2 на основании данных натурных измерений.

Новизна заключается в получении количественных значений температурной поправки для углов наклона, не охваченных действующими нормативными документами, что позволит повысить точность прогноза температурного режима грунтов земляного полотна в криолитозоне при реконструкции БАМ.

Методология

Эксперимент проводился в летний период 2023-2025 гг. на учебном полигоне «Сибирского государственного университета путей сообщения» (широта 55° с.ш.). В балластном щебне были размещены образцы скального грунта квадратной формы 10,0 см х 10,0 см в четырех положениях ориентированных строго на юг: с: горизонтально, вертикально, под углами 20° и 45° к горизонту соответственно. Образцы устанавливались на специальную подставку, угол контролировался с помощью уклономера, после чего образца

засыпались балластным щебнем для обеспечения плотного контакта с крупнообломочным скальным грунтом. Выбор углов обусловлен необходимостью оценки зависимости температуры поверхности в диапазоне от 0° до 90° и охватом типовых заложений откосов, наиболее распространенных при проектировании насыпей. Поверхность каждого образца была окрашена в серый цвет для обеспечения одинаковых условий нагрева за счет равного альбедо. Каждый образец был оборудован температурным датчиком DS18B20 (диапазон измеряемых температур -55…+125 °C; точность ±0.5°), который устанавливался с внутренней поверхности образца в центре в заранее подготовленное углубление для достоверного определения температуры дневной поверхности. Датчики не герметизировались, так как их размещение внутри образца не влияло на теплопередачу.



Рисунок 1 – Измерение температуры образцов скального грунта на учебном полигоне СГУПС

Перед началом эксперимента датчики были откалиброваны. Данные о температуре дневной поверхности наклонных образцов фиксировались каждые 5 с. с помощью регистратора на базе Arduino с записанной программой. Дополнительно выполнялись измерения температуры воздуха в тени. В дождливую погоду и при сплошной облачности измерения не проводились, поскольку рассеянная радиация не оказывает значительное влияние на нагрев поверхности. Первичная обработка измерений включала фильтрацию выбросов и синхронизацию временных рядов.

Среднесуточные значения температуры воздуха и поверхности скального грунта были определены по формулам 2 – 4. Величина температурной поправки оценивается как разница среднеинтегральных температур наклонной и горизонтальной поверхностей.

$$S_{день}=\left(T_{max}-T_0\right)\int_{t_0}^{t_1}\sin\left(\frac{t-t_0}{t_1-t_0}\pi\right)dt=\left(T_{max}-T_0\right)\frac{2\left(t_1-t_0\right)}{\pi} \quad (2)$$

$$S_{ночь}=\left(T_{min}-T_0\right)\int_{t_1}^{t_2}\sin\left(\frac{t-t_1}{t_2-t_1}\pi\right)dt=\left(T_{min}-T_0\right)\frac{2\left(t_2-t_1\right)}{\pi} \quad (3)$$

$$T_{сут}=\frac{1}{t_2-t_0}\left(S_{день}+S_{ночь}\right)+T_0 \quad (4)$$

$$\Delta T=T_{накл.пов}-T_{гор.пов.} \quad (5)$$

где $S_{день}$ – площадь под температурной синусоидой, соответствующей дневному времени суток;

$S_{ночь}$ – площадь под температурной синусоидой, соответствующей ночному времени суток;

$T_{сут}$ – среднесуточное значение температуры.

Результаты и обсуждение

На рис.2-3 представлены суточные фрагменты многодневной осциллограммы температур дневной поверхности образцов в различном положении и воздуха.

Для осциллограммы суточного изменения температуры горизонтально расположенного образца, представленной на рис.2 фиолетовой линией, среднесуточное значение температуры горизонтальной поверхности скального грунта составило $T_{сут}^{гор}$=28,4 °C. Среднесуточная температура воздуха, полученная в результате обработки данных голубой осцилограммы, составила $T_{сут}^{возд}$=20,9 °C. При этом температурная поправка для этого периода составит 7,5 °C.

