



УДК 625.711.84

А.С. Миляев

С.-Петербургская государственная лесотехническая академия

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



ВЛИЯНИЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ БИОМАССЫ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ НА ПРОМЕРЗАНИЕ ОСНОВАНИЙ ЗИМНИХ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ

Исследовано влияние тепловыделения биологического происхождения на промерзание оснований зимних лесовозных дорог в болотистой местности. Методика расчета построена на числовом примере.

Ключевые слова: зимние лесовозные дороги, грунтовое основание, биологические источники тепла, промерзание.

Зимние лесовозные дороги в болотистой местности устраиваются в соответствии с нормами [1]. При проектировании таких дорог необходимо располагать информацией о распределении температуры по глубине естественного основания, что позволяет определить толщину и температуру мерзлого слоя грунта, а затем его прочностные и деформационные характеристики, необходимые для расчетов дорожной конструкции на прочность и жесткость [3].

В настоящее время нет нормативных документов по расчету промерзания и оттаивания оснований зимних лесовозных дорог. В имеющихся методиках используются полуэмпирические формулы, в которых не в полной мере учитываются происходящие в грунтах термодинамические процессы.

Известно, что в биогенных грунтах (например в торфяных залежах) существуют биологические источники тепла, которые обеспечивают постоянную положительную температуру в слое, подстилающем естественное основание зимних лесовозных дорог [5]. Цель нашей работы – дать количественную оценку влияния такого тепловыделения на промерзание оснований зимних лесовозных дорог. Методика расчета построена на числовом примере.

Постановка задачи. Рассматривается промерзание в течение 5 сут слоя биогенного грунта (торфяной залежи) толщиной $h_{fnd} = 1,61$ м, предназначенного служить естественным основанием зимней лесовозной дороги. Этот слой подстилается термически активным массивом, в котором, благодаря жизнедеятельности микроорганизмов, поддерживается положительная температура $T_{bio} = +4$ °С.



Рис. 1. Термодинамическая система

Полагая, что температурное поле в основании дороги не изменяется вдоль ее оси, рассматриваем плоскую задачу теплопроводности. Для количественной оценки влияния тепловыделения на промерзание оснований зимних лесовозных дорог выполняется три независимых расчета. В первом расчете среднесуточная температура воздуха над поверхностью слоя биогенного грунта T_{air} принимается равной -8 , во втором -12 , в третьем -16 °С. Относительная влажность грунта W_{gr} в долях плотности скелета грунта ρ_s равна 2.

Воздух, биогенный грунт и термически активный массив являются составными частями закрытой термодинамической системы. Вырежем из нее прямоугольник длиной l_x и шириной l_y , как показано на рис. 1. Ось x направлена вглубь основания, ось y — поперек трассы дороги.

В слое биогенного грунта нет внутренних источников энергии, однако при замерзании в грунте поровой воды выделяется теплота кристаллизации Q_{gr} , которую необходимо учесть в расчете, приняв равной $(0 \dots -1)$ °С. Две границы слоя биогенного грунта (основания) подвержены воздействию температуры, на двух других имеется теплоизоляция.

Прочность мерзлого слоя биогенного грунта обеспечивается за счет замерзания капельно-жидкой воды в порах грунта. При этом выделяется скрытая теплота кристаллизации $Q_w = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг. В соответствии со СНиП 2.02.04–88 [6] теплота замерзания грунта Q_{gr} принимается равной количеству теплоты, необходимой для замерзания воды в единице объема грунта, и определяется по формуле

$$Q_{gr} = Q_w(W_{gr} - W_m)\rho_s, \quad (1)$$

где W_{gr} — суммарная влажность грунта, доли единицы;

W_m — влажность мерзлого грунта между включениями льда, доли единицы;

ρ_s — плотность скелета грунта, кг/м³.

