

СТАТЬИ

УДК 551.34:536.24

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ОТТАИВАНИЯ
ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД****Галкин А.Ф.***Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: afgalkin@yandex.ru*

Целью работы являлась оценка влияния температурного фактора на скорость оттаивания дисперсных мерзлых горных пород, вмещающих подземное сооружение. Рассмотрено влияние как естественной температуры горных пород, так и температуры воздуха в подземном сооружении. Для обобщения полученных результатов использовался безразмерный температурный критерий, характеризующий отношение средней температуры воздуха за период оттаивания к начальной средней температуре мерзлых пород, вмещающих подземное сооружение. В качестве примера рассмотрен подземный объект с цилиндрической симметрией, размещенный в мерзлых дисперсных породах и эксплуатирующийся с положительной температурой воздуха. Решение задачи получено в безразмерной, удобной для качественного и количественного анализа, форме. Получены простые инженерные формулы для оценки влияния начальной температуры пород и температуры воздуха в сооружении на скорость оттаивания дисперсных мерзлых пород. Проведено сравнение двух вариантов оттаивания при естественной температуре пород, как равной температуре плавления льда (однофазная задача), так и неравной (двухфазная задача). Результаты вариантных расчетов представлены в виде 3D графиков, которые позволяют наглядно определить степень влияния естественной температуры пород и температуры воздуха в сооружении на скорость оттаивания. Показано, что предварительное охлаждение пород является эффективным средством управления температурным режимом и позволяет существенно снизить скорость оттаивания породного массива. Установлено, что с ростом глубины оттаивания возрастает влияние естественной температуры горных пород на скорость оттаивания. Однако, чем выше температура воздуха в выработке, тем это влияние меньше.

Ключевые слова: оттаивание, скорость, мерзлые породы, криолитозона, температура, метод расчета**INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE RATE OF DEFROSTING
OF DISPERSED ROCKS****Galkin A.F.***Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: afgalkin@yandex.ru*

The aim of the work was to assess the influence of the temperature factor on the rate of thawing of dispersed frozen rocks. The influence of both the natural temperature of rocks and the air temperature in an underground structure is considered. To generalize the results obtained, a dimensionless temperature criterion was used, which characterizes the ratio of the average air temperature during the thawing period to the initial average temperature of the frozen rocks enclosing the underground structure. As an example, a subterranean object with cylindrical symmetry, located in frozen dispersed rocks and operating with a positive air temperature, is considered. The solution to the problem is obtained in a dimensionless form convenient for qualitative and quantitative analysis. Simple engineering formulas were obtained to assess the influence of the initial temperature of rocks and air temperature in a structure on the rate of thawing of dispersed frozen rocks. A comparison is made of two variants of thawing at the natural temperature of rocks, both equal to the melting temperature of ice (one-phase problem) and not equal (two-phase problem). The results of variant calculations are presented in the form of a 3D graph, which allows you to visually assess the degree of influence of the natural temperature of rocks and air temperature in the structure on the thawing rate. It is shown that pre-cooling of rocks is an effective means of temperature control and can significantly reduce the rate of thawing of the rock mass. It was found that with an increase in the thawing depth, the influence of the natural temperature of rocks on the thawing rate increases. However, the higher the air temperature in the mine, the less this effect.

Keywords: thawing, speed, frozen rocks, permafrost, temperature, calculation method

Строительство и эксплуатация инженерных объектов в криолитозоне осложняет ряд негативных факторов, одним из которых является зависимость механических свойств грунтов и дисперсных пород от температуры [1, 2]. Если в мерзлом состоянии грунты и породы обладают достаточной прочностью, то с повышением температуры прочность их существенно снижается. В общем случае, для характерных пород, эта зависимость близка к квадратичной [3, 4] в диапазоне отрицательных температур. Например, если температура мерзлых дисперсных

