

#### Практическая работа №4. Расчет глубины промерзания пород

Районы россыпной добычи полезных ископаемых: золота, олова, алмазов, редких металлов Сибири и на северо-востоке России характеризуются суровыми климатическими условиями.

Здесь расходы тепла за счет солнечной энергии в сентябре месяце превышают приходы, в результате чего талый массив постепенно охлаждается, а в октябре неизбежно наступает устойчивое сезонное промерзание верхнего слоя горных пород, достигающее в Якутии, Магаданской и Читинской областях 3...5 м. В естественных условиях обычно к декабрю 90...95 % аккумулированной в массиве за летний период солнечной энергии теряется в атмосферу и завершается промерзание сезонно-талого слоя.

В этих районах необходимо выполнять специальные горные работы по предохранению талых (оттаянных) пород от промерзания. Это связано с тем, что сумма отрицательных температур в несколько раз превышает сумму положительных температур, а высота снежного покрова недостаточна для защиты от глубокого промерзания. Обычно она изменяется в пределах от 0,5 до 1,0 м.

Для выявления эффективного способа и соответствующей технологии предохранения пород от промерзания выполняют теплофизические расчёты по определению глубины промерзания в конкретных природно-климатических и горнотехнических условиях. При этом оценивают возможность использования технических средств и приёмов управления процессом промерзания пород с целью уменьшения глубины промерзания.

Для инженерных расчетов глубину естественного сезонного промерзания достаточно определять с помощью упрощенных формул, например, по формуле Заальшютце. Впервые эта формула была получена и использована для расчёта промерзания влажных пород Заальшютцем в 1862 г. В настоящее время она используется для приближённых инженерных расчётов. Формула известна как формула Стефана [4,7,14]:

$$h_{np} = \sqrt{2 \times \lambda_m \times t_n \times \tau / Q_\phi}, \quad (3.3)$$

где  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности мёрзлой горной породы, Вт / (м · °С);

$t_n$  – температура поверхности пород, °С;

$\tau$  – продолжительность промерзания горной породы, ч;

$Q_\phi$  – расход тепла на замерзание воды, содержащейся в 1 м<sup>3</sup> породы, определяется по формуле:

$$Q_\phi = L \times G, \quad (3.4)$$

где  $L$  – скрытая теплота кристаллизации воды,  $L = 93$  Вт·ч / кг;

$G$  – льдистость горной породы, кг/м<sup>3</sup>.

Следует иметь в виду, что в формуле (3.3) не учитывается влияние внешнего теплообмена и теплообмена промёрзшего слоя с нижерасположенными тальми породами, а также тепловые потери, возникающие при охлаждении промёрзших пород до температуры ( $t_n/2$ ).

По этой причине результаты, полученные по формуле (3.3), будут завышенными.

Для повышения точности расчётов необходимы данные о теплоёмкости пород.

В таком случае глубина промерзания горных пород определяется по уточненной формуле:

$$h_{np} = \sqrt{2 \times \lambda_m \times t_n \times \tau / (Q_\phi + c_{ом} \times t_n / 2)}, \quad (3.5)$$

где  $c_{ом}$  – объёмная теплоёмкость мёрзлых пород, Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°C).

Всякая теплоизоляция на поверхности уменьшает глубину промерзания. В природных условиях роль такой изоляции выполняет снежный покров. Поэтому в районах с большой высотой снежного покрова, например, в Красноярском крае, Западной Сибири, глубина промерзания значительно меньше, чем в относительно более тёплых районах юга Забайкальского края, где высота снежного покрова составляет всего 0,10...0,25 м.

Глубину промерзания с учётом теплоизоляции, в том числе со снежным покровом, определяют по формуле [4,12]:

$$h_{np} = \sqrt{(2 \times \lambda_m \times t_n \times \tau) / (Q_\phi + C_{ом} \times t_n / 2) + h_m^2} - h_m, \quad (3.6)$$

где  $h_m$  – условная мощность слоя теплоизоляции, м:

$$h_m = \lambda_m \times h_{уз} / \lambda_{уз}, \quad (3.7)$$

где  $h_{уз} / \lambda_{уз}$  – термическое сопротивление теплоизоляции, м<sup>2</sup>·°C/Вт.