Математическая формулировка задачи. Распространение теплоты в слое биогенного грунта подчиняется уравнению теплопроводности [2]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) + q_v, \quad (2)$$

где H – энтальпия, Дж/м³;
 q_x, q_y – тепловые потоки в направлении осей x и y , Вт/м²;
 q_v – мощность внутренних источников энергии, Вт/м³;
 t – время, с.
 По закону Фурье

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}; q_y = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (3)$$

где λ_x, λ_y – теплопроводность в направлении осей x и y , Вт/(м·°C);
 T – температура, °C.

После подстановки q_x, q_y в уравнение (2) оно получает вид

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v. \quad (4)$$

Приращение энтальпии (теплосодержания, тепловой функции) определяется выражением

$$H = \int_{T_b}^T \rho C(T) dT, \quad (5)$$

где T_b, T – начальное и текущее значения температуры, °C;

ρ – плотность тела, кг/м³;
 C – теплоемкость, Дж/(кг·°C).

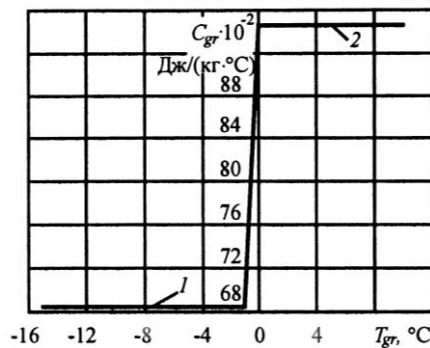
Ограничиваясь постоянными значениями плотности ρ и кусочно-линейной зависимостью теплоемкости C от температуры T (рис. 2), энтальпию можно представить кусочно-линейной зависимостью

$$H = (\rho C)_k \int_{T_b}^T dT, k = 1, 2 \dots \quad (6)$$

Уравнение (4) с учетом (6) в отсутствие внутренних источников тепла в слое биогенного грунта ($q_v = 0$) получает вид

$$(\rho C)_k \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right), k = 1, 2 \dots \quad (7)$$

Рис. 2. Зависимость теплоемкости грунта C_{gr} от температуры T_{gr} : 1 – мерзлого, $C_{gr,fr} = 6,82 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°C); 2 – талого $C_{gr,th} = 9,45 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°C)



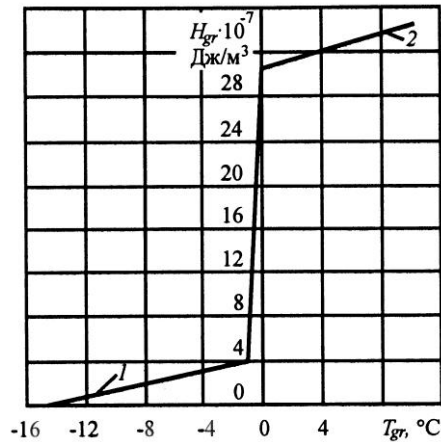


Рис. 3. Зависимость энтальпии грунта H_{gr} от температуры T_{gr} : 1 – мерзлого ($T_{gr} = -1$ °C), $H_{gr,fr} = 38,2 \cdot 10^6$ Дж/м³; 2 – талого ($T_{gr} = 0$ °C), $H_{gr,th} = 306,2 \cdot 10^6$ Дж/м³

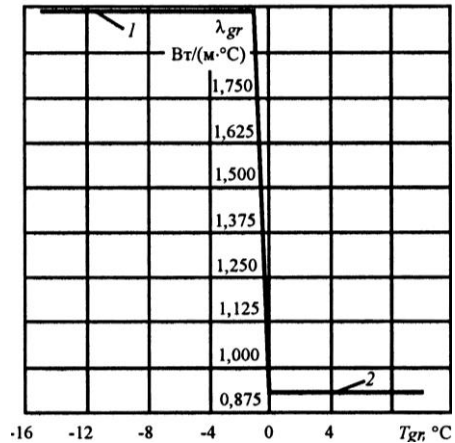


Рис. 4. Зависимость теплопроводности грунта λ_{gr} от температуры T_{gr} : 1 – мерзлого, $\lambda_{gr,fr} = 1,93$ Вт/(м·°C); 2 – талого, $\lambda_{gr,th} = 0,93$ Вт/(м·°C)

