

А.А. Юрченко

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВЫБРОСА ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА ПРИ МАССОВЫХ ВЗРЫВАХ В КАРЬЕРАХ

Наведено результати теоретичних досліджень параметрів пилогазової хмари при проведенні вибухових робіт у кар'єрах: температури суміші газів, об'єму, закону руху газів та пилу при їх піднятті, кількості теплоти, яка віддається в атмосферу при охолодженні.

Приведены результаты теоретических исследований параметров пылегазового облака при ведении взрывных работ в карьерах: температуры смеси газов, объёма, закона движения газов и пыли при их подъёме, количества теплоты, отдаваемой в атмосферу при остывании.

The results of teoriticheskikh researches of parameter of pilegazovogo cloud at the conduct of explosive works in careers are resulted: temperatures of mixture of gases, volume, law of motion of gases and dust at their getting up, amount of warmth, given in an atmosphere at cooling off.

Открытый способ разработки месторождений полезных ископаемых, как наиболее экономичный и эффективный, развивается во всём мире и в ближайшем будущем следует ожидать увеличения объёмов буровзрывных работ, которые являются основным способом разрушения горных пород. При этом на долю буровзрывных работ приходится 35% и более общего объёма загрязнения окружающей среды, что приводит к катастрофическим экологическим и социальным последствиям. Так, только на карьерах и ГОКах Днепропетровской области в результате проведения массовых взрывов ежегодно выбрасывается в атмосферу более 612 тыс. тонн вредных веществ, в т.ч. 76 тыс. тонн твёрдых и 536 тыс. тонн газообразных и жидких веществ.

После массового взрыва, в зависимости от его мощности, пылегазовое облако объёмом от несколько тысяч до нескольких миллионов кубических метров выбрасывается на высоту до 1,5 км, распространяется по всему карьере и, вовлеченное в атмосферные потоки, распространяется на десятки и сотни километров по прилегающим территориям. Таким образом, проблема уменьшения выбросов при массовых взрывах в карьерах является на сегодняшний день весьма актуальной.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование параметров пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах.

Известно, что зарождение и формирование пылегазового облака (ПГО) представляет собой высокоэнергетический, сложный и быстропотекающий процесс. После взрыва зарядов взрывчатых веществ (ВВ) продукты детонации обладают высоким давлением и температурой, которые в процессе расширения изменяются до конечных значений.

Горные породы разрушаются под воздействием продуктов детонации ВВ, ударных волн и волн разрушения, возникающих при взрыве. В настоящее время многими исследователями в области физики взрыва трактуется трёхстадийная волновая теория процесса разрушения горных пород [1]. Первая ста-

дия процесса характеризуется образованием радиальных трещин, развивающихся от источника взрыва по направлению к свободным поверхностям. Вторая – обусловлена отражением ударных волн. При этом в горном массиве возникают большие растягивающие напряжения и в конечном итоге образуются новые трещины. Возникновение новых трещин и пересечение их с ранее образованными трещинами приводит к созданию пространственной сетки трещин. Продукты детонации, находясь под большим давлением, проникают в трещины, увеличивая их размеры. При этом увеличивается и дальность распространения разрушения. Заключительная стадия разрушения характеризуется воздействием уже расширившихся продуктов детонации, которые к моменту полного расширения облака обладают большой энергией. Расширение продуктов детонации в горном массиве, согласно данным Ф.А. Баума [2], протекает до тех пор, пока давление их не станет равным прочностному сопротивлению среды на сжатие.

Работа разрушения горного массива совершается за счёт внутренней энергии взрывчатого вещества. При этом одна часть тепловой энергии ВВ будет затрачиваться на разрушения массива, а другая – на расширение газов до объёма, который они будут занимать при полном расширении в атмосфере.

В стадии зарождения ПГО представляет собой условный объект с оболочкой высокой плотности и температуры, обладающий большим запасом кинетической и тепловой энергии, который имеет незначительные геометрические параметры. В стадии развития ПГО представляет собой условный объект с оболочкой в виде полидисперсной (пылегазовоздушной) среды незначительной плотности и с температурой, равной температуре окружающей среды, который при окончании своего развития теряет оболочку и имеет значительные геометрические параметры (до десятков млн куб. м).

Результаты исследований, приведенные в [3], характеризуют физические и газодинамические процессы образования ПГО во времени:

- 0-180 мс – вылет и перемещение забойки скважин;
- 180-560 мс – выход взрывных газов и пыли из скважин и догорание остатков ВВ в атмосфере;
- 0-560 мс – выход пыли и газов в атмосферу по трещинам горных пород;
- 180-800 мс – период существования чётких границ видимого контура оболочки ПГО (от момента формирования до начала рассеивания контура оболочки);
- 80-560 мс – формирование теплового эпицентра ПГО;
- 180-560 мс – формирование пылевого эпицентра ПГО;
- 280-800 мс – формирование эжекционных потоков в основании ПГО;
- 1-5 с – период подъёма ПГО по вертикали с учётом инерционного расширения ПГО;
- 5-30с – начало периода торможения и рассеивания ПГО под действием ветровых потоков.

