

Библиографический список

1. **Контурное** взрывание в угольных шахтах / П.Я.Таранов, Е.М.Гарцуев, А.Г.Гудзь, В.Ф.Лавриненко и др. — Донецк: Донбасс, 1972. — 88 с.
2. **Фам Ван Лан**. Обоснование параметров камуфлетного взрывания при открытом способе разрушения горных пород и строительных конструкций: Автореф. дис... канд. техн. наук. 05.26.01 / Дон. гос. техн. у-т. — Донецк, 2001. — 20 с.
3. **Сборник** нормативных документов по взрывным работам в угольных шахтах: КД 12.01.1201-99: Утв. Первым зам. Министра угольной промышленности Украины 22.11.99 и Председателя Госнадзорохрантруда Украины 31.12.99. — Макеевка-Донбасс, 2000. — 240 с.
4. **Александров В.Е., Шевцов Н.Р., Вайнштейн Б.И.** Безопасность взрывных работ в угольных шахтах. — М.: Недра, 1986. — 150 с.

© Шевцов Н.Р., Купенко И.В., Лабинский К.Н., Бабичев В.А., Пудак В.И., 2002

УДК 622.235

КАЛЯКИН С.А. (ООО «Снэйк»), ШЕВЦОВ Н.Р. (ДонНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БУФЕРНОЙ СРЕДЫ НА СПОСОБНОСТЬ МЕТАНОПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ВОСПЛАМЕНЯТЬСЯ ОТ ВЗРЫВНОГО ИМПУЛЬСА

В результате развития теории локализации взрыва метановоздушной (МВС) и пылевоздушной (ПВС) смесей, а также взрывчатых веществ (ВВ) буферной средой как дисперсной системой [1] представилось возможным численно определить линейный размер зоны разлета раскаленных продуктов взрыва (L_k).

Оказалось, что размер этой зоны определяется минимальной длиной буферной среды ($\ell_{o.c.}$), при прохождении которой нагретые до высокой температуры расширяющиеся продукты взрыва охлаждаются и становятся не способными вновь вызывать воспламенение взрывоопасной среды. Для характеристики агрессивности (воспламеняющей способности) локализуемого взрыва вводится параметр Q_t , который определяет его энергию, выделяющуюся при детонации в единицу времени. Для характеристики эффективности (способности охлаждать продукты взрыва МВС или ПВС) буферной среды вводится параметр, определяемый произведением ее плотности (ρ_c) на величину удельного поглощения тепла материалом (λ), который ее обрабатывает. Кроме того, вводится параметр (α_o), который характеризует долю энергии, отбираемую материалом буферной среды у продуктов взрыва в результате его теплообмена с ними. В результате была найдена зависимость, определяющая изменение L_k от выше перечисленных параметров:

$$L_k = \alpha_o \left(\frac{a_o \cdot Q_t}{\lambda^{3/2} \cdot \rho_c} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где α_o — коэффициент, корректирующий относительное различие тепловых потоков через единицу площади буферной среды в открытом ($\alpha_o = 1$) и замкнутом ($\alpha_o > 1$) пространстве, т.е. учитывает различие между расширением продуктов взрыва и буферной среды для сферической симметрии и одномерным расширением в канале.

Основным параметром, характеризующим предохранительные свойства буферной среды (способной предотвращать воспламенение размещенной за ней, счи-

тая по ходу расширения продуктов взрыва, взрывоопасной смеси) является взрыво-предотвращающая концентрация флегматизирующего материала в буферной среде [1] — $C_{п.в.}$. Она определяется по формуле:

$$C_{п.в.} = \frac{m_c}{\ell_{б.с.} \cdot S}, \quad (2)$$

где S — сечение выработки, в которой создается буферная среда, m^2 ; m_c — масса флегматизирующего материала, идущего на создание буферной среды, обладающей предохранительными свойствами.

