

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/15SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/15SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Борисова А.С., Кудрявцев С.А. Исследование влияния солнечной инсоляции на вечномерзлом основании водопропускных труб железнодорожных насыпей // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/15SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/15SATS220

For citation:

Borisova A.S., Kudryavtsev S.A. (2020). The research of solar insolation influence on the permafrost base of railway. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/15SATS220

УДК 72

Борисова Анастасия Сергеевна

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия

Аспирант 3 курс

E-mail: boriskanastya@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1036130

Кудрявцев Сергей Анатольевич

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия

Заведующий кафедрой «Мосты, тоннели и подземные сооружения»

Доктор технических наук, доцент

E-mail: Olgakudr56@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=614674

Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/AAA-6935-2020>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8257641200>

Исследование влияния солнечной инсоляции на вечномерзлом основании водопропускных труб железнодорожных насыпей

Аннотация. В данной работе изучено влияние солнечной радиации на вечномерзлый грунт на территории застройки. Данная статья является частью диссертационного исследования автора. Деформации грунтового основания зданий, осадка, разрушение основания линейных сооружений (автодороги, ж/д пути) и иных строительных объектов, для которых основанием служит вечномерзлый грунт, являются актуальными проблемами. Целью работы является анализ распределения температур на поверхности сооружения с учетом неравномерной солнечной инсоляции. Автором проведены исследования температурного режима мерзлого основания на территории строительства железнодорожного пути с устройством в теле насыпи железобетонных водопропускных труб в зависимости от ориентации железнодорожного пути по сторонам света. Исследование температурного режима вечномерзлого грунта выполнялись в программном комплексе FEM Models программой «Termoground». Расчет изменения температурного режима железнодорожной насыпи на вечномерзлом грунте выполнялся в годичном периоде, согласно техническим рекомендациям, стартовый месяц для расчета вечномерзлых грунтов принят октябрь. Период отвода стоков талой и дождевой воды – апрель–сентябрь. Автором выполнены теплофизические расчеты

основания железнодорожной насыпи, ориентированной по разным сторонам света. Изучено изменение температурного режима вечномерзлого основания грунта в зоне застройки. Изучено влияния распределения температур в толще основания грунта на участке железнодорожной насыпи в зоне размещения водопропускной трубы и без. Показаны графики распределения температуры по откосам в зависимости от их ориентации по сторонам света. Расположение по сторонам света влияет на температуру основания в зоне застройки. Результаты расчетов показали неравномерный прогрев грунта с более солнечной стороны на участке насыпи без устройства водопропускной трубы с оголовками. Происходит увеличение температуры мерзлого грунта с более прогретой стороны, образуются чаши протаивания. Проведенный численный эксперимент показал эффективность учета неравномерной инсоляции в расчетах на стадии проектирования объектов строительства.

Ключевые слова: солнечная инсоляция; солнечная радиация; неравномерное оттаивание; железнодорожная насыпь; численное моделирование; FemModels

Введение

Солнечная радиация является самым мощным источником энергии для планеты. Солнечная инсоляция прогревает планету, количество поступающей энергии и ее распределение по поверхности планеты зависит от географических и топографических характеристик поверхности, времени года. Поэтому при ориентировании зданий выбирают наиболее оптимальный вариант расположения в зависимости от природно-климатических условий регионов строительства для уменьшения неблагоприятных воздействий (промерзание, перегрев). При строительстве линейных данная задача усложняется, так как из-за большой протяженности изменяются природно-географические условия.

Строительство новых объектов и эксплуатация зданий и сооружений на территории распространения вечной мерзлоты испытывают значительные трудности по ряду причин, таких как возможность увеличения глубины сезонного оттаивания и деградация вечной мерзлоты из-за изменений условий теплообмена на поверхности в зоне влияния сооружения на грунт. Деформации грунтового основания зданий, осадка, разрушение основания линейных сооружений (автодороги, ж/д пути) и иных строительных объектов, для которых основанием служит вечномерзлый грунт, являются актуальными проблемами.

