ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(2):82-91
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.536.24 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ГЛУБИНУ ОТТАИВАНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

А.Ф. Галкин[1], И.В. Курта[1]

[1] Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Республика Коми, Россия, e-mail: afgalkin@mail.ru

Аннотация: Приведены результаты оценки влияния начальной температуры мерзлых горных пород на глубину оттаивания. В качестве расчетных зависимостей использованы простые аналитические решения задачи Стефана при граничных условиях первого рода. Получено выражение для определения ошибки в расчетах глубины оттаивания при использовании в математической модели допущения о равенстве начальной температуры мерзлых пород температуре плавления льда. При этом в расчетных формулах учитывалась функциональная зависимость плотности пород и их теплоемкости от льдистости. В качестве примера рассмотрена смесь кварцевого песчаника с водой в мерзлом состоянии при изменении льдистости от нуля (сухой кварцевый песчаник) до единицы (чистый лед). Вариантные расчеты по полученным формулам представлены в виде 2D и 3D графиков для широкого диапазона возможных изменений начальных значений, характерных для горных выработок криолитозоны различного назначения. Анализ результатов расчета показал, что основным параметром, определяющим величину ошибки расчета, является значение числа Стефана. Количественно установлена зависимость между ошибкой прогноза глубины оттаивания пород и определяющими характеристиками: льдистостью мерзлых пород и их начальной температурой. Получено выражение для определения соотношения начальной температуры и льдистости горной породы, которое при инженерных оценочных расчетах глубины оттаиванияприведет к ошибке меньше допустимой.

Ключевые слова: горные породы, прогноз, оттаивание, ошибка, температура, проектирование, льдистость, криолитозона.

Для цитирования: *Галкин А. Ф., Курта И. В.* Влияние температуры на глубину оттаивания мерзлых пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2. – С. 82–91. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.

Effect of temperature on thaw depth in frozen rocks

A.F. Galkin[1], I.V. Kurta[1]

[1] Ukhta State Technical University, Ukhta, Republic of Komi, Russia, e-mail: afgalkin@mail.ru

Abstract: The estimates of the initial temperature effect on thaw depth in frozen rocks are presented. The calculation relations were the simple analytical solutions of a Stephan problem under first-order boundary conditions. The expression is obtained for finding error in calculations of thaw depth with mathematical model of the assumed equality between the initial temperature of frozen rocks and the ice melting temperature. The calculation formulas take into account the functional dependence of rock density and heat capacity on ice content. By way of illustration, a quartz sandstone-and-water mix is tested in frozen condition under the change in ice content from zero (dry

© А.Ф. Галкин, И.В. Курта. 2020.

quartz sandstone) to one (pure ice). The calculations from the obtained formulas are presented as 2D and 3D graphs for a wide range of variation in initial values typical of various-purpose underground openings in the permafrost zone. The calculation analysis shows that the main parameter to govern the calculation error is the value of the Stephan number. The error of the thaw depth prediction as function of the determinants represented by the ice content and initial temperature in frozen rocks is quantified. The expression is obtained to find the initial temperature and ice content relation such that the error of engineering design of thaw depth in frozen rocks is less than allowable value.

Key words: rocks, prediction, thawing, error, temperature, designing, ice content, permafrost zone.

For citation: Galkin A. F., Kurta I. V. Effect of temperature on thaw depth in frozen rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(2):82-91. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.

Введение

При разработке месторождений полезных ископаемых в криолитозоне как подземным, так и открытым способом, важной величиной, определяющей выбор технических решений при проектировании, является глубина оттаивания горных пород. При подземной разработке месторождений нагрузки на крепь и выбор параметров крепи в горных выработках определяются именно этой величиной [1—4]. При открытой разработке месторождений устойчивость бортов карьеров, интенсивность послойной бульдозерной вскрыши, периодичность промывки песков, заготовленных в зимний период, выбор толщины теплоизоляции отвалов-складов также определяются скоростью и глубиной оттаивания пород [5—8].

