

УДК 622.45:536.244

Ю.А. Хохолов, Д.Е. Соловьев

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛОГО
ГОРНОГО МАССИВА ПРИ ВЕДЕНИИ ПРОХОДЧЕСКИХ
РАБОТ**

Семинар № 16

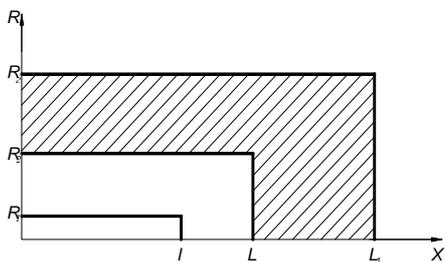
Добыча полезного ископаемого в районах крайнего Севера имеет свои характерные особенности. Главными из которых являются наличие многолетней мерзлоты и крайне жесткие климатические условия (в зимний период температура воздуха опускается до -50°C , а в летний доходит до $+35^{\circ}\text{C}$), и как следствие зависимость всех процессов горного производства от температурного фактора. В условиях криолитозоны тепловой режим шахт и рудников напрямую влияет на безопасность и эффективность горных работ. Для обеспечения безопасности и эффективности горных работ при строительстве и эксплуатации шахт и рудников необходима разработка соответствующих методик, позволяющих прогнозировать тепловые процессы, происходящие в выработке и окружающих ее горных породах. Одной из основных задач горной теплофизики является обеспечение устойчивости подготовительных выработок шахт и рудников при их проходке в летний период эксплуатации, когда в забой для проветривания выработки с поверхности подается теплый атмосферный воздух.

Вопросам прогнозирования теплового режима в подготовительных выработках с тупиковым забоем, проветриваемых с помощью трубопроводов посвящены работы А.Н. Ягельского [1], А.Ф. Воропаева [2], А.Е.

Величко [3], А.Н. Шербаня, В.П. Черняка, Н.А. Брайчевой [4, 5], Э.Н. Малашенко, Л.Б. Зимина [6], А.Ф. Галкина [7, 8] и др. В основном при расчетах выработка рассматривалась с не изменяющимся во времени контуром, не учитывалось влияние скорости проходки на формируемый тепловой режим, а именно постоянное смещение груди забоя после каждого проходческого цикла и, соответственно, ежесуточное обнажение массива горных пород с естественной температурой, а так же регулярное наращивание вентиляционного трубопровода по мере продвижения забоя.

В работе [9] была рассмотрена задача по определению параметров температурного поля вокруг очистной выработки при камерно лавной системе разработки с учетом движения забоя и фазовых переходов влаги в массиве многолетнемерзлых горных пород, однако при этом не уточняются параметры воздушной струи поступающей в забой для проветривания выработки. Результаты расчетов показали, что продвижение забоя порождает асимметрию температурного поля вокруг выработки, а также отмечается, что чем сильнее отличаются параметры теплового режима при нарезных и очистных работах, тем асимметрия сильнее.

Поскольку в летний период эксплуатации в выработку для ее про-



ветривания поступает теплый воздух, то это негативно сказывается на устойчивости окружающих её мерзлых горных пород и тем самым возникает необходимость в определении безопасных параметров вентиляционного режима, при которых бы обеспечивалась устойчивость горных выработок и соответственно безопасность ведения горных работ.

В этих целях была разработана математическая модель теплового режима многолетнемерзлого горного массива при ведении проходческих работ. При расчетах за основу взята модель, описанная в работе [10]. В отличие от данной модели при моделировании тепловых процессов учитывается теплообмен воздуха с поверхностью забоя, а также утечки через вентиляционную трубу. Разработанная модель позволяет рассчитать температурный режим вскрывающей тупиковой выработки при нагнетательном режиме проветривания с учетом скорости проходки выработки, а также теплообмена воздуха с забоем.

На рис. 1 приведена расчетная схема исследуемой области. Поперечное сечение выработки имеет форму окружности. Таким образом, горная выработка представляет собой область в виде полого цилиндра. Внутренний радиус соответствует радиусу выработки R_2 , а внешний – радиусу теплового влияния R_r . Проветривание выработки осуществляется нагнетательным способом с подачей

Рис. 1. Расчетная область

воздуха по вентиляционному трубопроводу радиуса R_1 . Поскольку задача является осесимметричной, рассматривается двумерная область в цилиндрических координатах.