Тогда длина буферной среды, обладающей взрывопредотвращающим действием на МВС или ПВС, будет равна:

$$\ell_{б.с.} = \frac{m_c}{S \cdot C_{п.в.}}. \quad (3)$$

При этом необходимо учесть, что $C_{п.в.} = K_3 \cdot C_{б.с.}$, где K — коэффициент, учитывающий изменение концентрации $C_{п.в.}$ по мере разбавления и расширения буферной среды под действием продуктов локализуемого взрыва; $C_{б.с.}$ — конечная концентрация флегматизатора в буферной среде (перед контактом ее со взрывоопасной смесью). Следует подчеркнуть, что при формировании буферной среды во взрывчатой атмосфере должно соблюдаться условие $C_{б.с.} \geq C_{ф.}$, где $C_{ф.}$ — флегматизирующая концентрация, т.е. минимально возможная концентрация флегматизатора в буферной среде, которая обеспечивает предотвращение воспламенения МВС или ПВС [2].

Учитывая это перепишем уравнение (3) следующим образом:

$$\ell_{б.с.} = \frac{K_3 \cdot m_c}{S \cdot C_{б.с.}}. \quad (4)$$

С учетом уравнений (1) и (4) получим критическое условие, описывающее процесс предотвращения воспламенения МВС или ПВС флегматизатором буферной среды:

$$\frac{L_k}{\ell_{б.с.}} = \frac{\alpha_o \cdot a_o^{0.5} \cdot Q_t^{0.5} \cdot S \cdot C_{б.с.}}{K_3 \cdot m_c \cdot \lambda^{0.75} \cdot \rho_c^{0.5}} = 1. \quad (5)$$

Равенство (5) преобразуем к виду:

$$a_o^{0.5} = \frac{K_3 \cdot m_c \cdot \lambda^{0.75} \cdot \rho_c^{0.5}}{\alpha_o \cdot Q_t^{0.5} \cdot S \cdot C_{б.с.}}. \quad (6)$$

Практический интерес вызывает изучение вопроса, связанного с определением влияния параметра a_o на безопасную длину забойки — $\ell_{б.с.}$, расположенной в канале мортиры, или на толщину предохранительной оболочки — δ_k вокруг заряда ВВ. Кроме того, необходимо знать какое влияние на параметр a_o оказывает время запыриания продуктов взрыва ВВ буферной средой до момента их контакта с взрывоопасной МВС или ПВС.

Рассмотрим случай взрывания заряда предохранительного ВВ в канале мортиры с забойкой из различных материалов. Для этих условий экспериментально бы-

ли определены минимальные длины забойки — $\ell_{б.з.}$, которые предотвращали воспламенение МВС продуктами взрыва ВВ [2].

Специфика создания предохранительной буферной средой в канале mortarы заключается в следующем. Продукты детонации ВВ воздействуют на забойку, в результате чего она начинает двигаться в канале mortarы. По мере движения продукты детонации ВВ смешиваются с забоечным материалом, в результате чего плотность буферной среды изменяется от начальной равной плотности материала в забойке до конечной плотности смеси материала забойки с продуктами взрыва ВВ на срезе их выхода из канала mortarы. Конечная плотность материала забойки и продуктов взрыва ВВ и определяет плотность буферной среды — ρ_c . В свою очередь в канале mortarы устанавливается взрывопредотвращающая концентрация материала забойки, ниже предельное значение которой равно $C_{ф.с.}$, т.е. $C_{б.с.}=C_{ф.}$

Тогда параметры, входящие в уравнение (6), с учетом специфики создания предохранительной среды в канале mortarы можно определить следующим образом:

— плотность буферной среды, создаваемой забойкой и продуктами взрыва ВВ:

$$\rho_c = \rho_{зоб} \left(\frac{\ell_{б.з.}}{\ell_k - \ell_{ВВ}} \right) + \Delta_{ВВ} \cdot \left(\frac{\ell_{ВВ}}{\ell_k} \right)^k;$$

— концентрация флегматизатора в буферной среде:

$$C_{б.с.} = \frac{m_{зоб}}{S_k \cdot (\ell_k - \ell_{ВВ})};$$

— коэффициент K_3 :

$$K_3 = \left(\frac{\ell_k - \ell_{ВВ}}{\ell_{б.з.}} \right);$$

— коэффициент α_o :

$$\alpha_o = 4 \cdot \left(\frac{R_{сф}}{R_k} \right)^2 \text{ (для аммонита 6ЖВ } \alpha_o = 24,4 \dots 25,0);$$

