

Методы расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна высокоскоростных магистралей в условиях холодного климата в КНР

Ван Синьтун, А. Ф. Колос, А. В. Петряев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ван Синьтун, Колос А. Ф., Петряев А. В. Методы расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна высокоскоростных магистралей в условиях холодного климата в КНР // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 26–37. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-26-37

Аннотация

Цель: Разрабатываются методы расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна высокоскоростных магистралей с учетом его многослойной конструкции. **Методы:** Рассмотрены существующие методы расчета глубины промерзания грунта, предложены усовершенствованный метод Берггрена для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна ВСМ и метод численного моделирования температурного режима земляного полотна на основе математической модели с учетом миграции влаги. Достоверность расчетов подтверждается сравнением с результатами численного моделирования и результатами расчета методом по китайским и российским нормам строительства железных дорог. **Результаты:** Результаты расчетов глубины промерзания земляного полотна по разным методам аналогичны. Усовершенствованный метод Берггрена целесообразно использовать для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна многослойной системы. Метод численного моделирования дает возможность прогнозировать глубину промерзания грунта, в том числе изменение глубины промерзания и оттаивания, вызванных потеплением климата. **Практическая значимость:** Для расчета глубины промерзания земляного полотна ВСМ целесообразно применять усовершенствованный метод Берггрена. Разработанная модель может быть использована как для изучения закономерности распределения теплового режима земляного полотна при промерзании и оттаивании, так и для проектирования толщины защитных слоев от мороза для конструкции земляного полотна высокоскоростных магистралей.

Ключевые слова: Глубина промерзания грунтов, земляное полотно высокоскоростных магистралей, усовершенствованный метод Берггрена, численное моделирование, температурный режим.

Введение

Глубина сезонного промерзания является наибольшей глубиной промерзания грунта за год [1], под слоем сезонного промерзания находятся немерзлые грунты. В условиях холодного климата глубина промерзания значительно влияет на прогнозирование пучения грунтов земляного полотна, проектирование морозозащитных слоев земляного полотна. Таким образом, расчет глубины промерзания является важной задачей при изучении температурного режима земляного полотна и определение ее значения актуально для проектирования и строительства железных дорог.

В нормах проектирования высокоскоростных магистралей разных стран конструкция земляного полотна ВСМ обычно устанавливается с двумя защитными слоями с целью обеспечения несущей способности, исключения неравномерных остаточных деформаций, в том числе деформаций морозного пучения. В связи с этим при проектировании защитных слоев общая их толщина должна быть больше, чем глубина промерзания грунтов земляного полотна.

В настоящее время методы расчета глубины промерзания грунта земляного полотна в основном базируются на формулах для проектирования однослойной конструкции земляного полотна железных дорог, это не полностью применимо к требованиям для двухслойной конструкции земляного полотна ВСМ. Поэтому в данной работе рассмотрены существующие методы расчета глубины промерзания грунта, предложен усовершенствованный метод Берггрена для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна ВСМ. Кроме этого, приведен пример расчета на основе климатических условий на северо-востоке КНР. Достоверность расчетов подтверждается сравнением с результатами численного моделирования и результатами расчета существующих в КНР и РФ методов.

Существующие методы расчета глубины промерзания грунта

В связи со сложностью процессов, происходящих в грунтах при замерзании, глубина промерзания грунтов зависит от многих метеорологических и теплофизических факторов, например продолжительности отрицательной температуры воздуха, типа грунта, его влажности, толщины снежного покрова и других. Многие исследователи или ученые занимались вопросами определения глубины промерзания грунтов и предлагали разнообразные методы и способы, по которым можно определить глубины промерзания. Существующие методы расчета глубины промерзания грунта можно разделить на теоретические, эмпирические и статистические.

Одной из первых теоретических формул для определения глубины промерзания однородного грунта является формула Стефана [2]:

$$h = \sqrt{\frac{2,23kF}{L}}, \quad (1)$$

где h — глубина промерзания грунта, м;

k — теплопроводность, Дж / (с · м² · °С);

F — индекс промерзания, определен суммой градусо-дней с отрицательными температурами при промерзании грунта, °С · дни ;

L — скрытая теплота плавления, Дж / м³.

