

УДК 625.711.84+625.31

А.С. Миляев

С.-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова

Миляев Александр Сергеевич родился в 1936 г., окончил в 1959 г. Ленинградское высшее военное инженерно-техническое училище ВМФ, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, зав. кафедрой теоретической и строительной механики С.-Петербургского государственного лесотехнического университета. Имеет более 150 научных работ в области механики деформируемого твердого тела, в том числе механики силового взаимодействия конструкций и сооружений с грунтом при статических и динамических нагрузках.
E-mail: icffi@home.ru.



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЕРЗАНИЯ СЛОИСТЫХ ОСНОВАНИЙ ЗИМНИХ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ ПО ТЕКУЩИМ ЗНАЧЕНИЯМ МЕТЕОДАНЫХ

Приведена 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.

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 требуются сведения о состоянии атмосферы (метеоданные), о геологическом строении основания и теплофизических характеристиках грунтов в талом и мерзлом состояниях, температуре на поверхности основания в начале расчета, а также об условиях теплообмена на подошве основания.

К настоящему времени создана научная база таких расчетов [1, 7, 8, 22], разработаны руководства и рекомендации [16, 18], стандарты [2–5, 20], методики [6, 13, 14, 21], однако нормы по расчету глубины и скорости промерзания слоистых грунтовых оснований зимних лесовозных дорог на основе текущих значений метеоданных отсутствуют.

В практических расчетах используют методики, построенные на полуэмпирических формулах решения задачи о теплопередаче от атмосферы к грунту, которые базируются на статистических метеоданных, осредненных по многолетним наблюдениям [6, 16].

В работе [16] глубину сезонного промерзания неосушенных торфяников рекомендуется определять по формуле, построенной на базе аналитического решения известной задачи Стефана [10], в которой реальные аргументы заменены на среднестатистические, что в конечном итоге приводит к отрыву математической модели [16] от конкретных условий протекания процесса промерзания. В частности, по методике [16] нельзя установить зависимость изменяющегося во времени распределения температуры по глубине грунта при изменении температуры воздуха, теплопроводности и теплоемкости в зависимости от температуры слоев грунта.

Кроме того, эта методика не учитывает теплоприток от слоев грунта ниже подошвы основания в зависимости от их термодинамического состояния.

В работе [6] время, необходимое для промерзания слоя грунта заданной толщины, рекомендуется определять по формуле, базирующейся на широко известном решении одномерной стационарной задачи о передаче тепла через стенку [9], причем температура воздуха на поверхности дороги зимой отсчитывается от среднестатистической нулевой температуры за 10 лет. Это означает, что независимо от реальных текущих значений метеоданных время промерзания грунта должно отсчитываться от среднестатистической даты наступления холодов. Количество холода, необходимого для промерзания слоя грунта заданной толщины, определяется в [6] по теплоемкости массы грунта в слое при его температуре $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, что не соответствует физическим условиям. Так, согласно литературным данным [22], поровая вода в слоях торфа, расположенных на некоторой глубине от поверхности, замерзает при температуре $-0,3\dots-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а переход в лед связанной воды, заполняющей внутренние поры растительных волокон и их остатков, происходит при температуре ниже $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методика [6] не учитывает суточные изменения температуры воздуха в расчетном отрезке времени, теплоту фазовых переходов воды в лед, зависимость теплопроводности и теплоемкости грунта от температуры, а также теплоприток от слоев грунта ниже подошвы основания в зависимости от их термодинамического состояния.

В учебном пособии [13] для теплотехнических расчетов оснований зимних лесовозных дорог используется методика [6].

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

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

Распространение теплоты в слоях грунта подчиняется уравнению теплопроводности [9]:

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

где H – энтальпия, Дж/м³;

t – время, с;

T – температура, °С;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – теплопроводность в направлении осей x, y, z , Вт/м²;

q_v – мощность внутренних источников энергии, Вт/м³.

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

Приращение энтальпии

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

где T_b, T – начальное и текущее значение температуры, °С;

ρ – плотность грунта, кг/м³;

C – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С).

