

- укреплении / С. М. Простов, М. В. Гуцал, Р. Ф. Гордиенко // Вестн. КузГТУ. – 2002. – №6. – С. 12–17.
7. Простов, С. М. Исследование параметров грунтов при электроосмотическом и электрохимическом укреплении на экспериментальной модели / С. М. Простов, М. В. Гуцал, А. В. Покатилов // Вестн. РАЕН (Зап.-Сиб.отд.). – 2004. – №6. – С. 128–134.
8. Простов, С. М. Электромагнитный бесконтактный геоконтроль / С. М. Простов, В. А. Хямляйнен, В. В. Дырдин // КузГТУ, Кемерово, 2002. – 132 с.
9. Простов, С. М. Комплексный контроль качества укрепления неустойчивых грунтов инъекционными растворами / С.М.Простов, М.В.Гуцал, О.В.Герасимов // Вестн. ТГАСУ. – 2003. №1. – С. 231–237.
10. Простов, С. М. Комплексный геоконтроль процессов инъекционного закрепления влагонасыщенных грунтов / С.М.Простов, О.В.Герасимов, Е.А.Мальцев // Вестн. КузГТУ. – 2003.- №3. – С. 17–21.

□ Автор статьи:

Простов  
Сергей Михайлович  
- докт. техн. наук, проф. каф.едры теоретической и геотехнической механики

**УДК 622.822**

**В.А.Портола**

## **ОЦЕНКА ПОЖАРООПАСНЫХ СКОРОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СКОПЛЕНИЕ УГЛЯ**

Рост глубины горных работ шахт и увеличение производительности угледобывающей техники сопровождается повышением выделения метана, что снижает безопасность труда из-за возможности образования взрывоопасных концентраций горючих газов, сдерживает темпы угледобычи. Для борьбы с метаном все большее распространение находят комбинированные схемы проветривания выемочных участков, дегазация выработанного пространства. Однако, наряду с положительными эффектами применяемых схем проветривания – снижением количества выносимого в действующие горные выработки горючего газа, уменьшением концентрации метана в атмосфере выработанного пространства, существует и отрицательный момент. Так, при борьбе с метаном существенно увеличивается количество проходящего

через выработанное пространство воздуха, возрастает концентрация кислорода в рудничной атмосфере. В результате активизируется окисление теряемого угля, что может влиять на эндогенную пожароопасность шахт.

Практика показывает, что наиболее часто самовозгораются скопления угля, образующиеся у теряемых в выработанном пространстве целиков угля (в монтажных, демонтажных камерах, вдоль вентиляционных, конвейерных штреков), а также в зонах геологических нарушений, где уголь, как правило, имеет повышенную химическую активность. Время разогрева угля в процессе самовозгорания сокращается с ростом концентрации кислорода в окружающей атмосфере, химической активности угля и удельного количества тепла, возникающего при взаимодействии

кислорода с активными центрами угля.

Скорость проходящего через скопление угля воздуха оказывает двоякое влияние на процесс самовозгорания. Фильтрующийся через выработанное пространство воздух с одной стороны способствует развитию процесса самовозгорания, доставляя необходимый кислород, с другой стороны тормозит его, вынося часть образуемого тепла и охлаждая угольное скопление. В настоящее время нет единого мнения о пожароопасных скоростях фильтрации воздуха через уголь. Так, в [1,2] утверждается, что самовозгорание угля развивается при скорости воздуха в пределах  $10^{-5}$  -  $10^{-4}$  м/с. Возможность повышения температуры угля только за счет молекулярной диффузии кислорода показана в [3]. Моделирование в лабораторных условиях [4] выявило, что разогрев угля

Изменение химической активности угля, средней температуры сечения очага, минимальной и максимальной скорости фильтрации воздуха в зависимости от температуры очага