На проектной стадии при наличии метеорологических изысканий при строительстве линейных объектов, имеющих большую протяженность и различные направления, целесообразно проверять процессы промерзания-оттаивания грунта с учетом неравномерной солнечной инсоляции, возникающей по ряду причин: ориентация сооружения, его геометрические характеристики, момент времени, географические, астрономические и топографические факторы.

1. Постановка целей и задач

Целью данной работы является исследование влияния солнечной радиации с зависимости от ориентирования объекта строительства по сторонам света, составление прогноза изменения грунтов основания в зоне влияния объекта строительства на грунт в годовом периоде [1]. Данная статья является частью диссертационного исследования. Изучаемый объект строительства – железнодорожный путь [2] с устройством в теле насыпи водопропускных труб. Конструкция железнодорожной насыпи показана на рисунке 1.1, данная модель разработана автором в программном обеспечении AutoCAD.

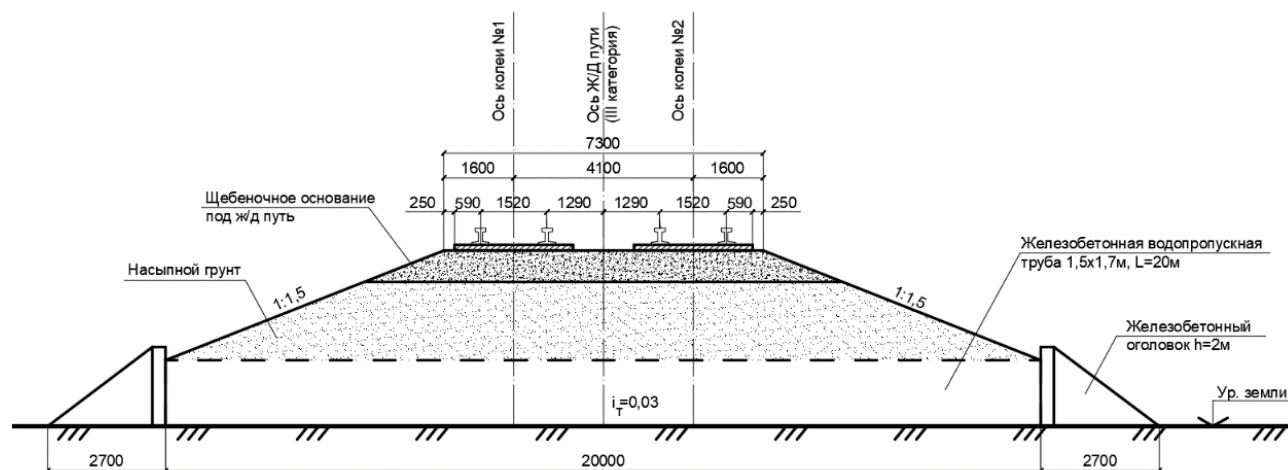


Рисунок 1.1. Надземная конструкция железнодорожного пути (разработано автором)

Рассмотрены следующие задачи:

1. Изучения влияния солнечной радиации на железнодорожный путь в зависимости от ориентации по сторонам света.
2. Изучение влияния солнечной радиации на участки железнодорожной насыпи в зоне размещения водопропускной трубы с оголовками и без.
3. Изучение процессов промерзания-оттаивания грунта под насыпью из-за воздействия неравномерной солнечной инсоляции.

Расчетные климатические данные района строительства приняты согласно технической документации, приняты для расчета за годовой период времени¹. Грунты основания – высокотемпературные, значения температуры приняты экспериментально, заданная температура сезонно-оттаивающего слоя – $0,5\text{ C}^0$, вечно мерзлого – $1,3\text{ C}^0$.

В расчетной температуре годового периода учитывалась горизонтальная и вертикальная солнечная радиация (полная и рассеянная) и испарение с поверхности для освещенных солнцем поверхностей с учетом ориентации по сторонам света. Коэффициент испарения с естественной поверхности (территория вне зоны застройки) принимался 0,8, для оголенной поверхности (насыпь) 0,3². Конструкция водопропускной трубы защищена от солнечного воздействия, то температура наружной поверхности трубы принята согласно среднемесячным данным без учета солнечной радиации и испарения.