В связи с непрактичностью точных математических решений задачи Стефана многими исследователями (В. С. Лукьянов, И. А. Золотарь, П. А. Пузаков,

А. В. Павлов, В. М. Сиденко и т. д.) разработаны приближенные решения [3]. Более того, в связи со сложностью формул, при практических расчетах разработаны номограммы.

Для упрощения определения глубины промерзания мерзлотооведами предложены эмпирические формулы, разработанные на основе наблюдаемых данных глубины промерзания в естественных условиях [3–5]. Но эмпирические формулы характеризуются ограниченностью применения при разных условиях.

К настоящему времени исследователями разработан метод определения глубины промерзания, основанный на статистических данных наблюдений. И. И. Леонovich [6] предложил эмпирические способы для определения глубины промерзания при наличии или отсутствии фактических данных о ней.

По норме, представленной в «Проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений в Китае» [7], нормативную глубину промерзания принимают равной средней из ежегодных максимальных глубин сезонного промерзания грунтов (по данным наблюдений за период не менее 10 лет) на открытой, оголенной от снега горизонтальной площадке при уровне подземных вод, расположенном ниже глубины сезонного промерзания грунтов, при отсутствии данных наблюдений нормативную глубину определяют по карте изолиний нормативной глубины сезонного промерзания, составленной в [7]. При проектировании земляного полотна железных дорог [8] в Китае расчетная глубина Z_d определяется по формуле:

$$Z_d = Z_0 \cdot \psi_{zs} \cdot \psi_{zw} \cdot \psi_{zc} \cdot \psi_{zt0}, \quad (2)$$

где Z_0 — нормативная глубина промерзания грунта, м;

ψ_{zs} — коэффициент, зависящий от типов грунта;

ψ_{zw} — коэффициент, зависящий от характера пучения;

ψ_{zc} — коэффициент, зависящий от условий окружающей среды;

ψ_{zt0} — коэффициент, зависящий от рельефа местности.

При проектировании земляного полотна железнодорожного пути в РФ по СП 32-104—98 [9] расчетная глубина промерзания определяется произведением поправочных коэффициентов по формуле:

$$Z_d = qnm \cdot Z_{\max}, \quad (3)$$

где q — коэффициент, учитывающий вид дренирующего грунта;

n — коэффициент, учитывающий вид конструкции земляного полотна;

m — коэффициент, учитывающий увеличение глубины промерзания земляного полотна по сравнению с многолетними и средними данными;

Z_{\max} — максимальная глубина сезонного промерзания земляного полотна из дренирующих грунтов от верха балластной призмы; определяется по среднему

многолетнему значению суммы градусо-дни ($\Omega, ^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$) отрицательных температур наружного воздуха с помощью номограммы, которую принимают по [10].

При дорожном строительстве методы определения глубины промерзания грунтов земляного полотна, принимаемые в Японии и Франции путем эмпирической формулы, аналогичны (используется индекс промерзания). В Германии на основании измерений территория подразделяется на три дорожно-климатические зоны, толщина защитных слоев от мороза определяется в разных дорожно-климатических зонах с учетом категории линий, уровня нагрузки и скорости движения.

Усовершенствованный метод Берггрена

Усовершенствованный метод Берггрена представляет собой одномерное решение для расчета глубины промерзания многослойной конструкции, по которому глубина промерзания X определяется по формуле [11]:

$$X = \lambda \sqrt{\frac{172800kF}{L}}, \quad (4)$$

где λ — безразмерный коэффициент;

k — теплопроводность грунта, $\text{кал} / \text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}$;

L — скрытая теплота плавления льда, $\text{кал} / \text{см}^3$;

F — индекс промерзания, определенный суммой градусо-дней с отрицательными температурами при промерзании грунта, $^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$

Для многослойной системы значение $\frac{L}{k}$ в формуле (4) определяется в следующем виде:

$$\frac{L}{k} = \frac{2}{X^2} \left[L_1 d_1 \left(\frac{d_1}{2k_1} \right) + L_2 d_2 \left(\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{2k_2} \right) + \dots + L_n d_n \left(\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \dots + \frac{d_n}{2k_n} \right) \right], \quad (5)$$

где k_i — теплопроводность грунта в i -ом слое, $\text{кал} / \text{см} \cdot \tilde{n} \cdot ^\circ\text{C}$;

L_i — скрытая теплота плавления льда в i -го слое, $\text{кал} / \text{см}^3$;

d_i — толщина i -го слоя, см ;

X — глубина промерзания, в том числе $X = \sum_{i=1}^n d_i$, см .