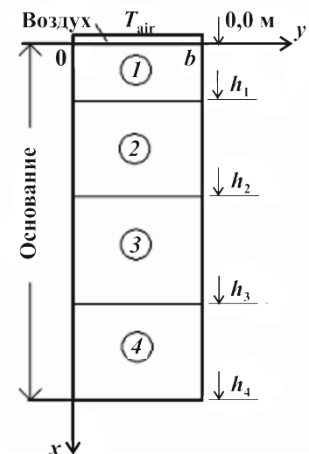


Рис. 1. Общая расчетная схема: 1 – 4 – слои грунтового основания; $h_1 - h_4$ – отметки подошв слоев; T_{air} – температура воздуха, $T_{air} = T_{air}(t)$

Внутренних источников энергии в системе нет ($q_v = 0$), однако в слоях грунта при замерзании поровой воды выделяется теплота кристаллизации (Q_{gr} , Дж/м³), которую необходимо учесть в расчете. В соответствии со СНиП 2.02.04 – 88 [20] Q_{gr} принимается равной количеству теплоты, необходимой для замерзания воды в единице объема грунта, и определяется по следующей 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;

ρ_s – плотность скелета грунта, кг/м³.

Примем, что Q_{gr} выделяется в интервале температур от -1 до 0 °C; $W_m = 0$.

На границе $x = 0$ происходит конвективный теплообмен:

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

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

α – коэффициент теплоотдачи;

A – площадь теплообмена;

T_{gr} – температура грунта на его поверхности.

Коэффициент α на границе «воздух–снег» (*snw*) и «воздух–лед» (*ice*) можно вычислить по следующим эмпирическим формулам СНиП [19]:

$$\alpha_{snw} = 23\sqrt{v + 0,3}; \quad (5)$$

$$\alpha_{ice} = 6\sqrt{v + 0,3}, \quad (6)$$

где v – скорость ветра над поверхностью теплообмена, м/с.

Уравнение (1) – нелинейное, нестационарное. Его решение возможно только численным методом. Для обеспечения устойчивости численной процедуры необходимо соблюдать определенное соотношение между «шагами» по времени Δt и пространству Δh [17]:

$$\frac{\lambda \Delta t}{\rho C (\Delta h)^2} \leq \frac{1}{2}, \quad (7)$$

где λ – теплопроводность в направлении распространения тепловой волны;

Δh – приращение пространственной координаты в направлении распространения тепловой волны.

Сформулированная задача может быть решена методом конечных элементов, например, с помощью программного комплекса «ЗЕНИТ».

Пример теплотехнического расчета

Основанием зимней дороги служит слоистый грунт, состоящий из пластов торфяного грунта (1), суглинка (2), супеси (3) и песка (4).

Ограничимся определением температуры на одной вертикали основания вдоль трассы дороги. С этой целью на оси трассы «вырежем» грунтовую колонку с размерами в плане $b \times b$ и глубиной h_4 : $b = 1,0$ м; $h_4 = 2,4$ м.

Используем прямоугольную систему координат, как показано на рис. 2.

Физико-механические и теплофизические свойства грунта принимаем по СНиП 2.02.04–88 [20].

Верхний слой (1) – торфяной грунт с плотностью скелета $\rho_s = 400 \text{ кг/м}^3$; толщина слоя – 0,5 м; относительная влажность торфяного грунта $W_{gr} = 2,00$ (в долях плотности скелета грунта); теплопроводность талого торфяного грунта $\lambda_{th} = 0,93$, мерзлого – 1,39 Вт/(м·°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 (2) с плотностью скелета $\rho_s = 1400 \text{ кг/м}^3$; толщина слоя – 0,5 м; относительная влажность суглинка $W_{gr} = 0,05$; теплопроводность талого суглинка $\lambda_{th} = 0,46$, мерзлого – 1,39 Вт/(м·°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) – супесь с плотностью скелета $\rho_s = 1400 \text{ кг/м}^3$; толщина слоя – 0,7 м; относительная влажность $W_{gr} = 0,10$; теплопроводность талой супеси $\lambda_{th} = 0,93$, мерзлой – 1,05 Вт/(м·°C); объемная теплоемкость талой супеси $C_{th} = 1,89 \cdot 10^6$, мерзлой – $1,74 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{°C)}$.

Четвертый слой (4) – песок с плотностью скелета $\rho_s = 2000 \text{ кг/м}^3$; толщина слоя – 0,7 м; относительная влажность $W_{gr} = 0,1$; теплопроводность талого песка $\lambda_{th} = 2,73$, мерзлого – 2,90 Вт/(м·°C); объемная теплоемкость талого песка $C_{th} = 2,68 \cdot 10^6$, мерзлого – $2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{°C)}$.

Плотность грунта ρ_s в слоях считаем постоянной величиной.