Уравнения сохранения энергии в трубопроводе и в выработке соответственно имеют следующий вид:

$$c_e \rho_e \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = \frac{2\alpha_1}{R_1} (T_2 - T_1), \quad (1)$$

$$0 < x \leq L,$$

$$c_e \rho_e \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} - v_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \frac{2R_1\alpha_1}{S_e} (T_2 - T_1) + \frac{2R_2\alpha_2}{S_e} (T_2 - T_{cm}), \quad 0 \leq x < L, \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – соответственно температура воздуха в трубопроводе и выработке, °С; α_1 – коэффициент теплопередачи от воздуха внутри трубопровода к рудничному воздуху через стенку трубопровода, Вт/(м²·К); S_e – площадь выработки; v_1 и v_2 – соответственно скорость воздуха в трубопроводе и выработке, м/с; c_e – удельная теплоемкость воздуха (Дж/(кг·К)), ρ_e – плотность воздуха (кг/м³), T_{cm} – температура стенки выработки, °С.

Граничные условия для уравнений сохранений энергии имеют вид:

$$T_1 = T_e, \quad x = 0. \quad (3)$$

$$T_2 = T_1, \quad x = L. \quad (4)$$

На границе выработки задается граничное условие III рода:

$$\alpha(T_{cm} - T_e) = \lambda \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_2}, \quad (5)$$

T – температура горных пород, °С; λ – коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/(м·К); R – радиальная координата, м.

Процесс распространения тепла в массиве горных пород с учетом фазовых переходов влаги описывается уравнением:

$$\left[C(T) + L_{\phi} \cdot \omega \cdot \rho \cdot \delta(T - T^*) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left[\lambda(T) \cdot R \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right],$$

$$0 \leq x \leq L, R_2 < R < R_r, \quad (6)$$

$$L < x \leq L_1, 0 \leq R \leq R_r$$

$$C = \begin{cases} c_1 \rho_1; & T < T^*; \\ c_2 \rho_2; & T > T^*. \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_1; & T < T^*; \\ \lambda_2; & T > T^*, \end{cases} \quad (8)$$

где c_1, c_2 - удельные теплоемкости мерзлых и талых пород, Дж/(кг·К); λ_1, λ_2 - коэффициенты теплопроводности мерзлых и талых пород, Вт/(м·К); L_{ϕ} - скрытая теплота фазовых переходов, Дж/кг; ω - весовая влажность пород (в долях единицы); T^* - температура фазовых переходов, °С; $\delta(T - T^*)$ - дельта-функция Дирака,

В начальный момент времени задается распределение температур:

$$T_1 = \tilde{\varphi}_1(x), T_2 = \tilde{\varphi}_2(x), 0 \leq x \leq L, \quad (9)$$

$$T = \tilde{\psi}(x, R), 0 \leq x \leq L, R_2 \leq R \leq R_r, \quad (10)$$

На внешней границе области температура принимается равной естественной температуре пород:

$$T|_{R=R_r} = T_e. \quad (11)$$

На боковых границах при $x=0$ и $x=L$ принимается, что потоки тепла отсутствуют, т.е. получаем граничные условия II рода:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, x=0, R_B \leq R \leq R_r, \quad (12)$$

$$x=L, R_B \leq R \leq R_r.$$

Коэффициент теплопередачи α_1 рассчитаем с учетом толщины и свойств материала трубы:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\frac{2R_1}{0,02\lambda_e Re_1^{0,8}} + \frac{\delta_{mp}}{\lambda_{mp}} + \frac{2R_2}{0,02\lambda_e Re_2^{0,8}}}, \quad (13)$$

где λ_e - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К), Re_1 - критерий Рейнольдса для воздуха в трубе, δ_{tr} - толщина трубы, м; λ_{tr} - коэффи-

циент теплопроводности материала трубы, Вт/(м·К), Re_2 - критерий Рейнольдса для воздуха в выработке.

Формула для расчета коэффициента теплообмена в выработке α_2 с учетом шероховатости поверхности выработки имеет вид [11]:

$$\alpha_2 = \frac{0,02 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_e \cdot Re_2^{0,8}}{2 \cdot R_2}, \quad (14)$$

где ε - коэффициент шероховатости.