горных пород повышается в четыре раза (с $-4,0^{\circ}\text{C}$ до $-1,0^{\circ}\text{C}$), то прочность льдистого песчаника на сжатие уменьшается в два раза. При переходе из мерзлого состояния в талое отдельные виды дисперсных пород и льдистых грунтов полностью теряют свою несущую способность. Это не только осложняет эксплуатацию инженерных объектов (как наземных, так и подземных), но и может приводить к аварийным ситуациям и техногенным катастрофам [5–7]. Поэтому прогноз температурного режима грунтовых оснований поверхностных ин-

женерных сооружений и дисперсных горных пород, вмещающих подземные и заглубленные сооружения, является актуальной задачей, позволяющей уже на стадии проектирования определить степень надежности принимаемых технических решений и оценить возможные риски при эксплуатации объектов в криолитозоне. При этом такие показатели, как глубина и скорость оттаивания грунтовых оснований и дисперсных пород, являются одними из основных при прогнозе теплового режима [8, 9]. Возможность управления этими показателями позволяет значительно снизить риски и повысить эксплуатационную надежность инженерных объектов криолитозоны. Известно, в частности, что эффективным способом управления глубиной оттаивания, наряду с применением специальных теплозащитных покрытий, является предварительное охлаждение горных пород вокруг подземного сооружения [10–12].

Целью настоящей работы была оценка влияния температурного фактора на скорость оттаивания дисперсных мерзлых горных пород. При этом рассматривается как естественная температура мерзлых пород, так и температура воздуха в сооружении.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели воспользуемся методологией, изложенной нами ранее в работах [13–15], которая основана на использовании безразмерных критериев для нахождения искомых параметров. Исходным выражением для получения расчетных формул является условие Стефана, которое для двухфазной задачи может быть записано в виде

$$\frac{dS}{d\tau} = -\tilde{\lambda}_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial R} \right|_{R=S} + \tilde{\lambda}_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial R} \right|_{R=S}, \quad (1)$$

где

$$\tilde{\lambda}_i = \frac{\lambda_i}{\rho L W}, \quad (2)$$

λ_i – коэффициент теплопроводности теплых ($i = 1$) и мерзлых ($i = 2$) пород, Вт/м·К; R – координата, м; S – глубина оттаивания пород, м; τ – время, с; ρ – плотность мерзлых пород, кг/м³; L – скрытая теплота плавления льда, Дж/кг ($L = 335 \cdot 10^3$ Дж/кг); W – льдистость пород, доли единицы; T_i – температура пород, °C ($i = 1$ – талых; $i = 2$ – мерзлых).

Рассмотрим для примера цилиндрическое подземное сооружение, размещенное в мерзлых дисперсных породах и эксплуати-

рующееся с положительной температурой воздуха. Примем распределение температуры в талой и мерзлой зоне квазистационарным, т.е.

$$T_i = A_i \ln R + B_i, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Для нахождения коэффициентов A_i и B_i воспользуемся следующими граничными условиями

$$-\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial R} \right|_{R=R_0} = \alpha (T|_{R=R_0} - t_b), \quad (4)$$

$$T_1|_{R=S} = T_2|_{R=R_0} = T_{пл}, \quad (5)$$

$$T_2|_{R=\delta} = T_e. \quad (6)$$

Здесь обозначены: T_e – температура горных пород на глубине радиуса теплового влияния выработки, °C; δ – радиус теплового влияния, м; α – коэффициент теплопередачи от воздуха к поверхности, Вт/м²·К; R_0 – эквивалентный радиус выработки, м; t_b – температура воздуха в выработке, °C.

Используя условия (4) и (5), найдем параметр A_1 :

$$A_1 = \frac{B_i(t_b - t_{пл})}{1 + B_i \ln(R_0 / S)}. \quad (7)$$

Где B_i – число Био, равное $B_i = (\alpha R_0 / \lambda_1)$.

