

УДК 622.02

**А.В. Дугарцыренов, Е.Л. Бельченко**

## **ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ ГРУНТОВ НА ДОПУСТИМУЮ ГЛУБИНУ**

**Сообщение 2**

*Проведена оценка глубины промерзания массива горных пород при наличии на ее поверхности теплоизоляционного покрытия при учете и без учета затрат тепла на процесс охлаждения грунта*

*Ключевые слова: промерзание, грунт, теплоизоляция складов-отвалов*

### **A.V. Dugartsirenov, E.L. Belchenko THE HEAT INSULATION PARAMETERS DURING THE SOIL FREEZING TILL THE PERMISSIBLE DEPTH**

**Message 2**

*The depth of rock massif's freezing given the heat-insulating coating on its surface is estimated with regards to and regardless of heat expenditures on cooling the soil.*

*Key words: freezing, soil, heat insulation of the dump storage areas.*

**П**араметры теплоизоляции при промерзании грунтов и в частности складов-отвалов на допустимую глубину были рассмотрены ранее методом эквивалентного слоя при условии равенства начальной температуры  $T_0$  грунта и температуры  $T_\phi$  фазового перехода воды [1]. В данной работе рассмотрен общий случай, когда  $T_b < T_\phi < T_0$ , где  $T_b$  - температура воздуха.

При условии  $T_\phi < T_0$  в начальный момент температура на контакте теплоизоляционного покрытия и талого грунта равна  $T_0$ . Затем в силу того, что температура на поверхности покрытия меньше начальной температуры грунта ( $T_\phi < T_0$ ), он охлаждается до тех пор, пока температура на контакте «покры-

тие-грунт» не станет равной температуре фазового перехода (рис. 1). С этого момента времени начинается собственно промерзание грунта от контакта с покрытием (рис. 2).

Таким образом, процесс промерзания грунта или склада-отвала разделяется на два этапа: предварительного охлаждения грунта при отсутствии промерзания за счет отвода тепла через теплоизолирующее покрытие в течение времени  $t_0$  до выполнения условия равенства температур поверхности грунта и фазового перехода и последующего его промерзания с движущейся границей фазового перехода  $\xi(t)$ .

Как и ранее, теплоизоляционное покрытие толщиной  $d$  и теплопроводностью  $\lambda_{II}$  заменяем эквивалентным мерзлым слоем грунта толщиной  $\ell_s$  и коэффициентом теплопроводности  $\lambda_M$ . Тогда общая глубина промерзшей эквивалентной зоны в некоторый момент времени будет равна  $\xi + \ell_s$  (рис. 2). Здесь величина  $\ell_s$  определяется выражением  $\ell_s = \frac{\lambda_M}{\lambda_{II}} d$ .