Формула (4) отличается от формулы Стефана (3) безразмерным коэффициентом λ , зависящим от критерия температурного отношения α и критерия фазовых переходов μ :

критерий температурного отношения α :

$$\alpha = \frac{T}{F/t}; \quad (6)$$

критерий фазовых переходов μ :

$$\mu = \frac{Q_{wt}T}{L_{wt}t}, \quad (7)$$

где T — среднегодовая температура воздуха, °С ;

F — индекс промерзания, °С · сут ;

t — продолжительность промерзания, сут ;

Q_{wt} — средневзвешенная теплоемкость, $Q_{wt} = \frac{1}{X} \sum_{i=1}^n Q_i \cdot d_i$, кал / (см³ · °С);

L_{wt} — средневзвешенная скрытая теплота, $L_{wt} = \frac{1}{X} \sum_{i=1}^n L_i \cdot d_i$, кал / см³;

Q_i — теплоемкость грунта в i -ом слое, кал / см³ · °С.

Коэффициент λ может определяться по номограмме в работе [11] или по формуле:

$$\lambda = \beta \sqrt{\frac{2}{\mu}}. \quad (8)$$

Значение β определяется по решению системы уравнений:

$$\frac{\exp(-\beta^2)}{G(\beta)} - \alpha \frac{\exp(-\beta^2)}{1 - G(\beta)} = \frac{\sqrt{\pi}}{\mu} \beta. \quad (9)$$

$$G(\beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\beta \exp(-z^2) dz. \quad (10)$$

На рисунке показана схема последовательности расчета по усовершенствованному методу Берггрена. Исходные данные для расчета включают в себя климатические данные на участке, теплофизические характеристики грунтов земляного полотна и основания и толщину каждого слоя в них.

