

УДК 622.831

П.Н. Васильев, Ю.А. Хохолов, В.А. Шерстов

**ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРВИЧНОЙ ПОСАДКИ КРОВЛИ
ПУТЕМ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА МЕРЗЛЫЙ МАССИВ**

Семинар № 19

Одним из важных вопросов, определяющих безопасность и эффективность очистной добычи угля на шахтах Севера, является выбор рациональных способов управления горным давлением. Породы кровли угольных месторождений области многолетней мерзлоты представлены в основном песчаниками и относятся к труднообрушаемым, допускают большие обнажения в очистных выработках, в связи с чем первичное обрушение пород кровли нередко происходит внезапно, без предупредительных признаков и сопровождается в отдельных случаях воздушными ударами, что может привести к завалу лав с аварией механизированного комплекса. Поэтому при разработке угольных пластов с труднообрушаемыми кровлями необходимо применение дополнительных мероприятий и различных технологий, исключающих проявления внезапных посадок пород кровли.

Попытки управлять процессом обрушения кровли в условиях многолетней мерзлоты известными способами без учета специфики толщи мерзлого массива не всегда приводят к желаемому результату [1]. Так, разупрочнение мерзлых пород гидрообработкой приводит лишь к тому, что происходит локальный гидроразрыв устьевой части скважины. Причиной этого можно считать отсутствие фильтрационной поверхности, отсутствие открытых трещин (все поры и трещины заполнены льдом), по которым происходит увлажнение. Следовательно, поиск эффективных способов разупрочне-

ния мерзлого массива следует производить с учетом специфических особенностей мерзлых горных пород, таких как:

- склонность мерзлых пород к хрупкому разрушению при динамических нагрузках (при низких температурах и значительной влажности);
- значительное ослабление прочности мерзлых пород при поступлении теплого воздуха по выработкам.

Для управления первичной посадкой труднообрушаемой кровли в условиях многолетней мерзлоты предложен способ теплового воздействия на мерзлые породы кровли путем подачи горячего воздуха в скважины, в результате чего окружающие мерзлые породы оттаивают и обрушаются, что приводит к образованию свободных полостей по линиям расчетного обрушения породной плиты (рис. 1).

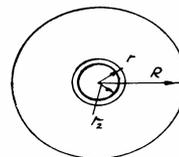
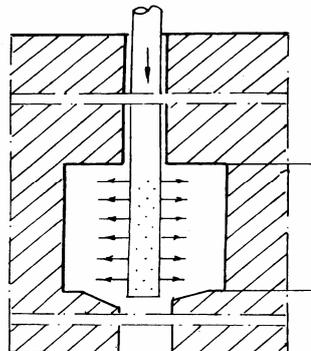


Рис. 1. Технология первичной посадки кровли в условиях многолетней мерзлоты: 1 - выемочный столб; 2 - многолетнемерзлые породы; 3 - скважины; 4 - ожидаемый свод обрушения; 5 - полости; 6 - органичная крепь

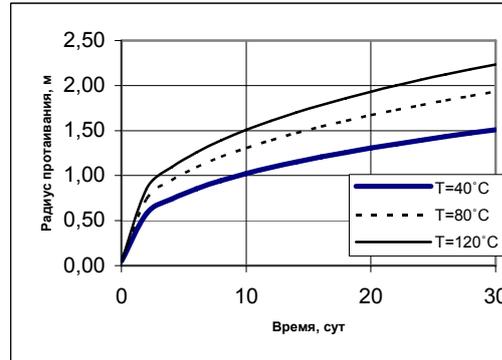
Способ осуществляют следующим образом. В намеченный и подготовленный к выемке выемочный столб в район последующей первич-

ной посадки кровли бурят с поверхности скважины до пласта угля по линиям, одна из которых располагается у границы выемочного столба, а другая – около того положения очистного забоя, где ожидается расчетная первичная посадка кровли. После того, когда начнется отработка выемочного столба и первая линия скважин обнажится, в скважины опускают металлические трубы с отверстиями в стенках с заглушенным нижним концом и располагают их в скважине таким образом, чтобы перфорированная часть труб находилась в районе расчетного свода обрушения горных пород при первичной посадке кровли. Затем в трубы подают под давлением теплоноситель – горячий воздух или пар. Оттаявший слой многолетнемерзлых пород проваливается по скважине и попадает в отработанное пространство лавы. Образование полостей в скважинах другой линии производят после их обнажения при работе лавы. После некоторого продвижения забоя лавы, вдоль нее устанавливают специальную крепь или бьют органку, а когда образование полостей в скважинах будет закончено, извлекают индивидуальную крепь из отработанного пространства и производят первичную посадку кровли. В крайнем случае, если посадки не произошло, в полости скважин помещают ВВ и взрывают.

