



**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ОРЕОЛА ОТТАИВАНИЯ ВОКРУГ ПРОТЯЖЕННОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ
НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

В. И. Слепцов

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, E-mail: v.i.sleptsov@yandex.ru,
просп. Ленина 43, г. Якутск 677980, Россия*

Представлены результаты математического моделирования процесса деформирования многолетнемерзлого массива вокруг выработки круглого сечения и исследовано влияние оттаивания на напряженное состояние горного массива и устойчивость выработки в условиях гидростатического поля напряжений. Показано, что существует критический размер ореола оттаивания, при превышении которого выработка начинает терять устойчивость.

Напряженное состояние, устойчивость горной выработки, многолетнемерзлые горные породы, теплообмен

**INFLUENCE OF THE SIZE OF THAWING HALO AROUND AN EXTENDED MINE WORKING
ON ITS STABILITY WITH REGARD TO CHANGES IN ELASTIC
AND STRENGTH PROPERTIES OF PERMAFROST ROCKS ON TEMPERATURE**

V. I. Sleptsov

*Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
E-mail: v.i.sleptsov@yandex.ru, pr. Lenin 43, Yakutsk 677980, Russia*

The results of mathematical modeling of permafrost rock mass deformation around a mine working with circular cross-section are presented and the influence of thawing on stress state of the rock mass and mine working stability in conditions of a hydrostatic stress field is studied. It is shown that there is a critical size of the thawing halo, upon exceeding which the working starts losing stability.

Stress state, stability of mine working, permafrost rocks, heat exchange

Специфические климатические условия, распространение многолетнемерзлых горных пород, в том числе со значительной влажностью, создают значительные трудности при освоении природных ресурсов Севера. При использовании многолетнемерзлых горных пород в качестве среды для горных сооружений мы имеем дело с природным материалом, иногда настолько чувствительным к внешним воздействиям, что даже незначительное изменение их величины, характера и времени действия может сказаться на его механических свойствах [1, 2]. Одним из основных факторов, обуславливающих изменчивость механических свойств многолетнемерзлых горных пород, является их температура. Изменение практически всех свойств многолетнемерзлых пород при оттаивании зависит от количества в них влаги (льда) и чем она меньше, тем меньше величина изменения. Таким образом, распределение напряжений вокруг подземных горных выработок и их устойчивость в значительной степени определяется распределением температур во вмещающем выработку многолетнемерзлом горном массиве.

Постановка задачи и методы исследования. Если рассмотреть многолетнемерзлый изотропный горный массив с отрицательной температурой, ослабленный протяженной подземной горной выработкой (случай плоской деформации), то в рамках классической теории упругости

напряжения в породном массиве не зависят от упругих свойств горных пород и следовательно, при полном оттаивании породного массива мы имеем такое же напряженное состояние, что и в полностью мерзлом породном массиве.

Общепринято, что при оттаивании для многолетнемерзлых горных пород характерно снижение модуля упругости [2], а коэффициент Пуассона от температуры зависит незначительно [3]. Из этого следует, что в начальный момент образования ореола оттаивания вокруг выработки напряжения на контуре выработки снижаются вследствие снижения модуля упругости и по мере увеличения размеров ореола оттаивания растут, в пределе стремясь к напряжениям вокруг выработки в массиве с отрицательной температурой пород. С другой стороны, при оттаивании пределы прочности многолетнемерзлых горных пород снижаются [2], что может повлечь потерю устойчивости горной выработки при оттаивании вмещающего породного массива. Рассматривается случай, когда выработка в породном массиве с отрицательной температурой устойчива, а в полностью оттаявшем массиве теряет устойчивость. Так как критерии устойчивости выработки, например Кулона–Мора, зависят от напряжений и пределов прочности горных пород, то при определенных условиях в начальный момент образования ореола оттаивания выработка остается устойчивой ввиду разгрузки напряжений на контуре выработки и, следовательно, существует критический размер ореола оттаивания, при превышении которого выработка теряет устойчивость. Данный размер зависит от величины снижения модуля упругости и величины уменьшения пределов прочности при оттаивании горных пород.

