

## Альтернативная методика расчета промерзания слоистых оснований сезонных зимних лесовозных дорог

А. С. Миляев<sup>1</sup>

Санкт-Петербургская государственная  
лестехническая академия

### АННОТАЦИЯ

Приводится методика расчета глубины и скорости промерзания слоистых оснований зимних лесовозных дорог на базе фактических метеоданных. Методика построена на численном решении нестационарной задачи о теплопередаче в термодинамической системе «воздух – грунт» с учетом фазовых превращений поровой воды в лед.

**Ключевые слова:** зимние лесовозные дороги, теплопередача, промерзание оснований, фазовые превращения воды в лед.

### SUMMARY

Is constructed an alternate methods of a rate freezing of the winter timber-carrying roads basis by real meteorological data. The technique bases on a numerical solution of a non-stationary heat transfer problem at thermal system «air – ground» testing a sharp saltus for want of a freezing pore water.

**Keyword:** winter timber-carrying roads, heat transfer problem, sharp saltus for want of a freezing pore water.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При проектировании и эксплуатации зимних лесовозных дорог необходимо располагать информацией о распределении температуры по глубине естественного основания. Эта информация позволяет определить толщину мерзлого слоя грунта и выполнить прочностные расчеты дорожной конструкции.

Для расчета глубины и скорости промерзания оснований зимних дорог необходимо располагать сведениями о состоянии атмосферы (метеоданными), геологическом строении основания и теплофизических характеристиках грунтов в талом и мерзлом состояниях.

К настоящему времени создана научная база таких расчетов [1÷5], разработаны руководства и рекомендации [6, 7], стандарты [8÷12], методики [13÷17], однако, норм по расчету глубины и скорости промерзания грунтов на основе текущих значений метеоданных не создано.

В практических расчетах используются методики, построенные на полуэмпирических формулах решения задачи о теплопередаче от атмосферы к грунту, которые базируются на статистических метеоданных, осредненных по многолетним наблюдениям [7, 14].

В работе [7] определение глубины сезонного промерзания неосушенных торфяников рекомендуется определять по формуле, построенной на базе известной задачи Стефана [19], в которой реальные аргументы заменены на среднестатистические, что в конечном итоге привело к отрыву математической модели в [7] от конкретных условий протекания процесса промерзания грунтов. В частности, по методике [7] нельзя установить зависимость изменяющегося со временем распределения температуры по глубине грунта от изменения температуры воздуха.

В работе [14] расчет времени, необходимого для промерзания слоя грунта заданной толщины, рекомендуется определять по формуле, построенной на базе широко известного решения одномерной стационарной задачи о передаче тепла через стенку [18], причем температура воздуха на поверхности дороги зимой отсчитывается от среднестатистической нулевой температуры за 10 лет. Это означает, что независимо от текущих значений метеоданных время промерзания грунта должно отсчитываться от среднестатистической даты наступления холодов. Количество холода, необходимого для промерзания слоя грунта заданной толщины, определяется в [14] по теплоемкости массы грунта в слое при температуре грунта, равной  $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что не соответствует физическим условиям. Так, например, согласно литературным данным [1], поровая вода в слоях торфа, расположенных на некоторой глубине от поверхности, замерзает при температуре  $-0,3\text{...}-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а переход в лед связанной воды, заполняющей внутренние поры растительных волокон и их остатков, происходит при температуре ниже  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Методика (14) не учитывает изменения температуры воздуха в расчетном отрезке времени и в течение суток, теплоту фазовых переходов воды в лед, зависимость теплопроводности и теплоемкости грунта от температуры, а также зависимость теплопритока от нижних слоев грунта от их термодинамического состояния.

Реальными суточными метеоданными (в противоположность среднестатистическим) будем называть текущие числовые значения температуры воздуха, скорость ветра и толщину снежного покрова, измеренные в данном месте в течение расчетного интервала времени.

Методику прогнозирования глубины и скорости промерзания оснований сезонных зимних лесовозных дорог построим, используя реальные суточные метеоданные и численное решение нестационарной задачи о теплопередаче в термодинамической системе «воздух – грунт» с учетом фазовых превращений

<sup>1</sup> Автор – заведующий кафедрой теоретической и строительной механики, д. т. н., профессор.

