Концепция рекультивации направлена на эффективное использование земель, на которых расположены отвалы, вторичное использование отходов действующих производств.

1. Мищенко О.В., Филимонов В.И. Разработка песчаных карьеров. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 234 с.
2. Кезин В.Г., Богданов С.В. Проблемы экологии и экологического образования в городе Лысьва // Наукоедение. – 2015. – Т.7, №5. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/183PVN515.pdf>.
3. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов: учебник в 3 т. – М.: Металлургия, 1981. – 576 с.

Хохолов Ю.А., Киселев В.В.

Оценка влияния водной среды на формирование температурного режима барьерных целиков россыпных шахт криолитозоны

*Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН
(Россия, Якутск)*

doi: 10.18411/lj-10-2018-202

idsp: 000001:lj-10-2018-202

Аннотация

Для выявления особенностей формирования температурного поля в мерзлом массиве дисперсных пород отработанной россыпной шахты, барьерном целике и толще воды разработана двухмерная математическая модель процессов теплообмена. Модель позволяет определить основные исходные данные необходимые для расчета нагрузок на породный барьерный целик с учетом протаивания и одновременно оценить время замерзания воды в затопленной выработке.

Ключевые слова: Россыпная шахта, барьерный целик, горные породы, температура, криолитозона

В практике подземной разработки мёрзлых россыпных месторождений криолитозоны были нередкими случаи прорыва воды в действующие шахты из отработанных и затопленных смежных шахт в результате протаивания и тем самым снижения несущей способности междушахтных (барьерных) целиков. В связи с этим, оценка растепляющего влияния водной среды на формирование температурного режима барьерных целиков имеет важное значение в определении их несущей способности и оптимальных параметров, которые во многом определяют безопасность ведения горных работ.

Необходимо отметить, что при подземной отработке россыпей арктических регионов камерно-лавными системами, при которых в условиях хронического дефицита крепежного леса, для поддержания выработанного пространства оставляются междуканальные целики значительных размеров, отработанные шахты затапливались специально в период паводков в надежде на быстрое замерзание воды и образования, таким образом, искусственных ледяных целиков, равных по размерам отработанным очистным камерам. В этом случае представлялась возможной и безопасной повторная отработка ранее оставленных породных целиков отработанной россыпной шахте (РШ), восполнив тем самым существенные (до 15%) потери полезного ископаемого. Однако на практике оказалось, что, несмотря на низкую температуру заливаемой воды (3-5°C), наличия сплошной мерзлоты и крайнюю суровость климата, замораживание залитой отработанной РШ естественным путем длилось годами, что не давало возможности использования существующих вскрывающих выработок, т.к. они изначально не были рассчитаны на длительный срок эксплуатации.

Проведенными ВНИИ-1 исследованиями были установлены причины низкой скорости льдообразования в затопленных РШ и механизм замораживания залитой в весеннее время воды [1]. Как оказалось, основными из них является высокая теплоемкость громадного объема воды, находящейся в затопленной РШ, которая обеспечивает быструю оттайку контактного слоя пород, обладающего высоким термическим сопротивлением и как следствие этого, препятствующем притоку холода из мерзлого горного массива. Кроме этого, как известно, при замерзании воды выделяется большое количество тепла, что также способствует оттайке. В результате этого снижение температуры воды до нулевого значения и образование первичного ледяного слоя на поверхности затопленных горных выработок идет в крайне замедленном темпе.

Для выявления особенностей процессов формирования температурного поля в массиве пород РШ, барьерном целике и толще воды разработана двухмерная математическая модель. Принято допущение, что горные породы, мерзлый породный целик и вода имеют разные начальные температуры. Расчетная схема приведена на рис. 1. Уравнение теплопроводности с учетом фазовых переходов влаги в массиве горных пород имеет вид [2,3,4]:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (1)$$

где T — температура горных пород, °С; x, y — координаты, м;

$$C(T) = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T \leq T_1 - \Delta T; \\ \frac{c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2}{2} + \frac{c_1 \rho_1 - c_2 \rho_2}{2 \Delta T} (T - T_1) + \frac{L W \rho_1}{\Delta T} \left(1 - \frac{|T - T_1|}{\Delta T} \right), & |T - T_1| < \Delta T; \\ c_2 \rho_2, & T \geq T_1 + \Delta T; \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T \leq T_1 - \Delta T; \\ \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2 \Delta T} (T - T_1), & |T - T_1| < \Delta T; \\ \lambda_2, & T \geq T_1 + \Delta T. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь c_1, ρ_1, λ_1 (c_2, ρ_2, λ_2) — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); плотность, кг/м³ и коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) для мерзлых (талых) пород; L — скрытая теплота плавления льда, Дж/кг; W — весовая влажность пород, доли ед.; T_1 — температура фазовых переходов влаги, °С; ΔT — параметр сглаживания, °С.

Рис. 1 – Расчетная область

Процесс распространения тепла в породном целике представляется следующим уравнением теплопроводности:

$$C_3(T) \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3(T) \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \lambda_3(T) \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2}, \quad (4)$$

где T_3 — температура целика, °C; C_3 , λ_3 — объемная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности пород целика.

Аналогичный вид имеет уравнение теплопроводности для воды:

$$C_4(T) \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4(T) \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \lambda_4(T) \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2}, \quad (5)$$

где T_4 — температура воды, °C; C_4 , λ_4 — объемная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности воды (льда). В обоих уравнениях теплопроводности учитываются фазовые переходы, причем для пород целика значение влажности задается, а для воды она равна 1.