Принимая плотность биогенного грунта равной 400 кг/м^3 и используя числовые значения теплоемкости мерзлого и талого грунта $C_{gr,fr} = 6,82 \cdot 10^3$, $C_{gr,th} = 9,45 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°C), по формуле (6) получаем зависимость энтальпии грунта H_{gr} от температуры, представленную на рис. 3.

В правой части уравнения (7) теплопроводность в направлении осей x , y также зависит от температуры, что отражено на рис. 4.

Начальные условия: при $t = 0$ в слое биогенного грунта $T = 0$ °C. Граничные условия: на прямой $x = 0$ температура $T = T_{air}$; на прямой $x = l_x$ температура $T = T_{bio} = +4$ °C; на прямых $y = 0$ и $y = l_y$ тепловых потоков нет: $q_y = 0$. Требуется найти толщину мерзлого слоя биогенного грунта для трех значений установившейся над поверхностью грунта температуры воздуха T_{air} : -8 , -12 и -16 °C по истечении 120 ч.

Метод решения задачи. Уравнение (7) – нестационарное, нелинейное, с переменными коэффициентами. Его аналитическое решение в настоящее время невозможно, поэтому используем численный метод конечных элементов, шаговое по времени решение и итерационную процедуру приближения на каждом шаге.

Для обеспечения устойчивости решения шаг по времени Δt и максимальный размер сетки узлов конечных элементов Δh должны отвечать критерию [4]:

$$\frac{\lambda \Delta t}{C(\Delta h)^2} \leq \frac{1}{2}, \quad (8)$$

где λ , C – теплопроводность и теплоемкость тел, входящих в термодинамическую систему, причем теплоемкость C в выражении (8) имеет размерность Дж/(м³·°C).

Используя размерность теплоемкости Дж/(кг·°С), критерий (8) переписываем в виде

$$\frac{\lambda \Delta t}{\rho C (\Delta h)^2} \leq \frac{1}{2}. \quad (9)$$

Конечно-элементная модель характеризуется следующими входными данными. Длина модели $l_x = 1,61$ м, ширина $l_y = 0,02$ м. Параметры биогенного грунта: плотность $\rho_{gr} = 400$ кг/м³; теплопроводность талого грунта $\lambda_{gr,th} = 0,93$, мерзлого $\lambda_{gr,fr} = 1,93$ Вт/(м·°С); теплоемкость талого грунта $C_{gr,th} = 9,45 \cdot 10^3$, мерзлого $C_{gr,fr} = 6,82 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°С); толщина слоя грунта $h_{fd} = 1,61$ м.

Шаг сетки узлов принимаем равным 0,01 м: $\Delta h = 0,01$ м; шаг по времени согласно критерию (8) получается равным: для талого грунта $\Delta t_{gr,th} = 200$, для мерзлого $\Delta t_{gr,fr} = 68$ с. Выбираем среднее значение шага по времени $\Delta t_{avr} = 200$ с, минимальное $\Delta t_{min} = 70$ с.

Точность решения на каждом шаге по времени контролируем с помощью итерационной процедуры по двум показателям: стабилизации (с заданным критерием сходимости $\delta_q = 1 \cdot 10^{-6}$) количества теплоты, протекающей через конечный элемент, и стабилизации температуры с критерием сходимости $\delta_T = 1 \cdot 10^{-6}$.