Математические задачи по определению изменения глубины оттаивания во времени относятся к классу задач, которые в теплофизике называют задачами Стефана [9—12]. Особенностью подобных задач является наличие агрегатных переходов влаги, содержащейся в породах [13—16]. В настоящее время разработаны мощные программные комплексы, реализующие численные решения задачи Стефана в различных постановках. Однако для оценочных расчетов в инженерной практике по-прежнему используются обычные аналитические решения, которые позволяют оперативно оценить значение скорости и глубины оттаивания пород, не прибегая к приобретению и использованию программных комплексов.

Кроме того, самый популярный в настоящее время инженерный программный комплекс ANSIS, реализующий решения краевых задач методом конечных элементов, в своей инструкции указывает, что решения класса задач типа задачи Стефана носят предварительный характер и не отличаются точностью и надежностью результатов. Специальные же универсальные, по мнению разработчиков, программные комплексы, предназначенные для решения задач Стефана, например, COMSOL, еще не стали повседневными в проектных и научных организациях, поэтому заинтересованные организации самостоятельно разрабатывают узкоспециализированные программы для решения конкретных технологических задач [17—21].

При этом для получения простых аналитических зависимостей по определению изменения глубины оттаивания во времени для горных выработок, резервуаров и скважин (задачи цилиндрической или сферической симметрии) используют простое допущение, что начальная температура горных пород равна температуре плавления льда. Такое допущение позволяет получить простые расчетные формулы в явном или трансцендентном виде, удобные для инженер-

ной оценки [22—27]. Целью настоящей работы была оценка влияния данного допущения на точность прогноза.

Метод расчета

Для наглядной оценки использовалась простая формула, рекомендованная для прогноза оттаивания мерзлых грунтов при постоянной температуре на поверхности (граничные условия 1 рода) [28]:

$$S_1 = \sqrt{\frac{2\lambda_t t_в \tau}{\rho LW + C(T_{пл} - T_e)}}\ , \text{м} \quad (1)$$

где C — удельная объемная теплоемкость пород, Дж/м^3 · К; L — теплота плавления льда, равная 335 кДж/кг; ρ — объемная масса горных пород, кг/м^3; W — суммарная влажность (льдистость + незамерзшая вода) пород, далее будем считать, что доля незамерзшей воды незначительна, и суммарная влажность пород равна льдистости пород; λt — коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/м · К; $t_в$ — температура воздуха, °С; τ — период оттаивания, ч.

Если не учитывать тепло, затрачиваемое на повышение температуры пород от T_e до $T_{пл}$, то второе слагаемое в знаменателе будет равно нулю ($T_e = T_{пл}$), а формула (1) будет иметь вид:

$$S_2 = \sqrt{\frac{2\lambda_t t_в \tau}{\rho LW}}\ , \text{м} \quad (2)$$

Степень изменения глубины оттаивания, вызванная тем, что в действительности ($T_e \neq T_{пл}$), определим из выражения:

$$f = S_1 / S_2 = \sqrt{\frac{\rho LW}{\rho LW + C(T_{пл} - T_e)}} \quad (3)$$

Если речь идет о льдистых грунтах или породах, то надо учитывать зависимость (ρ) от льдистости (W) горных пород, а также зависимости удельной массовой теплоемкости $C_м$ от льдистости. Т.е., в общем случае в формулу (3) должны входить функциональные зависимости $\rho(W)$ и $C_м(W)$. Для примера рассмотрим мерзлые песчаные породы.Для смеси кварцевого песка со льдом объемная масса может быть определена по формуле

$$\rho(W) = (1 - W)*2500 + 900W\ , \text{кг/м}^3, \quad (4)$$

здесь 2500 — плотность песка кварцевого, кг/м^3; 900 — плотность льда, кг/м^3.

Зависимость удельной массовой теплоемкости от льдистости песка можно записать в виде

$$C_м = 0{,}835*(1 - W) + 2{,}1W = 0{,}835 + 1{,}265W\ , \text{кДж/кг} \cdot \text{К}, \quad (5)$$

здесь 0,835 — удельная теплоемкость сухого песка, кДж/кг · К; 2,1 — удельная теплоемкость льда, кДж/кг · К.

После несложных преобразований формула (3) с учетом того, что $C_м = C/\rho$, может быть записана в критериальном виде

$$f = \left(\frac{1}{(1 + 1/Ste)}\right)^{0,5} \quad (6)$$

где Ste — критерий Стефана, равный $LW/C_м\,(T_{пл} - T_e)$.

