

## ПРОГНОЗ ГЛУБИНЫ ОТТАИВАНИЯ ПОРОД В ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЯХ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ

А.Ф. Галкин<sup>1</sup>, В.Ю. Панков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия, e-mail: afgalkin@mail.ru

<sup>2</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

**Аннотация:** Работа выполнена с целью определения поправочного (корректирующего) коэффициента, позволяющего минимизировать ошибку оценочных расчетов при использовании методов прогноза глубины оттаивания пород вокруг большепролетных выработок (камер) плоской симметрии для выработок цилиндрической (круговой) симметрии. Используя допущение о равенстве объемов пород, участвующих в теплообмене, было получено простое выражение для определения поправочного коэффициента. Сделана оценка возможного диапазона изменения поправочного коэффициента для условий, характерных для горных выработок рудника криолитозоны, эксплуатирующегося в естественном (нерегулируемом) тепловом режиме. Показано, в частности, что возможны случаи, когда поправочный коэффициент больше допустимого в инженерной практике. Это может приводить к существенной погрешности в определении глубины оттаивания горных пород и, как следствие, к ошибочным техническим решениям при проектировании. В частности, при выборе вида и параметров крепи. Для более полного охвата возможных исходных данных выражение для поправочного коэффициента представлено в безразмерном виде, как функция критериев Фурье и Стефана. Построены 3D графики, позволяющие в широком диапазоне исходных данных находить величину поправочного коэффициента для повышения точности определения глубины оттаивания пород вокруг выработок цилиндрической симметрии. Определены сечения горных выработок, для которых ошибка в определении глубины оттаивания не превышает допустимой в инженерной практике величины, и поправочный коэффициент может не применяться.

**Ключевые слова:** криолитозона, подземное сооружение, горная выработка, симметрия, глубина оттаивания, эквивалентный радиус, ошибка вычисления.

**Для цитирования:** Галкин А. Ф., Панков В. Ю. Прогноз глубины оттаивания пород в подземных сооружениях цилиндрической симметрии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 1. – С. 72–83. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_1\_0\_72.

### Thaw depth prediction in cylindrical underground openings

A.F. Galkin<sup>1</sup>, V.Yu. Pankov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia, e-mail: afgalkin@mail.ru

<sup>2</sup> M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

**Abstract:** The study aims to determine a correction factor to minimize estimation error in thaw depth prediction using the methods of plane-symmetry long-span openings for cylindrical

openings of circular symmetry. With an assumption of equal rock volumes involved in heat exchange, a simple expression was obtained for finding the correction factor. A potential variation range was assessed for the correction factor in the conditions typical of a mine operating in the permafrost zone in the natural (uncontrolled) thermal environment. In particular, it is shown that the correction factor can exceed sometimes the allowable value in the engineering practice. This can lead to an essential error in the thaw depth value and, as a consequence, can bring erroneous design engineering solutions. In order to embrace the maximum possible source data, the correction factor expression is presented in a dimensionless form as a function of the Fourier and Stefan criteria. The 3D plots allow finding the correction factor within a wide range of the source data to improve the accuracy of the thaw depth in rock mass around openings of cylindrical symmetry. The cross-sections of the underground openings, for which the thaw depth error is below the value allowable in the engineering practice and the correction factor is inapplicable, are determined.

**Key words:** permafrost zone, underground structure, underground opening, symmetry, thaw depth, equivalent radius, calculation error.

**For citation:** Galkin A. F., Pankov V. Yu. Thaw depth prediction in cylindrical underground openings. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(1):72-83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_1\_0\_72.

---

## Введение

Основной отличительной чертой шахт, рудников и подземных сооружений криолитозоны в сравнении с аналогичными объектами средней и южной климатической зоны является влияние температурного режима на устойчивость горных выработок [1 – 4]. Например, основная проблемная для сооружений глубокого заложения — высокая температура, пагубно влияющая на производительность труда и работоспособность подземных рабочих, чем, собственно, и определяется степень безопасности ведения горных работ [5 – 8]. Для объектов криолитозоны, кроме негативного влияния температуры на комфортность и безопасность труда рабочих в зимний период, существенное влияние на безопасность и надежность эксплуатации подземных объектов оказывает изменение прочностных свойств вмещающих пород при их оттаивании в летний период [1 – 3, 9, 10]. Известно, что в мерзлом состоянии прочность горных пород достаточна ве-

лика, что в большинстве практически значимых случаев позволяет эксплуатировать горные выработки, например, россыпных шахт, без крепления в течение всего зимнего периода [2]. В то же время, при прогреве горных пород и их оттаивании в летний период, у большинства типов дисперсных пород прочностные характеристики существенно изменяются, вплоть до полной потери связности и обрушения талого слоя [2, 11, 12].