Принимаем линейное распределение температуры в промерзшем слое,

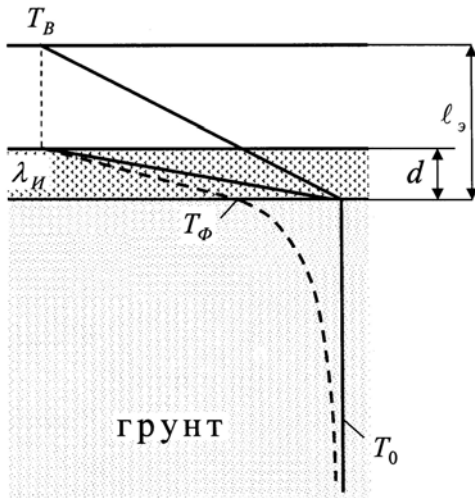


Рис. 1. Модель охлаждения грунта

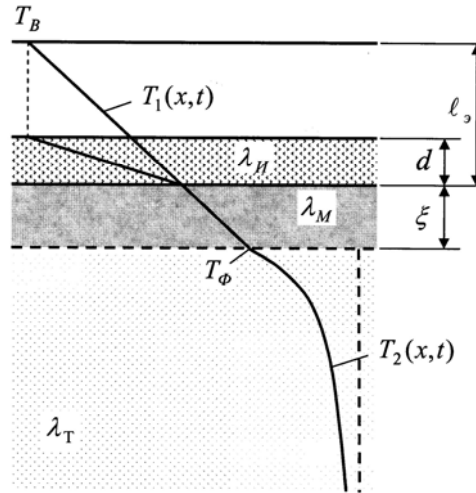


Рис. 2. Схема к расчету промерзания

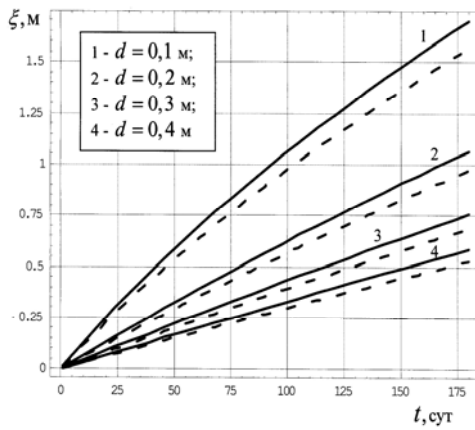


Рис. 3. Зависимости глубины промерзания массива от времени с учетом и без учета охлаждения грунта при разных толщинах теплоизоляционного покрытия

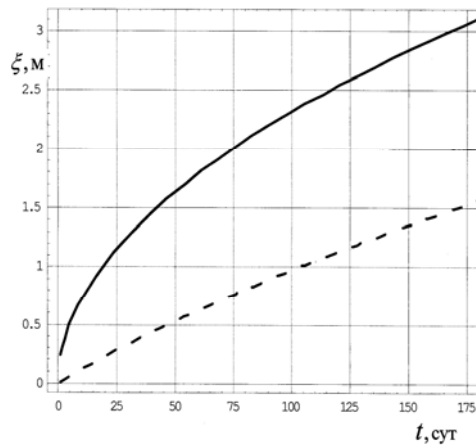
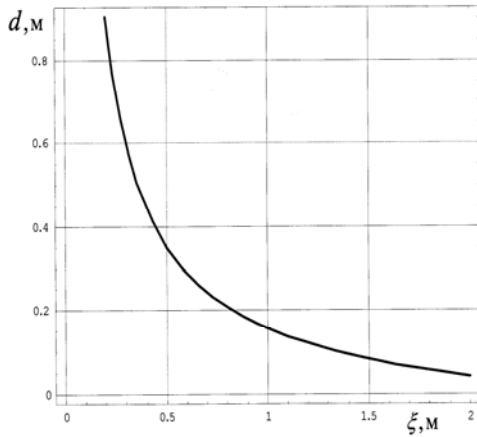


Рис. 4. Промерзание грунта без теплоизоляции и при наличии снежного покрова

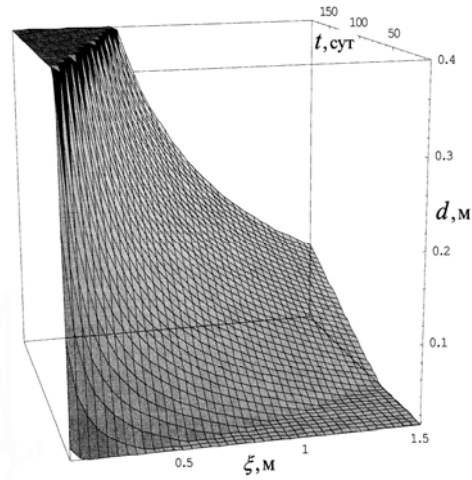
соответствующее стационарному состоянию

$$T_M(z,t) = T_B + \frac{T_\Phi - T_B}{\xi + \ell_3} \cdot z \quad (1)$$

и закон Гаусса в талой зоне



**Рис. 5. Зависимость толщины теплоизоляционного покрытия от допустимой глубины промерзания**



**Рис. 6. График зависимости толщины теплоизоляционного покрытия от допустимой глубины промерзания складов-отвалов и времени их стояния**

$$T_{\tau}(z, t) = T_{\phi} + (T_0 - T_{\phi}) \operatorname{erf} \left[ \frac{z - (\xi + \ell_3)}{2\sqrt{a_2(t_0 + t)}} \right], \quad (2)$$

где  $t_0$  - длительность периода охлаждения.