Относительная ошибка в расчете глубины оттаивания (завышение значения при неучете температуры мерзлых пород) может быть определена по формуле

$$\varepsilon = 100*(|1 - f|), \% \quad (7)$$

Анализ формул (6) и (7) позволяет сделать вывод, что ошибка в определении глубины оттаивания (завышение значения) не зависит от времени оттаивания, коэффициента теплопроводности оттаивающих пород, температуры воздуха в период оттаивания и определяется только числом Стефана, то есть льдистостью породы и значением ее температуры.

Представляет интерес оценить значение температуры мерзлой породы T_e, при котором ошибка в определении глубины оттаивания не превысит 10%, т.е. значения, обычно применяемого в качестве допустимого, в инженерных расчетах. Формула, полученная из уравнений (5), (6) и (7) для данного случая имеет вид:

$$|T_e| \le 0{,}234L/(1{,}265 + 0{,}835/W) \quad (8)$$

Если абсолютная температура мерзлых пород меньше полученного значения по формуле (8), то ошибка может быть отнесена в расчетный запас.

Результаты и обсуждение

По полученным выше формулам были проведены многовариантные расчеты, результаты которых приведены в виде графиков на рис. 1—4.

На рис. 1 представлена зависимость относительной ошибки определения глубины оттаивания от льдистости пород при их различной начальной температуре.

Анализ графиков на рисунке показывает, что ошибка в определении глубины оттаивания может достигать больших значений только для пород с небольшой льдистостью и низкой начальной температурой. При увеличении льдистости пород значение начальной температуры резко уменьшается и мало влияет на точность прогноза. Например, при льдистости пород 8% при начальной температуре —5 °С относительная ошибка составит 10% (график № 2, рис. 1). А при увеличении льдистости в два раза, до 16%, ошибка уменьшится более чем в два раза и будет меньше 5%. Если начальная температура пород при льдистости 8% будет –20 °С, то ошибка составит уже 80% (график № 5, рис. 1). Но, при увеличении льдистости в 2 раза, ошибка уменьшится в 3 раза и будет меньше 30%. То есть чем ниже естественная температура горных пород и меньше их льдистость, тем ошибка прогноза будет больше. Чем больше льдистость пород, тем ошибка меньше.

На рис. 2 показано изменение относительной ошибки определения глубины

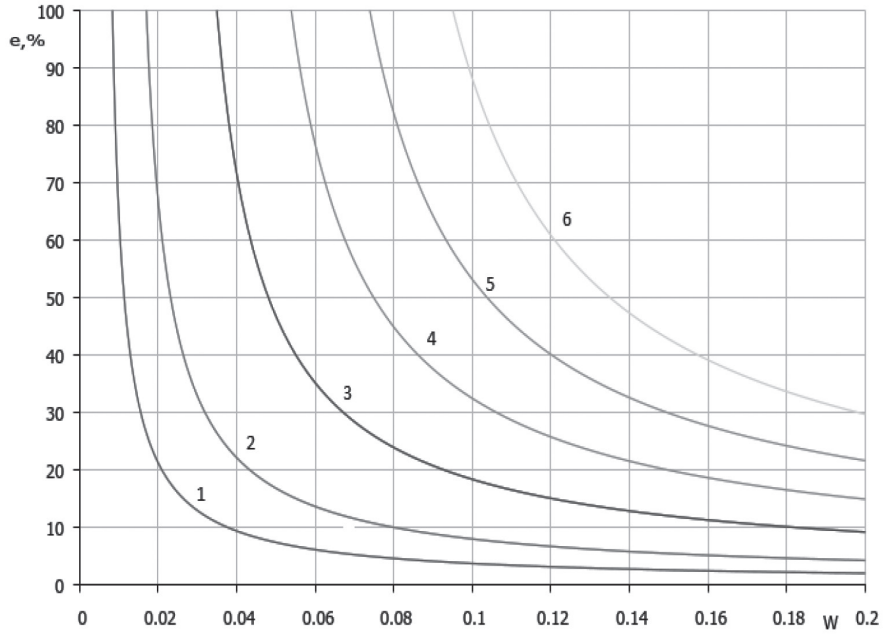

Рис. 1. Изменение относительной ошибки e (%) определения глубины оттаивания в зависимости от льдистости W (доли единиц) пород при их различной начальной температуре T_e (°С): 1 — 2,5 °С; 2 — 5,0 °С; 3 — 10,0 °С; 4 — 15,0 °С; 5 — 20,0 °С; 6 — 25,0 °С