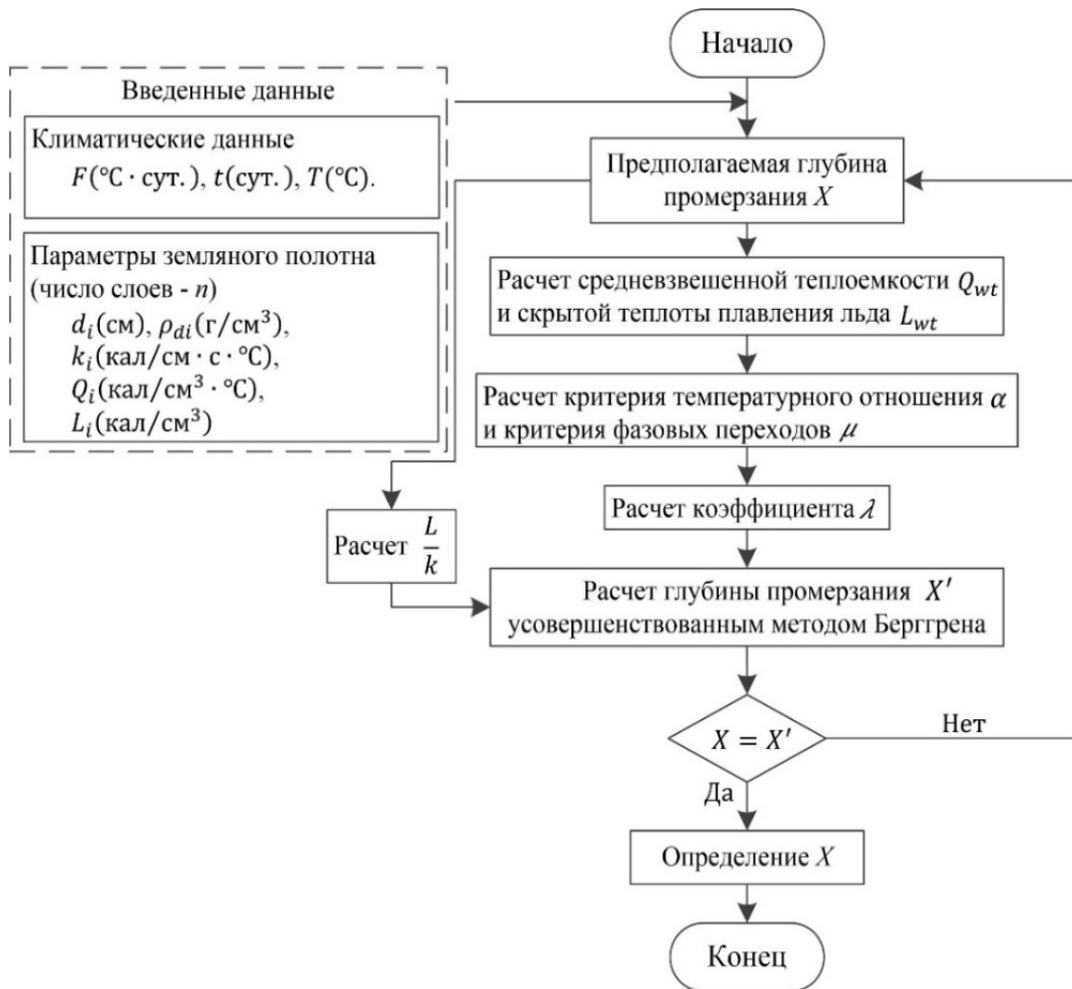


Схема последовательности расчета по усовершенствованному методу Берггрена

При расчете необходимо предположить значение глубины промерзания X ,

чтобы определить средневзвешенное значение $\frac{L}{k}$ и безразмерный коэффициент λ .

Если вычисленная глубина промерзания X' усовершенствованным методом Берггрена совпадает с предполагаемой глубиной X , то расчет завершен. В противном случае расчет повторяется до тех пор, пока X' не равна X .

Метод численного моделирования

В условиях холодного климата грунты земляного полотна подвергаются сезонному промерзанию, температурный режим земляного полотна изменяется с изменением температуры воздуха в течение года. Таким образом, глубина промерзания также определяется максимальной глубиной термоизоплета $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ путем математического моделирования температурного поля земляного полотна. В данной работе температурный режим земляного полотна описывается совмещенной моделью, которая

базируется на основе теории теплопроводности и ненасыщенной влагопроводности. Система уравнений модели приведена в виде:

$$\begin{cases} C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_w}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial y} + K(\theta_w) \right), \\ \theta_i = \theta_w \cdot B_I \end{cases}, \quad (11)$$

где C — объемная теплоемкость грунта, Дж/(м³·К);

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

L — удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;

ρ_i — плотность льда, кг/м³;

θ_i — суммарная льдистость мерзлого грунта, м³/м³;

T — температура, К;

t — время, с;

θ_w — объемная влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды, м³/м³;

ρ_w — плотность воды, кг/м³;

$D(\theta_w)$ — коэффициент диффузии влаги, который определяется как отношение коэффициента влагопроводности к удельной влагоемкости, м²/с; $K(\theta_w)$ — коэффициент влагопроводности в ненасыщенной зоне, м/с;

B_I — соотношение между суммарной льдистостью θ_i и объемной влажностью мерзлого грунта за счет незамерзшей воды θ_w .

Значение B_I описывается кусочной функцией в виде:

$$B_I = \frac{\theta_i}{\theta_w} = \begin{cases} 1,1 \left(\frac{T - 273,15}{T_{bf} - 273,15} \right)^b - 1,1, & T < T_{bf}, \\ 0, & T \geq T_{bf} \end{cases}, \quad (12)$$

где T_{bf} — температура начала замерзания грунта, К;

b — коэффициент, зависящий от вида и засоленности грунтов. При отсутствии экспериментальных данных принимается 0,56 для глины, 0,47 для суглинка, 0,61 для песка.