Обозначим теплопроводность, теплоемкость и энтальпию при температуре 0 °C символами λ_0 , C_0 и H_0 . Тогда зависимости теплопроводности λ , теплоемкости C и энтальпии H от температуры можно представить в виде

$$\lambda = \lambda_0 f_1(T); C = C_0 f_2(T); H = H_0 f_3(T). \quad (8)$$

Введем безразмерные функции

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_0} = f_1(T); \bar{C} = \frac{C}{C_0} = f_2(T); \bar{H} = \frac{H}{H_0} = f_3(T). \quad (9)$$

Безразмерные функции (9) представлены на рис. 3.

Приращение энтальпии, определяемое выражением (2), для каждого слоя грунта вычисляем при начальном ($T_b = -15 \text{ °C}$) и текущих значениях температуры ($T_{-1} = -1 \text{ °C}$; $T_0 = 0 \text{ °C}$; $T_{10} = 10 \text{ °C}$), промежуточные – по программе линейной интерполяции.

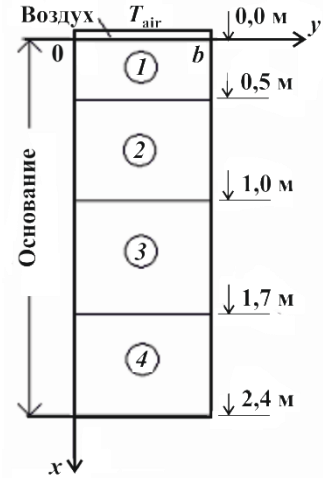


Рис. 2. Грунтовая колонка к примеру расчета

В табл. 1 приведены промежуточные значения приращения энтальпии грунтовых слоев по рис. 3.

Таблица 1

Грунт	$\Delta H \cdot 10^{-6}, \text{ Дж/м}^3, \text{ при } T, \text{ }^\circ\text{C}$			
	-15	-1	0	10
Торф	0	38,20	306,20	344,00
Суглинок	0	20,58	44,00	60,00
Супесь	0	24,30	71,20	90,10
Песок	0	31,64	98,64	125,44

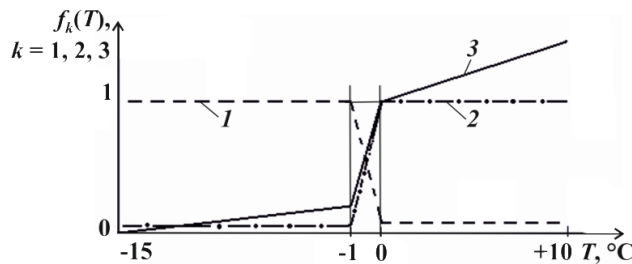


Рис. 3. Зависимости теплопроводности λ (1), теплоемкости \bar{C} (2) и энтальпии H (3) от температуры T

Граничные условия: температура воздуха $T_{air} = -16 \text{ }^\circ\text{C}$ (формула (4)); на прямых $y = 0$ и $y = 1$ м тепловые потоки $Q = 0$. В подошве основания, на прямой $x = 2,4$ м, тепловой поток $Q \neq 0$, поэтому поддерживается постоянная температура $T_{dwn} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Скорость ветра у поверхности торфа принимаем равной 5 м/с. Полагаем, что на границе «воздух–торфяной грунт» при температуре $T = -0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ образуется ледяная пленка, поэтому коэффициент теплоотдачи α_{ice} можно вычислить по формуле (6) СНиП 2.06. 04–82 [19]:

$$\alpha_{ice} = 6\sqrt{5} + 0,3 = 13,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}). \quad (10)$$

Начальные условия: при $t = 0$ на поверхности основания, т.е. на прямой $x = 0$ м, температура $T = -1,5 \text{ }^\circ\text{C}$, во всех остальных точках основания, кроме подошвы, $T = -0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

Расчет выполняется в одномерной постановке, так что в правой части уравнения теплопроводности (1) второе и третье слагаемые равны нулю. Приращение пространственной координаты в направлении распространения тепловой волны Δx полагаем 0,01 м, поэтому в направлении оси ox геометрическая модель имеет 241 узел.

Используя условие устойчивости численной процедуры (7), вычисляем допустимые шаги по времени Δt для каждого слоя грунта, результаты вычислений сводим в табл. 2.