$t_0$ , $^{\circ}\text{C}$	50	100	200	300	500	800	1000
$U, \text{м}^3/(\text{кг с})$	$26 \cdot 10^{-9}$	$47 \cdot 10^{-9}$	$89 \cdot 10^{-9}$	$131 \cdot 10^{-9}$	$215 \cdot 19^{-9}$	$341 \cdot 10^{-9}$	$425 \cdot 10^{-9}$
$t_c$ , $^{\circ}\text{C}$	26	43,3	71,6	97,3	143,7	207,4	246,8
$v_{\min}$ , м/с	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$
$v_{\max}$ , м/с	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$

Таблица 1

происходит при расходе воздуха от  $2,2 \cdot 10^{-4}$  до  $8,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Обработка большого объема информации об эндогенных пожарах на шахтах Кузбасса позволили авторам [5] классифицировать наблюдаемые утечки воздуха как пожароопасные ( $1,67 \cdot 10^{-3}$  -  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ), малоопасные ( $10^{-3}$  -  $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) и неопасные (более  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и менее  $10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ). Однако по результатам утечек невозможно установить пожароопасные скорости, формирующиеся непосредственно в скоплении самовозгорающегося угля. Причину несовпадения рассматриваемого параметра у разных авторов можно объяснить изменением свойств исследуемых углей в широких пределах, а также недостаточной изученностью процесса самовозгорания, который в большинстве случаев протекает в недоступных местах.

Для оценки диапазона скоростей воздуха, способствующих развитию процесса самовозгорания при фильтрации через скопление угля, рассмотрим тепловой баланс очага, имеющего форму шара. Фильтрующийся через него воздух доставляет кислород, необходимый для генерации тепла. Часть образующегося тепла расходуется на поддержание или увеличение температуры очага самовозгорания, а оставшееся количество теряется за счет теплопроводности горных пород и используется для нагрева воздуха, выносимого за пределы очага.

Расчет минимального количества воздуха, необходимого для развития процесса самовозгорания, осуществляем из условия, что весь подводимый потоком воздуха кислород вступает в реакцию в скоплении угля. В этом случае количество генерируемого тепла

$$Q_1 = v S C q, \quad (1)$$

где  $v$  - скорость фильтрации воздуха через очаг самовозгорания,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $S$  - площадь сечения очага,  $\text{м}^2$ ;  $C$  - начальная кон-

центрация кислорода в воздухе, доли ед;  $q$  - удельная теплота сорбции кислорода углем,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ .

За счет теплопроводности, при условии поддержания температуры очага, теряется количество тепла

$$Q_2 = \lambda S_2 \frac{dt}{dr} \approx 4\pi\lambda R(t_0 - t_1) \quad (2)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности скопления угля,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $S_2$  - площадь поверхности очага самовозгорания,  $\text{м}^2$ ;  $R$  - радиус очага самовозгорания,  $\text{м}$ ;  $t_0$  - максимальная температура в центре очага самовозгорания,  $\text{К}$ ;  $t_1$  - температура окружающих горных пород,  $\text{К}$ .

Количество тепла, выносимое потоком фильтрующегося воздуха, можно оценить уравнением

$$Q_3 = v S c_1 \rho_1 \Delta t = v R^2 \pi c_1 \rho_1 (t_c - t_1) \quad (3)$$

где  $c_1$  - теплоемкость воздуха,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\rho_1$  - плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t_c$  - средняя температура очага самовозгорания,  $\text{К}$ .

Повышение температуры очага самовозгорания возможно при соблюдении условия

$$Q_1 > Q_2 + Q_3. \quad (4)$$

Подставляя (1-3) в (4), получаем уравнение для расчета нижней границы скорости фильтрации воздуха через угольное скопление, обеспечивающей развитие процесса самовозгорания угля

$$v \geq \frac{4\lambda(t_0 - t_1)}{RCq - R c_1 \rho_1 (t_c - t_1)}. \quad (5)$$

Для расчета верхнего предела скорости фильтрации воздуха, превышение которого приводит к преобладанию потерь тепла над генерацией, рассмотрим тепловой баланс, в котором выделение тепла происходит при неполном поглощении кислорода. Исходя из удельной скорости сорбции кислорода, количество выделившегося тепла равно