— энергия взрыва, выделяемая в единицу времени:

$$Q_t = Q_v \cdot m_{ВВ} \cdot \frac{D}{\ell_{ВВ}},$$

где $\ell_{б.з.}$ — безопасная длина забойки, м; ℓ_k — длина канала mortarы, м; $\ell_{ВВ}$ — длина заряда ВВ, взрываемого в mortarе; $\Delta_{ВВ}$ — плотность заряжения ВВ, кг/м³; $m_{зоб}$ — масса флегматизатора в забойке, кг; $R_{сф}$ — радиус сферы, создаваемой в начальный момент продуктами детонации ВВ:

$$R_{сф} = \sqrt[3]{\frac{3m_{ВВ}}{4\pi \cdot \Delta_{ВВ}}},$$

$m_{ВВ}$ — масса взрываемого в mortarе ВВ, кг; Q_v — удельная теплота взрыва ВВ, кДж/кг; D — скорость детонации ВВ:

$$D = \sqrt{2Q_v \cdot (n^2 - 1)}, \text{ м/с;}$$

n — показатель политропы продуктов детонации ВВ ($n=2...3$, для $n=2,5$ $D = 3,24 \cdot Q_v^{0,5}$); κ — показатель адиабаты продуктов взрыва ВВ:

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v}.$$

С учетом этих уравнений параметр a_0 будет равен:

$$a_0 = \frac{K^2 \cdot m_{зоб}^2 \cdot \lambda^{1,5} \cdot \rho_c \cdot \ell_{ВВ}}{\alpha_0^2 \cdot (3,24 \cdot Q_v)^{1,5} \cdot m_{ВВ} \cdot S_K^2 \cdot C_\phi^2}.$$

Для удобства расчета по этому уравнению оно преобразовано к виду:

$$a_0 = \left(\frac{K_3}{\alpha_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{3,24 \cdot Q_v}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{m_{зоб}}{m_{ВВ}}\right) \cdot \left(\frac{\rho_c}{C_\phi}\right) \cdot \left(\frac{\ell_{ВВ} \cdot (\ell_\kappa - \ell_{ВВ})}{S_\kappa}\right). \quad (7)$$

Для расчета времени запираания продуктов взрыва в канале стальной мортиры необходимо знать скорость выбрасывания буферной среды из канала.

В работе получена следующая формула:

$$V_{б.с.}^2 = \frac{P_n \cdot \left(\frac{V_3}{V_\kappa}\right)^\kappa}{\rho_c \cdot (1 + 0,5 \cdot C_m + K_{тр} + 1/2 \cdot K_p \cdot \frac{\ell_{зоб}^2}{S_\kappa})}, \quad (8)$$

где P_n — давление продуктов взрыва ВВ в зарядной камере канала мортиры, ограниченной забойкой; V_3 — объем канала, заполненный зарядом ВВ, м³; V_κ — объем канала мортиры, м³; C_m , $K_{тр}$, K_p — коэффициенты, аэродинамического сопротивления, трения, распора соответственно.

Давление P_n рассчитывается известными в гидродинамической теории детонации методами. Наиболее близкие к фактическим значениям дает метод определения по уравнению состояния, предложенный Тейлором [3].

Очевидно время запираания продуктов взрыва в канале мортиры будет равно:

$$\tau_3 = \frac{\ell_\kappa - \ell_{ВВ}}{V_{б.с.}}. \quad (9)$$

По уравнению (7) рассчитаны значения параметра a_0 для экспериментально установленных параметров (длина, материал, характер расположения) забойки (12 вариантов), при которых исключалось воспламенение МВС в опытном штреке продуктами взрыва заряда аммонита БЖВ в канале мортиры [2]. По формуле (8) рассчитана скорость выбрасывания из канала мортиры буферной среды, формируемой безопасными длинами забойки, а по формуле (9) определено время запираания продуктов взрыва в условиях, в которых установлены безопасные длины забойки.