Задача промерзания рассматривается при следующих начальных и граничных условиях:

$$T_{\tau}(\xi + \ell_3, t_0) = T_{\phi}; \quad (3)$$

$$T_{\text{м}}(z, t) = T_{\text{в}}; \quad (4)$$

$$T_{\tau}(\xi + \ell_3, t_0) = T_{\text{м}}(z, t) = T_{\phi} = \text{const}. \quad (5)$$

Кроме этого, на границе раздела фаз имеет место условие

$$\lambda_{\text{м}} \frac{\partial T_{\text{м}}(z, t)}{\partial z} - \lambda_{\tau} \frac{\partial T_{\tau}(z, t)}{\partial z} = L_{\phi} W \rho \frac{d\xi}{dt}, \quad (6)$$

где  $W$  - влажность породы, кг/кг;  $\rho$  - ее плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $L_{\phi}$  - теплота фазового перехода «вода - лед», Дж/кг.

В отличие от ранее рассмотренного случая, в условие (6) входит член, отражающий затраты тепла на охлаждение талого грунта.

Исходя из распределений (1) и (2), найдем градиенты температур на границе раздела фаз

$$\frac{\partial T_{\text{м}}(\xi + \ell_3, t)}{\partial z} = \frac{T_{\phi} - T_{\text{в}}}{\xi + \ell_3};$$

$$\frac{\partial T_{\tau}(\xi + \ell_3, t)}{\partial z} = \frac{T_0 - T_{\phi}}{\sqrt{\pi a_{\tau}(t_0 + t)}},$$

где  $a_{\tau}$  - температуропроводность талого грунта.

Тогда условие (6) преобразуется к виду

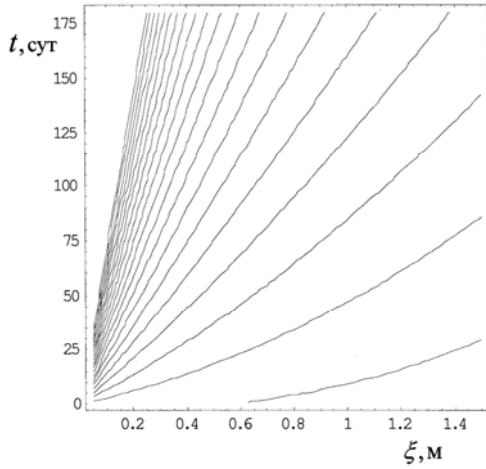
$$\lambda_{\text{м}} \frac{T_{\phi} - T_{\text{в}}}{\eta} - \lambda_{\tau} \frac{T_0 - T_{\phi}}{\sqrt{\pi a_{\tau}(t_0 + t)}} = L_{\phi} W \rho \frac{d\eta}{dt}, \quad (7)$$

где  $\eta = \xi + \ell_3$ .

Дифференциальное уравнение при начальном условии (3) имеет решение

$$\eta = \beta \sqrt{t_0 + t} \quad (\beta = \text{const}). \quad (8)$$

Очевидно



**Рис. 7. Контурный график функции  $d(\xi, t)$**

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{1}{2} \beta \frac{1}{\sqrt{t_0 + t}}.$$

С учетом этого, постоянная  $\beta$  определяется из характеристического уравнения

$$\begin{aligned} \lambda_m \frac{T_\phi - T_b}{\beta \sqrt{(t_0 + t)}} - \lambda_\tau \frac{T_0 - T_\phi}{\sqrt{\pi a_\tau (t_0 + t)}} = \\ = \frac{1}{2} L_\phi W \rho \beta \frac{1}{\sqrt{(t_0 + t)}} \end{aligned}$$

или

$$L_1 - L_2 \beta = \beta^2, \quad (9)$$

$$\text{где } L_1 = \frac{2\lambda_m(T_\phi - T_b)}{L_\phi W \rho}; \quad L_2 = \frac{2\lambda_\tau(T_0 - T_\phi)}{\sqrt{\pi a_\tau} \cdot L_\phi W \rho}.$$