В таких породах температурный режим деятельного слоя выработки напрямую определяет выбор способов и средств крепления для обеспечения их безопасной эксплуатации [1 – 3, 9, 10]. Поэтому в научном и инженерном сообществе, занимающимся проблемами горной теплофизики, большое внимание уделяется разработке надежных методов прогноза и оценки теплового режима в горных выработках подземных сооружений криолитозоны. При этом наряду с численными методами прогноза с

использованием специальных программных комплексов по-прежнему актуальными являются аналитические решения задач горной теплофизики [13–22].

Целью настоящей статьи было определение поправочного (корректирующего) коэффициента, позволяющего минимизировать ошибку оценочных расчетов при использовании методов прогноза глубины оттаивания пород вокруг большепролетных выработок (камер) плоской симметрии для выработок цилиндрической (круговой) симметрии. В работе [23] нами было показано, что тепловой поток в горных выработках плоской и сферической симметрии, несмотря на количественное отличие, имеет область, в которой возникающей в инженерных расчетах ошибкой можно пренебречь. В частности, установлено, при каком сечении горных выработок, возникающая ошибка меньше допустимой и может быть отнесена в расчетный запас.

Для правильного восприятия дальнейшего материала приведем цитату из работы [23] об особенностях теплообмена в выработках различной симметрии. «Для выработок большого сечения, или как их еще называют, большепролетных выработок, при решении тепловых задач используют вместо цилиндрической и сферической плоскую симметрию. При этом руководствуются простым соображением, что при большом эквивалентном радиусе выработки поверхность теплообмена можно рассматривать как плоскую, а эффект кривизны поверхности не окажет влияния на точность прогноза. Собственно, это следует из простого анализа одномерного уравнения Фурье для тел различной симметрии, которые отличаются от плоскости только дополнительным членом, пропорциональным  $b/R$ , где  $b = 0, 1, 2$  для плоской, цилиндрической и сферической симметрии, соответственно. Отсю-

да очевидно, что чем больше значение  $R$ , тем меньше второй член в уравнении, и тем меньше влияние кривизны на точность прогноза. Эффект кривизны поверхности заключается в том, что для плоского случая при увеличении координаты на  $\Delta R$  поверхность и объем пород, участвующих в теплообмене, не изменяются, т.е.  $\Delta S$  и  $\Delta V$  остаются постоянными величинами для всего времени протекания тепловых процессов. А для цилиндрической и сферической симметрий они изменяются, возрастая с каждым приращением координаты на значение  $\Delta R$ . В то же время, аналитические решения плоских задач значительно проще, чем решение задач в цилиндрической или шаровой симметрии, и во многих практически интересных случаях получаются в явном виде, что особенно важно для качественного и количественного анализа получаемых зависимостей и оценки влияния отдельных составляющих теплового процесса на конечный результат».

Мы посчитали нужным привести эту цитату, чтобы не только упростить восприятие дальнейших рассуждений, но и подчеркнуть, что данная статья является логическим продолжением ранее проведенных исследований и их естественным развитием.

### Метод расчета

Для достижения цели воспользуемся следующим допущением: объем пород, участвующих в теплообмене, одинаков вокруг выработок с плоской и цилиндрической симметрией. Данное допущение является оправданным, так как количество энергии, переданной от воздуха к горным породам, при прочих равных условиях теплообмена является величиной постоянной. А свойства горных пород не зависят от геометрических характеристик выработок. Естественно, глубина оттаивания в этом слу-

чае вокруг выработок цилиндрической симметрии всегда меньше, чем при плоской симметрии. Если принять, что по одной из координат геометрический параметр (длина выработки) равен единице ( $l = 1,0$  м), то справедливо равенство  $V_1 = V_2$  и  $S_1 = S_2$ . Таким образом,

$$S_1 = 2\pi h R_0 \text{ и } S_2 = \pi (R_2^2 - R_0^2), \quad (1)$$

где  $V_1, V_2$  – объем пород, участвующих в теплообмене при плоской и цилиндрической симметрии соответственно, м<sup>3</sup>;  $S_1, S_2$  – площадь сечения талой зоны пород при плоской и цилиндрической симметрии соответственно, м<sup>2</sup>;  $h$  – глубина оттаивания пород в выработке плоской симметрии, м;  $R_0$  – эквивалентный радиус выработки, м;  $R_2$  – радиус оттаивания пород вокруг выработки цилиндрической симметрии, м.