Для получения единственного решения системы уравнений тепломассопереноса необходимо знать краевые (начальные и граничные) условия и геометрическую форму тела. Обычно начальные условия задают распределение температуры

или влажности внутри тела в начальный момент. Граничные условия описываются законом взаимодействия поверхности тела с окружающей средой на границах.

Необходимые теплофизические характеристики грунта для вычисления определены в соответствии с СП 25.13330.2012 [12], гидрофизические параметры описаны аппроксимирующими функциями на основе модели Ван Генухтена-Муалема [13].

Примеры расчетов

Для проверки работоспособности представленных методов выполнены расчеты глубины промерзания земляного полотна при климатических условиях на северо-востоке КНР следующими методами: усовершенствованным методом Бергрена, методом численного моделирования, по нормам ТВ 10035—2018 в КНР и СП 32-104—98 в РФ для расчетов глубины промерзания земляного полотна.

Выбранные участки для расчетов находятся в Харбине и Чанчунь. В соответствии с данными из китайского центра метеорологической информации КНР необходимые климатические данные для расчетов представлены в табл. 1 [14]. При численном моделировании температура на поверхности задана с учетом амплитуды колебания температуры воздуха.

Конструкция земляного полотна высокоскоростных магистралей состоит из двух защитных слоев и насыпи по норме ТВ 10621—2014 «Проектирование высокоскоростных железных дорог в КНР» [15], физические параметры грунтов земляного полотна представлены в табл. 2. При численном моделировании конструкции земляного полотна соответствующие теплофизические параметры и температурные условия взяты из работы [16]. Расчет методом численного моделирования выполнен на 5 лет с шагом 1 день.

ТАБЛИЦА 1. Климатические данные на разных участках

Участок	Индекс промерзания (°С·сут)	Продолжительность промерзания (сут)	Среднегодовая температура воздуха (°С)
Харбин	1582	140	4,9
Чанчунь	1260	134	6,1

ТАБЛИЦА 2. Физические параметры грунтов земляного полотна

Слой грунта*	Толщина слоя (см)	Плотность сухого грунта (кг/м ³)	Влажность (%)	Теплопроводность (кал/(см·с·°С))
1	70	1,78	10	0
2	230	2,12	9	0

*1 — щебенистый грунт, 2 — грунты крупнообломочные и песчаные.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчетов глубины промерзания земляного полотна по разным методам

Участок	Расчетная глубина промерзания земляного полотна (см)			
	По усовершенствованному методу Берггрена	По численному моделированию	По норме ТВ 10035—2018 (КНР)	По норме СП 32-104—98 (РФ)
Харбин	220	224	226	218
Чанчунь	185	187	181	185

Результаты расчетов глубины промерзания земляного полотна по разным методам приведены в табл. 3. Очевидно, что расчетная глубина промерзания по разным методам близки друг другу, погрешность результатов расчетов от среднего значения не более 1,9 %.

Таким образом, усовершенствованный метод Берггрена целесообразно использовать для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна многослойной системы. По сравнению с методом численного моделирования этот метод отличается простотой ввода данных и эффективным вычислением.

Метод численного моделирования дает возможность прогнозировать глубину промерзания грунта, в том числе изменение глубины промерзания и оттаивания, вызванных потеплением климата. Разработанная модель может быть использована как для изучения закономерности распределения теплового режима земляного полотна при промерзании и оттаивании, так и для проектирования толщины защитных слоев от мороза для конструкции земляного полотна высокоскоростных магистралей.

Заключение

1. На основе анализа существующих методов расчета глубины промерзания грунта в данной работе предложен усовершенствованный метод Берггрена для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна ВСМ многослойной системы. Показатели расчетной глубины, вычисленной разными методами, в основном согласуются друг с другом. Усовершенствованный метод Берггрена целесообразно применять для расчета глубины промерзания земляного полотна ВСМ.

