

**В. Ф. ОВЧИННИКОВ**, доктор техн. наук,

**В. А. ДРОТИК**, инж.  
(Горный факультет УИПА)

**А. В. СТУПАК**, инж.

(2-й военезированный горноспасательный отряд)

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВЗРЫВОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ПРИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ\*

По данным Гостехнадзорхрантруда Украины, за последние 15 лет на шахтах Центрального и Восточного Донбасса в 1,7 раза увеличилось количество взрывов метана и угольной пыли с тяжелыми последствиями. Иницирующим фактором во взрывах угольной пыли являются вспышки метана или открытое пламя при буровзрывных работах (БВР) и огневых, короткое замыкание в кабельных системах при нарушении Правил безопасности и Единых правил безопасности при ведении взрывных работ.

Один из основных критериев, характеризующих склонность пыли к взрыву для всех видов каменных углей (кроме антрацитов) и сланцев, — содержание в них летучих компонентов ( $V_d > 15\%$ ). В состав последних входят предельные и непредельные углеводороды: водород, этан, бутан, пропан, этилен, пропилен, бутиден и смолистые вещества, которые активно выделяются из угля при температуре свыше  $100^\circ\text{C}$  [1, 2].

К опасным по взрываемости угольной пыли относятся пласты с выходом летучих компонентов более 12 (Польша, Германия, Чехия и Нидерланды), 20 (Англия), 7,9% (США). Степень взрываемости летучих компонентов возрастает с уменьшением фракций пылинок.

По данным исследований МакНИИ и Института химической физики АН Российской Федерации [1, 3], нижний предел взрываемости угольной пыли с  $V_d = 15...35\%$  составляет  $11—15 \text{ г/м}^3$ , а при содержании в шахтной атмосфере метана 2,5% он уменьшается до  $3—5 \text{ г/м}^3$ . Если  $V_d = 10...15\%$ , то нижний предел будет 50, а верхний —  $400 \text{ г/м}^3$ . Максимальная сила взрыва взвешенной угольной пыли отмечается при ее содержании в выработке  $250—300 \text{ г/м}^3$ .

В результате исследований [2] в газоаналитической лаборатории 2-го ВГСО установлен объем  $Q$  выделяющихся углеводородов (летучих)  $V_n$  из навесок  $M$  по 100 г угольной пыли различных фракций  $\epsilon$ , имеющих природную влажность  $W$  в зависимости от температуры  $T$ , равной  $150^\circ\text{C}$ , в экспериментальной муфельной печи. Из таблицы видно, что интенсивность выделения летучих компонентов (углеводородов) из навесок угольной пыли с  $V_n = 30...35\%$  в 3 раза больше, чем из угольной пыли с  $V_n = 15\%$ . Повышенная взрывоопасность углеводородных смесей заключается в том, что стехиометрические смеси углеводородов имеют интервал взрываемости от 2 до 81%, в то время как у метана — от 5 до 15%. Минимальная температура вспышки (взрыва) метана составляет  $600^\circ\text{C}$ , а для углеводородных газовых смесей —  $250^\circ\text{C}$  [1, 3].

Для разработки физико-химических основ предупреждения взрывов угольной пыли (углеводородов) при БВР в пластовых выработках были выполнены аналитические исследования. Вначале произведена термоаналитическая оценка

\* В порядке предложения.

флегматизирующей роли предварительно нагнетаемой в пласт воды из расчета 10% объема угля на два цикла БВР (2,5—3 м). Цель оценки — с помощью расчетного количества воды мгновенно снизить при взрыве ВВ температуру отбитого угля и газовой смеси в активной зоне отрыва пласта (на 1,5—2 м) до невзрывоопасной температуры (250°C) с применением только мгновенных и короткозамедленных электродетонаторов.