В тех случаях, когда применяют искусственные теплоизоляционные покрытия, термическое сопротивление определяют как сумму термических сопротивлений снежного покрова и искусственной теплоизоляции (пенопласта, полимерной или водо-воздушной замерзающей пены, искусственного снега и т.д.) по формуле:

$$h_{уз} / \lambda_{уз} = h_{сн} / \lambda_{сн} + h_{ум} / \lambda_{ум}, \quad (3.8)$$

где  $h_{ум}$  – толщина искусственного теплоизолятора, м;

$\lambda_{ум}$  – коэффициент теплопроводности искусственного теплоизолятора, Вт / (м·°C).

С помощью теплоизоляционных покрытий, как это следует из формулы (3.8), исключить полностью промерзание горных пород невозможно. Практический же интерес представляет определение такой

толщины искусственного теплоизолятора с заданными теплоизоляционными свойствами, при использовании которого можно обеспечить допустимую глубину промерзания.

Например, для средне- и крупно-литражных драг вполне допустимо промерзание пород на глубину (0,4...1,0 м), для экскаваторов- (0,3...0,4 м), для бульдозеров-рыхлителей – (0,3...1,2 м). Из формул (3.6-3.8) получим формулу для расчёта толщины искусственного теплоизолятора, при которой допускается некоторое промерзание пород на глубину технически возможной разработки их механическими средствами разупрочнения, т.е. в пределах  $(1,5...1,0 \text{ м}) \geq h_{np} > 0$ :

$$h_{um} = \lambda_{um} \times \{t_n \times \tau / [h_{np}^1 \times (Q_f + c_{ом} \times t_n / 2)] - h_{np}^1 / 2\lambda_m - h_{сн} / \lambda_{сн}\}, \quad (3.9)$$

где  $h_{np}^1$  – допустимая глубина промерзания горных пород (в конце сентября), м

В формулах (3.3, 3.5, 3.6, 3.9) температуру поверхности пород ( $t_n$ , °С) обычно назначают по данным температуры наружного воздуха в холодный период года, т.е. в период, когда температура воздуха ниже нуля °С – в распространённых районах добычи золота с октября по апрель (в Оймяконском районе Якутии в пос. Усть-Нера температура воздуха в сентябре отрицательная, поэтому здесь продолжительность холодного периода больше, чем в других районах на 30 дней).

### **Пример №2**

Для следующих исходных данных определить глубину промерзания пород при отсутствии снежного покрова и при наличии снежного покрова на последнее число каждого месяца холодного периода. При отсутствии снежного покрова вычисления выполнить по упрощённой формуле (3.3) и по уточнённой формуле (3.5).

Результаты сравнить по абсолютной и относительной величине (в % к глубине промерзания, вычисленной по уточнённой формуле). Построить графики зависимости  $h_{np} = f(\tau)$ . Определить толщину искусственного теплоизолятора, при которой глубина промерзания ( $h_{np}$ ) не превысит 0,5 и 1,5 м.

Исходные данные: льдистость мерзлых горных пород  $G = 200 \text{ кг} / \text{м}^3$ , объёмная теплоёмкость мёрзлых пород  $c_{ом} = 600 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$ , коэффициент теплопроводности мёрзлых пород  $\lambda_m = 2,3 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ , высота снежного покрова  $h_{сн} = 0,5 \text{ м}$ , коэффициент теплопроводности снега  $\lambda_{сн} = 0,27 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ , коэффициент теплопроводности искусственного теплоизолятора (щиты из пенопласта)  $\lambda_{um} = 0,05 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ; температура наружного воздуха в холодные месяцы года составляет: сентябрь – 10, октябрь – 20, ноябрь – 25, декабрь – 30, январь – 35, февраль – 30, март – 15, апрель – 10 °С ниже нуля.