поровой воды в лед и зависимости теплофизических свойств грунта от температуры.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служат слоистые основания зимних лесовозных дорог. Методика исследования носит теоретический характер и состоит в следующем. Рассматривается замкнутая термодинамическая система (рис. 1), состоящая из слоев воздуха и грунта с известными физико-механическими и теплофизическими свойствами; температура и фазовое состояние системы заданы; температура воздуха изменяется по заданному закону. Поверхности  $y = 0$ ,  $y = b$ ,  $x = h_4$  теплоизолированы. Требуется определить изменение температуры в каждой точке системы в зависимости от изменения температуры воздуха и заданных условий на ее границе.

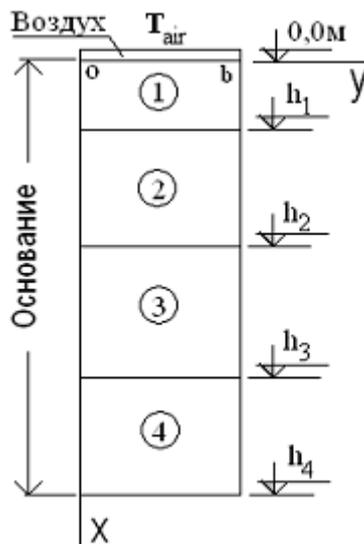


Рис. 1. Общая расчетная схема:  
1, 2, 3, 4 – слои грунтового основания;  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$  – отметки подошв слоев;  $T_{air}$  – температура воздуха:  $T_{air} = T_{air}(t)$

Распространение теплоты в слоях грунта подчиняется уравнению теплопроводности [18]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (1)$$

где  $H$  – энтальпия, Дж/м<sup>3</sup>;

$T$  – температура, °С;

$\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $\lambda_z$  – теплопроводность в направлении осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , Вт/м<sup>2</sup>;

$q_v$  – мощность внутренних источников энергии, Вт/м<sup>3</sup>;

$t$  – время, с.

В правой части уравнения (1) теплопроводность в направлении осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  зависит от температуры. Тепловые потоки через границы  $y = 0$ ,  $y = b$ ,  $x = h_4$  отсутствуют:  $Q(x, y, z, t) = 0$ .

Приращение энтальпии определяется выражением

$$\Delta H = \int_{T_b}^T \rho C(T) dT, \quad (2)$$

где  $T_b$ ,  $T$  – начальное и текущее значение температуры;

$\rho$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;

$C$  – удельная тепло-емкость, Дж/кг·°С.

Внутренних источников энергии в системе нет ( $q_v = 0$ ), однако, в слоях грунта при замерзании поровой воды выделяется теплота кристаллизации  $Q_{gr}$ , которую необходимо учесть в расчете. В соответствии со СНиП [12] теплота замерзания грунта  $Q_{gr}$ , Дж/м<sup>3</sup> принимается равной количеству теплоты, необходимой для замерзания воды в единице объема грунта, и определяется по формуле:

$$Q_{gr} = Q_w (W_{gr} - W_m) \rho_s, \quad (3)$$

где  $Q_w$  – теплота кристаллизации воды:  $Q_w = 3,35 \cdot 10^5$ , Дж/кг;

$W_{gr}$  – суммарная влажность грунта, доли единицы;  $W_m$  – влажность мерзлого грунта между включениями льда, доли единицы;

$\rho_s$  – плотность скелета грунта, кг/м<sup>3</sup>.

Примем, что теплота кристаллизации  $Q_{gr}$  выделяется в интервале температур от 0 до -1 °С,  $W_m$  будем считать равной нулю.

На границе  $x = 0$  происходит конвективный теплообмен по закону:

$$Q = \alpha A (T_{air} - T_{gr}), \quad (4)$$

где  $Q$  – тепловой поток через границу  $x = 0$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,

$T_{gr}$  – температура грунта на его поверхности;

$A$  – площадь теплообмена.

