

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ ПРИ ЕЕ ПРОГРЕВЕ ПОЖАРОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОСТЫВАНИИ

Греков С.П., доктор техн.наук
 НИИ горноспасательного дела,
 Александров С.Н., Назаренко В.И., Почтаренко Н.С., кандидаты техн.наук
 Донецкий государственный технический университет

В работах [1,2] рассматривалась задача расчета температуры пожарных газов и скорости распространения очага пожара по горным выработкам.

Представляет также значительный практический интерес исследование теплового поля в горных выработках после прохождения по ней пожара, так как это позволяет определить возможность направления в нее людей со стороны свежей струи для тушения пожара.

Физическая модель развития пожара и распространения нагретых пожарных газов представлена следующим образом. В некотором сечении горной выработки возникает тепловой источник, поджигающий крепь выработки. Интенсивность развития источника зависит от вида горючего материала в выработке и скорости вентиляционного потока. Исследованиями установлено [1], что для наихудших условий (сухая крепь, большая скорость воздушного потока) время развития пожара до максимальной его температуры составляет 30-50 мин. Зоной горения обычно бывает охвачено несколько десятков метров. Для простоты рассуждений будем считать, что в зоне развития пожара его температура изменялась во времени по кривым, близким к экспоненциальным; по длине зоны развития пожара - к прямолинейной зависимости. Принимаем, что пожар сосредоточен в точке; за очагом пожара следуют зоны термической подготовки и подсушки, в которых из-за конвективного и лучистого теплообмена со стенкой выработки происходит охлаждение пожарных газов (рисунок). Процесс распространения пожарных газов по горной выработке, осредняя температуру по радиусу, можно записать уравнениями:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u(T) \frac{\partial T}{\partial x} = -A(T - T_n), \quad (1)$$

где $A = \frac{2a_g \alpha}{R\lambda}$,

$$T|_{t=0} = f(t); \quad T|_{t=0} = T_g = T_n,$$

a_g - температуропроводность потока, определяемая зависимостью [3]

$$a = 3,5 \cdot 10^{-3} u_0 \frac{T}{T_g},$$

T - текущая температура потока, K ;

T_g, T_n - температуры воздушного потока и пород до возникновения пожара, K ;

α - коэффициент теплоотдачи, $Bm/(m^2 \cdot K)$;

R - эквивалентный радиус выработки, m ;

$\lambda(T)$ - теплопроводность воздуха, $Bm/(m \cdot K)$;

x, t - пространственная и временная координаты, m и s ;

$f(t)$ - функция изменения температуры в очаге горения при развитии пожара.

Решение уравнения (1) с учетом скорости перемещения пожара v_n (м/с) имеет вид

$$T = T_g + (f(t) - T_g) e^{-\frac{A(x-v_n t)}{u}} \quad (2)$$

Экспериментальными исследованиями [2] найдены величины α и λ , зависящие от температуры. Эти зависимости могут быть описаны формулами:

При $300 < T < 800$ К

$$\alpha = 1,06\varepsilon \frac{G^{0,8} P^{0,2}}{S} T^{0,209}, \quad (3)$$

$$\lambda = 1,1\lambda_0 T^{-0,018}, \quad (4)$$

где ε - коэффициент шероховатости стенок выработки;

λ_0 - теплопроводность воздуха при нормальной температуре, Вт/(м·К);

G - массовый расход воздуха, кг/с;

P - периметр выработки, м;

S - площадь поперечного сечения выработки, м².

При $800 < T < 1300$ К

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-8} \varepsilon \frac{G^{0,8} P^{0,2}}{S} T^{2,95}, \quad (5)$$

$$\lambda = 86,5\lambda_0 T^{-0,67}. \quad (6)$$

Вычисление T по формулам (2)-(6) производится методом итераций. Вначале принимается значение $T = T_g$ и по формулам (3)-(4) определяются значения α и λ . Затем находят температуры потока по формуле (4). После этого по полученному значению температур вновь определяются величины α и λ и по ним снова вычисляются температуры потока. Процесс повторяется до тех пор, пока разница между двумя последовательно полученными величинами T не будет превышать 1-3 %.

Процесс распространения тепла в породах, окружающих горную выработку, при радиусе выработки $R > 1,6$ м, как было показано в [4], можно рассматривать как в стержне, т.е. использовать уравнение теплопроводности [5] с граничными условиями третьего рода.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$T_n(r, t) = (T_g - T_{n.o}) \left[\operatorname{erfc} \frac{r}{2\sqrt{at}} - e^{Hr + H^2 at} \operatorname{erfc} \left(\frac{r}{2\sqrt{at}} + H\sqrt{at} \right) \right] + T_{n.o}, \quad (7)$$

где r, t - пространственная и временная координаты, м и с;

$$H = \frac{\alpha}{\lambda},$$

a - температуропроводность пород, м²/с;

$T_{n.o}$ - начальная температура пород, К.