### **Решение**

1. Определяем среднюю температуру и продолжительность промерзания на конец каждого месяца холодного периода: на конец сентября –  $t_n = -10$  °С,  $\tau = 30 \cdot 24 = 720$  ч; на конец октября –  $t_n = (10 \cdot 30 + 20 \cdot 31) / (30 + 31) = -15,08$  °С,  $\tau = (30 + 31) \cdot 24 = 1464$  ч; на конец ноября –  $t_n = (10 \cdot 30 + 20 \cdot 31 + 25 \cdot 30) / (30 + 31 + 30) = -18,35$  °С,  $\tau = (30 + 31 + 30) \cdot 24 = 2184$  ч. Аналогично имеем – на конец декабря  $t_n = -21,24$ ,  $\tau = 2904$  ч, на конец января  $t_n = -24,23$  °С,  $\tau = 3648$  ч, на конец февраля  $t_n = -25,14$  °С,  $\tau = 4320$  ч, на конец марта  $t_n = -23,65$  °С,  $\tau = 5064$  ч, на конец апреля  $t_n = -21,95$  °С,  $\tau = 5784$  ч.

2. По формуле (3.3) определяем глубину промерзания пород при отсутствии снежного покрова на конец сентября

$$h_{np} = \sqrt{(2 \times 2,36 \times 10 \times 720) / (93 \times 200)} = 1,33 \text{ м.}$$

Аналогично получим глубину промерзания: на конец октября – 2,34 м; на конец ноября – 3,15 м; на конец декабря – 3,90 м; на конец января – 4,68 м; на конец февраля – 5,18 м; на конец марта – 5,44 м; на конец апреля – 5,60 м.

3. Определяем глубину промерзания по уточнённой формуле (3.5) на конец сентября

$$h_{np} = \sqrt{(2 \times 2,3 \times 10 \times 720) / (93 \times 200 + 600 \times 10 / 2)} = 1,24 \text{ м.}$$

Глубина промерзания пород вычисленная по уточненной формуле на 0,09 м или на 7,3 % меньше, чем по приближённой формуле (3.3).

Результаты расчётов для других месяцев получены аналогично и представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

### Результаты расчетов глубины промерзания горных пород

Дата	Глубина промерзания, м		Разность		Глубина промерзания под снегом, м
	по формуле (3.2)	по формуле (3.4)	абсолют., м	относит., %	
30 сентября	1,33	1,24	0,09	7,3	0,18
31 октября	2,34	2,09	0,24	11,7	0,19
30 ноября	3,15	2,76	0,38	13,9	0,82
31 декабря	3,90	3,37	0,53	15,7	1,17
31 января	4,68	3,96	0,71	18,0	1,56
28 февраля	5,18	4,37	0,81	18,5	1,84
31 марта	5,44	4,63	0,81	17,5	2,03
30 апреля	5,60	4,82	0,78	16,2	2,17

4. Определяем глубину промерзания пород при наличии снежного покрова, т.е. в естественных условиях, для чего предварительно определяем по формуле (3.8) условную мощность теплоизоляции. При этом термическое сопротивление снежного покрова составит:

$$h_{сн} / \lambda_{сн} = 0,5 / 0,27 = 1,85 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт.}$$

Условная мощность слоя теплоизоляции снежного покрова определяется по формуле:

$$h_m = h_{из} \cdot \lambda_m / \lambda_{из}. \quad (3.10)$$

Тогда  $h_m = 1,85 \cdot 2,3 = 4,26 \text{ м.}$

Глубина промерзания пород в конце сентября составит (см. формулу 3.6)

$$h_{np} = \sqrt{(2 \times 2,3 \times 10 \times 720) / (93 \times 200 + 600 \times 10 / 2) + 18,14} - 4,26 = 0,18 \text{ м.}$$

Аналогично определяется глубина промерзания в конце каждого месяца. Результаты расчётов приведены в табл. 3.3.

Графики изменения глубины промерзания горных пород показаны на рис. 1, 2, 3.

При этом следует иметь в виду, что из-за использования средних значений коэффициента теплопроводности снега и максимальной высоты снежного покрова, которая наблюдается только к концу холодного сезона, вычисленные значения глубины промерзания могут отличаться от наблюдаемых в реальных природно-климатических условиях.

Для уточнения расчётных значений необходимо иметь данные о высоте снежного покрова в течение холодного периода (по данным ближайшей метеостанции).