2. Численное моделирование процессов промерзания-оттаивания мерзлого грунта

Расчет температурного режима вечномерзлого грунта выполнен в программном комплексе FEM Models программой «Termoground» в годовом цикле влияния температур на грунт [3–5].

¹ СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменениями N 1, 2), Москва, 2013. – 214 с.; СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменениями N 1, 2), Москва, 2013. – 214 с.

² СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88, Москва: 2012 – 117 с.

Данная программа позволяет анализировать процессы промерзания и оттаивания по установленным температурным и влажностным полям, также составить прогноз изменения состояния грунта основания из-за теплового воздействия от здания/сооружения.

Процессы промерзания-оттаивания в программном модуле «Termoground» описываются уравнением теплопроводности с учетом фазовых превращений грунтовой воды в интервале отрицательных температур для нестационарного теплового режима в трехмерном грунтовом пространстве следующим уравнением:

$$C_{th(f)}\rho_d \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{th(f)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (2.1)$$

где $C_{th(f)}$ – удельная теплоемкость грунта (талого или мерзлого) (Дж/кг·К); ρ_d – плотность сухого грунта (кг/м³); T – температура (К); t – время (с); $\lambda_{th(f)}$ – теплопроводность грунта (талого или мерзлого) (Вт/м·К); x, y, z – координаты (м); q_v – мощность внутренних источников тепла (Вт/м³).

Это уравнение позволяет определять величины входящего и выходящего теплового потока из элементарного объема грунта, оставляя основной поток объема грунта в точке во времени равным изменению величины теплооборотов.

Функция теплоемкости состоит из двух частей. Первая часть – объемная теплоемкость грунта (талого или мерзлого) и вторая часть – скрытая теплота фазовых переходов в интервале отрицательных температур поглощенная или отданная грунтом из-за изменений фазы грунтовой воды, представленная в виде:

$$C_{(f)} = C_{(f)} + L_0 \frac{\partial W_w}{\partial T} \quad (2.2)$$

Подставляя соотношение 2.2 в выражение 2.1 получим полное дифференциальное уравнение:

$$\rho_d (C_{th(f)} + L_0 \frac{\partial W_w}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{th(f)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (2.3)$$

где $C_{th(f)}$ – удельная теплоемкость талого или мерзлого грунта (Дж/кг·°С); ρ_d – плотность сухого грунта (кг/м³); T – температура (°С); t – время (с); L_0 – удельная теплота фазовых превращений “вода – лед” в расчете на единицу массы (Дж/кг); $\lambda_{th(f)}$ – теплопроводность талого или мерзлого грунта (Вт/м·°С); x, y, z – координаты (м); q_v – мощность внутренних источников тепла (Вт/м³); W_w – влажность незамерзшей воды в грунте.

Данная формула представляет возможным учитывать изменения компоненты скрытой теплоты фазовых переходов в интервале отрицательных температур поглощенной или отданной грунтом из-за изменений фазы грунтовой воды.

3. Анализ влияния инсоляции на железнодорожную насыпь

Прогноз изменения температурного режима [6–8] железнодорожной насыпи на вечномерзлом грунте выполнялся в годичном периоде, согласно техническим рекомендациям, стартовый месяц для расчета вечномерзлых грунтов принят октябрь. Период отвода стоков

талой и дождевой воды – апрель–сентябрь. Результаты приведены на период максимального оттаивания – сентябрь.

Ниже представлены результаты численных расчетов влияния солнечной инсоляции на железнодорожную насыпь в зависимости от ориентации по сторонам света.

3.1 Направление железнодорожного пути Север-Юг, ориентация откосов насыпи Запад-Восток

На рисунках 3.1 и 3.2 показаны результаты теплофизических расчетов, выполненных автором в программном обеспечении FemModels, мерзлого основания железнодорожного пути, откосы насыпи ориентированы на запад и восток.