$V_0, \%$	$\tau, \text{мм}$	$W, \%$	$Q, \text{мг}$
10—15	5,0	3,5	4,0
15—20	2,5	3,8	6,2
20—25	1,5	3,6	8,1
25—30	1,25	3,5	10,2
30—35	1,0	3,4	12,4

Из разработок ИХФ АН РФ [3], ДонТУ [4] и ИГТМ [5] следует, что при взрыве ВВ воздушно-газовая смесь в зоне отрыва угля на 1,5—2 м прогревается только ударной волной (первый процесс). Взорванный уголь мгновенно нагревается лишь в процессе теплопередачи (второй процесс). Время протекания первого процесса  $\approx 0,0002$  с, второго  $\approx 0,015$  с. Активное выделение летучих компонентов при дроблении угля в активной зоне происходит во втором процессе, так как в первом они не успевают полностью выделиться и для них решающим фактором является температура в конце второго процесса.

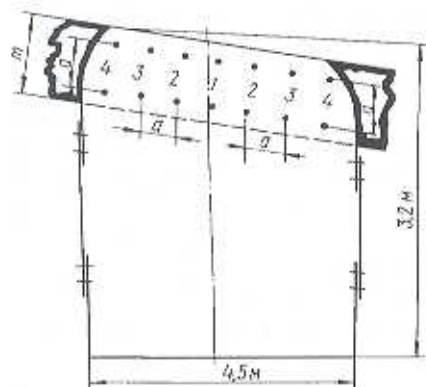


Рис. 1. Схема шелевого вруба БВР в пластовой выработке с крепью КПС-11,2: 1, 2, 3 и 4 — сваренные шпуры соответственно с электродетонаторами мгновенного и короткозамедленного действия 15—30, 40—60 и 80—120 мс;  $a$  — 600 мм — расстояние между шпурами по углу.

Рассмотрим паспорт БВР с предварительным нагнетанием (на два цикла)  $2,4 \text{ м}^3$  воды (10% по объему) с применением шелевого вруба (мощность пласта 1 м) в подготовительных выработках (рис. 1) на выбросоопасных пластах  $t_0$  и  $k_2$  шахт им. Менжинского и “Горская”, ГП “Первомайск-уголь” с использованием крепи КПС-11,2 (вместо арочной), что исключает вторжение взрывными работами в кровлю

пласта. Для тонких пластов ( $m \approx 0,7$  м) в шелевом врубе вместо сваренных используют одиночные шпуры (расстояние между ними по углу  $a = 600$  мм). Линия наименьшего сопротивления (ЛНС) составляет  $0,5 \sqrt{q} = 0,45$ , где  $q = 0,8 \text{ кг}$  — масса заряда предохранительного ВВ (угленит Э-6) в одном шпуре [5]. Температура взрыва предохранительного ВВ в шпуре равна  $1500^\circ\text{C}$ , а давление продуктов взрыва  $P = 1250$  МПа [3, 4].

Установим допустимую (по расчету) температуру газовой смеси в зоне отрыва пласта при взрыве предохранительного ВВ в шпурах 1, 2, 3, 4 (рис. 1). Для условий предварительного нагнетания в пласт  $2,4 \text{ м}^3$  воды — флегматизатора отразим характер протекания термодинамических процессов. В момент взрыва первых (1—2) пар зарядов ВВ время протекания двух встречных фронтов ударных волн в зоне отрыва составляет доли миллисекунд [4, 5], поэтому уголь и предварительно закачанная в пласт вода не успевают мгновенно прогреться. Примем средний размер фракций угля диаметром  $d = 20$  мм.

Следующий процесс отражает нагрев угля ( $\tau = 0,015$  с). Рассчитаем долю фракций от всего объема угля, который успевает прогреться до определенной температуры за время  $\tau$ . Решаем как нестационарную задачу теплопроводности и допускаем, что фракция угля в зоне отрыва пласта зарядами шпуров 1—2 имеет цилиндрическую форму, радиус  $R$  и длину  $L$ . Второе обязательное допущение заключается в том, что за время  $\tau$  температура газовой смеси в зоне отрыва пласта при взрыве ВВ остается постоянной. Составляем уравнение термодинамического процесса.