Fig. 1. Change in the relative error e (%) of determining the thawing depth depending on the ice content W (fraction of units) of the rocks at their different initial temperatures T_e (°C): 1 — 2.5 °C; 2 —5.0 °C; 3 —10.0 °C; 4 —15.0 °C; 5 —20.0 °C; 6 —25.0 °C

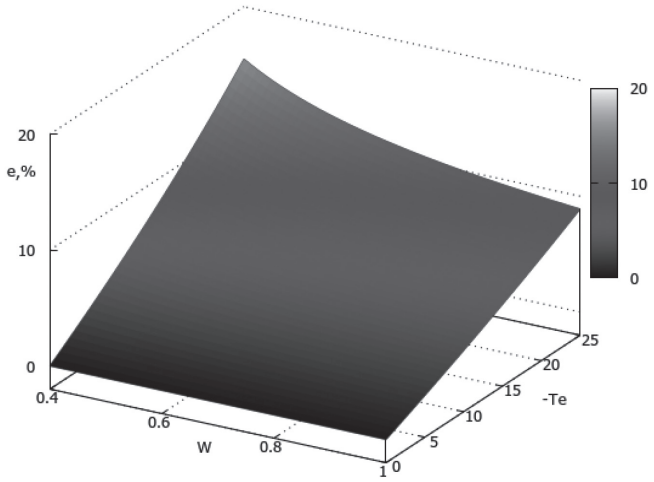

Рис. 2. Изменение относительной ошибки e (%) определения глубины оттаивания льдогрунта в зависимости от льдистости W (доли единиц) начальной температуры T_e (°C)

Fig. 2. Change in the relative error e (%) of determining the depth of thawing of the ice soil depending on the ice content W (fraction of units) of the initial temperature T_e (°C)

оттаивания льдогрунта (*W* > 40%) в зависимости от льдистости и начальной температуры в виде 3D графика.

Как видно из графика, для льдогрунтов относительная ошибка определения глубины оттаивания в большинстве случаев не превосходит допустимых в инженерной практике значений, равных 10%. Для горных пород с льдистостью меньше 20% ошибки, взависимости от значений естественной температуры пород, могут быть больше.

На рис. 3 приведен 3D график изменения относительной ошибки определения глубины оттаивания пород в зависимости от льдистости и начальной температуры в широком диапазоне изменения льдистости пород. Из графика видно, что сущест-

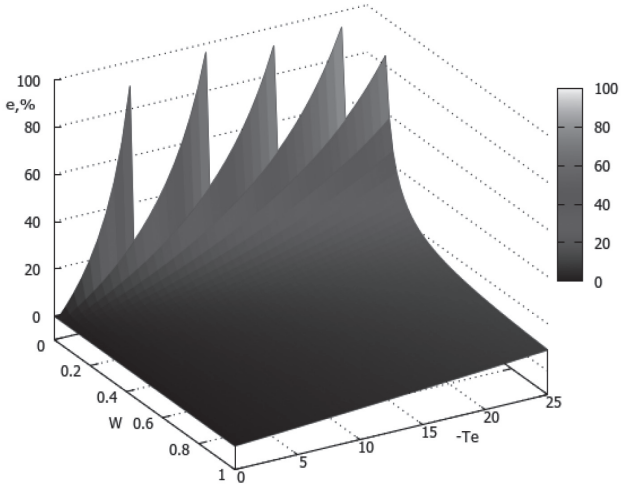

Рис. 3. Изменение относительной ошибки e (%) определения глубины оттаивания пород в зависимости от льдистости W (доли единиц) и начальной температуры T_e (°C)

Fig. 3. Change in the relative error e (%) of determining the depth of thawing of rocks depending on the ice content W (fraction of units) and the initial temperature T_e (°C)