На контактах целик–горные породы, вода – горные породы и целик - вода задаются граничные условия IV рода:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \quad T_3 = T \quad x, y \in G_7; \quad (6)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \quad T_3 = T \quad x, y \in G_8; \quad (7)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \lambda \frac{\partial T_4}{\partial x}, \quad T_3 = T_4, \quad x, y \in G_6; \quad (8)$$

на нижней границе области G_I — условие I рода:

$$T = T_5, \quad x, y \in G_1, \quad (9)$$

где T_5 — естественная температура горных пород, °C.

На границах G_2 , G_5 , G_9 , G_{10} , G_{11} в силу симметричности условия II рода имеют вид:

$$\frac{\partial T_3}{\partial y} = 0, \quad x, y \in G_5, \quad \frac{\partial T_4}{\partial y} = 0, \quad x, y \in G_9; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x, y \in G_2, G_{11}, \quad \frac{\partial T_4}{\partial x} = 0, \quad x, y \in G_{11}. \quad (11)$$

На границах G_3 , G_4 (горные породы-шахтный воздух и целик-шахтный воздух) теплообмен происходит путем свободной конвекции.

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \cdot (T_3 - T_6), \quad x, y \in G_4, \quad (12)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \cdot (T - T_6), \quad x, y \in G_3, \quad (13)$$

где T_6 - температура воздуха в выработке, °C; α - коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплообмена зависит от температуры воздуха и температуры стенки выработки:

$$\alpha = 1,66 \cdot \sqrt[3]{|T_6 - T_7|}, \quad (14)$$

где T_7 - температура стенки выработки или целика, °C.

В начальный момент времени температура горных пород равна естественной:

$$T = T_5, \quad t = 0, \quad (15)$$

а температура целика и воды — заданной:

$$T_3 = T_6, \quad t = 0, \quad (16)$$

где T_3 — начальная температура целика, °C,

$$T_4 = T_7, \quad t = 0, \quad (17)$$

где T_7 — начальная температура воды, °C.

Система уравнений (1)–(17) решается численными методами конечных разностей.

Для оценки теплового влияния выработки, заполненной водой, на окружающие её мерзлые горные породы проведены расчеты при следующих исходных данных: высота выработки (отработанного шахтного поля) 2 м, удельная теплоемкость мерзлых пород 1210 Дж/(кг·K), талых — 1660 Дж/(кг·K), плотность их скелета 2500 кг/м³, коэффициент теплопроводности мерзлых пород 2 Вт/(м·K); талых — 1,6 Вт/(м·K); влажность 30 %, естественная температура пород -5°C, начальная температура пород целика -3°C, начальная температура воды +5°C, ширина целика 5 м.

На рис. 2 приведены температурные изолинии при ширине целика 5 м через промежутки времени в 1 год и 12 лет соответственно. Как видно из графиков, замерзание воды происходит в очень медленном темпе и весь ее объем в затопленной выработке замерзает только через 12 лет. При заполнении выработки водой сначала происходит протаивание контактного слоя мерзлых горных пород вокруг неё и барьерного целика. Из графика (рис.3) видно, что максимального значения глубина протаивания достигает через 1,5 месяца после заполнения водой и составляет примерно 0,31 м. В дальнейшем за счет преобладающего притока холода из горного массива происходит постепенное охлаждение воды и замерзание сначала талого слоя, а затем и всего объема воды начиная от границ к центру, причем при ширине породного целика 5 м этот период составляет 7 месяцев.

Рис. 2. Температурные изолинии в породном массиве, барьерном целике и водном объеме затопленной выработки

Рис. 3. Динамика глубины протаивания барьерного целика при ширине 5 м

Таким образом, по разработанной программе можно определить основные исходные данные необходимые для расчета нагрузок на барьерный целик за счет протаивания горных пород и одновременно оценить продолжительность замерзания воды в выработке.

Расчеты показывают, что при сроке эксплуатации РШ два-три года в барьерных породных целиках образуется ослабленная область мощностью 2-3 м, представленная вялой мерзлотой, в связи с чем теряется его несущая способность и поэтому в этих случаях ширину межшахтных (барьерных) целиков следует увеличивать в зависимости от объема находящейся воды и естественной температуры горных пород.

Кроме этого, математическая модель позволяет определить размеры ореолов протаивания вокруг затопленных выработок и рассчитать температурное поле окружающих горных пород, барьерного целика и толщи воды в динамике с учетом разницы начальных температур горных пород, целика и воды. Полученные данные должны учитываться при разработке превентивных мероприятий по предотвращению внезапного обрушения растепленного барьерного целика и, как следствие этого затопления действующей РШ криолитозоны.

1. Катвицкий В.В., Сытник Ю.Н., Возмитель Ю.А., Тарасов С. И., Шерстов В.А., Чугунов Ю.Д. Подземная повторная отработка самоходными машинами мерзлых техногенных россыпей // Колыма. – 1987. – №7. – С. 10 -13.
2. Каймонов М.В., Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Необутов Г.П. Методика расчета послонного намораживания пород при формировании льдопородного массива в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. - № 9 – С. 47-49.
3. Хохолов Ю.А. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках криолитозоны // Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны: Труды Межд. научн.-практ. конф.. – Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2005. – Т. 2. – С. 76-82.
4. Васильев П.Н., Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Шерстов В.А. Тепло-вой режим угольных шахт Якутии и способы его регулирования. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. – 240 с.

Шихов А.И., Дунаева Е.Н.

Методы и приборы неразрушающего контроля

*Санкт-Петербургский Горный университет
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi: 10.18411/lj-10-2018-203

idsp: 000001:lj-10-2018-203

Аннотация

В данной статье рассматриваются акустические, визуально-оптические и магнитные методы неразрушающего контроля, а также средства, применяемые для их