Анализ полученных результатов показывает следующее. В зависимости от условий предотвращения величина параметра a_0 изменялась в пределах 0,2000...0,0003. Скорость выбрасывания буферной среды колебалась в пределах 715,2...145,0 м/с.

Получено, что с возрастанием времени записания продуктов взрыва, величина которого колебалась в пределах 2,28...0,49 мс, значение a_o уменьшается (коэффициент корреляции равен 0,66) при ошибке равной 0,25). Коэффициент корреляции функции $\ell_{3,6} = \varphi(\tau_3)$ оказался равным 0,87 при ошибке равной 0,16. Кроме того, обнаружена функциональная связь параметра a_o и $\ell_{3,6}$ с плотностью буферной среды, а также концентрацией в ней забоечного материала (коэффициенты корреляций равны 0,81...0,62).

Теперь рассмотрим случай, когда буферную среду образует предохранительная оболочка, располагаемая вокруг заряда из непреходящего ВВ. В этом случае параметр a_o можно определить так же из уравнения (7) при $\alpha_o = 1$, а комбинации $(\frac{\lambda}{3,24 \cdot Q_v})^{1,5}$ и $(\frac{m_{об}}{m_{ВВ}})$ остаются те же.

Другие параметры, входящие в уравнение (8), будут равны:

— плотность буферной среды, создаваемой ВВ с предохранительной оболочкой толщиной δ_k :

$$\rho_c = \frac{m_{ВВ} + m_{об}}{V_k};$$

— концентрация флегматизатора в буферной среде, создаваемой оболочкой:

$$C = \frac{m_{об}}{V_k};$$

— коэффициент K_3 :

$$K_3 = \left(\frac{r_k - r_{ВВ}}{\delta_o \cdot \eta} \right);$$

— поверхность сферы, образованной буферной средой:

$$S_k = 4,836 \cdot \sqrt[3]{V_k^2},$$

где V_n — начальный объем ВВ, м³; V_k — объем, занимаемый буферной средой, при котором состояние продуктов детонации ВВ характеризуется точкой сопряжения изоэнтроп с $n \approx 3$ и $\kappa \approx 1,2$; η — коэффициент, учитывающий сжимаемость оболочки при детонации ВВ; r_k — радиус буферной среды соответствующий объему V_k ; $r_{ВВ}$ — радиус заряда ВВ.

Тогда уравнение (7) применительно к взрыву заряда ВВ в оболочке приводит к виду:

$$a_o = (K_3)^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{3,24 \cdot Q_v} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{m_{об}}{m_{ВВ}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_c}{C_{б.с.}} \right) \cdot \left(\frac{r_{ВВ}^{np} \cdot r_k}{3 \cdot S_k} \right), \quad (10)$$

где $r_{ВВ}^{np}$ — приведенный радиус сферического заряда ВВ.

Время записания продуктов взрыва ВВ буферной средой, создаваемой предохранительной оболочкой, будет равно:

$$\tau_z = \frac{r_k - r_{BB}}{V_{об}}, \quad (11)$$

где $V_{об}$ — средняя скорость движения оболочки, м/с.

После точки сопряжения плотность продуктов взрыва резко падает, и они практически беспрепятственно движутся между частицами оболочки. Кроме того, часть энергии ВВ затрачивается на сообщение оболочке скорости, с которой она движется вместе с продуктами детонации.

Максимальная скорость разлета оболочки в результате воздействия на ее продукты детонации будет равна:

$$V_{об} = \frac{0,3 \cdot m_{ВВ} \cdot D_{ВВ}}{m_{об}}. \quad (12)$$

Результаты расчета по формулам (10)–(12) применительно к экспериментальным значениям толщины предохранительной оболочки из 8 различных жидких, гелеобразных и порошковых материалов (25 вариантов взрывания), полученным в работе [2], показывает следующее.