Термическое сопротивление теплозащитного слоя входит в параметр « α » и может быть определено по формуле [14].

$$R_T = (\delta_T / \lambda_T) = (1 / \lambda Bi) - 1 / \alpha. \quad (8)$$

Параметр A_2 может быть найден из граничных условий (5) и (6).

$$A_2 = \frac{T_{пл} - T_e}{\ln(S / \delta)}. \quad (9)$$

После несложных преобразований выражение (1) может быть представлено в безразмерном виде

$$\frac{dS}{d\tau} = (-\tilde{\lambda}_1 A_1 + \tilde{\lambda}_2 A_2) / S, \quad (10)$$

$$\tilde{\lambda}_i = \frac{\lambda_i}{\rho L W}.$$

Если температура горных пород близка к температуре плавления льда, то $A_2 \rightarrow 0$ и скорость оттаивания пород будет равна

$$\frac{dS}{d\tau} = -\tilde{\lambda}_1 A_1 / S. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет определить степень влияния числа Био, характеризующего в данном случае термическое сопротивление теплозащитного слоя, на скорость оттаивания дисперсных пород.

Найдем функцию отношений скоростей оттаивания при разных начальных температурах горных пород, разделив выражение (10) на (11):

$$f = 1 - \frac{\lambda_2 A_2}{\lambda_1 A_1}, \quad (12)$$

где

$$\frac{A_2}{A_1} = - \left(\frac{T_{\text{пл}} - T_e}{t_b - T_{\text{пл}}} \right) \frac{(1/B_i) + \ln(R_0/S)}{\ln(\delta/S)}. \quad (13)$$

Окончательно, для определения соотношения скоростей оттаивания с учетом того, что температура в мерзлой зоне не равна $T_{\text{пл}}$ и равна $T_{\text{пл}}$, получим

$$f = 1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \theta \cdot \left[\frac{\left(\frac{1}{B_i} \right) - \ln(S/R_0)}{\ln(\delta/S)} \right], \quad (14)$$

$$\theta = \frac{T_{\text{пл}} - T_e}{t_b - T_{\text{пл}}}.$$

Анализ выражения (14) показывает, что оно не зависит от льдистости пород напрямую и определяется только соотношениями

температур (t_b/T_e) и коэффициентов теплопроводности (λ_2/λ_1). В то же время сам параметр « S », входящий в формулу, зависит от льдистости, поэтому параметр « f » в общем случае является функцией критерия Стефана [15].

Для граничных условий первого рода ($B_i \rightarrow \infty$), принимая температуру плавления льда, равной 0°C , выражение (14) преобразуется к виду

$$f = 1 - \ln\left(\frac{S}{R_0}\right)^P, \quad P = \left(\frac{\lambda_2 T_e}{\lambda_1 t_b}\right) / (\ln(\delta/S)). \quad (15)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ выражения (15) показывает, что в начальный момент оттаивания $S \rightarrow R_0$ естественная температура горных пород не оказывает существенного влияния на скорость оттаивания (здесь необходимо учесть, что время начала оттаивания определяется отдельно для случая $T \neq T_{\text{пл}}$). С ростом глубины оттаивания отношение уменьшается, что свидетельствует о возрастании влияния естественной температуры горных пород на процесс оттаивания. Однако, чем выше температура воздуха в выработке, тем это влияние меньше.

По полученным формулам были проведены варианты расчетов, которые представлены в виде 3D графиков на рис. 1 и 2.