$$Q_1' = V U q \rho_2, \quad (6)$$

где  $V$  - объем очага самовозго-

рания,  $\text{м}^3$ ;  $U$  - удельная скорость сорбции кислорода углем,  $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ ;  $\rho_2$  - плотность скопления угля в очаге самовозгорания,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Самовозгорание угля в случае сохранения неизменными потерь тепла за счет теплопроводности и конвекции происходит при условии

$$Q_1' > Q_2 + Q_3. \quad (7)$$

Подставляя (2), (3) и (6) в (7), имеем

$$v \leq \frac{4R^2 UCq\rho_2 - 12\lambda(t_0 - t_1)}{3Rc_1\rho_1(t_c - t_1)} \quad (8)$$

Используя полученные формулы (5) и (8), был произведен расчет диапазона скоростей фильтрации воздуха, при которых возможно развитие процесса самовозгорания для очагов с максимальной температурой от 50 до 1000  $^{\circ}\text{C}$ . При расчете использовались следующие численные данные:  $\rho = 800 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $C = 0,2$ ;  $\lambda = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $q = 12500000 \text{ Дж}/\text{м}^3$ ;  $c_2 = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\rho_2 = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Температура окружающих пород равнялась 10  $^{\circ}\text{C}$ , а скорость сорбции кислорода определяли по уравнению

$$U = u + B t_C, \quad (9)$$

где  $u$  - удельная скорость сорбции при  $t = 0$   $^{\circ}\text{C}$  ( $u = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ );  $B$  - температурный коэффициент скорости сорбции кислорода углем ( $B = 42 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с}\cdot\text{гр})$ ).

Расчет радиуса очага самовозгорания осуществляем из условия, что развитие эндогенного пожара продолжается длительное время (обычно несколько месяцев). Поэтому процесс самовозгорания можно рассматривать как квазистационарный, в котором распределение температуры в каждый момент времени подчиняется законам стационарного теплообмена. В этом случае температурное поле очага самовозгорания можно описать уравнением Био-Фурье

$$\frac{4\pi}{3} r^3 q C \rho (u + B t) = \pi 4r^2 \lambda \frac{dt}{dr} \quad (10)$$

где  $r$  – текущий радиус очага пожара, м.

Разделяя переменные и интегрируя (10) при граничных условиях

$$t|_{r=0} = t_0; t|_{r=R} = t_1, \quad (11)$$

где  $t_0$  - температура в центре очага пожара,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_1$  - естественная температура горных пород,  $^{\circ}\text{C}$ , получаем уравнения для расчета температуры прогретой зоны очага

$$t = (t_0 + K)e^{-\frac{Ar^2}{2}} - K \quad (12)$$

и для определения радиуса прогретой очагом зоны

$$R = \sqrt{\frac{2}{A} \ln \left| \frac{t_0 + K}{t_1 + K} \right|}. \quad (13)$$

где

$$A = \frac{qCB\rho}{3\lambda}; \quad K = \frac{u}{B}.$$

Средняя температура сечения, проходящего через центр очага,

$$t_C = \frac{2}{R^2} \int_0^R t(r) r dr = \frac{2(t_0 + K)}{R^2 A} - \frac{2(t_0 + K)}{R^2 A} e^{-\frac{A R^2}{2}} - K. \quad (14)$$

Учитывая, что из (12) имеем

$$\frac{A}{e^2} R^2 = \frac{t_0 + K}{t_1 + K}, \quad (15)$$

получаем

$$t_C = \frac{2(t_0 - t_1)}{R^2 A} - K. \quad (16)$$

При расчете диапазона скоростей фильтрации воздуха, обеспечивающих развитие процесса самовозгорания угля, радиус очага рассчитывали по выражению (13), среднюю температуру сечения очага определяли по формуле (16). Результаты расчетов химической активности угля, средней температуры сечения очага, максимальной и минимальной скорости фильтрации воздуха, обеспечива-

ющих процесс самовозгорания угля, приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что развитие процесса самовозгорания угля происходит при изменении скорости фильтрации воздуха в широком диапазоне. По мере повышения температуры очага необходимая для поддержания процесса самовозгорания скорость фильтрации воздуха возрастает. На рис. 1 показано изменение средней скорости фильтрации воздуха, обеспечивающей максимальный темп процесса самовозгорания, в зависимости от температуры в центре очага.