Таблица 2

Грунт	Δt , с, при T , °С	
	-15...-1	0...10
Торф	49,1	101,6
Суглинок	70,7	87,0
Супесь	41,4	50,8
Песок	19,5	24,5

В расчете использованы: среднее значение шага по времени $\Delta t = 15$ с; минимальное – $\Delta t_{\min} = 10$ с; максимальное – $\Delta t_{\max} = 30$ с.

Для решения сформулированной задачи применяется метод конечных элементов, шаговое по времени решение и итерационная процедура приближения на каждом шаге. Точность решения на каждом шаге по времени контролируется в программном комплексе «ЗЕНИТ» с помощью итерационной процедуры по двум показателям: по стабилизации количества тепла, протекающего через конечный элемент, и по стабилизации температуры.

Аналогичная схема решения нелинейной нестандартной задачи теплопроводности была использована автором в статье [12].

Машинное время счета одного варианта задачи на персональном компьютере типа Pentium (R) с двумя центральными процессорами несущей частоты 2,6 ГГц и оперативной памятью 2 ГБ составляет около 20 мин. В результате решения задачи на каждом шаге по времени получают значения температуры в узлах конечных элементов.

Поскольку в данном случае необходимо иметь распределение температуры в грунте по прошествии 120 ч с момента установления температуры воздуха $T_{air} = -16$ °С, в файл выходных данных записаны результаты расчета только на последнем шаге по времени $t_{end} = 120$ ч.

По этим данным построены соответствующие графики зависимости температуры T_{120} от координаты x в узлах на прямой $y = 0$ м вблизи от поверхности грунтового основания дороги и у подошвы этого основания (рис. 4).

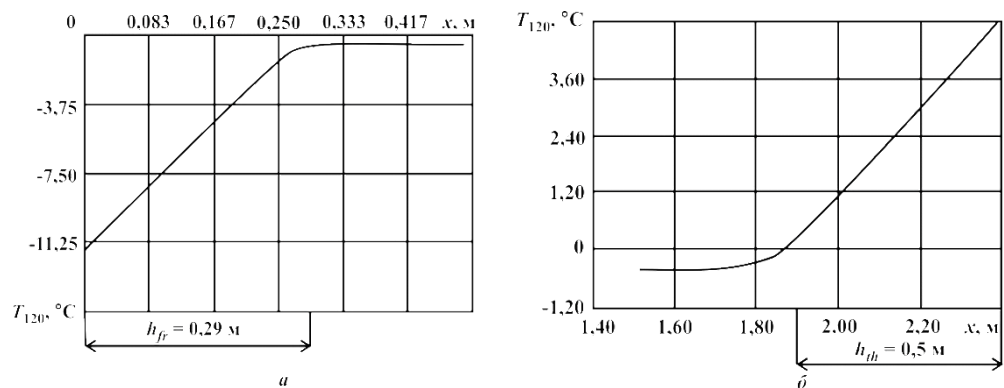


Рис. 4. Распределение температуры по глубине грунта у поверхности (а) при $T_{air} = -16$ °С; $t_{end} = 120$ ч и у подошвы (б) при $T_{dwn} = 5$ °С; $t_{end} = 120$ ч

Символом h_{fr} на рис. 4, *а* отмечена нижняя граница промерзания грунта. При этом принято, что торфяной грунт замерзает при температуре $-0,3$ °С. Толщина мерзлого торфяного грунта h_{fr} , полученная в расчете, составляет около 29 см. Скорость промерзания торфяного грунта равна $29/5 = 5,8$ см/сут.

Символом h_{fr} на рис. 4, *б* отмечена толщина незамерзшего песка вблизи от подошвы грунтового основания. Она составляет 0,5 м.

Заключение и выводы

Разработана методика автоматизированного расчета процесса промерзания грунта естественного слоистого основания зимних лесовозных дорог, в которой учитываются фактические (не усредненные за предыдущие годы) метеорологические данные в заданном интервале времени, фазовые превращения поровой воды в лед и зависимость теплофизических свойств грунта от температуры.

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

Эту методику можно использовать для решения теплотехнических задач при оценке несущей способности оснований сезонных зимних лесовозных дорог.

Приведенный пример расчета промерзания слоистого грунта естественного основания зимней дороги показывает, что скорость промерзания верхнего слоя основания из торфяного грунта при достаточно низкой стабильной температуре воздуха (-16 °С в течение 5 сут) может достигать 5,8 см/сут, что обеспечивает значительную толщину (29 см) мерзлого слоя.