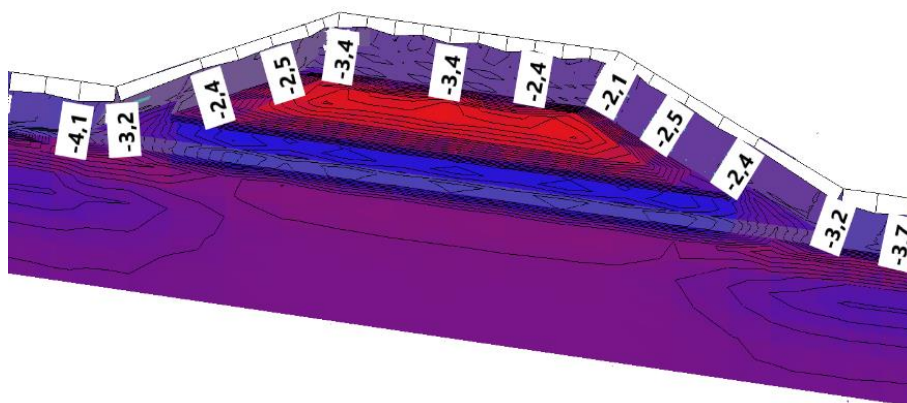


Рисунок 3.1. Эюра распределения температур откосов насыпи железнодорожного пути по западной и восточной сторонам по продольному сечению водопроводной трубы (разработано автором)

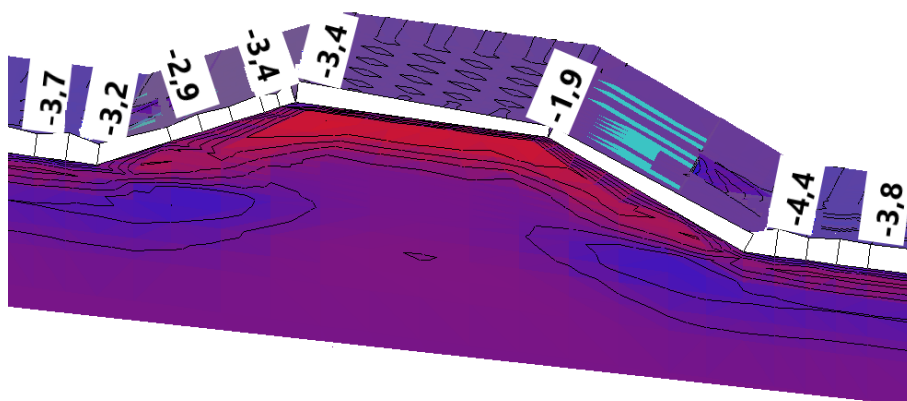


Рисунок 3.2. Эюра распределения температур откосов железнодорожного пути по западной и восточной сторонам вне зоны влияния водопроводной трубы (поперечное сечение железнодорожной насыпи) (разработано автором)

Температура поверхности и откосов с западной и восточной стороны на участке насыпи железнодорожного полотна и в зоне размещения трубы к началу замерзания принимают отрицательные значения. Отсутствуют чаши протаивания под насыпью, зоны мерзлого и талого грунта показаны на рисунке 3.3. Данный рисунок создан автором в программном обеспечении FemModels.

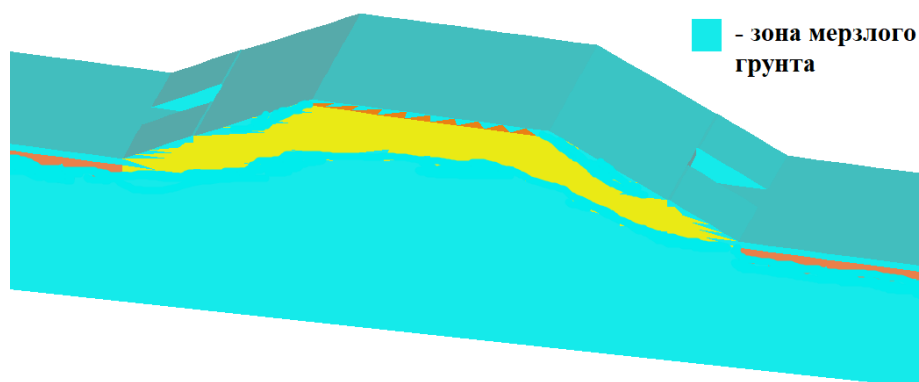


Рисунок 3.3. Зоны талого и мерзлого грунтов с учетом влияния инсоляции на железнодорожную насыпь, ориентированную по откосам на восток и запад (разработано автором)