Отдаваемая теплота

$$dQ_{отд} = -kF(t_k - t_0) d\tau, \quad (1)$$

где  $t_0$  и  $t_k$  — начальная и конечная температуры,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $k$  — коэффициент теплопередачи, Вт/( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ );

получаемая теплота

$$dQ_{пол} = c_{\tau} \rho V_{пр} \frac{dt}{d\tau} d\tau, \quad (2)$$

$F$  — площадь боковой поверхности элемента цилиндра фракции угля (площадь торцов пренебрегаем),  $\text{мм}^2 \cdot 10^{-2}$ ;  
 $c_{\tau}$  — удельная теплоемкость угля, Дж/( $\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$ );  
 $\rho$  — плотность фракций угля,  $\text{г}/\text{мм}^3$ ;  
 $V_{пр}$  — прогреваемый объем принятой фракции в зоне отрыва угля при взрыве ВВ,  $\text{мм}^3$ .

При  $dQ_{отд} = dQ_{пол}$  имеем

$$c_{\tau} V_{пр} dt = -kF(t_k - t_0) d\tau, \quad (3)$$

Введем следующие значения разности температур:  $\theta = t - t_0$  и  $d\theta = dt$ . Подставим их в формулы и проинтегрируем, после чего получим

$$\ln \frac{\theta}{\theta_0} = - \frac{kF}{c_{\tau} \rho V_{пр}} \tau, \quad (4)$$

где  $t_0 = 30^\circ\text{C}$  — начальная температура фракций угля;  
 $t_k$  — конечная температура фракций угля.

Площадь боковой поверхности принятой фракции угля  $F = 2\pi RL$ . Толщина активного прогрева фракции угля в зоне отрыва при взрыве ВВ составит  $XR$  (где  $X$  — часть зоны прогрева пылинки радиусом  $R$ ). Определим объем прогрева фракций угля в зоне отрыва:

$$V_{\text{пр}} = \pi R^2 L - \pi (R - XR)^2 L = \pi R^2 L (2X - X^2). \quad (5)$$

Введем в расчет условия, при которых вспышка метана инициирует взрыв угольной пыли:  $k=100 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$ ;  $t_{\text{гор}}=600^\circ\text{C}$ ;  $\rho=1225 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_1=1240,24 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ . Тогда

$\ln \frac{\theta}{\theta_0} \approx -0,9$ ;  $X = 10^{-4}$ . При этом объем прогрева принятой фракции угля при взрыве ВВ составит  $V_{\text{пр}}=2\cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ . В пересчете на массу:  $m_{\text{пр}}=2\cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Согласно работе [4] энергетический баланс выделения энергии при взрыве двух шпуров  $Q_{\text{ВВ}}=(2,5\text{--}5,4)\cdot 10^5 \text{ Дж}$ . Из этого количества энергии 80% тратится на механическую работу отрыва угля, его дробления и отброса [3, 4], остальные 20% — на мгновенный нагрев угля, пара, воды, предварительного закачанной в пласт, испарение ее при взрыве ВВ (политронический процесс). В общем виде уравнение теплового баланса

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{г}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{н}}, \quad (6)$$

где  $Q_{\text{г}}$  — теплота на мгновенный нагрев фракций угля до температуры  $t_x$  от начальной  $30^\circ\text{C}$ ;

$Q_{\text{в}}$  — теплота на мгновенный нагрев воды от  $30$  до  $100^\circ\text{C}$ ;

$Q_{\text{п}}$  — теплота на мгновенное испарение воды при температуре более  $100^\circ\text{C}$ ;

$Q_{\text{н}}$  — теплота на мгновенный нагрев пара от  $100^\circ\text{C}$  до  $t_x$ .

Уравнение (6) теплового баланса при политроническом процессе взрыва ВВ примет вид

$$Q_{\text{ВВ}} = c_1 m_{\text{г}} (t_x - 30) + c_{\text{в}} m_{\text{в}} (100 - 30) + r_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{пар}} m_{\text{в}} (t_x - 100). \quad (7)$$

Учитываем, что в процессе теплообмена при взрыве ВВ спаренных шпуров 1—2 участвует частичная масса угля  $m_{\text{г}}$ , равная  $2,4 \text{ кг}$ , и воды, находящаяся в трещинах и микротрещинах приведенной массы угля, т. е.  $m_{\text{в}}=0,24 \text{ кг}$ .