В примере расчета влажность мерзлого грунта между включениями льда W_m принята равной нулю, поскольку, с одной стороны, ее можно определить только опытным путем после промерзания грунта, с другой – отличная от нуля W_m может только увеличивать теплоту замерзания грунта Q_{gr} в формуле (3), что может уменьшить скорость промерзания. Следовательно, в приведенном примере расчета получена нижняя граница скорости промерзания грунта.

Для оценки достоверности рассчитанной в примере скорости промерзания верхнего слоя основания из торфяного грунта при температуре воздуха -16 °С в течение 5 сут, равной 5,8 см/сут, воспользуемся результатами расчетов толщины промерзания торфа по методике работы [6]. В табл. 15 этой работы [6] приведены следующие результаты расчетов промерзания зимней дороги на болоте, покрытой снегом: влажность торфа – 1000 %; средняя температура воздуха -12 °С в течении 9 сут; средняя толщина снежного покрова – 6 см; толщина промерзания торфа – 30 см. Таким образом, средняя скорость промерзания торфа $30/9 = 3,33$ см/сут.

Учитывая, что в нашем примере расчета отсутствует снежный покров и температура воздуха принята ниже, чем в работе [6], степень достоверности приведенной в статье методики расчета можно оценить как удовлетворительную.

При известных механических характеристиках и толщине мерзлого слоя напряженно-деформированное состояние конструкции сезонных зимних лесовозных дорог можно определить по методике [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вялов С.С.* Реология мерзлых грунтов / Под ред. В.Н. Разбегина М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
2. ГОСТ 24847–81. Грунты. Методы определения глубины сезонного промерзания. М.: Госстандарт, 1981. 10 с.
3. ГОСТ 25358–82. Грунты. Метод полевого определения температуры. М.: Госстандарт, 1982. 10 с.
4. ГОСТ 26263–84. Грунты. Методы лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов. М.: Госстандарт, 1984. 9 с.
5. ГОСТ 5180–84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Госстандарт, 1985. 24 с.
6. *Дорофеев А.Г., Дорофеев В.Н.* Зимние лесовозные дороги с увеличенным сроком действия // Лесозэксплуатация и лесосплав. Обзор. информ. Вып. 10. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1987. 52 с.
7. *Ершов Э.Д.* Общая геокриология. М.: Недра, 1990. 559 с.
8. Инженерная геокриология: справ. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова М.: Недра, 1991. – 439 с.
9. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
10. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
11. *Миляев А.С.* Автоматизированный расчет конструкций зимних лесовозных дорог: учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГЛТУ, 2006. 303 с.
12. *Миляев А.С.* Влияние тепловыделений биомассы подстилающего слоя на промерзание оснований зимних лесовозных дорог // Лесн. журн. 2010. №1. С. 53–58. (Изв. высш. учеб. заведений).
13. *Морозов В.С.* Теплотехнический расчет оснований сезонных зимних дорог на болотах: учеб. пособие. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. 79 с.
14. *Невзоров А.Л.* Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах: учеб. пособие. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. 156 с.
15. *Павлов А.В.* Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. Новосибирск: Наука, 1980. 240 с.
16. Рекомендации по определению теплофизических характеристик торфяных грунтов и расчетам их промерзания и оттаивания. М.: НИИОПС Госстроя СССР, 1978. 54 с.
17. *Рихтмайер Р., Мортон К.* Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972. 418 с.
18. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов / ПНИИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1973. 191 с.

19. СНиП 2.06.04–82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) / Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1982. 37 с.

20. СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2000. 52 с.

21. Строительство промышленных сооружений на мерзлом торфе / С.С. Вялов, Г.Л. Каган, А.Н. Воевода, В.И. Муравленко. М.: Недра, 1980. 144 с.

22. *Цытович Н.А.* Механика мерзлых грунтов (общая и прикладная). М.: Высш. шк., 1973. 448 с.

Поступила 11.01.11

A.S. Milyaev

St. Petersburg State Forest Technical University

Forecasting of Freezing Parameters of Layered Bases of Winter Wood-Roads According to the Current Meteorological Data

The method of calculating the depth and speed of freezing of layered bases of winter wood-roads according to the current meteorological data is introduced in the article. The method is based on a numerical solution of a non-stationary problem of heat transfer in a thermodynamic "air-ground" system with an allowance for phase transitions of interstitial water into ice.

Key words: winter wood-roads, heat transfer, freezing of bases, phase transitions of water into ice.