Средние значения распределения температур по откосам одинаковые, происходит равномерное распределение температур по откосам с восточной и западной стороны откосов насыпи. На основании полученных средних значений температурных распределений на откосах, ориентированных на западную и восточную стороны, автором был разработан график распределения температур на поверхности откосов, показан на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4. График средних значений температур откосов насыпи, ориентированных на восточную и западную стороны (разработано автором)

При заданных климатических характеристиках и при ориентировании линейного объекта по направлению Север-Юг амплитуда колебаний солнечной инсоляции по восточной и западной сторонам откосов незначительны, принимают отрицательные температуры к началу заморозков, что не приводит к оттаиванию под насыпь.

3.2 Направление железнодорожного пути Запад-Восток, ориентация откосов насыпи Север-Юг

На рисунках 3.5–3.7 показаны результаты влияния солнечной инсоляции на откосы насыпи по северной и южной сторонам, данные рисунки созданы автором в программном обеспечении FemModels.

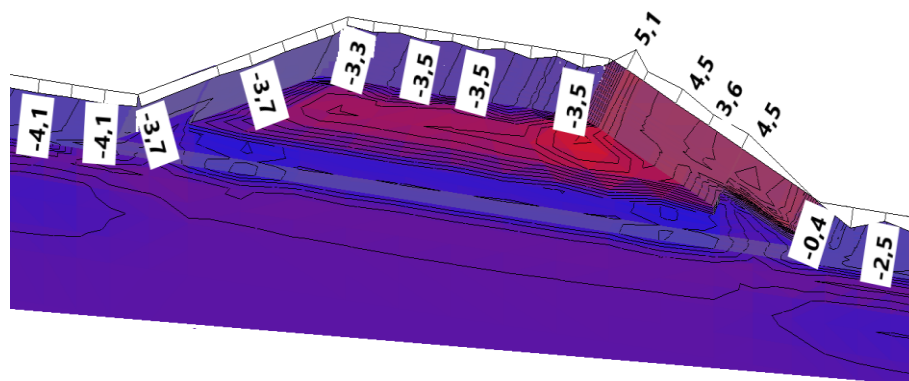


Рисунок 3.5. Эюра распределения температур откосов железнодорожного пути по северной и южной сторонам по продольному сечению водопропускной трубы (разработано автором)

На участке водопропускной трубы по направлению Запад-Восток (рис. 3.6) происходит неравномерная солнечная инсоляция по откосам насыпи. Результаты представлены на период начала заморозания, температура на откосе с южной стороны остается положительной. Но данный процесс не влияет на процессы промерзания оттаивания грунта из-за используемого водопропускной трубы и оголовков из железобетона, которые препятствуют проникновению положительной температуры под основание с южной стороны.

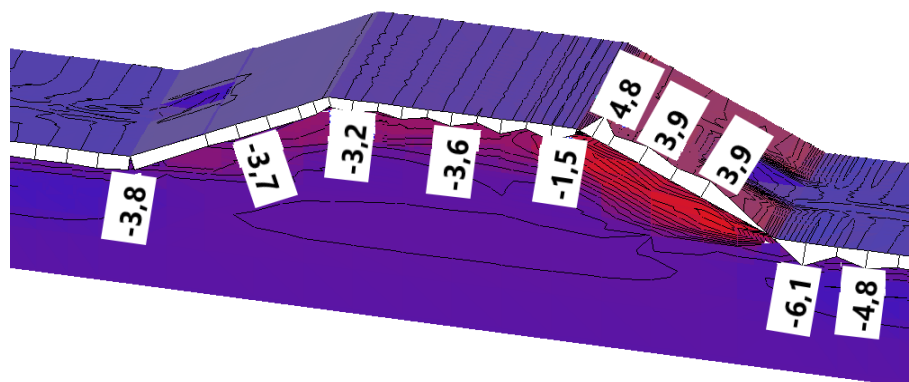


Рисунок 3.6. Эюра распределения температур откосов насыпи по северной и южной сторонам вне зоны влияния водопроводной трубы (поперечное сечение железнодорожной насыпи) (разработано автором)

На поперечном сечении участка насыпи, где отсутствует водопропускная труба, происходит смещение положительных температур с южной стороны откоса в насыпь. При наступлении холодного периода времени, откос по северной стороне смерзает, по южной стороне нет, появляется оттаивающая чаша под насыпью. Из-за возникновения чаши протаивания в основании под участком застройки появляется высокая вероятность развития деформаций в насыпи.