Анализ полученных результатов дает следующие выводы о влиянии применяемых способов борьбы с метаном (приводящих к увеличению скорости фильтрации воздуха через выработанное пространство) на процесс самовозгорания.

1. На начальной стадии процесса самовозгорания (до температуры  $70 - 90 ^{\circ}\text{C}$ ), когда повышение температуры происходит при небольших скоростях фильтрации воздуха, увеличение скорости воздуха замедлит или предотвратит развитие процесса самовозгорания угля.

2. Возросшие скорости фильтрации воздуха ускорят процесс разогрева угля на стадии возгорания (температура очага более  $90 ^{\circ}\text{C}$ ). Верхний предел температуры очага при интенсивном притоке кислорода возрастет, что увеличит вероятность воспламенения метана и угольной пыли.

3. В скоплениях с высокой химической активностью угля по отношению к кислороду повышение скорости фильтрации воздуха приведет к ускорению процесса самовозгорания.

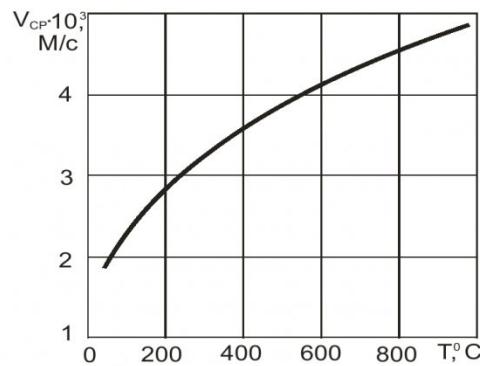


Рис. 1. Изменение средней скорости фильтрации воздуха, необходимой для самовозгорания угля, в зависимости от температуры очага

Таким образом, все шире применяемые способы борьбы с метаном, приводящие к увеличению скорости фильтрации воздуха через выработанное пространство, не увеличат вероятность самовозгорания теряемого угля со средней и небольшой сорбционной активностью по отношению к кислороду. Однако вероятность развития самовозгорания будет возрастать, если в выработанном пространстве будут образовываться скопления горючего материала с большой сорбционной способностью. Так, резко возрастет опасность самовозгорания угольной пыли, откладываемой в выработанном пространстве. Может возрасти вероятность развития эндогенных пожаров в местах геологических нарушений, уголь в которых имеет повышенную сорбционную активность.

В случае же возникновения очага самовозгорания следует ожидать увеличения вероятности перерастания процесса во взрыв горючих газов и угольной пыли из-за резкого ускорения стадии возгорания, более высокой температуры очага, а также быстрого нарастания концентрации метана в рудничной атмосфере в случае проведения изоляционных работ при тушении эндогенного пожара.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баев Х.А. Определение пожароопасной скорости фильтрации воздуха через угольное скопление //

Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело.-1969.-№ 11-12.- С. 44-45.

2. Глузберг Е.И. О нелинейном эффекте тепло- и массообмена в процессе самонагревания угля в горных выработках // Сб. научн. тр. / Физические процессы горного производства. Термофизические процессы в горной технологии.- Л.: изд. ЛГИ.- 1983. - С. 34-38.

3. Портола В.А., Иглиев В.Г. Роль молекулярной диффузии в возникновении эндогенных пожаров // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело.-1981.-№ 3.- С. 24-25.

4. Саранчук А.И., Баев Х.А. Теоретические основы самовозгорания угля.- М.: Недра, 1976.- 151 с.

5. Линденau Н.И., Маевская В.М., Крылов В.Ф. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров.- М.: Недра, 1977.-319 с.

Автор статьи:

Портола

Вячеслав Алексеевич

- д.т.н , проф. кафедры аэрологии,  
охраны труда и природы