Рассмотрим более подробно физические процессы, происходящие при формировании свободной полости. При подаче горячего воздуха или пара через отверстия трубы происходит разрушение мерзлых горных пород путем оттаивания и удаления (рис. 2). Если по всему периметру трубы отверстия расположены равномерно, то можно сделать вывод о том, что тепловой поток во всех направлениях одинаков. Это приводит к осесимметричной задаче.

Для расчета радиуса образовавшейся полости рассмотрим одномерную задачу оттаивания полуграниченного цилиндрического пространства. Температура мерзлых горных пород в начальный момент времени равна T_0 .

Рис. 2. Схема расчета радиуса зарядной полости: r — радиус скважины, м.; r_2 — радиус трубы, м; R — радиальная координата, м



После подачи горячего теплоносителя с температурой T_2 теплообмен осуществляется по закону свободной конвекции. Сначала температура стенки скважины поднимается до температуры фазового перехода лед-вода T_1 , а затем происходит нагрев с плавлением и оттаиванием. Из-за интенсивности процесса оттаивания мерзлых грунтов можно пренебречь временем начала плавления. Тогда задача определения радиуса образовавшейся полости формулируется следующим образом:

$$T(\xi, \tau) = T, \quad (1)$$

$$T(\infty, \tau) = T_0, \quad (2)$$

$$-\alpha(T_1 - T_2) + \lambda \left. \frac{dT}{dR} \right|_{R=\xi} = q\rho W \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (3)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial}{\partial R} \left(\lambda R \frac{\partial T}{\partial R} \right) \right), \quad \xi < R < \infty, \quad (4)$$

$$\xi = \xi_0 \text{ при } \tau = 0$$

где T , T_1 — соответственно температура грунта, фазовых переходов; C ; R — радиальная координата, м; τ — время, с; ξ — радиус протаивания, м; r_2 — радиус трубы, м; α — коэффициент теплообмена горячей струи воздуха со стенкой скважины, Вт/(м² К); λ — коэффициент теплопроводности мерзлых пород, Вт/(м·К); q — теплота фазовых переходов, Дж/кг; W — влажность грунта, доли ед., с, ρ — удельная теплоемкость, (Дж/(кг·К)) и плотность мерзлых пород, кг/м³.

Примем $T_1 = 0$ °С. Воспользуемся интегральным методом решения задачи протаивания [2], которая сводится к виду

$$T(\xi; \tau) = 0, \quad (5)$$

$$T(R'; \tau) = T_0, \quad (6)$$

Рис. 3. Зависимость радиуса полости от времени при разных температурах воздуха при расходе $G = 2 \text{ м}^3/\text{сек}$

$$\alpha \cdot T_2 \cdot \frac{r_2}{\xi} + \lambda \frac{dT}{dR} \Big|_{R=\xi} = q\rho W \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (7)$$

$$\frac{d}{dR} \left(R \frac{dT}{dR} \right) = 0, \quad \xi < R < R', \quad (8)$$

где R' — радиус теплового влияния, м.

Из (8)

$$T = C_1 \ln R + C_2 \quad (9)$$

Постоянные C_1, C_2 определяются из решения (10) граничными условиями (6) и (7):

$$\begin{cases} C_1 \ln \xi + C_2 = 0 \\ C_1 \ln R' + C_2 = T_0 \end{cases} \quad (10)$$

Найдя из (11) C_1 и C_2 , приведем (10) к виду

$$T = \frac{T_0}{\ln \frac{R'}{\xi}} \cdot \ln \frac{R}{\xi} \quad (11)$$

Вычислим производную

$$\frac{dT}{dR} \Big|_{R=\xi} = \frac{T_0}{\xi \ln \frac{R'}{\xi}} \quad (12)$$

Значения (12) подставим в (7) и получим следующее уравнение

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{1}{q\rho W} \left[\frac{\alpha \cdot T_2 \cdot r_2}{\xi} + \frac{\lambda T_0}{\xi \ln \frac{R'}{\xi}} \right] \quad (13)$$

Начальное условие

$$\xi = \frac{d}{2} \quad \text{при } \tau = 0 \quad (14)$$

где d — диаметр скважины, м.