Ни рисунке 3.7 показаны зоны талого и мёрзлого грунтов, где видно образование чаши протаивания под насыпью.

Автор создал график средних значений температур на поверхности южного и северного откосов (см. рисунок 3.8), на котором видна разница температурных значений между откосами с южной и северной сторон. Разница температур дала результат неравномерной инсоляции с северной и южной сторон откосов насыпи.

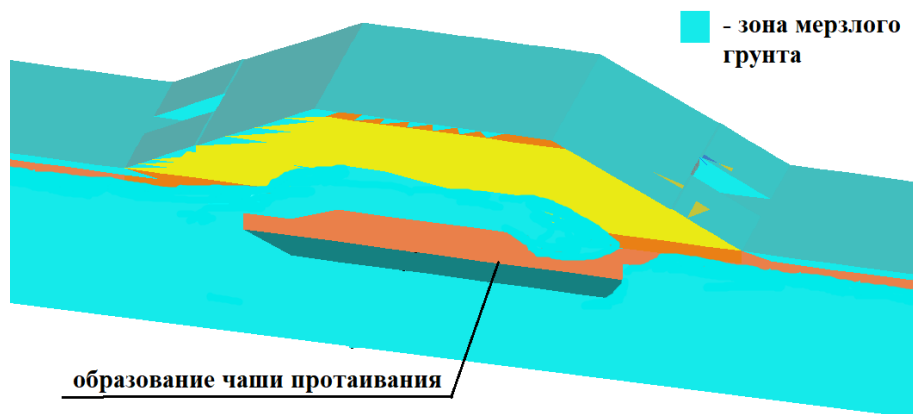


Рисунок 3.7. Зоны талого и мерзлого грунтов с учетом влияния инсоляции на железнодорожную насыпь, ориентированную по откосам на север и юг (разработано автором)