В рамках линейной теории упругости на основе сопряженного решения температурной и механической задач выполнялось математическое моделирование методом конечных элементов процесса деформирования многолетнемерзлого массива вокруг выработки круглого сечения и исследовалось влияние оттаивания (посредством изменения упругих и прочностных свойств) на напряженное состояние горного массива и устойчивость выработки в условиях гидростатического поля напряжений. Сделано допущение, что свойства горных пород как теплофизические, так и механические описываются кусочно-постоянными функциями. В качестве среды выбраны карбонатные породы, так как имеются экспериментальные данные по упругим и прочностным свойствам [4]. Для нетронутого мерзлого массива в расчетах приняты усредненные экспериментальные значения для доломита и известняка (модуль упругости равен 50 000 МПа; коэффициент Пуассона — 0.25, коэффициент хрупкости $\psi = \sigma_t / \sigma_c = 0.05$, где σ_t , σ_c — пределы прочности на одноосное растяжение и сжатие). Коэффициент теплопроводности мерзлого массива принят 2.2 Вт/(м·К), удельная теплоемкость — 830 Дж/(кг·К), для оттаявшего массива — 2.1 Вт/(м·К) и 900 Дж/(кг·К) соответственно. Плотность горных пород принята 2200 кг/м³, естественная температура горных пород –4°C, воздуха в выработке — +4°C, температура оттаивания–замерзания 0°C, коэффициент теплообмена на стенках выработки 10 Вт/(м²·К).

Ввиду симметричности выработки в расчетах рассматривалась четверть выработки. Радиус выработки в расчетах взят $R = 1.0$ м. Такой размер выбран для удобства перерасчета результатов в случае подобных выработок других размеров. Расчетная область представляет собой квадрат 25×25 м (рис. 1). Давление на внешней границе расчетной области для удобства расчетов принято 1.0 МПа, так как для упругой постановки напряжения в расчетной области прямо пропорциональны давлениям на границах. Таким образом, сделан переход к безразмерной постановке задачи в напряжениях, так как полученные в результате расчета напряжения являются $\sigma / \gamma H$, где γ , H — удельный вес горных пород и глубина залегания выработки.

Рассмотрены случаи падения модуля упругости горных пород при оттаивании на 10, 20, 30 %, для пределов прочности горных пород — вариант, когда падение прочности на 5 % меньше, чем падение модуля упругости.

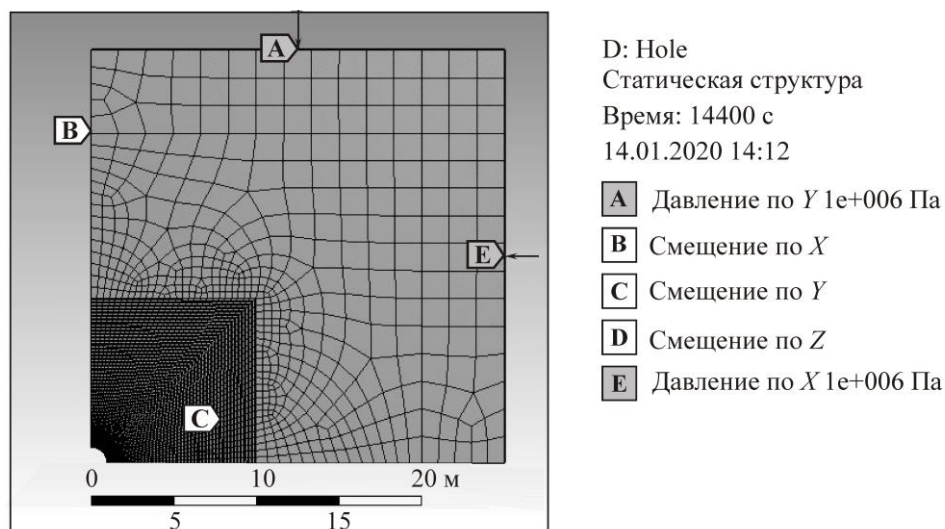


Рис. 1. Расчетная область и разбиение на конечные элементы

Для определения температурного поля вокруг выработки решена нестационарная температурная задача. Глубина оттаивания вокруг выработки в зависимости от времени приведена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Динамика глубины оттаивания вокруг выработки

Время, ч	Глубина оттаивания, м
4	0.05
6	0.125
15	0.35
30	0.55
90	1.02
210	1.63

Распределения температуры в породном массиве в соответствующие моменты времени показаны на рис. 2.