Коэффициент теплообмена определяется формулой из [3]:

$$Nu = 3.06 \frac{Re^{0.5}}{h^{0.77}} Pr^{0.4} \quad (15)$$

где Nu — критерий Нуссельта,

$$Nu = \frac{\alpha d_1}{\lambda_1} \quad (16)$$

где d_1 — диаметр отверстия, м; λ_1 — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м К), критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{v d_1}{\nu} \quad (17)$$

где v — скорость вытекающей воздушной струи, м/с; ν — вязкость воздуха, м²/с; Pr — число Прандтля для воздуха; $h = h/d_1$ (здесь h — расстояние от трубы до стенки полости)

Если известны: расход подаваемого воздуха G (м³/с), диаметр отверстия d_1 (м), K_o — количество отверстий на 1 м трубы, длина l (м) и диаметр насадки d_2 (м), то коэффициент теплообмена согласно (17) имеет вид

$$\alpha = 6.122^{0.77} \sqrt{\frac{G}{\pi K_o l v}} \frac{Pr^{0.4} \lambda}{d_1^{0.73} (2\xi - d_2)^{0.77}} \quad (18)$$

Радиус образовавшейся полости находится решением дифференциального уравнения (14) с начальным условием (15) и с учетом зависимости (18); которое решается численными методами с применением ЭВМ. Для получения упрощенной зависимости радиуса протаивания от времени примем следующее допущение. Предварительные расчеты показывают, что значение первого члена в правой части (14) на порядок больше второго, т.е. $\alpha T_1 \gg \frac{\lambda T_0}{\xi \ln(R/\xi)}$.

Поэтому вторым членом можно пренебречь. Физический смысл данного допущения заключается в том, что вся поступающая тепловая энергия расходуется на оттаивание мерзлых пород. Таким образом, получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{6.12 \cdot 2^{0.77} \sqrt{\frac{G}{\lambda K_o l v}} \cdot Pr^{0.4} \cdot \lambda \cdot T_2 \cdot d_2}{\xi \cdot d_1^{0.73} (2\xi - d_2)^{0.77} \cdot 2q\rho W} \quad (19)$$

Данное уравнение решается численным методом Рунге-Кутты с помощью ПЭВМ.

На рис. 3 дан пример расчета радиуса полости протаивания в зависимости от времени, расхода горячего воздуха (при $G = 2 \text{ м}^3/\text{сек.}$), температуры горячего воздуха T .

Из рис. 3 видно, что за 30 суток радиус полости составит 2.25 м., т.е. диаметр ее будет равным 4.5 м, что вполне достаточно при 2-3 скважинах для разупрочнения горных мерзлых пород и обеспечения нормальной первичной посадки кровли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слепцов А.Е. Механизация очистных работ и управление кровлей на россыпных шахтах Севера. - Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1983. - 144 с.
2. Бондарев Э.А., Капитонова Т.А., Попов Ф.С. Оценка точности интегральных методов решения задачи

Стефана// Теплофизические и массообменные свойства гигроскопических материалов. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1977. – С. 34-40.

3. Юдаев Б.Н. Теплопередача. - М.: Высш. шк., 1973. 345 с.

Коротко об авторах

Васильев Петр Назарович – ст. научный сотрудник,
Хохолов Юрий Аркадьевич – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник,
Шерстов Валерий Андреевич – доктор технических наук, профессор, гл. научный сотрудник,
Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН.

**ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

РУКОПИСИ,

1. Ганин И.П., Сердюк Н.И. Влияние газовой составляющей на характер действия ударной гидродинамической волны (№ 388/03-05 — 20.01.05) 6 с.
2. Сердюк Н.И. Энергетические диапазоны гидродинамических воздействий на фильтровую область буровых скважин при различных способах ее декольматажа (№ 389/03-05 — 20.01.05) 11 с.
3. Сердюк Н.И. Повышение эффективности буровых технологических процессов за счет использования эффекта кавитации (№ 390/03-05 — 20.01.05) 10 с.
4. Сердюк Н.И. Оптимизация работы фильтровой области продуктивных горизонтов буровых скважин (№ 391/03-05 — 20.01.05) 4 с.