2. Приведенные результаты решения методом численного моделирования показывают, что этот метод математического моделирования процесса промерзания грунтов земляного полотна дает удовлетворительный прогноз динамики температурного поля, а также возникающей глубины промерзания в многослойной системе. Численный метод является эффективным средством определения глубины промерзания земляного полотна и может быть использован при проектировании толщины защитных слоев земляного полотна ВСМ.

Библиографический список

1. ГОСТ 24847—2017. Грунты. Методы определения глубины сезонного промерзания. — М.: Стандартиформ, 2018. — 19 с.
2. Carlson H. Calculation of depth of freezing and thawing under pavements / H. Carlson, M. S. Kersten // Soil temperature and ground freezing. — 1953. — Iss. 71. — Pp. 81–98.
3. Леонович И. И. Механика земляного полотна. / И. И. Леонович, Н. П. Вырко. — Минск: Наука и техника, 1975. — 232 с.
4. Zhang Yu. Study on the Stability of High-speed Railway Roadbed in Deep Seasonally Frozen Region: Doctoral dissertation / Yu. Zhang. — Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. — 161 p.
5. Yan H. Experimental Study on Frost Depth of High Speed Railway Subgrade in Cold Region / H. Yan, D. Cai, G. Yang et al. // China Railway Science. — 2015. — Iss. 36(03). — Pp. 1–6.
6. Леонович И. И. Статистический метод определения глубины промерзания грунтов / И. И. Леонович, Н. П. Вырко, М. Н. Демидко // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. — Минск: БГТУ, 2015. — № 2. — С. 27–31.
7. GB 50007—2011. Code for design of building foundation. — Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. — 333 p.
8. TB 10035—2018. Code for Design on Special Railway Earth Structure. — Beijing: China Railway Publishing House, 2018. — 281 p.
9. СП 32-104—98. Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм. — Москва: ГУП ЦПП, 1999. — 90 с.
10. Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути. — М.: Транспорт, 1998. — 74 с.
11. Aldrich Jr. Frost Penetration Below Highway And Airfield Pavements / P. Harl, Jr. Aldrich // Highway Research Board Bulletin. — 1956. — Iss. 135. — Pp. 124–149.
12. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04—88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». — Утв. Приказом Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2020 г. № 915/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2020. — 135 с.
13. Lu N. Unsaturated soil mechanics / N. Lu, W. J. Likos. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. — 556 p.
14. CMA Meteorological Data Centre: National Meteorological Information Centre. — Beijing, 2016. — URL: <http://data.cma.cn/en/?r=data/index&cid=0b9164954813c573> (дата обращения: 11.11.2022).
15. TB 10035—2018. Code for Design on Special Railway Earth Structure. — Beijing: China Railway Publishing House, 2018. — 281 p.
16. Wan X. Optimization Study for Subgrade Structure of HSR in Deep Seasonally Frozen Region Based on Temperature Field: Master's Thesis / X. Wang. — Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. — 101 p.

Дата поступления: 23.12.2022

Решение о публикации: 20.02.2023

Контактная информация:

ВАН Синьгун — аспирант; wangxintong@mail.ru

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.; kolos2004@inbox.ru

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; pgups60@mail.ru

Methods of Calculating Soil Freezing Depth of High-Speed Railway (HSR) Subgrade in Cold Climate Conditions in People's Republic of China

Wang Xintong, A. F. Kolos, A. V. Petriaev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Wang Xintong, Kolos A. F, Petriaev A. V. Methods of Calculating Soil Freezing Depth of High-Speed Railway (HSR) Subgrade in Cold Climate Conditions in People's Republic of China. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 26–37. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-26-37

Summary

Purpose: Methods for calculating soil freezing depth of high-speed railway subgrade are developed given its multilayer structure. **Methods:** Existing methods for soil freezing depth calculation have been reviewed, advanced Berggren method for calculating soil freezing depth of HSR subgrade and numerically modeling method for subgrade temperature regime on the basis of mathematical model given moisture migration are proposed. The calculation reliability is confirmed by comparison with numerical simulation results and the results of the calculation by method based on Chinese and Russian railway construction standards. **Results:** The results of soil freezing depth calculations by different methods are similar. It is reasonable to use advanced Berggren method to calculate soil freezing depth for multilayer system. Numerical modeling method makes it possible to predict soil freezing depth including depth change of freezing and thawing caused by climate warming. **Practical significance:** To calculate soil freezing depth of HSR subgrade, it is advisable to use advanced Berggren method. The developed model can be used both to study the logic of subgrade thermal regime distribution at freezing and thawing and to project the thickness of protective layers against a frost for HSR subgrade construction.