Результаты решения задачи. Для каждого шага по времени находят значения температуры в узлах конечных элементов. Поскольку в данном случае требовалось получить распределение температуры в грунте по прошествии 120 ч установившейся над поверхностью грунта температуры воздуха, в файл выходных данных записывали результаты расчета только на последнем шаге по времени T_{120} . По ним построены графики зависимости температуры T_{120} от координаты x в узлах на прямой $y = 0,01$ м, которые представлены на рис. 5, где по оси абсцисс отложены расстояния от поверхности грунта, по оси ординат – температура грунта по истечении 120 ч. Двумя черными квадратиками в начале горизонтальной части кривой на графике помечены точки, расположенные на нижней границе промерзания модели. Толщина слоя мерзлого грунта h_{frz} при температуре воздуха –8, –12 и –16 °С равна соответственно 16, 18,5 и 21 см.

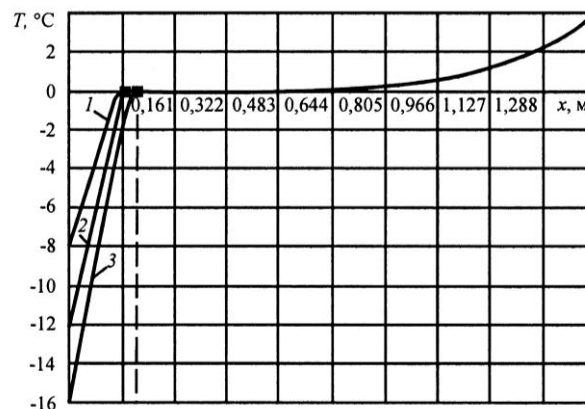


Рис. 5. Распределение температуры T в конечно-элементной модели по глубине грунта (x): 1, 2, 3 – при температуре воздуха над поверхностью грунта соответственно –8, –12 и –16 °С

Выводы

Приведенная методика применима при проектировании зимних лесовозных дорог для решения теплотехнических задач. В частности, ее можно использовать для определения толщины мерзлого слоя в любой момент времени после наступления холодов, что необходимо как при выборе трассы и проектировании новой зимней дороги, так и назначении сроков начала эксплуатации существующей дороги.

Методика базируется на численном решении нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности, в котором теплоемкость, энтальпия и теплопроводность зависят от температуры и испытывают резкий скачок при замерзании поровой воды в грунте.

Из сравнения падения температуры воздуха с увеличением толщины слоя мерзлого грунта следует, что биологические источники тепла могут существенно влиять на толщину слоя мерзлого грунта оснований зимних лесовозных дорог в болотистой местности, внося ограничения в расчеты на прочность и жесткость конструкции дороги.

Приведенный пример расчета показывает, что теплота, выделяемая термически активным массивом, подстилающим естественное основание зимней дороги, сильно замедляет процесс его промерзания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВСН 01–85. Инструкция по проектированию лесозаготовительных предприятий [Текст]. – М.: Минлесбумпром СССР, 1986. – 135 с.
2. *Исаченко, В.П.* Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. *Миляев, А.С.* Автоматизированный расчет конструкций зимних лесовозных дорог [Текст]: учеб. пособие / А.С. Миляев. – СПб., 2006. – 303 с.
4. *Рихтмайер, Р.* Разностные методы решения краевых задач [Текст] / Р. Рихтмайер, К. Мортон. – М.: Мир, 1972. – 418 с.
5. *Румянцев, В.А.* Биотеплофизика замерзания мелководного озера [Текст] / В.А. Румянцев, С.М. Шишкаев // ДАН. – 1996. – Т. 347, № 1. – С. 106–108.
6. СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах [Текст] / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 52 с.

Поступила 19.02.09

A.S. Milyaev

Saint-Petersburg State Forest Technical Academy

Influence of Heat Liberation of Sublayer Biomass on Freezing of Winter Wood-track Basis

The influence of heat liberation of biological origin on freezing of winter wood-track bases in the marshy land is investigated. The calculation procedure is based on the numerical example.

Keywords: winter wood tracks, subsoil, biological heat sources, freezing.