Проведенные по формуле (7) вычисления показали, что для реальных значений теплофизических параметров горных пород безразмерный профиль температур по глубине массива может быть с достаточной для практических целей точностью описан зависимостью

$$\Theta = \frac{T_n(r, t) - T_{n.o}}{T_g - T_{n.o}} = \frac{T_{n.изб}}{T_{г.изб}} = e^{-\frac{18,5r}{\sqrt{t_n/3600}}} = e^{-\beta r},$$

где t_n - время нагревания горного массива, с.

После прохождения по выработке пожара задача остывания массива сформулирована в виде

$$\frac{\partial T_{n.узб}}{\partial t_1} = a \frac{\partial^2 T_{n.узб}}{\partial r^2}, \quad (8)$$

$$T_{n.узб}(r,0) = T_{n.max.узб} e^{-\beta r}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_{n.узб}}{\partial r} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_n - T_\theta) |_{r=0}, \quad (10)$$

где t_1 - время, отсчитываемое с момента прекращения нагревания пород, т.е. прохождения пожаром рассматриваемого сечения x горной выработки, с;

$T_{n.max.узб} = T_{n.max} - T_{n.o}$ - температура стенки пород выработки в рассматриваемом сечении x на момент прекращения ее нагревания, K.

Для случая нагревания потока стенками канала примем, что $T_\theta = T_{cm} / n$. Тогда вместо (10) получим

$$\frac{\partial T_{n.узб}}{\partial r} = \frac{\alpha(n-1)}{n} T_{n.узб} |_{r=0}, \quad (11)$$

где n - коэффициент, зависящий от отношения скоростей до и после прохождения пожара. Согласно исследованиям [6] может быть принят равным 2.

Решение задачи (8-11), полученное методом функции источника, имеет вид (для $r = 0$, т.е. стенки выработки):

$$T_{cm.n.узб} = (T_{n.max} - T_{n.o}) \left[\frac{1}{2} e^{\beta^2 at_1} \operatorname{erfc}(\beta \sqrt{at_1}) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2h}{h-\beta}\right) e^{\beta^2 at_1} \operatorname{erfc}(\beta \sqrt{at_1}) + \frac{h}{h-\beta} e^{h^2 at_1} \operatorname{erfc}(h \sqrt{at_1}) \right] + T_{n.o},$$

где $T_{cm.n.узб}$ - избыточная температура стенок породы при остывании, K;

$$h = \frac{\alpha(n-1)}{\lambda n}.$$

Температура воздуха в любом сечении горной выработки после прохождения по ней пожара $T_{1в.узб}$ может быть принята равной половине $T_{cm.n.узб}$, т.е.

$$T_{1в.узб} = \frac{T_{cm.n.узб}}{2}$$

Рассмотренная в статье методика расчета температуры в горной выработке при ее прогреве пожаром и последующем остывании использована в программной системе МАВР, предназначенной для моделирования процесса развития и свободного движения подземного пожара в сети горных выработок угольной шахты.

Библиографический список

1. Жадан В.М. Визначення температури пожежних газів і швидкості переміщення пожежного осередку в горизонтальній гірничній виробці. //Доп.АН УРСР. - 1967. - Сер.А. -№3.

2. Определение коэффициента нестационарного теплообмена для горных выработок при подземных пожарах. / Медведев Б.И., Почтаренко Н.С.// Разработка месторождений полезных ископаемых: Сб.науч.тр. - Киев: Техніка, 1972.
3. Шервуд Т., Пикфорд Р., Уилки И. Массопередача. - М.: Химия, 1982. - 696 с.
4. Определение температуры пожарных газов в начальный период развития экзогенного пожара./ Горноспасательное дело: Сб.науч.тр. - Донецк, 1973. - С.10-12.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. - 599 с.
6. Математическая модель поля температур в горной выработке при пожаре. / Греков С.П., Калюсский А.Е. ВНИИГД горноспасательного дела. - Донецк, 1989. - 7 с. Деп.в ЦНИ-ЭИуголь 25.12.89, №5025.

Подрисуночные подписи

к статье "Алгоритм и программа расчета температуры в горной выработке при ее прогреве и последующем остывании".

Рисунок - Структура пожарного очага и динамика температурного поля в горной выработке (по В.М.Жадану):

- 0 - зона развития пожара;
- I - зона горения;
- II - зона термической подготовки горючих материалов;
- III - зона подсушки;
- 1 - распределение температур в выработке на момент окончания развития пожара;
- 2, 3 - распределение температур в различные моменты времени при перемещении пожара по выработке.