Keywords: Soil freezing depth, HSR subgrade, advanced Berggren method, numerical simulation, temperature regime.

References

1. *GOST 24847—2017. Grunty. Metody opredeleniya glubiny sezonnogo promerzaniya* [GOST 24847—2017. Soils. Methods for determining the depth of seasonal freezing]. Moscow: Standartinform Publ., 2018, 19 p. (In Russian)
2. Carlson H., Kersten M. S. Calculation of depth of freezing and thawing under pavements. *Soil temperature and ground freezing*, 1953, Iss. 71, pp. 81–98.
3. Leonovich I. I. *Mekhanika zemlyanogo polotna* [Subgrade mechanics]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1975, 232 p. (In Russian)
4. Zhang Yu. Study on the Stability of High-speed Railway Roadbed in Deep Seasonally Frozen Region: Doctoral dissertation. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015, 161 p.
5. Yan H., Cai D., Yang G. et al. Experimental Study on Frost Depth of High Speed Railway Subgrade in Cold Region. *China Railway Science*, 2015, Iss. 36(03), pp. 1–6.

6. Leonovich I. I. *Statisticheskij metod opredeleniya glubiny promerzaniya gruntov. Trudy BGTU. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Statistical method for determining the depth of soil freezing. Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry]. Minsk: BGTU Publ., 2015, Iss. 2(175), pp. 27–31. (In Russian)
7. GB 50007—2011. Code for design of building foundation. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011, 333 p.
8. TB 10035—2018. Code for Design on Special Railway Earth Structure. Beijing: China Railway Publishing House, 2018, 281 p.
9. SP 32-104—98. *Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznyh dorog kolei 1520 mm* [SP 32-104—98. Design of subgrade for 1520 mm gauge railways]. Moscow: GUP CPP Publ., 1999, 90 p. (In Russian)
10. *Tekhnicheskie ukazaniya po ustraneniyu puchin i prosadok zheleznodorozhnogo puti* [Technical instructions for eliminating deeps and drawdowns of the railway track]. Moscow: Transport Publ., 1998, 74 p. (In Russian)
11. Aldrich Jr., Harl P. Frost Penetration Below Highway And Airfield Pavements. Highway Research Board Bulletin. 1956, Iss. 135, pp. 124–149.
12. SP 25.13330.2020 “SNiP 2.02.04—88 Osnovaniya i fundamenty na vechno-merzlykh gruntakh”. *Utv. Prikazom Ministerstvom stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva RF ot 30 dekabrya 2020 g. № 915/pr* [SP 25.13330.2020 “SNiP 2.02.04—88 Bases and foundations on permafrost soils”. Approved. By order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 30, 2020 № 915/pr]. Moscow: FAU “FTsS” Publ., 2020, 135 p. (In Russian)
13. Lu N., Likos W. J. Unsaturated soil mechanics. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004, 556 p.
14. CMA Meteorological Data Centre: National Meteorological Information Centre. Beijing, 2016. Available at: <http://data.cma.cn/en/?r=data/index&cid=0b9164954813c573> (accessed: November 11, 2022)
15. TB 10035—2018. Code for Design on Special Railway Earth Structure. Beijing: China Railway Publishing House, 2018, 281 p.
16. Wan X. Optimization Study for Subgrade Structure of HSR in Deep Seasonally Fro-zen Region Based on Temperature Field: Master's Thesis. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019, 101 p.

Received: December 23, 2022

Accepted: February 20, 2023

Author's information:

Xintong WANG — Postgraduate Student; wangxintong@mail.ru

Aleksey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; kolos2004@inbox.ru

Andrey V. PETRYAEV — PhD in Engineering, Senior Researcher; pgups60@mail.ru