Подставляя исходные данные для взрываемых одновременно двух шпуров, получим (по расходу энергии взрыва)  $(2,5,4)\cdot 10^5=2,4\cdot 1240(t_x-30)+4190\cdot 0,24(100-30)+2256\cdot 10^3\cdot 0,24+1385\cdot 0,24(t_x-100)$ , откуда  $t_x=154^\circ\text{C}$  — фактическая температура продуктов взрыва (газа) в зоне отрыва пласта.

Расчет показал, что в результате предварительного (до БВР) нагнетания воды-флегматизатора в угольный пласт в количестве  $2,4 \text{ м}^3$  (10% объема угля для двух циклов) температура газозооной смеси в зоне отрыва пласта не превышает  $154^\circ\text{C}$ , что предотвращает взрыв углеводородной смеси и метана. Без предварительного нагнетания воды и пласта подготовительной выработки

$$Q_{\text{ВВ}} = Q_{\text{г}}; Q_{\text{н}} = c_1 m_{\text{г}} (t_x - 30), \text{ или } (2,5,4)\cdot 10^5 = 2,4\cdot 1240(t_x - 30).$$

Получаем  $t_x=370^\circ\text{C}$ .

Температура в зоне отрыва пласта в момент взрыва ВВ в подготовительном забое без предварительного нагнетания воды в пласт значительно превышает предельно допустимую ( $250^\circ\text{C}$ ) для углеводородных газовых смесей, представляя опасность взрыва угольной пыли.

Установлено, что прямые затраты в смену (месяц) для предварительного нагнетания расчетного количества ( $2,4 \text{ м}^3$ ) воды в пласт  $n=1 \text{ м}$  подготовительной выработки на один цикл БВР составляют всего 0,25% общих затрат. Как видим, затраты оправдывают цель для предупреждения взрывов в шахте.

**Выводы.** Предварительное (до БВР) нагнетание в пласт подготовительной выработки расчетного количества воды обеспечивает снижение вероятности взрыва не только углеводородов (угольной пыли), но и метана. Температура газовой смеси в зоне отрыва пласта при БВР не превышает  $154^\circ\text{C}$ . Без предварительного нагнетания температура газовой смеси в зоне отрыва пласта в момент взрыва ВВ достигает  $370^\circ\text{C}$ , создавая угрозу взрыва угольной пыли (температура взрыва  $250^\circ\text{C}$ ).

Дополнительная трещиноватость при БВР в породах кровли [6] подготовительной выработки выбросоопасного пласта на сопряжении с движущейся в обратном направлении лавой в зоне максимального опорного давления вызывает постоянные сдвиги и отрыв пород кровли, провоцируя макровыбросы (шахты им. Скопинского, "Глубокая"). При нарушении пылегазового режима, появления искры или короткого замыкания на сопряжении с лавой и за ней (при столбовой системе) возникает угроза взрыва метана и угольной пыли (шахты им. Скопинского, им. Засядько, "Красноармейская-Западная" № 1, им. Баранова и др.).

Для предупреждения макровыбросов, выбросов и взрывов угольной пыли, провоцируемой вспышкой метана, при БВР следует применять податливую крепь с плоским верхняком (крепь КПС-11,2) на выбросоопасных пластах с пологим (до  $15^\circ$ ) залеганием при крепости кровли  $f>6$ , исключая вторжение взрывных работ в кровлю (шахты "Горская", им. Менжинского) с предварительным нагнетанием воды в пласт (10% по объему).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков К. З., Бурчаков А. С. Аэрология горных предприятий. — М.: Недра, 1987.
2. Овчинников В. Ф., Ступак А. В. Роль физико-химических факторов в оценке мер по предупреждению взрывов угольной пыли в шахтах // Уголь Украины. — 2003. — № 2.
3. Щелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
4. Таранов П. Я. Бурозрывные работы. — М.: Недра, 1974.
5. Петренко В. Д., Овсienко А. В. Расчет газодинамических параметров истечения и вылета продуктов детонации и забойки // Сб. науч. трудов НГАУ. — Днепропетровск, 1995.
6. Овчинников В. Ф. Выбор крепи для выемочных выработок выбросоопасных пластов глубоких шахт // Уголь Украины. — 2001. — № 9.