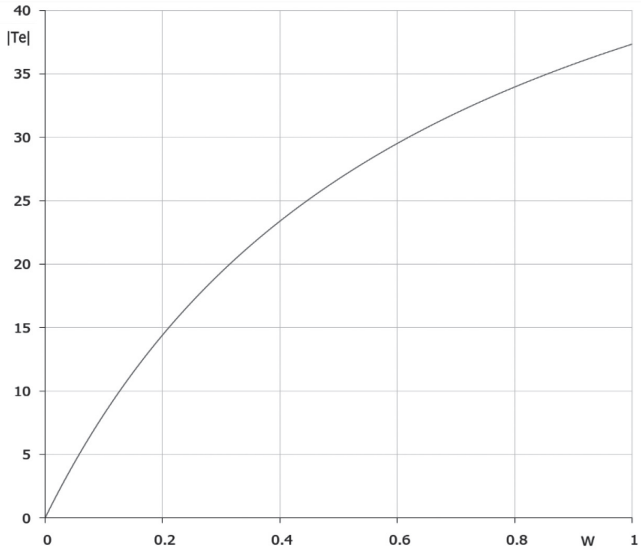

Рис. 4. Соотношение абсолютного значения начальной температуры $|T_e|$ (°С) и льдистости W (доли единиц) породы, при котором относительная ошибка e (%) определения глубины оттаивания не превысит 10%

Fig. 4. The ratio of the absolute value of the initial temperature $|T_e|$ (°C) and ice W (fraction of units) of the rock, at which the relative error e (%) of determining the depth of thawing does not exceed 10%

вуют такие сочетания начальной температуры и льдистости пород, при которых ошибки, вызванные рассматриваемым допущением, будут значительными.

При эксплуатации горных выработок криолитозоны с естественным тепловым режимом, начальная температура оттаивающих пород не превышает, как правило, –10 °С. Поэтому для характерных условий можно считать ошибки, вызванные допущением о равенстве температуры пород температуре плавления льда, незначительными. Важность этот фактор приобретает, когда рассматриваются подземные сооружения специального назначения, которые эксплуатируются в обычных условиях при температурах –18 °С или –25 °С, а в чрезвычайных ситуациях температура в них повышается до +18 °С и выше [29, 30]. В этом случае при проектировании необходимо все расчеты вести по формулам, полученным без рассматриваемого допущения.

Соотношение значений температуры и льдистости горных пород, которое не превысит допустимую в инженерной практике ошибку в определении глубины оттаивания пород, приведены на графике рис. 4. Если начальные значения температуры и льдистости для конкретного расчетного объекта лежат ниже кривой на рисунке, то ошибку можно считать приемлемой. В противном случае необходимо пользоваться более сложными моделями. Например, при льдистости пород 20% предельная температура горных пород, при которой ошибка меньше 10%, равна –14 °С, а при льдистости 80% — минус 34 °С.

Заключение

На основе анализа результатов расчетов можно сделать следующие выводы.

Получены простые инженерные зависимости и разработан простой и понятный алгоритм оценки влияния широко используемого допущения при расчетах глубины оттаивания пород о равенстве температуры горных пород температуре плавления льда.

Показано, что относительная ошибка определения глубины оттаивания, в рассматриваемом случае, зависит только от значения критерия Стефана и не зависит от длительности периода оттаивания, коэффициента теплопроводности оттаивающих пород и температуры воздуха в период оттаивания.

Установлено, что для характерных условий криолитозоны в большинстве случаев ошибка не превышает допустимых в инженерной практике значений и может быть отнесена в расчетный запас. Получена зависимость, которая позволяет оперативно оценить, при каких исходных данных (температуре и льдистости мерзлых пород) возможно использование расчетных формул, полученных из упрощенных расчетных моделей с использование допущения о равенстве температуры горных пород температуре плавления льда.

Возможным направлением дальнейших исследований в данной области является определение влияния естественной температуры горных пород на выбор параметров тепловой защиты 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. *Кузьмин Г.П.* Подземные сооружения в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 2002. — 176 с.

4. *Галкин А.Ф.* Тепловой режим рудников криолитозоны // Записки Горного института. — 2016. — Т. 219. — С. 377—381.

5. *Кисляков В.Е., Никитин А.В.* Систематика способов разупрочнения глинистых песков при разработке россыпных месторождений // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. — 2009. — № 1. — С. 13—16.