Приравняв объемы (площади), после несложных преобразований получим следующее корректирующее уравнение:

$$R_2^2 = \sqrt{R_0^2 + 2hR_0}. \quad (2)$$

Введем параметр  $m$

$$m = R_2/h. \quad (3)$$

Этот параметр показывает, на сколько должно быть больше значение  $h$ , чтобы выполнялось равенство  $V_1 = V_2$ . Отношение  $1/m$  показывает во сколько раз должен быть параметр  $R_2$  меньше параметра  $h$ , чтобы удовлетворялось данному равенству.

Разделив обе части уравнения (2) на величину  $h^2$ , после преобразований получим следующую формулу для корректирующего коэффициента  $m$ :

$$m = \sqrt{z^2 + 2z}, \quad z = R_0/h. \quad (4)$$

Данный коэффициент позволяет уточнить реальную глубину оттаивания пород вокруг объектов с цилиндрической симметрией при известной глубине оттаивания (при прочих равных условиях) на аналогичных объектах плоской

симметрии. Например, если мы рассчитали или измерили глубину оттаивания в большепролетных камерах подземного сооружения, то с помощью данного коэффициента можно оценить глубину оттаивания в соединяющих их горных выработках значительно меньшего сечения с цилиндрической симметрией.

Так как горные выработки редко имеют классическую круговую (цилиндрическую) симметрию, для их приведения к канонической форме обычно используют понятие «эквивалентного радиуса», который определяется по простой формуле [3, 16, 23]

$$R_0 = \sqrt{S_0/\pi}, \quad (5)$$

где  $S_0$  – реальное сечение горной выработки любой формы, м<sup>2</sup>.

Для выработок подземных сооружений большого сечения различной геометрии было предложено при прогнозе температурного режима камер и целиков использовать коэффициент формы в виде эквивалентного диаметра, для определения которого получена соответствующая формула [24].

Если использовать известную формулу (5) для определения эквивалентного радиуса, то параметр  $k$  будет определяться также по формуле (4), но промежуточный параметр  $z$  находится из следующего выражения:

$$z = \sqrt{S_0/h^2\pi}. \quad (6)$$

На практике обычно используется не глубина оттаивания, отсчитываемая от центра сечения выработки, а значение, определяемое от поверхности выработки, которое обозначим как  $\delta$ . В этом случае  $R_0 = R_2 - \delta$ , и после преобразований получим следующее выражение для корректирующего коэффициента, который обозначим  $k$ :

$$k = (\delta/h) = \sqrt{z^2 + 2z} - z, \quad (7)$$

$$z = R_0/h$$

Для общности анализа сделаем оценку диапазона изменения поправочного коэффициента в аналитической безразмерной форме. При этом будем считать, что глубина оттаивания для выработок плоской симметрии определяется по классической формуле Стефана [16, 20]

$$h / l = \sqrt{2Fo / St} \quad (8)$$

где  $Fo$  — число Фурье, равное  $at/R_0^2$ , где  $a$  — температуропроводность горных пород,  $m^2/c$ . Температуропроводность горных пород (коэффициент температуропроводности) является комплексной величиной, определяется по формуле:  $a = \lambda/(c\rho)$ , где  $c$  — удельная теплоемкость горных пород, Дж/кг·К;  $\rho$  — плотность горных пород, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/(м·К).  $St$  — число Стефана, равное  $Lw/ct$ , где  $L$  — скрытая теплота плавления льда, Дж/(кг·К);  $w$  — льдистость горных пород, д.е.;  $t$  — температура воздуха в период оттаивания, °С.

Параметр  $z$  для рассматриваемого случая может быть определен по следующей формуле

$$z = \sqrt{S_0 St / 2\pi l Fo} . \quad (9)$$

Оценим относительную ошибку, которая возникает в расчетах, если не пользоваться поправочным коэффициентом. В этом случае можно записать

$$\begin{aligned} e &= 100((h - \delta h)/h), \% \\ e &= 100(1 - k), \% \end{aligned} \quad (10)$$

Представляет интерес оценить значение сечений выработок цилиндрической симметрии для различных условий эксплуатации подземных сооружений, расчеты глубины оттаивания для которых укладываются в допустимый диапазон ошибки, то есть меньше десяти процентов. Расчетная формула для выполнения условия  $e \leq 10,0\%$ , полученная из выражения (10) с учетом (7) и (9), имеет вид:

$$S_0 \geq 25Fo/St \quad (11)$$

## Анализ и обсуждение результатов

Оценим возможный диапазон изменения параметра  $z$  для характерных условий горных выработок золотодобывающего рудника криолитозоны, эксплуатирующегося при естественном (нерегулируемом) тепловом режиме. Реальные значения глубины оттаивания пород и сечений выработок рудников криолитозоны обычно находятся в следующих характерных пределах [9, 10]:  $1,0 \leq h \leq 2,0$  и  $10,0 \leq S_0 \leq 20,0$ . Подставляя минимальные и максимальные значения этих величин в уравнение (6), получим, что возможные изменения параметра  $z$  находятся в диапазоне  $0,89 \div 6,4$ . То есть диапазон достаточно большой.