Температура воздуха в выработке при $x=L$ рассчитывается по следующей формуле с учетом теплообмена с забоем выработки:

$$T_2 = \frac{c_e \rho_e G T_1 + \alpha_3 (\pi R_2^2 + 2\pi R_2 l_1) \cdot \bar{T}_{заб}}{c_e \rho_e G + \alpha_3 (\pi R_2^2 + 2\pi R_2 l_1)}, x=L. \quad (15)$$

где α_3 - коэффициент теплообмена со стенкой забоя, Вт/(м²·К); G - расход воздуха, м³/с; l_1 - расстояние между концом трубы и забоем; $\bar{T}_{заб}$ - средняя температура стенки забоя, °С.

Коэффициент теплопередачи α_3 в забое определяется по формуле [12]:

$$\alpha_3 = 3,06 \frac{\lambda_e \cdot Re_2^{0,5}}{h^{0,77} \cdot 2 \cdot R_2} Pr^{0,4}, \quad (16)$$

где Pr - критерий Прандтля, $\bar{h} = l_1 / 2R_2$.

Утечки через вентиляционную трубу могут быть оценены коэффициентом доставки η , который равен отношению $\eta = G_k / G_n$ (где G_k - количество воздуха в конце трубопровода (у забоя), G_n - количество воздуха в начале трубопровода). Коэффициент доставки η зависит от диаметра, длины и материала трубы, и определяется по таблице из работы [13].

Для разработанной модели были проведены численные эксперименты по расчету теплового режима тупиковой выработки в период проходки. Расчеты проводились при следующих исходных параметрах: забой за 1 смену (6 часов) продвигается на 1,5 м, при

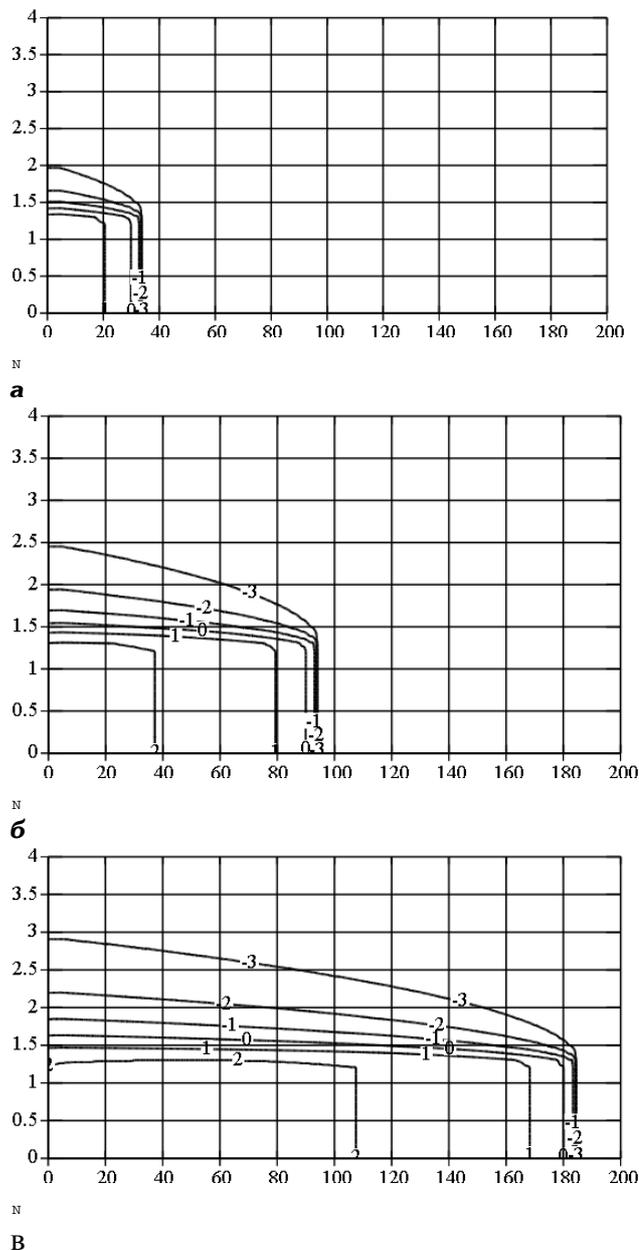


Рис. 2. Температурные изолинии на момент времени: а - 120 часов; б - 360 часов; в - 720 часов