Как видно из рис.3, температура наклонной поверхности наклонных образцов начинает постепенно расти после восхода солнца, опережая температуру горизонтального образца. Максимальная разница температур достигается в солнечный полдень. Кратковременное понижение температуры образцов наблюдалось за счет уменьшения поступающей прямой солнечной радиации из-за переменной облачности.

Расчет среднесуточной температуры дневной поверхности образцов скального грунта с различными углами наклона выполнялся по формулам 2-4, выполненных в течение трех летних сезонов. В таблице 1 приведены осредненные значения среднесуточной температуры дневной поверхности образцов за наиболее репрезентативный период 27.07.2025-29.07.2025. Среднесуточная температура воздуха за указанный период составила $T_{сут}^{возд}$ =25,3 °C.

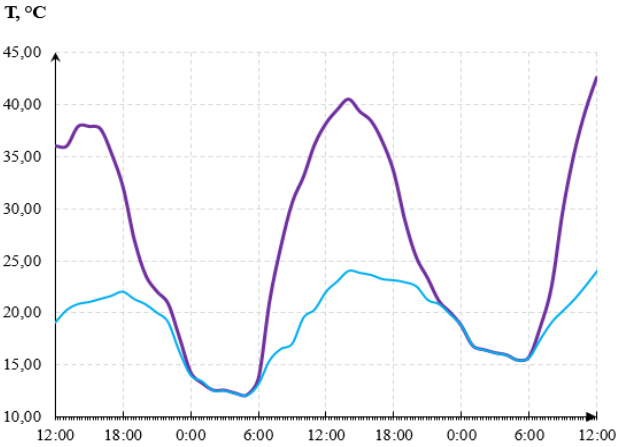


Рис.2 Осциллограммы суточного изменения температуры за период 26.06.2025-28.06.2025

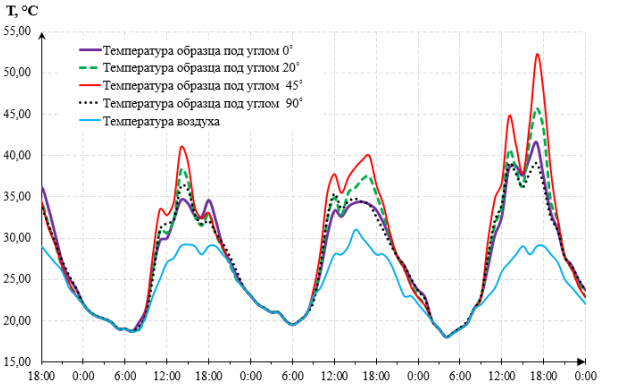


Рис.3 Осциллограммы суточного изменения температуры за период 27.07.2025-29.07.2025

Таблица 1
Результаты экспериментального определения температурной поправки для наклонных поверхностей

Образец	Среднесуточное значение температуры, $T_{сут}$, °C	Температурная поправка ΔT, °C
Угол наклона 0°	30,1	4,8
Угол наклона 20°	31,9	6,6
Угол наклона 45°	34,9	9,6
Угол наклона 90°	29,0	3,7

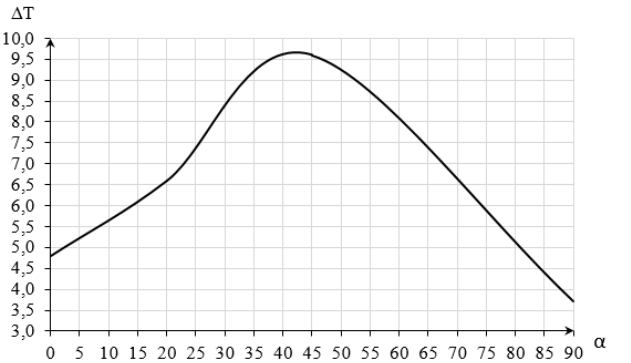


Рис.4 График изменения температурной поправки $\Delta T = f(\alpha)$

Таблица 2
Температурная поправка для откосов железнодорожной насыпи из крупнообломочного скального грунта

Заложение откоса	Угол наклона поверхности α	Температурная поправка ΔT, °C
1:1,5	33,7	8,95
1:1,75	29,7	8,52
1:2	26,6	8,13

Для определения температурной поправки на южно-ориентированном

откосе железнодорожной насыпи из скального крупнообломочного грунта (для откосов с заложением 1:1,5, 1:1,75, 1:2) на основании данных натурных измерений был построен график, характеризующий изменение величины температурной поправки в зависимости от угла наклона поверхности (рис.4). Результаты определения температурной поправки для откосов с заложением 1:1,5, 1:1,75 и 1:2 сведены в таблицу 2.