Соответствующий диапазон изменения корректирующего коэффициента будет равен  $0,71 \div 0,93$ . Это означает, что существуют варианты, когда ошибка может быть как незначительной (поправочный коэффициент близок к единице), так и очень большой, почти в три раза превышающей обычно допустимое в инженерной практике значение в 10%. И в том, и в другом случае возникающая ошибка относится в расчетный запас. Однако запас больше допустимого редко используется на практике. Это может привести к неправильным техническим решениям при проектировании и существенному увеличению капитальных затрат. Например, глубина оттаивания пород является определяющей при выборе типа и вида крепления выработок. При незначительной глубине оттаивания обычно применяют анкерную крепь, а при больших значениях — металлическую арочную крепь с затяжкой [1, 3, 9, 10]. Естественно, ценовые характеристики у данных видов крепи отличаются на порядок. Поэтому в конкретных условиях необходимо пользоваться поправочным коэффициентом при оценке глубины оттаивания горных пород вокруг выработок цилиндрической

симметрии. По полученным формулам были проведены варианты расчеты, результаты которых приведены в виде графиков на рис. 1–5 (см. Приложение, с. 82–83). На рис. 1 показано изменение значения поправочного коэффициента в зависимости от глубины оттаивания пород для различных сечений горных выработок цилиндрической симметрии.

Анализ графика на рис. 1 позволяет утверждать, что чем меньше глубина оттаивания пород, тем ошибка в определении глубины оттаивания пород вокруг выработки с цилиндрической симметрией будет больше, так как поправочный коэффициент в этом случае меньше. Например, для сечения выработки, равного  $10 \text{ м}^2$ , при расчетной глубине оттаивания для плоской симметрии  $0,2 \text{ м}$  поправочный коэффициент приблизительно равен  $0,35$ . Т.е. реальная глубина оттаивания в случае цилиндрической симметрии будет равна  $0,07 \text{ м}$ . Для сечения выработки в два раза больше ( $20 \text{ м}^2$ ) поправочный коэффициент будет равен  $0,97$ , а реальная глубина оттаивания приблизительно будет равна  $0,19 \text{ м}$ . Таким образом, количественно подтверждается вывод, что чем меньше сечение, тем меньше поправочный коэффициент и тем больше ошибка в определении реальной глубины оттаивания. Причем чем больше глубина оттаивания, тем эта зависимость менее существенна.

На рис. 2 приведен обобщающий 3D график изменения поправочного коэффициента в зависимости от критериев Фурье и Стефана, определяющих скорость и глубину оттаивания мерзлых горных пород вокруг выработок. Как видно из графика на рис. 2, чем больше значение числа Стефана, тем больше поправочный коэффициент практически во всем рассмотренном диапазоне изменения чисел Фурье. Большие числа Стефана при одинаковой температуре оттаивания

характерны для пород с большой льдистостью. То есть чем больше льдистость пород, тем меньшую ошибку мы получаем, если используем прогнозные формулы плоской симметрии для расчета глубины оттаивания пород вокруг выработок с цилиндрической симметрией.

Выполненный анализ результатов вариантов расчетов позволяет сформулировать обобщающий вывод: чем меньше сечение исследуемого объекта цилиндрической симметрии, тем эффект «кривизны» будет сказываться больше. При этом чем больше длительность периода оттаивания горных пород, тем эта зависимость меньше. Для подтверждения сделанного вывода на рис. 3 представлены графики изменения возникающей ошибки (если не учитывать поправочный коэффициент) для двух характерных сечений горных выработок в зависимости от условий теплообмена (чисел Фурье и Стефана). Как видно из графиков, плоскость для безразмерного сечения, равного  $10$ , расположена ниже плоскости, характеризующей сечение в два раза больше. Это свидетельствует о том, что при уменьшении сечения ошибка при прогнозе ореола оттаивания будет больше.

Представляет интерес определение реальных сечений выработок, для которых ошибка в определении глубины оттаивания пород будет меньше допустимой в инженерной практике. На рис. 4 представлен 2D график, позволяющий определить диапазон изменения таких сечений в зависимости от числа Фурье при характерных для криолитозоны значениях чисел Стефана. Из графика видно, что предельное значение сечения выработки (в рассмотренном диапазоне изменения чисел Стефана) существенно зависит от длительности периода оттаивания (число Фурье). Чем больше период оттаивания, тем больше допустимое сечение горной выработки цилиндриче-



ской симметрии, для которой можно не использовать поправочный коэффициент при прогнозе глубины оттаивания пород.