Величина параметра a_0 изменяется в пределах 0,404...0,039. Средняя скорость движения оболочки изменяется в зависимости от ее материала и величина заряда в пределах 1460,3...209,6 м/с, а время запираания продуктов взрыва буферной средой находится в пределах 2,540...0,078 мс.

В результате математической обработки полученных результатов установлено, что толщина предохранительной оболочки δ_k функционально зависит от времени запираания, скорости детонации и сжимаемости материала оболочки (коэффициенты корреляции равна 0,79...0,84). Значение параметра a_0 функционально зависит от скорости детонации (коэффициент корреляции равен 0,63) и массы оболочки (коэффициент корреляции равен 0,60).

В заключение рассмотрим процесс воспламенения МВС через воздушную оболочку взрывом свободно подвешенного заряда ВВ [2]. Оказалось, что критическая толщина предохранительной воздушной оболочки ($\delta_{к.в.}$) превышает радиус продуктов взрыва ВВ (r_k), т.е. продукты взрыва не «достают» МВС при предельном их расширении (таблица).

Таблица. Результаты воспламенения МВС взрывом заряда ВВ через воздушную оболочку

Тип ВВ	$m_{ВВ}$, кг	r_k , м	$\delta_{к.в.}$, м	$\frac{\delta_{к.в.}}{r_k}$	$P_{ср.уд.}$, Н/м ² ·10 ⁶	$r_{ув}$, м	$r_в$, м при $P_r=1,0$ МПа	$r_в$, м при $P_r=0,7$ МПа
Аммонит 6ЖВ	0,2	0,46	0,62	1,33	3,124	0,297	0,525	0,627
-//-	0,4	0,58	0,95	1,626	3,165	0,373	0,664	0,793
Детонит 10А	0,2	0,48	0,74	1,55	3,243	0,3104	0,559	0,67
-//-	0,4	0,60	1,06	1,766	3,248	0,391	0,705	0,842

Итак, можно утверждать, что действие собственно продуктов взрыва ВВ ограничено весьма небольшими расстояниями. Вследствие нестационарности процесса расширения продуктов взрыва они будут достигать предельной границы путем ряда колебаний около этой границы. Сначала продукты взрыва, расширяясь, займут наибольший объем, т.е. произойдет их перерасширение, вследствие чего температура и

давление в них будет меньше, чем в окружающей атмосфере; затем внешнее давление «подожмет» их до давления несколько большего, чем то, что установилось на этот момент времени, и т.д. Поэтому роль продуктов взрыва при наличии оболочки из воздуха весьма ограничена и по-видимому они не влияют на сам процесс воспламенения МВС, так как $r_k < \delta_{к.в.}$.

В связи с этим необходимо рассмотреть роль, которую может взять на себя в процессе воспламенения МВС ударная волна, образовавшаяся в результате удара продуктов детонации о воздух. При этом будем считать, что ударная волна в виде относительно тонкого слоя как бы «сидит» на поверхности расширяющихся продуктов взрыва. Известное решение этой задачи в физике взрыва дает следующее соотношение:

$$V_{yв} \geq \left\{ 1 - [1 - (k-1)/2]^3 \right\} \cdot V_k, \quad (13)$$

где $V_{yв}$ — объем сферического взрыва, ограниченный ударной волной; V_k — предельный объем расширения.

Таким образом, воздушная ударная волна несколько ограничивает объем расширения продуктов взрыва (также как и жесткая оболочка). В дальнейшем она отрывается от них и распространяется по воздуху самостоятельно не зависимо от их дальнейшего расширения.

Среднее давление воздуха в воздушной ударной волне на момент ее отрыва от границы расширяющихся продуктов взрыва примерно равно:

$$P_{ср.у.в.} \approx (\gamma_a - 1) \cdot \rho_{ВВ} \cdot Q_v \cdot \frac{V_u}{V_{y.в.}} = \frac{(\gamma_a - 1) \cdot m \cdot Q_{ВВ}}{1 - [1 - (k-1)/2]^3 \cdot V_k}. \quad (14)$$

По мере удаления от центра взрыва давление во фронте ударной волны начнет падать примерно обратно пропорционально квадрату расстояния ($P \approx r^{-2}$). Дальнейшее падение давления будет менее интенсивным, а сама ударная волна не будет уже сильной.