Полученные результаты наглядно демонстрируют закономерность изменения температурной поправки в зависимости от угла наклона поверхности к горизонту. Согласно графику, представленному на рис. 4, зависимость $\Delta T = f(\alpha)$ имеет нелинейный характер, достигая экстремума при 45°. Это объясняется тем, что в летний период на широте 55° с.ш. угол падения прямых солнечных лучей на поверхность под углом 45° горизонту приближается к нормали, за счет чего обеспечивается максимальная плотность потока солнечной радиации на единицу площади. Именно поэтому максимальные среднесуточные температуры дневной поверхности (34,9°С) зафиксированы для образца с углом наклона 45°, что на 4,8°С выше, чем у горизонтального образца, и на 9,6°С выше температуры воздуха. Полученное экспериментально значение температурной поправки для вертикальной поверхности (3,7°С) оказалось ниже, чем для горизонтальной поверхности на 1,1°С, из-за того, что общее время облучения такой поверхности меньше, как и плотность потока солнечной радиации из-за угла падения солнечных лучей.

Представленные результаты наглядно демонстрируют, что линейная интерполяция между температурными поправки на горизонтальную и вертикальную поверхность даст абсолютно некорректные значения. При этом абсолютное игнорирование влияния угла наклона поверхности и экспозиции при прогнозировании температурного режима может привести к некорректным результатам и неверно принятым решениями на этапе проектирования земляного полотна.

Полученные значения температурной поправки для горизонтальной поверхности (4,8°С и 7,5°С) коррелируют с результатами измерений [6], проведенных в июле-августе 2019 г. (расхождение в пределах 10%), что подтверждает достоверность проведенных измерений и позволяет рекомендовать полученный график (рис.4) для практического использования.

Важно подчеркнуть, что представленные данные репрезентативны для крупнообломочного скального грунта. Для насыпей из глинистых или песчаных грунтов значения температурной поправки могут отличаться.

Заключение

Температура наклонной поверхности – параметр, используемый в теплофизических расчетах при прогнозировании температурного режима земляного полотна. Измерения выполнены на 55° с.ш. для крупнообломочного скального грунта, который применяется в железнодорожном строительстве вторых путей в рамках реконструкции Байкало-Амурской магистрали, которая располагает в пределах от 54° до 56° с.ш.

Построенный график позволяет определить температурную поправку для поверхности откоса из скального грунта любой крутизны в диапазоне от 0° до 90°. Для стандартных заложений откосов 1:1,5, 1:1,75 и 1:2 экспериментально установлены значения температурной поправки 8,95°С, 8,52°С и 8,13°С соответственно.

Результаты исследования позволяют уточнить температуру поверхности южно-ориентированного откоса насыпи из скального грунта для уточнения граничного условия первого рода при прогнозировании температурного режима грунтов основания земляного полотна в криолитозоне, что повысит достоверность расчета и позволит корректно назначать противодеградационные мероприятия на участках реконструкции БАМ.