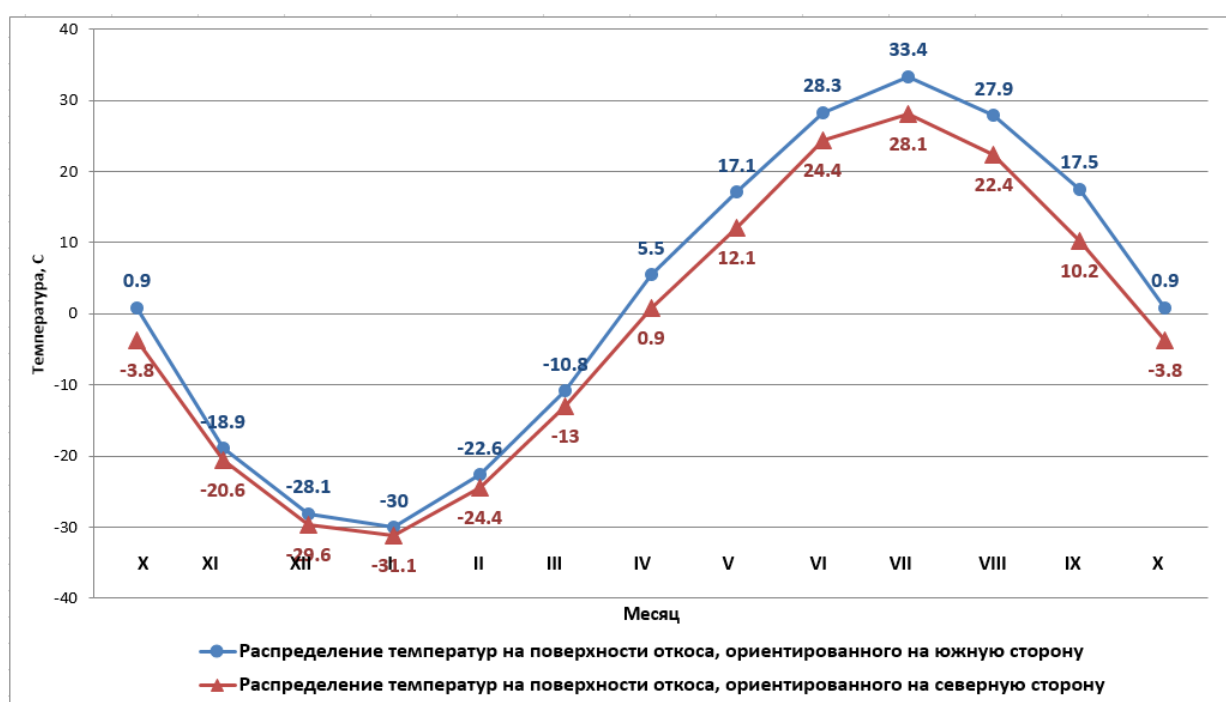


Рисунок 3.8. График средних значений температур откосов насыпи, ориентированных на восточную и западную стороны (разработано автором)

На основании полученных результатов можно сказать, что при ориентировании откосов по южной стороне во избежание оттаивания [9; 10], необходимо предусматривать меры по исключению попадания солнечной инсоляции, используя каменную наброску, светоотражающие щиты и иные изолирующие материалы.

Расчеты п.4 были выполнены на основании усредненных значений, принятых по нормативной документации. Результаты данных расчетов показали роль влияния ориентации по сторонам света на возведенный на вечной мерзлоте строительный объект.

Заключение

1. Исследовалось изменение температурного режима основания вечномерзлого грунта водопропускной трубы под воздействием солнечной инсоляции.

2. Была создана модель железнодорожного пути с устройством в теле насыпи водопропускной трубы с разной ориентацией по сторонам света.
3. Выполнены теплофизические расчеты методами численного моделирования в программном комплексе «Fem Models» в модуле «Termoground».
4. Расположение по сторонам света влияет на температуру основания в зоне застройки.
5. Результаты расчетов показали неравномерный прогрев грунта с более солнечной стороны на участке насыпи без устройства водопропускной трубы.
6. Целесообразно выполнять расчеты процессов промерзания-оттаивания грунта с учетом их ориентации по сторонам света.
7. Детальные расчеты влияют на финансовую сторону строительства: уменьшение расход использования дополнительных мер по сохранению мерзлоты на участках, где это не требуется, либо усилить меры по сохранению температурного режима, чтобы в дальнейшем избежать затрат на ремонтных работы от неравномерных деформаций оттаивания вечномерзлого основания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paramonov V., Sakharov I., Kudriavtsev S. Forecast the processes of thawing of permafrost soils under the building with the large heat emission. MATEC Web of Conferences 2016. С. 05007.
2. Kazharsky A., Valtseva T., Kotenko Z., Goncharova E. Thermophysical feasibility of railway embankment design on permafrost when projecting side tracks. Procedia Engineering. 2016. Т. 165. с. 1080–1086.
3. Борисова А.С. Особенности проектирования подземного нефтерпровода на территории распространения вечной мерзлоты. Транспорт азиатско-тихоокеанского региона №1, 2018, с. 13–15.
4. Кудрявцев С.А. Численные исследования теплофизических процессов в сезонно-мерзлых грунтах. Криосфера Земли. 2003. Т. ПХ. – № 4. – С. 102.
5. Кудрявцев С.А. Расчет процесса промерзания и оттаивания по программе «Termoground». Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. № 4. С. 83.
6. Ulitskii V.M., Sakharov I.I., Paramonov V.N.: Bed – Structure System Analysis for Soil Freezing and Thawing Using the “Termoground” Software. Soil Mechanics and Foundation Engineering 52(5). 2015, pp. 240–246.
7. Кудрявцев С.А. Использование метода конечных элементов в решении задач геотехники: учебн. пособие – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2014. – 162 с.
8. Kudryavtsev S., Zhussupbekov A., Shakhmov Z., Lukpanov R., Tleulenova G. Frost depth monitoring of pavement and evaluation of frost susceptibility at soil ground of Kazakhstan. ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 19, Unearth the Future, Connect Beyond. 2017. С. 1455–1458.
9. Borisova A. The research of the freezing and thawing process of the foundations with the use of season and cold-producing devices. International scientific conference environmental science for construction industry, MATEC Web of Conferences 193, 03040 (2018) ESCI 2018.
10. Berestyanyu Y.B., Valtseva T.Y., Goncharova E.D., Mikhailin R.G., Geosynthetical materials in designs of highways in cold regions of Far East. В сборнике: Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering. "Cold Regions Engineering 2009: Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction" 2009. – p. 546.