6. *Дугарцыренов А.В., Бельченко Е.Л.* О теплоизоляции складов-отвалов при разработке россыпных месторожений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 2. — С. 129—133.

7. *Демидов Ю.В., Аминов В.Н., Енютин А.Н.* Развитие теоретических основ проектирования комплексной открыто-подземной разработки мощных месторождений Севера / Комплексная разработка рудных месторождений мощными глубокими карьерами: сборник научных статей. — Апатиты, 1995. — С. 24—31.

8. *Демидов Ю.В., Енютин А.Н., Аминов В.Н.* Моделирование условий сезонного колебания температурного поля коренных пород борта карьера вблизи дневной поверхности в условиях Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 1999. — № 3. — С. 168—172.

9. *Аминов В.Н.* Термоизоляция подземного пространства при отработке подкарьерных запасов в условиях длительного действия низких отрицательных температур. — Петрозаводск: Verso, 2013. — 51 с.

10. *Каркашадзе Г.Г., Бельченко Е.Л.* Определение глубины сезонного промерзания грунтов при наличии многослойного утепления на поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 1999. — № 1. — С. 23—26.

11. *Дугарцыренов А.В., Бельченко Е.Л.* Параметры теплоизоляции при промерзании грунтов на допустимую глубину // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 5. — С. 44—47.

12. *Комаров И.А.* Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. — М.: Научный мир, 2003. — 608 с.

13. *Сосновский А.В.* Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Криосфера Земли. — 2006. — Т. X. — № 3. — С. 83—88.

14. *Константинов П.Я.* О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // Криосфера Земли. — 2006. — Т. X. — № 3. — С. 15—22.

15. *Нагорнова Т.А.* Математическое моделирование процесса промерзания насыщенного влагой грунта // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 6. — С. 127—129.

16. *Хабибуллин И.Л.*, *Солдаткин М.В.* Динамика промерзания сезонно-талого слоя криолитозоны с учетом наличия снежного покрова // Вестник Башкирского университета. — 2012. Т. 17. — № 2. — С. 843—846.

17. *Хабибуллин И.Л.*, Лобастова С. А., *Бураншина А.Р.*, *Солдаткин М.В.*, *Хусаинова З.Р.* Математическое моделирование термокарстовых процессов на территории месторождений Крайнего Севера // Вестник Башкирского университета. — 2007. — № 1. — С. 21—23.

18. *Song T., Upreti K., Subbarayan G.* A sharp interface isogeometric solution to the Stefan problem // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2015, Vol. 284, pp. 556—582.

19. *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. DOI: 10.1016/j.cam.2014.01.003.

20. *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. DOI: 10.1016/j.finel.2018.05.008.

21. *Mustafa Turkyilmazoglu*. Stefan problems for moving phase change materials and multiple solutions // International Journal of Thermal Sciences, 2018, Vol. 126, pp. 67—73

22. *Бондарев Э.А. Красовицкий Б.А.* Температурный режим нефтяных и газовых скважин. — Новосибирск: Наука, 1974. — 88 с.

23. *Galkin A.F.* Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating // Metallurgical and Mining Industry. 2015, Vol. 7, No 8, pp. 68—73.

24. *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.

25. *Ioan Sarbu, Calin Sebarchievici* Thermal energy storage / Solar heating and cooling systems, 2017, pp. 99—138. DOI: 10.1016/B978-0-12-811662-3.00004-9.

26. *M. Zeeshan Khalid, M. Zubair, Majid Ali* An analytical method for the solution of two phase Stefan problem in cylindrical geometry // Applied Mathematics and Computation. 2019, Vol. 342, pp. 295—308.

27. *Crepeau J., Siahpush A.* Solid-liquid phase change driven by internal heat generation // Comptes Rendus Mécanique. 2012, Vol. 340, no 7, pp. 471—476.

28. *Рекомендации* по проектированию и строительству плотин из грунтовых материалов для производственного и питьевого водоснабжения в условиях Крайнего Севера и вечной мерзлоты. — М.: Стройиздат, 1976. — 112 с.

29. *Галкин А.Ф.* Комплексное использование теплообменных выработок // Записки Горного института. — 2017. — Т. 224. — С. 209—214.