Литература

1. Исаков А. Л., Моисеева И. С., Гудкова И. Н. Обоснование конструктивных особенностей земляного полотна из дренирующих грунтов в криолитозоне с помощью теплотехнических расчетов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. No 1 (73). С. 95–103. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_95.
2. Hou Y. D. et al. Thermal and deformational repairing effect of crushed rock revetment acting as reinforcement along Qinghai–Tibet railway in permafrost regions //Advances in Climate Change Research. – 2022. – Т. 13. – №. 3. – С. 421-431.
3. Yandong H. et al. The thermal effect of strengthening measures in an insulated embankment in a permafrost region //Cold Regions Science and Technology. – 2015. – Т. 116. – С. 49-55.
4. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 36 с
5. СП 498.1325800.2020 Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 35 с.
6. Исаков А. Л., Гудкова И. Н., Жураева Б. С. Влияние учета солнечной радиации на результаты теплотехнических расчетов земляного полотна железнодорожного пути //Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – №. 4 (63). – С. 94-105.
7. СП 131.13330.2025 Строительная климатология СНиП 23-01-99* / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 146 с.
8. Рекомендации по методике прогноза изменений мерзлотно-грунтовых условий при строительстве и эксплуатации сооружений на трассе БАМ. Проект, ОАО ЦНИИС, М., 1976. – 176 с.

Experimental determination of the temperature correction for an inclined surface

Moiseeva I.S.
Siberian Transport University (STU)

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

The surface temperature of the embankment slopes differs significantly from the temperature on the horizontal surface of the main platform of the embankment and the daytime surface of the base at its sole, and it is affected not only by albedo, but also by exposure. The southern slopes of the railway embankments are heated significantly more than the main platform. The existing methods for determining the temperature correction make it possible to reliably determine the values for horizontal and vertical surfaces, when empirical data are not available for inclined surfaces. This paper presents the results of field measurements for the period 2023-2025 in the summer at a latitude of 55 ° n. Quantitative values of the temperature correction for rocky coarse–grained soil, widely used in the construction of the Baikal-Amur mainline, at angles of inclination corresponding to typical slopes of railway embankments, are obtained. For slopes with a steepness of 1:1.5, 1:1.75 and 1:2, the correction is 8.95°C, 8.52°C and 8.13°C, respectively. It is established that the dependence of the temperature correction on the angle of inclination is nonlinear, with a maximum at 45°. The obtained values of the temperature correction for the horizontal surface (4.8 °C and 7.5 °C) correlate with the results of measurements carried out in July-August 2019, which confirms the reliability of the results and allows us to recommend them for practical use when setting a boundary condition of the first kind in numerical models when predicting the temperature regime of frozen soils at the base of the railway bed. on the slopes of the embankment in the cryolithozone for climatic conditions of BAM.

Keywords: permafrost zone, temperature correction, inclined surface, rocky soil, solar radiation, embankment slope.

References

1. Isakov A. L., Moiseeva I. S., Gudkova I. N. Justification of design features for roadbeds made of free-draining soils in the cryolithozone using thermal engineering calculations // Bulletin of the Siberian Transport University. 2025. No. 1 (73). P. 95–103. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_95.
2. Hou Y. D. et al. Thermal and deformational repairing effect of crushed rock revetment acting as reinforcement along Qinghai–Tibet railway in permafrost regions // Advances in Climate Change Research. – 2022. – Vol. 13. – No. 3. – P. 421–431.
3. Yandong H. et al. The thermal effect of strengthening measures in an insulated embankment in a permafrost region // Cold Regions Science and Technology. – 2015. – Vol. 116. – P. 49–55.
4. SP 447.1325800.2019 Railways in permafrost regions. Basic design principles / Ministry of Construction of Russia. – Official edition. – Moscow: Standartinform, 2019. – 36 p.
5. SP 498.1325800.2020 Bases and foundations of buildings and structures on permafrost soils. Requirements for engineering site preparation / Ministry of Construction of Russia. – Official edition. – Moscow: Standartinform, 2021. – 35 p. 6. Isakov A. L., Gudkova I. N., Zhuraeva B. S. Influence of accounting for solar radiation on the results of thermal engineering calculations for railway track subgrades // Bulletin of the Siberian Transport University. – 2022. – No. 4 (63). – P. 94–105.
7. SP 131.13330.2025 Construction Climatology (SNiP 23-01-99*) / Ministry of Construction of Russia. – Official edition. – Moscow: Standartinform, 2021. – 146 p.
8. Recommendations on the methodology for forecasting changes in permafrost and soil conditions during the construction and operation of structures along the BAM route. Draft, JSC TSNIIS, Moscow, 1976. – 176 p.