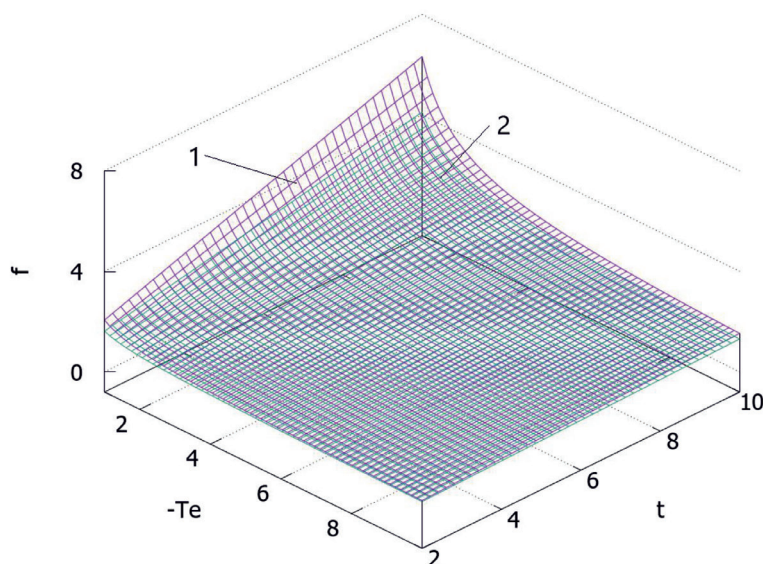


Рис. 1. Изменение скоростей оттаивания горных пород (f) в зависимости от их естественной температуры (T_e , $^\circ\text{C}$) и температуры воздуха в сооружении (t , $^\circ\text{C}$):
1 – при $h = R_0$; 2 – при $h = R_0/2$

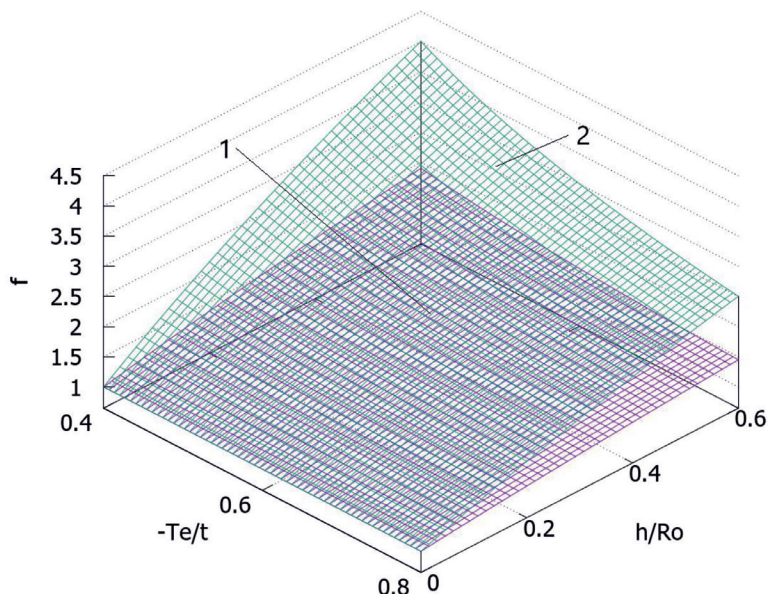


Рис. 2. Изменение скоростей оттаивания горных пород (f) в зависимости от безразмерной температуры (Te/t) и относительной глубины оттаивания (h/Ro):
 1 – при $(\lambda_z/\lambda_p) = 4,0$; 2 – при $(\lambda_z/\lambda_p) = 1,2$

На рис. 1 показана зависимость параметра « f » от температуры воздуха в сооружении и естественной температуры горных пород. При этом принимались следующие характерные значения исходных данных: отношение коэффициентов теплопроводности мерзлых и талых пород – 1,2; отношение глубины ореола оттаивания к эквивалентному радиусу – 0,5 и 1,0. По оси « x » естественная температура горных пород приведена в абсолютных значениях.

Как видно из графиков на рисунке, с увеличением длительности периода оттаивания отношение скоростей оттаивания увеличивается: плоскость 1 находится выше плоскости 2. При этом качественный характер изменения параметра « f » практически не изменяется. С понижением естественной температуры значение его уменьшается. А при постоянной естественной температуре наблюдается сильная зависимость от температуры воздуха в сооружении. Причем чем выше естественная температура горных пород, тем эта зависимость сильнее. Об этом свидетельствует простое сравнение степени наклона плоскостей на рисунке, например, при температурах $-2,0^{\circ}\text{C}$ и $-8,0^{\circ}\text{C}$.