На рис. 5 представлен обобщающий 3D график, позволяющий оперативно определить диапазон изменения таких сечений в зависимости от чисел Фурье и Стефана, характерных для условий эксплуатации конкретного подземного сооружения в криолитозоне. Как видно из графика, допустимые сечения горных выработок достаточно вариативны и изменяются в широком диапазоне, охватывающем, практически все типовые сечения горных выработок подземных сооружений.

Причем существенное влияние на конкретное значение допустимого сечения оказывают геокриологические и климатические условия эксплуатации горных выработок. Общая закономерность выражается в том, что при увеличении числа Стефана и уменьшении числа Фурье значение предельного сечения уменьшается. А при увеличении числа Фурье и уменьшении числа Стефана значение предельного сечения увеличивается.

### **Выводы**

Получены зависимости для определения поправочного коэффициента, позволяющего оценить глубину оттаивания мерзлых пород вокруг выработок цилиндрической симметрии подземных объектов различного назначения при известной из практики или рассчитанной глубине оттаивания пород на аналогичных объектах плоской симметрии. Выполнено сравнение количественного изменения глубины оттаивания в горных выработках различной симметрии при граничных условиях первого рода. Определен возможный диапазон изменения поправочного коэффициента для характерных условий рудников криолитозоны, эксплуатирующихся с есте-

ственным (нерегулируемым) тепловым режимом. Показано, что в зависимости от конкретных условий величины поправочного коэффициента могут изменяться в очень широком диапазоне, а возникающая ошибка, хотя и относится в расчетный запас, может достигать значений, в 3–5 раз больше допустимых в инженерной практике. Представлены результаты вариантных расчетов в виде 3D графиков, которые оперативно позволяют оценить величину поправочного коэффициента для широкого диапазона исходных данных, характерных для строительства и эксплуатации подземных сооружений в криолитозоне.

Для обобщения выводов результаты представлены в виде зависимостей искомой величины в безразмерной (критериальной) форме от критериев Фурье и Стефана. Установлено, в частности, что чем больше значение числа Стефана, тем больше поправочный коэффициент практически во всем рассмотренном диапазоне изменения чисел Фурье. То есть чем больше льдистость пород, тем меньшую ошибку мы получаем, если используем прогнозные формулы плоской симметрии для расчета глубины оттаивания пород вокруг выработок с цилиндрической симметрией.

Выполненный анализ результатов вариантных расчетов позволяет сформулировать обобщающий вывод: чем меньше сечение исследуемого объекта цилиндрической симметрии, тем эффект «кривизны» будет сказываться больше. При этом чем больше длительность периода оттаивания горных пород, тем эта зависимость менее существенна.

Дальнейшим направлением исследований должен быть поиск области возможного перехода от плоской симметрии к сферической с помощью поправочного коэффициента. Эта проблема важна при решении задач прогноза теплового режима горных пород в камер-

ных выработках небольшого сечения. Необходимо оценить и точность самого подхода к оценке глубины оттаивания пород с использованием поправочного коэффициента путем сравнения полученных результатов с результатами математического моделирования теплового режима пород вокруг выработок цилиндрической и сферической симметрии и расчетами по классическим формулам.

Также следует оценить степень влияния наличия теплоизоляции на поверхности выработки на величину поправочного коэффициента, а также количественно обосновать целесообразность и корректность использования предложенного методического подхода для оценки глубины оттаивания пород вокруг выработок различной симметрии в подземных сооружениях криолитозоны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скуба В. Н.* Исследование устойчивости горных выработок в условиях многолетней мерзлоты. — Новосибирск: Наука, 1974. — 118 с.
2. *Шерстов В. А.* Повышение устойчивости выработок россыпных шахт Севера. — Новосибирск: Наука, 1980. — 56 с.
3. *Дядькин Ю. Д.* Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. — М.: Недра, 1968. — 256 с.
4. *Кузьмин Г. П.* Подземные сооружения в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 2002. — 176 с.
5. *Greth A., Roghanchi P., Kocsis K.* A review of cooling system practices and their applicability to deep ad hot underground US mines / Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium. Golden. 2017, vol. 11, pp. 1–9.
6. *Danko G.* Ventilation and climate control of deep mines / McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology. 2012, pp. 296–299.
7. *Казаков Б. П., Зайцев А. В.* Исследование процессов формирования теплового режима глубоких рудников // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2014. — № 10. — С. 91–97.
8. *Лапшин А. А.* Влияние твердеющей закладки в очистных камерах на микроклимат глубоких шахт // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2014. — № 10. — С. 3–11.
9. *Вернигор В. М., Морозов К. В., Бобровников В. Н.* О подходах к проектированию теплового режима рудников в условиях многолетнемерзлых пород // Записки Горного института. — 2013. — Т. 205. — С. 139–140.
10. *Галкин А. Ф.* Тепловой режим рудников криолитозоны // Записки Горного института. — 2016. — Т. 219. — С. 377–381. DOI: 10.18454/pti.2016.3.377.
11. *Паршаков О. С., Левин Л. Ю., Семин М. А.* Анализ процесса оттаивания горных пород при проходке шахтных стволов способом искусственного замораживания // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 8. — С. 51–69. DOI: 10.25018/0236149320218051.
12. *Семин М. А., Бровка Г. П., Пугин А. В., Бублик С. А., Желнин М. С.* Исследование влияния неоднородности поля температур на прочность ледопородных ограждений стволов шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 79–93. DOI: 10.25018/0236149320219079.
13. *Горелик Я. Б., Паздерин Д. С.* Корректность постановки и решения теплотехнических задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли. — 2017. — Т. XXI. — № 3. — С. 49–59.
14. *Khalid M. Z., Zubair M., Ali M.* An analytical method for the solution of two phase Stefan problem in cylindrical geometry // Applied Mathematics and Computation. 2019, vol. 342, pp. 295–308.