Условию  $\beta > 0$  при  $L_2 \geq 0$  удовлетворяет только следующее решение уравнения (9):

$$\beta = \frac{-L_2 + \sqrt{L_2^2 + 4L_1}}{2}. \quad (10)$$

При  $t = 0$  и соответственно  $\xi = 0$  из (8) имеем

$$t_0 = \frac{\ell_3^2}{\beta^2}. \quad (11)$$

Объединяя (8) и (11), находим

$$\xi(t) = \sqrt{\ell_3^2 + \beta^2 t} - \ell_3. \quad (12)$$

В частном случае при отсутствии охлаждения талого грунта ( $T_\phi = T_0$ ) имеем  $L_2 = 0$  и  $\beta^2 = L_1$ . Тогда выражение (12) переходит в ранее полученную формулу [1]:

$$\xi(t) = \sqrt{\ell_3^2 + \frac{2\lambda_m(T_\phi - T_b)}{L_\phi W \rho} t} - \ell_3. \quad (13)$$

Зависимости  $\xi(t)$  по соотношениям (12) (пунктирные линии) и (13) (сплошные линии) представлены в графическом виде на рис. 3. Непосредственно видно, что зависимости, полученные по формуле (12) лежат ниже соответствующих кривых, рассчитанных по частному выражению (13). Это объясняется тем, что глубина промерзания по (12) учитывает расход тепла на охлаждение и потому непосредственно на процесс промерзания тепла затрачивается меньше.

Характер изменения во времени глубины промерзания при отсутствии теплоизоляционного покрытия (сплошная линия) и при наличии на поверхности грунта снежного покрова толщиной 0,1 м (пунктирная линия) представлен в графическом виде на рис. 4. Как показывают графики, при больших временах (более 75 суток), наличие снежного покрова уменьшает глубину промерзания практически в 2 раза. Увеличение толщины снежного покрова существенно уменьшает глубину промерзания (рис. 3). Отсюда следует обоснование Естественного метода теплоизоляции грунтов – накопления снежного покрова (снегозадержания). Кроме этого, возможно применение искусственных способов теплоизоляции – использование покрытий из пенополистирола, во-

довоздушных и быстротвердеющих пен и др.).

Разрешая уравнение (12) относительно толщины теплоизоляционного покрытия, получим

$$d = \frac{\lambda_n}{2\lambda_m} \left( \frac{\sqrt{L_2^2 + 4L_1 - L_2}}{4\xi} \cdot t - \frac{\xi}{2} \right). \quad (14)$$

Поскольку величины  $L_1$  и  $L_2$  не зависят от толщины  $d$ , то последняя согласно (14) находится в пропорциональной зависимости от коэффициента теплопроводности теплоизоляционного покрытия. Зависимость  $d(\xi)$  при заданном времени стояния склада-отвала (времени промерзания) и коэффициентах теплопроводности, равных соответ-

ственно  $t = 8$  мес. и  $\lambda_n = 0,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ , соответствующем свежеснеговому снегу, представлена на рис. 5.

Зависимость необходимой толщины покрытия от совместного влияния глубины промерзания и времени стояния складов-отвалов дана на трехмерном графике (рис. 6). Изолинии  $d = \text{const}$ , выполненные с шагом 0,05 м от  $d = 0$ , даны на рис. 7.

Полученные результаты позволяют оценить путем инженерного расчета необходимую толщину теплоизоляционного покрытия, достаточную для промерзания складов-отвалов не более чем на допустимую глубину, заданную характеристиками применяемого рыхлительного оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дугарцыренов А.В., Бельченко Е.Л. Параметры теплоизоляции при промерзании грунтов на допустимую глубину. Сообщение 1. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 6, 2009, с. 44-47. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

Дугарцыренов А.В. – докторант кафедры «Физика горных пород и процессов»,  
 Бельченко Е.Л. – профессор кафедры «Физика горных пород и процессов»,  
 Московский государственный горный университет, priem@msmu.u



#### ДИССЕРТАЦИИ

#### ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>			
ЭРТУГАНОВА	Разработка акустоэмиссионного мето-	25.00.16	к.т.н.

Эльмира Александровна	да определения технологических характеристик соляных горных пород при их растворении		
--------------------------	--	--	--