30. *Galkin A.F.* Integrated use of mine openings in cryolithic zone // Metallurgical and Mining Industry. 2015, Vol. 7, No 2, pp. 312—315. ГИАБ

REFERENCES

1. Skuba V.N. *Issledovanie ustoychivosti gornykh vyrabotok v usloviyakh mnogoletney merzloty* [Research on the sustainability of mining in permafrost], Novosibirsk, Nauka, 1974, 118 p.

2. Sherstov V.A. *Povyshenie ustoychivosti vyrabotok rossypnykh shakht Severa* [Increase in sustainability of the mining of the North], Novosibirsk, Nauka, 1980, 56 p.

3. Kuz'min G.P. *Podzemnye sooruzheniya v kriolitozone* [Underground structures in the cryolitozone], Novosibirsk, Nauka, 2002, 176 p.

4. Galkin A.F. Thermal regime of cryolitozone mines. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016. Vol. 219, pp. 377—381. [In Russ].

5. Kislyakov V.E., Nikitin A.V. Systematics of ways of ungetting clay sands in the development of deposits. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2009, no 1, pp. 13—16. [In Russ].

6. Dugartsyrenov A. V., Bel'chenko E. L. On the insulation of warehouses-dumps in the development of bulk-storages. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no 2, pp. 129—133. [In Russ].

7. Demidov Yu. V., Aminov V. N., Enyutin A. N. Development of the theoretical basis of the design of complex open-underground development of powerful deposits of the North. *Kompleksnaya razrabotka rudnykh mestorozhdeniy moshchnymi glubokimi kar'erami*: sbornik nauchnykh statey [Complex development of ore deposits by powerful deep quarries: collection of scientific articles], Apatity, 1995, pp. 24—31.

8. Demidov Yu. V., Enyutin A. N., Aminov V. N. Simulation of the conditions of seasonal fluctuation swaying of the temperature field of indigenous rocks near the day surface in the conditions of the North. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 1999, no 3, pp. 168—172. [In Russ].

9. Aminov V. N. *Termoizolyatsiya podzemnogo prostranstva pri otrabotke podkar'ernykh zapasov v usloviyakh dlitel'nogo deystviya nizkikh otritsatel'nykh temperatur* [Thermal insulation of underground space during the development of sub-career reserves in the conditions of long-term action of low negative temperatures], Petrozavodsk, Verso, 2013, 51 p.

10. Karkashadze G. G., Bel'chenko E. L. Determining the depth of seasonal freezing of soils in the presence of multi-layered ut-eplification on the surface. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 1999, no 1, pp. 23—26. [In Russ].

11. Dugartsyrenov A. V., Bel'chenko E. L. Parameters of insulation when the soils are frozen at an acceptable depth. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no 5, pp. 44—47. [In Russ].

12. Komarov I. A. *Termodinamika i teplomassoobmen v dispersnykh merzlykh porodakh* [Thermodynamics and heat-mass exchange in dispersed frozen rocks], Moscow, Nauchnyy mir, 2003, 608 p.

13. Sosnovskiy A. V. Mathematical modeling of the effect of snow thickness on the degradation of permafrost during climate warming. *Kriosfera Zemli*. 2006. Vol. X, no 3, pp. 83—88. [In Russ].

14. Konstantinov P. Ya. On the connection of the depth of seasonal thawing with the interannual variability of the average annual temperature of the soils. *Kriosfera Zemli*. 2006. Vol. X, no 3, pp. 15—22. [In Russ].

15. Nagornova T. A. Mathematical simulation of the process of freezing of moisture-saturated soil. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2005. Vol. 308, no 6, pp. 127—129. [In Russ].

16. Khabibullin I. L., Soldatkin M. V. The dynamics of freezing of the seasonal-melt layer of cryolitozone with the presence of snow cover. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2012. Vol. 17, no 2, pp. 843—846. [In Russ].

17. Khabibullin I. L., Lobastova S. A., Buranshina A. R., Soldatkin M. V., Khusainova Z. R. Mathematical simulation of thermokarst processes in the fields of the Far North. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2007, no 1, pp. 21 —23. [In Russ].

18. Song T., Upreti K., Subbarayan G. A sharp interface isogeometric solution to the Stefan problem. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015, Vol. 284, pp. 556—582.