Коэффициент теплопроводности снега принимается в зависимости от слёживаемости снега по справочным данным или по результатам измерений.

5. Определяем по формуле (3.9) толщину искусственного теплоизолятора при допустимой глубине промерзания (в конце сентября)  $h_{np}^I = 0,5 \text{ м:}$

$$\begin{aligned} h_{um} &= 0,05 \{ 10 \cdot 720 / [0,5 (93 \cdot 200 + 600 \cdot 10 / 2)] - \\ &\quad - 0,5 / (2 \cdot 2,3) - 0,5 / 0,27 \} = 0,05 (0,67 - 0,11 - 1,85) = \\ &= 0,05 \cdot 1,29 = -0,06 \text{ м.} \end{aligned}$$

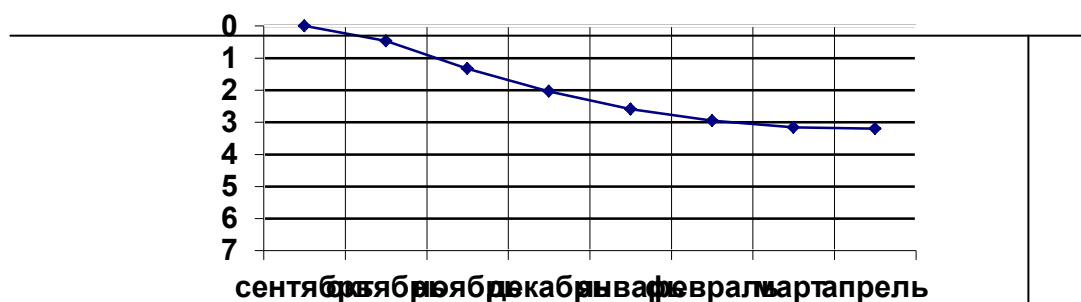
В данном случае условие допустимой глубины промерзания 0,5 м выполняется за счёт снежного покрова (если считать, что снег выпадает в сентябре), поэтому полученное решение отрицательной толщины искусственного теплоизолятора не имеет физического смысла и не принимается во внимание.

То же будем иметь и в расчётах на конец октября. Аналогичным образом производят расчёты для других месяцев и при допустимой глубине промерзания  $h_{np}^I = 1,5 \text{ м.}$  Результаты расчётов представлены в табл. 3.4.