Рис. 2. Изменение температуры в породном массиве вокруг выработки в различные моменты времени

Для каждого момента времени из табл. 1 решена задача механики в упругой постановке для различных вариантов изменения модуля упругости с использованием найденного температурного поля вокруг выработки. Характерное распределение максимального главного напряжения в породном массиве вокруг выработки представлено на рис. 3.



Рис. 3. Изменение максимального главного напряжения в породном массиве для выработки круглого сечения при различных глубинах оттаивания. Падение модуля упругости при оттаивании составляет 30 %

На рис. 4 показаны зависимости коэффициента концентрации напряжений на контуре выработки $K_{кн}$ от относительной глубины оттаивания: $l = L/R$, где L — глубина оттаивания; R — радиус выработки; E_t/E_f — отношение модуля упругости в талой зоне к модулю упругости в мерзлой зоне.

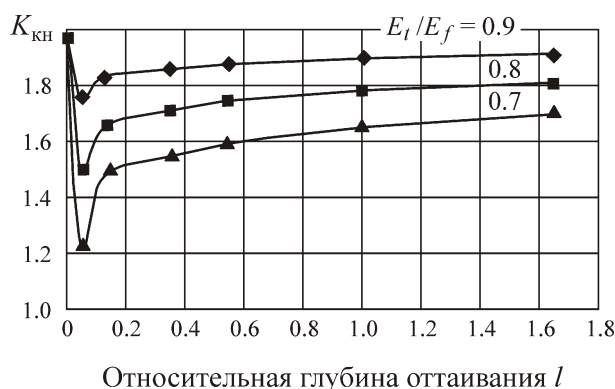


Рис. 4. Зависимость коэффициента концентрации напряжений на контуре выработки круглого сечения от относительной глубины оттаивания

Для оценки устойчивости горной выработки использован критерии прочности Кулона–Мора, предел прочности на сжатие σ_c мерзлых горных пород выбирался таким, чтобы выработка в мерзлом породном массиве находилась в предельном состоянии. Таким образом, предел прочности на сжатие σ_c мерзлых горных пород для выработки круглого сечения равен 2.0 МПа. Предел прочности на растяжение получаем из коэффициента хрупкости горных пород.

По результатам расчетов определен критический размер ореола оттаивания, представленный в табл. 2, при превышении которого выработка начинает терять устойчивость по критерию Кулона–Мора (S_t/S_f — отношение предела прочности в талой зоне к пределу прочности в мерзлой зоне).

ТАБЛИЦА 2. Критический размер глубины оттаивания

E_t/E_f	S_t/S_f	L/R
0.9	0.95	1.03
0.8	0.85	0.33
0.7	0.75	0.17

ВЫВОДЫ

Появление оттаявшей зоны способствует падению коэффициента концентрации напряжений на контуре выработки, которое зависит от величины уменьшения модуля упругости в этой зоне. По мере увеличения ее размера коэффициент концентрации напряжений на контуре выработки постепенно возрастает. При условии, что отношение предела прочности в талой зоне к пределу прочности в мерзлой зоне не больше, чем отношение модуля упругости в талой зоне к модулю упругости в мерзлой зоне, существует критический размер ореола оттаивания, при превышении которого выработка начинает терять устойчивость по критерию Кулона–Мора. Для случая, когда падение прочности горных пород при оттаивании на 5 % меньше, чем падение модуля упругости, определены критические размеры ореола оттаивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Tsytoovich N. A.** Mechanics of frozen soils, Moscow, Vyschaya Shkola Publ., 1973, 448 pp. [**Цытович Н. А.** Механика мерзлых грунтов. — М.: Высш. шк., 1973. — 448 с.]
2. **Votyakov I. N.** Physical and mechanical properties of frozen and thawing soils of Yakutia, Novosibirsk, Nauka Publ., 1975, 176 pp. [**Вотяков И. Н.** Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. — Новосибирск: Наука, 1975. — 176 с.]
3. **Spivak A. I. and Popov A. N.** Destruction of rocks while drilling wells, Moscow, Nedra Publ., 1994, 272 pp. [**Спивак А. И., Попов А. Н.** Разрушение горных пород при бурении скважин. — М.: Недра, 1994. — 272 с.]
4. **Suknev S. V.** Determination of static elastic properties of rocks with temperature changes, Journal of Mining Science, 2016, no. 2, pp. 161–171 [**Сукнев С. В.** Определение статических упругих свойств горных пород при изменении температуры //ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С.161–171.]