Уравнение (1) – нелинейное, нестационарное. Его решение возможно только численным методом. Для обеспечения устойчивости численной процедуры необходимо соблюдать определенное соотношение между «шагами» по времени  $\Delta t$  и по пространству  $\Delta h$  [20]:

$$\frac{\lambda \Delta t}{\rho C (\Delta h)^2} \leq \frac{1}{2}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность в направлении распространения тепловой волны;

$\Delta h$  – приращение пространственной координаты в направлении распространения тепловой волны.

Сформулированная задача может быть решена методом конечных элементов, например, с помощью пакета прикладных программ «Зенит».

**ПРИМЕР РАСЧЕТА**

Основанием зимней дороги служит слоистый грунт. Ограничимся определением температуры в одной точке основания вдоль трассы дороги. С этой целью на оси трассы «вырезаем» грунтовую колонку с размерами в плане  $b \times b$  и глубиной  $h_4$ ,  $b = 1\text{ м}$ ,  $h_4 = 4,8\text{ м}$ . Используем прямоугольную систему координат, как показано на рис.2.

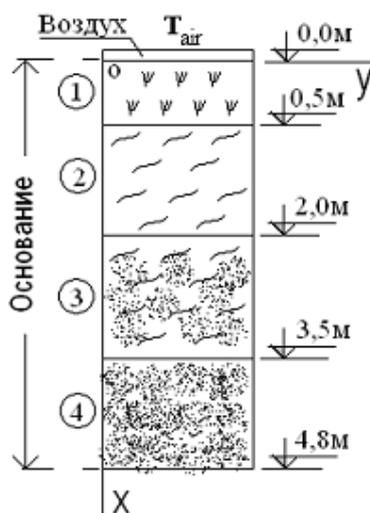


Рис. 2. Грунтовая колонка к примеру расчета

Физико-механические и теплофизические свойства грунта принимаем по СНиП [12].

Верхний слой (№ 1) – торфяной грунт с плотностью скелета  $\rho_s$ , равной  $400\text{ кг/м}^3$ . Толщина слоя –  $0,5\text{ м}$ ; относительная влажность торфяного грунта  $W_{gr}$  в долях плотности скелета грунта равна 2. Теплопроводность талого торфяного грунта  $\lambda_{th} = 0,93$ , мерзлого –  $1,39\text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ ; объемная теплоемкость талого торфяного грунта  $C_{th} = 3,78 \cdot 10^6$ , мерзлого –  $2,73 \cdot 10^6\text{ Дж/м}^3 \cdot \text{°C}$ .

Торфяной грунт подстилается слоем суглинка (слой № 2) с плотностью скелета  $\rho_s$ , равной  $1400\text{ кг/м}^3$ . Толщина слоя –  $1,5\text{ м}$ ; относительная влажность суглинка  $W_{gr}$  в долях плотности скелета грунта равна  $0,05$ . Теплопроводность талого суглинка  $\lambda_{th} = 0,46$ , мерзлого –  $1,39\text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ ; объемная теплоемкость талого суглинка  $C_{th} = 1,6 \cdot 10^6$ , мерзлого –  $1,47 \cdot 10^6\text{ Дж/м}^3 \cdot \text{°C}$ .

Третий слой (№ 3) толщиной  $1,5\text{ м}$  – супесь с плотностью скелета  $\rho_s$ , равной  $1400\text{ кг/м}^3$ , и относительной

влажностью  $W_{gr} = 0,1$  в долях плотности скелета грунта. Теплопроводность талой супеси  $\lambda_{th} = 0,93$ , мерзлой –  $1,05\text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ ; объемная теплоемкость талой супеси  $C_{th} = 1,89 \cdot 10^6$ , мерзлой супеси –  $1,74 \cdot 10^6\text{ Дж/м}^3 \cdot \text{°C}$ .