вентилятора местного проветривания (τ_1 , час); 2) вентиляция осуществляется за счет диффузии воздуха (τ_2 , час). В качестве температур поступающего воздуха выбраны следующие значения $+5\text{ }^\circ\text{C}$ и $+10\text{ }^\circ\text{C}$. Расходы воздуха равны 5 и 10 $\text{м}^3/\text{с}$, $\omega = 0,2$, $\rho = 1800\text{ кг}/\text{м}^3$, $\lambda_1 = 2,0\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_2 = 1,6\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, удельная теплоемкость сухой породы $C_p=900, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, естественная температура пород $T_e = -4\text{ }^\circ\text{C}$. Площадь сечения выработки $S_B = 6\text{ м}^2$, начальная длина выработки $L=5\text{ м}$. Параметры трубопровода: $R_{тр}=0,3\text{ м}$, $\delta_{тр}=0,003\text{ м}$ и $\lambda_{тр}=0,14, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Рассмотрены три режима проветривания выработки: I) вентилятор работает 1,5 часа и 1,5 часа не работает; II) вентилятор работает 2 часа и 4 часа не работает; III) вентилятор работает 3 часа и 3 часа не работает.

Для наглядности на рис.2 - 4 представлены результаты расчетов (в виде изолиний) по одному из вариантов температурного режима породного массива

этом температурное поле, полученное для каждого шага выемки становится начальным распределением температуры для последующего шага.

Режим проветривания разбивается на два этапа: 1) осуществляется деятельная вентиляция с использованием

в период проходки тупиковой выработки с учетом движения забоя при расходе воздуха $10\text{ м}^3/\text{с}$, температуре поступающего воздуха $+10\text{ }^\circ\text{C}$ и III режиме проветривания в разные моменты времени: через 120, 360 и 720

Результаты расчетов максимальной глубины протаивания

T _в , °C	Режим проветривания		Q, м ³ /с	Максимальная глубина протаивания, м		
	τ ₁ , час	τ ₂ , час		Через промежуток времени, час		
				120	360	720
+5	1,5	1,5	5	-	-	-
	2	4		-	-	-
	3	3		-	-	-
	1,5	1,5	10	0,03	0,09	0,09
	2	4		-	-	-
	3	3		0,01	0,08	0,09
+10	1,5	1,5	5	0,06	0,14	0,15
	2	4		-	0,02	-
	3	3		0,05	0,13	0,15
	1,5	1,5	10	0,14	0,28	0,38
	2	4		0,08	0,19	0,24
	3	3		0,14	0,27	0,37

часов соответственно. На оси абсцисс лежит координата длины (в метрах), на оси ординат – радиальная координата (в метрах). Радиус выработки R₂ = 1,38 м. Как видно из рисунков заданные параметры вентиляционной струи и режим проветривания приводят к интенсивному протаиванию окружающих выработку горных пород.

Результаты расчетов в виде максимальных глубин протаивания пород вокруг выработки через заданные интервалы времени приведены в таблице. Результаты расчетов выявили количественные показатели изменения температурного режима окружающих пород и ореолов протаивания вокруг выработки. Как видно из таблицы при температуре +5 °C и расходе воздуха 5 м³/с при всех трех режимах проветривания протаивание окружающего породного массива не происходит. При увеличении расхода воздуха до 10 м³/с происходит незначительное протаивание горных пород при I и III режимах проветривания, в то время как при II режиме массив остается в мерзлом состоянии, что связано с относительно большим временем простоя вентилятора по сравнению с двумя другими режимами проветривания.

Изменение температуры воздуха с +5 °C до +10 °C при расходе воздуха 5 м³/с вызывает протаивание пород

ного массива для I и III режимов проветривания. При II режиме горные породы приустьевой части, через определенный промежуток времени, начинают протаивать, затем по мере продвижения забоя скорость протаивания замедляется и растепление выработки прекращается, а в дальнейшем наблюдаем эффект «схлопывания» мерзлой зоны. Причиной этого в данном случае является тот факт, что при увеличении длины проходимой выработки обнажаются все больше поверхностей выработки с естественной температурой пород, что приводит к постепенному поглощению тепла, вносимого вентиляционным потоком, всей площадью поверхности выработки и охлаждению исходящей вентиляционной струи. При варианте расчета с температурой воздуха +10 °C и расходе 10 м³/с наблюдается наиболее интенсивное протаивание мерзлых пород при всех трех режимах проветривания выработки.