На рис. 2 показана зависимость параметра « f », характеризующего отношения скоростей оттаивания пород при различной естественной температуре пород, в зависимости от безразмерного ореола оттаивания

при различных теплофизических характеристиках (коэффициентов теплопроводности в мерзлом и талом состоянии). При этом для наглядности, в качестве сравнения, взято максимально возможное отношение коэффициентов теплопроводности пород в мерзлом и талом состоянии. То есть в качестве окружающих пород принят лед. В этом случае отношение равно 4. Для сравнения взят характерный вариант дисперсных пород с отношением коэффициентов теплопроводности в мерзлом и талом состоянии, равном 1, 2. При этом рассмотрен период, когда глубина ореола оттаивания изменяется от 0 (начало оттаивания) до 0,6 от эквивалентного радиуса выработки. Такой диапазон является характерным, например, для горных выработок рудников криолитозоны.

Как следует из рисунка, теплофизические свойства горных пород оказывают существенное влияние на изменение скорости оттаивания горных пород. Причем чем больше значение отношения коэффициентов теплопроводности пород в мерзлом и талом состоянии, тем эта зависимость сильнее.

Заключение

Сделана оценка влияния температурного фактора на скорость оттаивания дисперсных мерзлых горных пород, вмещающих подземное сооружение. Рассмотрено влияние как естественной температуры

горных пород, так и температуры воздуха в подземном сооружении. Для обобщения полученных результатов использовался безразмерный температурный критерий, характеризующий отношение средней температуры воздуха за период оттаивания к начальной средней температуре мерзлых пород, вмещающих подземное сооружение. В качестве примера рассмотрен подземный объект с цилиндрической симметрией, размещенный в мерзлых дисперсных породах и эксплуатирующийся с положительной температурой воздуха. На основе приближенного решения двухфазной задачи Стефана для подземного объекта цилиндрической симметрии при граничных условиях третьего рода получены простые инженерные зависимости и разработан простой и понятный алгоритм оценки влияния естественной температуры мерзлых горных пород и температуры воздуха в сооружении на скорость оттаивания. Показано, что допущение о равенстве естественной температуры горных пород температуре плавления льда может существенно завышать скорость оттаивания в широком диапазоне исходных параметров. Причем, чем больше длительность процесса оттаивания, тем это отношение больше. Хотя по абсолютным значениям скорости оттаивания в обоих случаях уменьшаются с течением времени. В начальный момент оттаивания $S \rightarrow R_0$ естественная температура горных пород не оказывает существенного влияния на скорость оттаивания (здесь необходимо учесть, что время начала оттаивания определяется отдельно для случая $T \neq T_{пл}$). С ростом глубины оттаивания отношение уменьшается, что свидетельствует о возрастании влияния естественной температуры горных пород на процесс оттаивания. Однако, чем выше температура воздуха в выработке, тем это влияние меньше. Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на определение влияния естественной температуры горных пород на скорость оттаивания дисперсных горных пород вокруг сооружений различной симметрии.