Четвертый слой толщиной  $1,3\text{ м}$  – песок с плотностью скелета  $\rho_s$ , равной  $2000\text{ кг/м}^3$ , и относительной влажностью  $W_{gr} = 0,1$  в долях плотности скелета грунта. Теплопроводность талого песка  $\lambda_{th} = 2,73$ , мерзлого –  $2,9\text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ ; объемная теплоемкость талого песка  $C_{th} = 2,68 \cdot 10^6$ , мерзлого –  $2,26 \cdot 10^6\text{ Дж/м}^3 \cdot \text{°C}$ .

Приращение энтальпии, определяемое выражением (2), для каждого слоя грунта вычислим при начальном значении температуры  $T_b = -15\text{ °C}$  и текущих значениях  $T_{-1} = -1\text{ °C}$ ,  $T_0 = 0\text{ °C}$ ,  $T_{10} = 10\text{ °C}$ . Промежуточные значения приращения энтальпии определим по линейной интерполяции.

В таблице 1 приведены промежуточные значения приращения энтальпии для грунтовых слоев по рисунку 2.

Таблица 1

Грунт	$\Delta H \cdot 10^{-6}, \text{ Дж/м}^3$			
	$-15\text{ °C}$	$-1\text{ °C}$	$0\text{ °C}$	$10\text{ °C}$
Торф	0	38,2	306,2	344
Суглинок	0	20,58	44	60
Супесь	0	24,3	71,2	90,1
Песок	0	31,64	98,64	125,44

Граничные условия: температура воздуха  $T = -16\text{ °C}$  (формула (1)); на прямых  $x = 4,8\text{ м}$ ,  $y = 0$  и  $y = 1\text{ м}$  тепловые потоки  $Q = 0$ .

Начальные условия: при  $t = 0$  в верхнем слое на прямой  $x = 0\text{ м}$  температура  $T = -1,5\text{ °C}$ , во всех остальных точках основания температура  $T = 0,5\text{ °C}$ .

Ставится задача: найти распределение температуры  $T$  по толщине мерзлого слоя грунта в момент времени  $t_{120} = 120$  часов.

Приращение пространственной координаты в направлении распространения тепловой волны  $\Delta x$  полагаем равным  $0,01\text{ м}$ , так что в направлении оси  $ox$  геометрическая модель будет иметь 481 узел.

Используя условие устойчивости численной процедуры (5), вычисляем допустимые значения шага по времени  $\Delta t$  для каждого слоя грунта. Результаты вычислений приведены в таблице 2.

Таблица 2

Грунт	$\Delta t, \text{ с}$	
	$T = -15 \div -1\text{ °C}$	$T = 0 \div 10\text{ °C}$
Торф	49,1	101,6
Суглинок	70,7	87
Супесь	41,4	50,8

Песок	19,5	24,5
-------	------	------

В расчете используется минимальное значение шага по времени  $\Delta t = 20$  с.

Для решения сформулированной задачи применяется метод конечных элементов, шаговое по времени решение и итерационная процедура приближения на каждом шаге решения.

Точность решения на каждом шаге по времени контролируется с помощью итерационной процедуры по двум показателям: по стабилизации количества тепла, протекающего через конечный элемент, и по стабилизации температуры.

Машинное время счета одного варианта задачи на персональном компьютере Pentium(R) с двумя центральными процессорами несущей частоты 2,61 ГГц и оперативной памятью 1,99 ГБ составляет около 15 минут.

В результате решения задачи на каждом шаге по времени получаются значения температуры в узлах конечных элементов. Поскольку в данном случае необходимо получить распределение температуры в грунте по прошествии 120 часов с момента установления температуры воздуха  $T_{\text{air}} = -16$  °С, в файл выходных данных записаны результаты расчета только на последнем шаге по времени  $t_{\text{end}} = 120$  часов и построен соответствующий график зависимости температуры  $T_{120}$  от координаты  $x$  в узлах на прямой  $y = 0$  м. Этот график представлен на рисунке 3.