Borisova Anastasiia Sergeevna

Far eastern state transport university, Khabarovsk, Russia
E-mail: boriskanastya@mail.ru

Kudryavtsev Sergey Anatolievich

Far eastern state transport university, Khabarovsk, Russia
E-mail: Olgakudr56@mail.ru

The research of solar insolation influence on the permafrost base of railway

Abstract. The solar radiation influence on permafrost soil in the construction site is researched. This article is part of the author's dissertation research. The work is carried out taking into account uneven insolation. The research conducts research in the field of temperature at the construction site, where there are iron and reinforced concrete culverts. The research of the temperature regime of permafrost soil performed in the FEM Models software packages by the Termoground module. In accordance with technical recommendations, the starting month for calculating permafrost is October. The period of drainage of thawed snow and rainwater is April – September. Thermophysical calculations of the base of the railway embankment, oriented on different sides of the world, have been performed. Changes in the temperature regime of the permafrost soil base in the construction site were researched. The calculation results showed uneven heating of the soil from the sunnier side in the embankment without the installation of a culvert with heads. There is an increase in the temperature of frozen soil from the warmer side, thawing bowls are formed. A numerical experiment shows the effectiveness of accounting for uneven insolation in the calculations at the design stage of construction projects.

Keywords: solar insolation; solar radiation; uneven thawing; railway embankment; numerical simulation; FemModels

REFERENCES

1. Paramonov V., Sakharov I., Kudryavtsev S. (2016). *Forecast the processes of thawing of permafrost soils under the building with the large heat emission*. p. 05007.
2. Kazharsky A., Valtseva T., Kotenko Z., Goncharova E. (2016). Thermophysical feasibility of railway embankment design on permafrost when projecting side tracks. *Procedia Engineering*, (165), pp. 1080–1086.
3. Borisova A.S. (2018). Features of the design of an underground oil pipeline on the territory of permafrost distribution. *Asia Pacific Transport*, 1, pp. 13–15 (in Russian).
4. Kudryavtsev S.A. (2003). Numerical studies of thermophysical processes in seasonally frozen soils. *Earth cryosphere*, 4(8), p. 102. (in Russian).
5. Kudryavtsev S.A. (2004). Calculation of the process of freezing and thawing according to the Termoground program. *Reconstruction of cities and geotechnical construction*, 4, pp. 83 (in Russian).
6. Ulitskii V.M., Sakharov I.I., Paramonov V.N. (2015). Bed – Structure System Analysis for Soil Freezing and Thawing Using the “Termoground” Software. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 52(5), pp. 240–246.
7. Kudryavtsev S.A. (2014). Ispol'zovanie metoda konechnykh ehlementov v reshenii zadach geotekhniki. [*Using the finite element method in solving geotechnical problems.*] Khabarovsk: Publishing House Far Eastern State Transport University, p. 162.
8. Kudryavtsev S., Zhussupbekov A., Shakhmov Z., Lukpanov R., Tleulenova G. (2017). *Frost depth monitoring of pavement and evaluation of frost susceptibility at soil ground of Kazakhstan*. pp. 1455–1458.
9. Borisova A. (2018). *The research of the freezing and thawing process of the foundations with the use of season and cold-producing devices*.
10. Berestyanyy Y.B., Valtseva T.Y., Goncharova E.D., Mikhailin R.G. (2009). *Geosynthetical materials in designs of highways in cold regions of Far East*. p. 546.