По результатам расчетов можно сделать вывод о том, что для заданной скорости движения забоя и температуры воздуха поступающего в вентиляционный трубопровод в пределах +5 °C все три рассмотренных режима проветривания выработки позволяют обеспечить мерзлое состояние вмещающего

шающих горных пород, либо их протаивание на незначительную глубину. При увеличении температуры воздуха до +10 °С только один из вариантов проветривания (вентилятор работает 2 часа и 4 часа не работает) не приводит к протаиванию горных пород. Увеличение расхода воздуха на вентиляцию до 10 м³/с приводит к значительному увеличению глубины про-

таивания и соответственно снижению устойчивости окружающих выработку горных пород. Поэтому наиболее эффективным способом предотвращения растепления пород является регулирование температуры подаваемого в выработку воздуха, в частности, предварительное охлаждение вентиляционного потока в ледяных или грунтовых охладителях [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягельский А.Н. Тепловые расчеты вентиляционного воздуха выработок с туликовым забоем в глубоких угольных шахтах [Текст] / А.Н. Ягельский. - М.: Недра, 1960. - 143 с.
2. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах [Текст] / А.Ф. Воропаев. - М.: Недра, 1977. - 359 с.
3. Величко А.Е. Тепловой расчет туликовых выработок [Текст] / А.Е. Величко // Разработка месторождений полезных ископаемых. - Киев: Техника, 1978. - Вып. 49. - С. 40 - 44.
4. Шербань А.Н., Черняк В.П., Брайчева Н.А. Методы расчета температуры воздуха в строящихся горных выработках и воздухопроводах для их проветривания [Текст] / А.Н. Шербань, В.П. Черняк, Н.А. Брайчева // ФТПРПИ. - 1977. - №5. - С. 69 - 76.
5. Брайчева Н.А. Методы расчета температуры вентиляционного воздуха подземных сооружений [Текст] / Н.А. Брайчева, В.П. Черняк, А.Н. Шербань. - Киев: Наукова думка, 1981. - 183 с.
6. Малашенко Э.Н. Методы тепловых расчетов туликовых горных выработок [Текст] / Э.Н. Малашенко, Л.Б. Зимин // Тепловой режим глубоких угольных шахт и металлургически рудников. - Киев: Наук. Думка, 1977. - С. 101-116.
7. Галкин А.Ф. Тепловой режим подземных сооружений Севера [Текст] / А.Ф. Галкин,
8. Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Ин-т горного дела Севера. - Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. - 304 с.
9. Галкин А.Ф. Регулирование теплового режима при проходке выработок в мерзлых породах [Текст] / А.Ф. Галкин // Безопасность труда в промышленности. - 2008. - №7. - С. 28-31.
10. Изаксон В.Ю. Прогноз термомеханического состояния многолетнемерзлого массива [Текст] / В.Ю. Изаксон, Е.Е. Петров, И.И. Ковлеков. - Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1989. - 108 с.
11. Шерстов В.А. Тепловой режим россыпных шахт криолитозоны [Текст] / В.А. Шерстов, В.В. Киселев, Ю.А. Хохолов. - Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2007. - 316 с.
12. Шербань А.Н. Руководство по регулированию теплового режима шахт [Текст] / А.Н. Шербань, О.А. Кремнев, В.Я. Журавленко. - М.: Недра, 1977. - 359 с.
13. Юдаев Б.Н. Теплопередача [Текст] / Б.Н. Юдаев. - М., «Высш. Школа», 1973. - 360 с.
14. Мустель П.И. Рудничная аэрология [Текст] / П.И. Мустель. - М.: Недра, 1970. - 216 с.
15. Чабан П.Д. Расчет охлаждения рудничного воздуха в необсаженных ледяных каналах [Текст] / П.Д. Чабан, В.П. Афанасьев, В.В. Журкович // Колыма. - 1976. - №12. - С. 39-42. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Хохолов Ю.А. - доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,

Соловьев Д.Е. - инженер,

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН,

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 16 симпозиума «Неделя горняка-2009».

Рецензент д-р техн. наук, проф. В.В. Мельник.