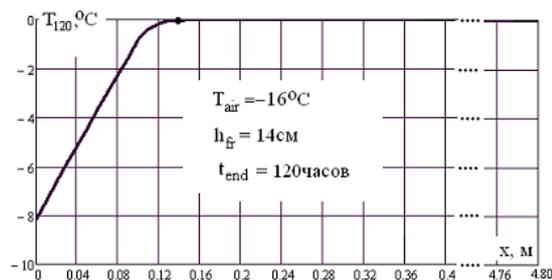


Рис. 3. Распределение температуры по глубине грунта

Кружком на графике отмечена точка, расположенная на нижней границе промерзания грунта. При этом принято, что торфяной грунт замерзает при температуре, равной  $-0,3$  °С. Толщина мерзлого торфяного грунта  $h_{г}$  составляет всего лишь  $0,14$  м. Скорость промерзания равна  $0,14/5 = 0,028$  м/сутки, т. е.  $2,8$  см в сутки

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета процесса промерзания грунта естественного основания зимних лесовозных дорог, в которой учитываются текущие фактические (не усредненные за предыдущие годы) метеорологические данные в заданном интервале времени

Эту методику можно использовать для решения теплотехнических задач при оценке несущей способности оснований зимних дорог. В частности, ее можно использовать для определения толщины мерзлого слоя грунта с учетом изменения температуры по его глубине в любой момент времени после наступления холодной погоды, что необходимо как для проектирования зимней лесовозной дороги, так и для определения сроков начала эксплуатации существующей зимней дороги. После выполнения теплотехнического анализа прочностные расчеты конструкции зимней дороги можно выполнить по методике [22].

Методика базируется на численном решении нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности, в котором теплоемкость, энтальпия и теплопроводность грунта зависят от температуры.

Приведенный пример расчета промерзания слоистого грунта естественного основания зимней дороги показывает, что верхний слой основания из торфяного грунта сильно замедляет процесс промерзания

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов (общая и прикладная) / Н. А. Цытович. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
2. Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1978. 464 с.
3. Ершов Э. Д. Общая геокриология / Э. Д. Ершов М.: Недра, 1990. 559 с.
4. Инженерная геокриология: Справочное пособие / Под ред. Э. Д. Ершова. М.: Недра, 1991. 439 с.
5. Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов / Под ред. В. Н. Разбегина. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
6. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов / Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1973. 191 с.
7. Рекомендации по определению теплофизических характеристик торфяных грунтов и расчетам их промерзания и оттаивания. М.: НИИ оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова (НИИОПС) Госстроя СССР, 1978. 54 с.
8. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Госстандарт, 1985. 24 с.
9. ГОСТ 24847-81. Грунты. Методы определения глубины сезонного промерзания. М.: Госстандарт, 1981. 10 с.
10. ГОСТ 26263-84. Грунты. Методы лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов. М.: Госстандарт, 1984. 9 с.
11. ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры. М.: Госстандарт, 1982. 10 с.
12. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2000. 52 с.

13. Павлов А. В. Расчет и регулирование мерзлотно-го режима почвы / А. В. Павлов. Новосибирск: Наука, 1980. 240 с.
14. Дорофеев А. Г., Дорофеев В. Н. Зимние лесовозные дороги с увеличенным сроком действия / А. Г. Дорофеев, В. Н. Дорофеев // Лесозэксплуатация и лесосплав. Обзорная информация. Вып. 10. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1987. 52 с.
15. Морозов В. С. Теплотехнический расчет оснований сезонных зимних дорог на болотах: Учебное пособие / В. С. Морозов. Архангельск: АГТУ, 2004. 79 с.
16. Невзоров А. Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах: Учебное пособие / А. Л. Невзоров. Архангельск: АГТУ, 1999. 156 с.
17. Вялов С. С. Строительство промышленных сооружений на мерзлом торфе / С. С. Вялов, Г. Л. Каган, А. Н. Воевода и др. М.: Недра, 1980. 144 с.
18. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
19. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
20. Рихтмайер Р. Разностные методы решения краевых задач / Р. Рихтмайер, К. Мортон. М.: Мир, 1972. 418 с.
21. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1982. 37 с.
22. Миляев А. С. Автоматизированный расчет конструкций зимних лесовозных: Учебное пособие / А. С. Миляев. СПб., 2006. 303 с.