15. McCord D., Crepeau J., Siahpush A., Brogin J. Analytical solutions to the Stefan problem with internal heat generation // *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 103, pp. 443 – 451.
16. Galkin A. F. Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating // *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, no. 8, pp. 68 – 73.
17. Mitchell S. L., Vynnycky M. On the numerical solution of two-phase Stefan problems with heat-flux boundary conditions // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2014, vol. 264, pp. 49 – 64.
18. Li M., Chaouki H., Robert J. L., Ziegler D., Martin D., Fafard M. Numerical simulation of Stefan problem with ensuing melt flow through XFEM/level set method // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2018, vol. 148, pp. 13 – 26.
19. Turkyilmazoglu M. Stefan problems for moving phase change materials and multiple solutions // *International Journal of Thermal Sciences*. 2018, vol. 126, pp. 67 – 73.
20. Гудмен Т. Р. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена / Проблемы теплообмена. — М.: Атомиздат, 1967. — С. 41 – 95.
21. Khokholov Y. A., Kurilko A. S., Solov'ev D. E. Temperature field analysis in salty rocks at shaft mouth under operation of a freezing system // *Journal of Mining Science*. 2016, vol. 52, no. 3, pp. 593 – 600.
22. Курилко А. С., Хохолов Ю. А., Дроздов А. В., Соловьев Д. Е. Геотермический контроль грунтов основания копров и устьевого части вертикальных стволов на примере алмазодобывающего рудника «Удачный» (Якутия) // *Криосфера Земли*. — 2017. — Т. XXI. — № 5. — С. 82 – 91. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(82-91).
23. Галкин А. Ф., Курта И. В., Панков В. Ю. Сравнение теплового потока в горных выработках плоской и сферической симметрии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 10. — С. 133 – 141. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-133-141.
24. *Пособие по расчету устойчивости подземных горных выработок при размещении в них объектов народного хозяйства* / Разраб. И.П. Романовым и др. — М.: ЦИТП, 1990. — 71 с. **ИЗДАНИЕ**

## REFERENCES

1. Skuba V. N. *Issledovanie ustoychivosti gornyykh vyrabotok v usloviyakh mnogoletney mertzloty* [Study of the stability of mine workings in the conditions of permafrost], Novosibirsk, Nauka, 1974, 118 p.
2. Sherstov V. A. *Povyshenie ustoychivosti vyrabotok rossypanykh shakht Severa* [Increase in sustainability of the mining of the North], Novosibirsk, Nauka, 1980, 56 p.
3. Dyad'kin Yu. D. *Osnovy gornoy teplofiziki dlya shakht i rudnikov Severa* [Basics of mining thermo physics for underground mines in the North], Moscow, Nedra, 1968, 256 p.
4. Kuzmin G. P. *Podzemnye sooruzheniya v kriolitozone* [Underground structures in the permafrost zone], Novosibirsk, Nauka, 2002, 176 p.
5. Greth A., Roghanchi P., Kocsis K. A review of cooling system practices and their applicability to deep ad hot underground US mines. *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. Golden. 2017, vol. 11, pp. 1 – 9.
6. Danko G. Ventilation and climate control of deep mines. *McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology*. 2012, pp. 296 – 299.
7. Kazakov B. P., Zaitsev A. V. The study of the formation of the thermal regime of deep mines. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*. 2014, no. 10, pp. 91 – 97. [In Russ].
8. Lapshin A. A. The effect of hardening bookmarks in treatment chambers on the microclimate of deep mines. *East European Journal of Advanced Technology*. 2014, no. 10, pp. 3 – 11. [In Russ].
9. Vernigor V. M., Morozov K. V., Bobrovnikov V. N. About approaches to designing thermal regime of mines in permafrost. *Journal of Mining Institute*. 2013, vol. 205, pp. 139 – 140. [In Russ].
10. Galkin A. F. Thermal regime of cryolithozone mines. *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 219, pp. 377 – 381. [In Russ]. DOI: 10.18454/pmi.2016.3.377.