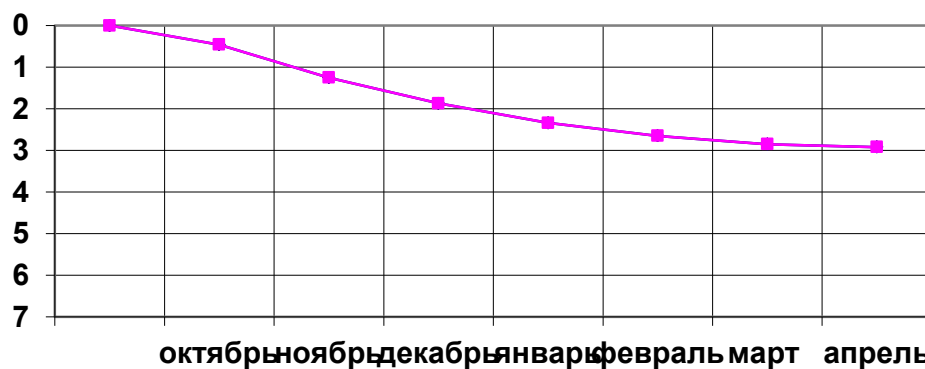
*Таблица 3.4*

**Толщина искусственного теплоизолятора при допустимой  
глубине промерзания пород**

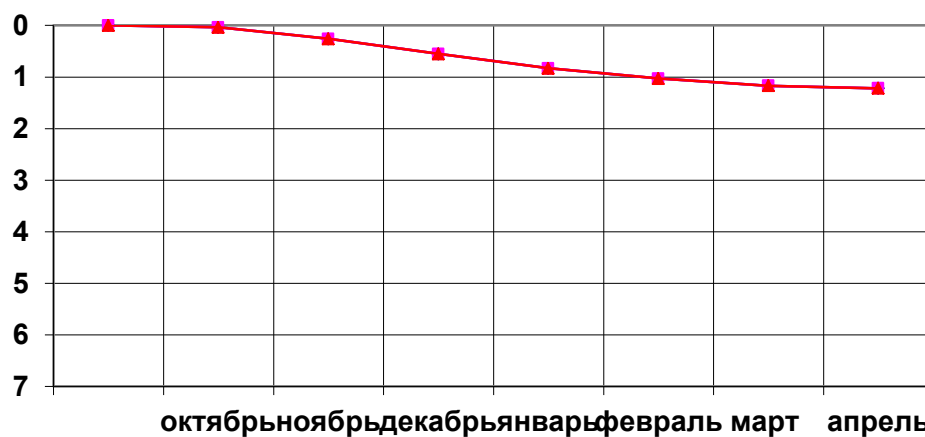
Дата	Толщина теплоизолятора при допустимой глубине промерзания, $h_{пр}^I$ , м	
	0,5	1,5
30 сентября	0,000	0,000
31 октября	0,000	0,000
30 ноября	0,070	0,000
31 декабря	0,150	0,000
31 января	0,240	0,005
28 февраля	0,320	0,030
31 марта	0,370	0,050
30 апреля	0,400	0,060



**Рис. 1. Графики зависимости для естественного промерзания (без снега) по формуле 3.2**



**Рис.2. График зависимости для естественного промерзания (без снега) по формуле 3.4**



**Рис.3. График для естественного промерзания (со снегом) по формуле 3.5**

## Задание для самостоятельной работы №2

1. Определить глубину промерзания в естественных условиях. Для снега принять коэффициент теплопроводности  $\lambda_{сн} = 0,27 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ .
2. Определить глубину промерзания при полном отсутствии снежного покрова.
3. Определить толщину искусственной теплоизоляции, при которой глубина промерзания не должна превышать 0,5 и 1,5 м. Коэффициенты теплопроводности искусственных теплоизоляторов принять следующие: щит из пенопласта  $\lambda_{из} = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ; твердеющая пена  $\lambda_{из} = 0,1 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ; искусственный снег  $\lambda_{из} = 0,35 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ .
4. Варианты исходных данных принять согласно табл. 3.5.
5. Льдистость, объемную теплоемкость и коэффициент теплопроводности принять по исходным данным примера №2.
6. Построить графики зависимости  $h_{пр} = f(\tau)$  для естественного промерзания (со снегом) и без снега.
7. Выполнить анализ полученных результатов.

Таблица 3.5

### Исходные данные к расчёту глубины промерзания

Вариант	Высота снежного покрова, м	Температура холодного периода, °С ниже нуля							
		сент.	окт.	нояб.	декаб.	январ.	фев.	март	апр.
1. пр.Дамбуки	0,90	-	3,3	18,8	28,9	31,1	24,9	15,1	1,9
2. пр. Уркима	0,80	-	5,1	21,0	31,4	32,8	26,4	15,7	3,3
3.пр. Ципикан	0,40	-	5,0	19,6	28,3	30,3	25,7	16,3	3,7
4.р. Бодайбо	0,60	-	2,6	19,0	28,5	31,8	26,0	15,4	3,0
5.пр. Тайга	0,50	-	3,4	18,1	25,9	26,2	23,5	14,7	3,5
6.Енисейск, Красн.край	0,90	-	0,4	12,5	20,9	22,0	19,0	10,6	0,9
7.Северо-Енисейск	0,85	-	4,2	17,6	25,6	26,8	23,4	15,2	5,0
8.Сусуман, Магадан.обл.	0,45	3,0	15,1	30,4	38,0	39,8	35,6	28,1	14,0
9.пр. Софийск	0,60	-	5,1	20,6	30,7	33,3	26,4	17,1	5,2
10.Усть-Кара	0,25	-	1,1	17,3	29,0	31,4	26,2	14,6	0,0
11.Нер.Завод пр. Ср.Борзя	0,20	-	0,7	15,0	25,8	28,9	23,5	13,1	0,0
12.Усть-Нера	0,40	5,5	14,5	34,4	46,4	48,9	42,8	30,6	12,2