Поэтому:

$$P_r = P_{ср.у.в.} \cdot \left(\frac{r_0}{r_{ys}} \right)^{-2} \quad \text{или} \quad r_0 = \frac{r_{yв}}{\left(\frac{P_r}{P_{ср.у.в.}} \right)^{0,5}}. \quad (15)$$

Как показывают расчеты, приведенные в таблице, при взрывании зарядов ВВ в воздушной оболочке роль ударной волны весьма значительна.

В этом случае расчет гораздо лучше согласуется с экспериментом.

Таким образом, можно говорить о том, что основная роль предохранительной оболочки вокруг заряда ВВ сводится к тому, чтобы ослабить действие на взрывоопасную среду ударной волны, которая образуется расширяющимися продуктами взрыва.

Библиографический список

1. Шевцов Н.Р. Теория локализации взрыва, способы и средства взрывозащиты горных выработок при взрывных работах: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Дон. политех. ин-т. — Донецк, 1992. — 45 с.

2. Шевцов Н.Р. Экспериментальный метод определения удельного теплопоглощения // Уровень динамики и причины производственного травматизма на угольных шахтах при проведении взрывных работ: Сб. научн. тр. МакНИИ. — Макеевка–Донбасс: изд. МакНИИ, 1983. — С. 9–13.

3. Калякин С.А., Шевцов Н.Р. Взаимодействие продуктов детонации ВВ с забоечным материалом при камуфлетном взрывании // Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда на угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. — Макеевка–Донбасс: изд. МакНИИ, 1988. — С. 47–53.

© Калякин С.А., Шевцов Н.Р., 2002

УДК 622.232.72

НЕЧЕПАЕВ В.Г. (ДонНТУ)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВЫГРУЗКИ УГЛЯ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Сложившаяся в топливно-энергетическом комплексе Украины ситуация определяет насущную потребность скорейшего совершенствования серийных и создания новых очистных машин для эффективной и рентабельной отработки тонких и весьма тонких пластов. Причем, учитывая современное экономическое положение, повышение технического уровня парка очистных машин целесообразно обеспечить при минимальных затратах на их модернизацию. Однако, созданию высокопроизводительных комбайнов для выемки тонких пологих пластов со шнековыми исполнительными органами, получившими преобладающее распространение во всех развитых угледобывающих странах, препятствует недостаточная их погрузочная способность. В то время как потребный уровень погрузочной способности постоянно возрастает в связи с ростом энерговооруженности и скорости перемещения комбайнов, известные пути и методы ее повышения практически исчерпали себя.

Для решения этой важной народнохозяйственной проблемы разработана концепция активной выгрузки, предусматривающая активацию рабочего процесса путем оказания дополнительного силового воздействия на перемещаемый шнеком уголь [1]. Созданы способы и средства реализации концепции, разработаны конструкторские и технологические решения применительно к существующим и проектируемым отечественным и зарубежным очистным комбайнам [2]. Разработана теория функционирования шнековых систем активной выгрузки [3 и др.]. На основе установленных закономерностей рабочих процессов таких систем решен комплекс задач структурно-параметрической оптимизации, позволившей синтезировать механо-гидродинамическую систему активной выгрузки (МГДСВ) для очистных комбайнов, в которой силовое активирующее воздействие на поток перемещаемого шнеком угля осуществляется напорными струями жидкости, генерируемыми специальными струеформирующими устройствами (СУ). В качестве рабочей жидкости, полностью или частично, используется жидкость, подаваемая в рабочую зону шнековых исполнительных органов для пылеподавления.

Установлено, что наиболее приемлемыми при современном уровне развития отечественного угольного комбайностроения являются следующие схемы расположения СУ: в зоне вращательного переноса угля на незабойную сторону шнека в соответствии с [4] (верхнее расположение); в зоне между разгрузочным торцом шнека и забойным конвейером в соответствии с [5] (нижнее расположение); одновременное