11. Parshakov O. S., Levin L. Yu., Semin M. A. Thawing of rocks in shaft sinking with artificial ground freezing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 8, pp. 51–69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236149320218051.

12. Semin M. A., Brovka G. P., Pugin A. V., Bublik S. A., Zhelnin M. S. Effects of temperature field nonuniformity on strength of frozen wall in mine shafts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 9, pp. 79–93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236149320219079.

13. Gorelik Ya. B., Pazderin D. S. Correctness of formulation and solution of thermomechanical problems in forecasting temperature field dynamics in the foundations of constructions on permafrost. *Earth's Cryosphere.* 2017, vol. XXI, no. 3, pp. 49–59. [In Russ].

14. Khalid M. Z., Zubair M., Ali M. An analytical method for the solution of two phase Stefan problem in cylindrical geometry. *Applied Mathematics and Computation.* 2019, vol. 342, pp. 295–308.

15. McCord D., Crepeau J., Siahpush A., Brogin J. Analytical solutions to the Stefan problem with internal heat generation. *Applied Thermal Engineering.* 2016, vol. 103, pp. 443–451.

16. Galkin A. F. Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating. *Metallurgical and Mining Industry.* 2015, no. 8, pp. 68–73.

17. Mitchell S. L., Vynnycky M. On the numerical solution of two-phase Stefan problems with heat-flux boundary conditions. *Journal of Computational and Applied Mathematics.* 2014, vol. 264, pp. 49–64.

18. Li M., Chaouki H., Robert J. L., Ziegler D., Martin D., Fafard M. Numerical simulation of Stefan problem with ensuing melt flow through XFEM/level set method. *Finite Elements in Analysis and Design.* 2018, vol. 148, pp. 13–26.

19. Turkyilmazoglu M. Stefan problems for moving phase change materials and multiple solutions. *International Journal of Thermal Sciences.* 2018, vol. 126, pp. 67–73.

20. Goodman T. R. The use of integral methods in nonlinear problems of unsteady heat transfer. *Problemy teploobmena* [Heat transfer problems], Moscow, Atomizdat, 1967, pp. 41–95.

21. Khokholov Y. A., Kurilko A. S., Solov'ev D. E. Temperature field analysis in salty rocks at shaft mouth under operation of a freezing system. *Journal of Mining Science.* 2016, vol. 52, no. 3, pp. 593–600.

22. Kurilko A. S., Khokholov Y. A., Drozdov A. V., Solov'ev D. E. Control of ground temperatures under headframes and collars of vertical shafts. A case study of the Udachny diamond mine (Yakutia). *Earth's Cryosphere.* 2017, vol. 21, no. 5, pp. 82–91. [In Russ]. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(82-91).

23. Galkin A. F., Kurta I. V., Pankov V. Yu. Comparison of heat flows in underground openings of plane and spherical symmetry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 133–141. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-133-141.

24. *Posobie po raschetu ustoychivosti podzemnykh gornykh vyrabotok pri razmeshchenii v nikh ob'ektov narodnogo khozyaystva* [Manual for calculating the stability of underground mine workings when placing objects of the national economy in them], Moscow, TsITP, 1990, 71 p. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галкин Александр Федорович — д-р техн. наук,  
профессор, главный научный сотрудник,  
e-mail: afgalkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>,  
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,

Панков Владимир Юрьевич — канд. геол.-минерал. наук,  
доцент, e-mail: viu.pankov@s-vfu.ru,

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

Для контактов: Галкин А.Ф., e-mail: afgalkin@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.F. Galkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher,  
e-mail: afgalkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>,  
Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences, 677010, Yakutsk, Russia  
V.Yu. Pankov, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor,  
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,  
677000, Yakutsk, Russia, e-mail: viu.pankov@s-vfu.ru,  
**Corresponding author:** A.F. Galkin, e-mail: afgalkin@mail.ru.

Получена редакцией 14.10.2021; получена после рецензии 21.10.2021; принята к печати 10.12.2021.  
Received by the editors 14.10.2021; received after the review 21.10.2021; accepted for printing 10.12.2021.