19. 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. DOI: 10.1016/j.cam.2014.01.003.

20. 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. DOI: 10.1016/j.finel.2018.05.008.

21. Mustafa Turkyilmazoglu. Stefan problems for moving phase change materials and multiple solutions. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, Vol. 126, pp. 67—73

22. Bondarev E. A. Krasovitskiy B. A. *Temperaturnyy rezhim neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Temperature regime of oil and gas wells], Novosibirsk, Nauka, 1974, 88 p.

23. Galkin A. F. Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, Vol. 7, No 8, pp. 68—73.

24. 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.

25. Ioan Sarbu, Calin Sebarchievici Thermal energy storage. *Solar heating and cooling systems*, 2017, pp. 99—138. DOI: 10.1016/B978-0-12-811662-3.00004-9.

26. M. Zeeshan Khalid, M. Zubair, Majid Ali An analytical method for the solution of two phase Stefan problem in cylindrical geometry. *Applied Mathematics and Computation*. 2019, Vol. 342, pp. 295—308.

27. Crepeau J., Siahpush A. Solid-liquid phase change driven by internal heat generation. *Comptes Rendus Mécanique*. 2012, Vol. 340, no 7, pp. 471—476.

28. *Rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitel'stvu plotin iz gruntovykh materialov dlya proizvodstvennogo i pit'evogo vodosnabzheniya v usloviyakh Kraynego Severa i vechnoy merzloty* [Recommendations for the design and construction of dams from soil materials for industrial and drinking water supply in the Far North and permafrost], Moscow, Stroyizdat, 1976, 112 p.

29. Galkin A. F. Complex use of heat-exchange tunnels. *Zapiski Gornogo instituta*. 2017. Vol. 224, pp. 209—214. [In Russ].

30. Galkin A. F. Integrated use of mine openings in cryolithic zone. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, Vol. 7, No 2, pp. 312—315.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галкин Александр Федорович[1] — д-р техн. наук, профессор, e-mail: afgalkin@mail.ru,
Курта Иван Валентинович[1] — канд. техн. наук, доцент,
проректор по научной работе, e-mail: ivankurta@ya.ru,
[1] Ухтинский государственный технический университет.
Для контактов: Галкин А.Ф., e-mail: afgalkin@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.F. Galkin[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: afgalkin@mail.ru,
I.V. Kurta[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Vice-Rector for Research, e-mail: ivankurta@ya.ru,
[1] Ukhta State Technical University, 169300, Ukhta, Republic of Komi, Russia.
Corresponding author: A.F. Galkin, e-mail: afgalkin@mail.ru.

Получена редакцией 05.09.2019; получена после рецензии 29.10.2019; принята к печати 20.01.2020.
Received by the editors 05.09.2019; received after the review 29.10.2019; accepted for printing 20.01.2020.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО РЕСУРСА СИЛОВЫХ ГИДРОЦИЛИНДРОВ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКОЙ ИХ СОЕДИНЕНИЙ

(2019, № 12, СВ 45, 20 с.)

Набатников Юрий Федорович[1] — д-р техн. наук, профессор,
Нго Ван Туан[1] — аспирант, *Нго Ву Нгуэн*[1] — аспирант,
[1] ГИ НИТУ МИСиС, e-mail: kaftmr@mail.ru.

Предложен метод селективной сборки деталей соединений силовых гидроцилиндров механизированных крепей, позволяющий обеспечить их заданный ресурс работы.

Ключевые слова: детали машин, соединения, точность и износ соединений и их уровень качества, мелкосерийное производство, селективная сборка, межгрупповая взаимозаменяемость.

PROVIDING A GIVEN RESOURCE POWER HYDRAULIC CYLINDERS MECHANIZED SUPPORTS SELECTIVE ASSEMBLY OF THEIR CONNECTIONS

Yu.F. Nabatnikov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Ngo Van Tuan[1], Graduate Student, *Ngo Vu Nguyen*[1], Graduate Student,
[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

The method of selective Assembly of details of connections of power hydraulic cylinders of the mechanized supports allowing to provide their set resource of work is offered.

Key words: machine parts, connections, precision and wear of connections and their quality level, small-scale production, selective Assembly, intergroup interchangeability.