Список литературы / References

1. Скуба В.Н. Исследование устойчивости горных выработок в условиях многолетней мерзлоты. Новосибирск: Наука, 1974. 118 с.
1. Scuba V.N. Research on the sustainability of mining in permafrost. Novosibirsk: Nauka, 1974. 118 p. (in Russian).
2. Воронов Е.Т., Бондарь И.А. Влияние температурного фактора на безопасность и эффективность ведения подземных горных работ в криолитозоне // Вестник ЧитГУ. 2010. № 5 (62). С. 85–93.
2. Voronov E.T., Bondar I.A. Influence of the temperature factor on the safety and efficiency of underground mining in the permafrost zone // Bulletin of ChitGU. 2010. No. 5 (62). P. 85–93 (in Russian).
3. Guo fang Xu, Jilin Qi, Wei Wu. Temperature Effect on the Compressive Strength of Frozen Soils: A Review. Recent Advances in Geotechnical Research, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. 2019. P. 227–236. DOI: 10.1007/978-3-319-89671-7_19.
4. Teng J., Shan F., He Z., Zhang S., Sheng D. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. Géotechnique. 2018. P. 208–225. DOI: 10.1680/jgeot.17.P.208.
5. Шац М.М. Современное состояние городской инфраструктуры г. Якутска и пути повышения ее надежности // Геориск. 2011. № 2. С. 40–46.
5. Shats M.M. The current state of the urban infrastructure of Yakutsk and ways to improve its reliability // Georisk. 2011. No. 2. P. 40–46 (in Russian).
6. Железняк М.Н., Шестернев Д.М., Литовко А.В. Проблемы устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. М.: «Геомаркет», 2018. С. 223–227.
6. Zheleznyak M.N., Shesternev D.M., Litovko A.V. Problems of stability of highways in permafrost // Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiyskoy Federatsii. M.: «Geomarket», 2018. P. 223–227 (in Russian).
7. Панков В.Ю., Бурнашева С.Г. Анализ способов защиты автомобильных дорог от негативных криогенных процессов // Лучшая студенческая статья 2020: сб. ст. XXIX Межд. науч.-исслед. конк. Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2020. С. 52–55.
7. Pankov V.Yu., Burnasheva S.G. Analysis of ways to protect highways from negative cryogenic processes // Luchshaya studentskaya stat'ya 2020: sb. st. XXIX Mezhd. nauch.-issled. konk. Penza: MTSNS «Nauka i prosveshcheniye», 2020. P. 52–55 (in Russian).
8. Galkin A.F. Thermal conditions of the underground town collector tunnel // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 8. P. 70–73.
9. Zhang X., Feng S.G., Chen P.C. Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions // Oil Gas Storage Transportation. 2013. No. 6. P. 365–369.
10. Дугартыренов А.В., Бельченко Е.Л. Параметры теплоизоляции при промерзании грунтов на допустимую глубину // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. № 5. С. 44–47.
10. Dugartyrenov A.V., Belchenko E.L. The parameters of insulation when the soils are frozen at an acceptable depth // Gornyy' informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2009. No. 5. P. 44–47 (in Russian).
11. Ushakov G.S., Galkin A.F. Calculation of the stable room span when the rock mass is subjected to additional freezing // Soviet Mining. 1976. Vol. 12. Issue 4. P. 364–367.
12. Железняк М.Н., Сериков С.И., Шац М.М. Эколого-геокриологические и геотехнические условия газотранспортной системы «Сила Сибири» // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2018. Т. 17. № 2. С. 189–200. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.8.
12. Zheleznyak M.N., Serikov S.I., Shatz M.M. Ecological, geocryological and geotechnical conditions of the Power of Siberia gas transmission system // Bulletin of PNIPIU. Geology. Oil and gas and mining, 2018. Vol. 1. No. 2. P. 189–200 (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.8.
13. Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu. Calculation of thermal conductivity coefficient of thermal insulation mixtures. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 918 (2020) 012009.
14. Галкин А.Ф. Расчет параметров теплозащитных покрытий подземных сооружений криолитозоны // Известия вузов. Горный журнал. 2008. № 6. С. 81–89.
14. Galkin A.F. Calculation of the parameters of heat-shielding coatings of underground structures of the permafrost zone // Izvestiya VUZov. Gornyy zhurnal. 2008. No. 6. P. 81–89 (in Russian).
15. Галкин А.Ф., Курта И.В. Влияние температуры на глубину оттаивания мерзлых пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 2. С. 82–91. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.
15. Galkin A.F., Kurta I.V. Influence of temperature on the depth of thawing of frozen rocks // Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2020. No. 2. P. 82–91 (in Russian). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.