## Приложение

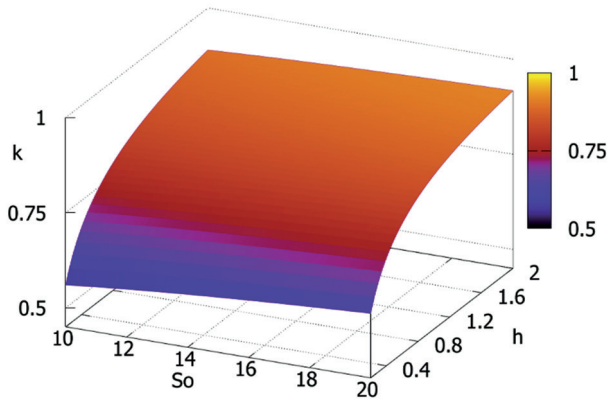


Рис. 1. Значения поправочного коэффициента в зависимости от глубины оттаивания пород для различных сечений горных выработок цилиндрической симметрии  
Fig. 1. Correction factor versus thaw depth in rock mass for different sections of cylindrical underground openings

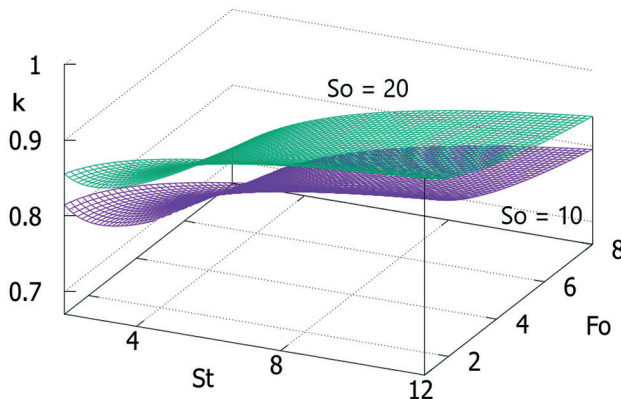


Рис. 2. Изменение поправочного коэффициента в зависимости от критериев Фурье и Стефана  
Fig. 2. Correction factor as function of the Fourier and Stefan criteria

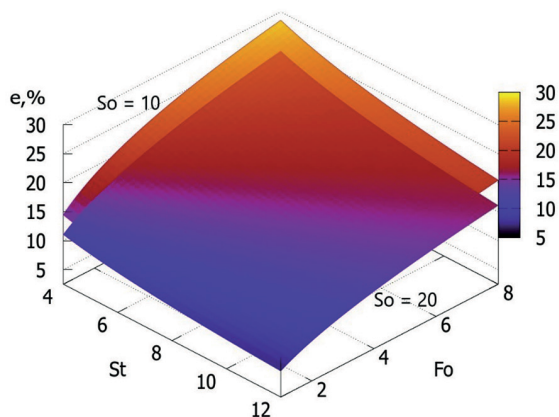


Рис. 3. Ошибка при расчете глубины оттаивания вокруг выработки цилиндрической симметрии без учета поправочного коэффициента

Fig. 3. Error of thaw depth in rock mass around cylindrical opening without regard to correction factor

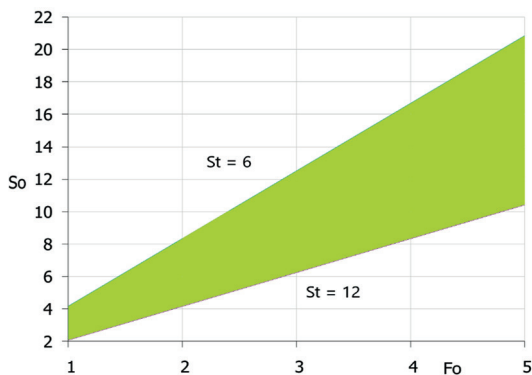


Рис. 4. Диапазон изменения сечений горных выработок при ошибке менее 10% в определении глубины оттаивания пород

Fig. 4. Variation range for cross-sections of underground openings at thaw depth error less than 10%

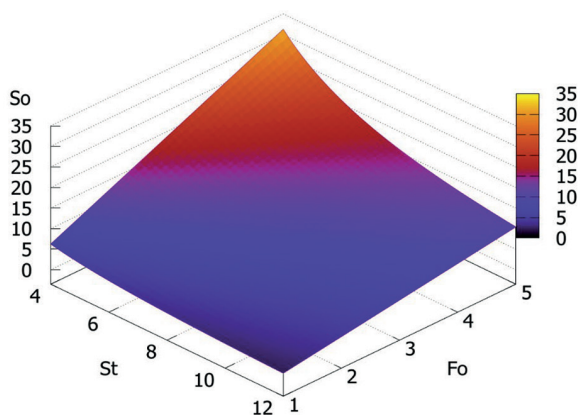


Рис. 5. Сечения горных выработок, для которых неиспользование поправочного коэффициента является допустимым

Fig. 5. Sections of underground openings for which correction factor non-use is allowable