Развитие ПГО при массовом взрыве в атмосфере карьера происходит в следующей последовательности:

- 1 – процесс зарождения ПГО (интервал времени 0-560 мс);
- 2 – процесс формирования ПГО (интервал времени 560-5000 мс);
- 3 – процесс распространения ПГО в атмосфере карьера (интервал времени 5-30 с).

Проведёнными исследованиями установлено, что за первые $t = 800$ мс под действием энергии взрыва ПГО выбрасывается на высоту $H = 100-120$ м. При этом скорость движения всех компонентов облака составляет $u = H/t = 125-150$ м/с. Период формирования эпицентров не зависит от метеорологических параметров атмосферы.

При разработке проекта массового взрыва определяется контур взрываемого участка, который по площади уступа имеет ширину B и длину L . После производства взрыва в первые 800 мс ПГО выбрасывается на высоту $H = 100-120$ м и имеет в стадии зарождения температуру около 2500 °С. Таким образом, в результате первого этапа зарождения ПГО образуется исходный объём раскалённых газов и пыли $V_1 = BLH$. В течение 280-800 мс заканчивается формирование теплового и пылевого эпицентров ПГО и начинается формирование эжекционных потоков и подъём облака по вертикали.

При взрыве 1 кг ВВ выделяется от 700 до 1000 л взрывных газов [4], которые содержат углекислого газа (CO_2) – 98,5%, окислов азота (NO , NO_2) – 0,2%, окиси углерода (CO) – 1,3%. Эти газы в период зарождения ПГО занимают объём

$$V_1 = 1000 Q, \text{ л,}$$

где Q – масса заряда ВВ при массовом взрыве, кг.

В исходный объём ПГО, кроме взрывных газов, поступает и атмосферный воздух в количестве

$$V_2 = V_1 - V_2.$$

Таким образом, в исходный объём ПГО поступают взрывные газы V_2 температурой t_2 и атмосферный воздух V_2 температурой t_2 . Определим массу этой смеси и её температуру.

Масса смеси газов равна сумме масс газов, составляющих смесь:

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_i \quad \text{или} \\ m = p_1 V_{21} + p_2 V_{22} + \dots + p_i V_{2i},$$

где $m_i = \rho_i V_{2i}$ – масса i -го газа смеси, кг; i – порядковый номер газа смеси; p_i – плотность i -го газа смеси, кг/м³; V_{2i} – объём i -го газа в смеси, м³.

Так как газы при смешивании не совершают внешней работы, то внутренняя энергия смеси газов, согласно первому закону термодинамики, равна сумме внутренних энергий отдельных газов до смешивания [5]

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i,$$

где U – внутренняя энергия смеси газов, Дж; U_i – внутренняя энергия i -го газа, Дж; n – количество газов, составляющих газовую смесь.

Внутренняя энергия газа определяется по выражению

$$U = m C_p T,$$

где m – масса газа, кг; C_p – удельная массовая теплоёмкость газа при постоянном давлении, Дж/кг·К; T – температура газа, К.

$$\text{Поэтому} \quad \begin{aligned} U_1 &= m_1 C_{p1} T_1, \\ U_2 &= m_2 C_{p2} T_2, \\ U_i &= m_i C_{pi} T_i, \end{aligned}$$

где C_{pi} – массовая теплоёмкость газов, составляющих смесь, Дж/кг К ($i=1, 2, \dots, n$); T_i – температура газов, составляющих смесь, К.

$$\text{Тогда } m C_p T = m_1 C_{p1} T_1 + m_2 C_{p2} T_2 + \dots + m_n C_{pn} T_n$$

$$\text{или} \quad C_p T = q_1 C_{p1} T_1 + q_2 C_{p2} T_2 + \dots + q_n C_{pn} T_n, \quad (1)$$

где C_p – массовая теплоёмкость смеси газов, Дж/кг К; T – температура смеси газов, К; $q_i = \frac{m}{m_i}$ – массовые доли газов, составляющих газовую смесь.

Теплоёмкость смеси газов определяют по выражению [5]:

$$C_p = q_1 C_{p1} + q_2 C_{p2} + \dots + q_n C_{pn} = \sum_{i=1}^n q_i C_{pi}.$$

Тогда выражение (1) примет вид $T (q_1 C_{p1} + q_2 C_{p2} + \dots + q_n C_{pn}) = q_1 C_{p1} T_1 + q_2 C_{p2} T_2 + \dots + q_n C_{pn} T_n$.

Отсюда находим температуру смеси газов на первом этапе зарождения пылегазового облака

$$T = \frac{q_1 C_{p1} T_1 + q_2 C_{p2} T_2 + \dots + q_n C_{pn} T_n}{q_1 C_{p1} + q_2 C_{p2} + \dots + q_n C_{pn}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i C_{pi} T_i}{\sum_{i=1}^n q_i C_{pi}}. \quad (2)$$

Таким образом, по истечении 800 мс после взрыва и смешивания раскалённых газов, пыли и атмосфер-

ного воздуха пылегазовое облако будет иметь объём V_1 и температуру T , которую можно определить по выражению (2).

Дальнейшее расширение ПГО происходит под воздействием тепловых и инерционных процессов при постоянном давлении, равном атмосферному, так как давление в расширяющихся продуктах детонации и в воздухе быстро выравнивается. Согласно исследованиям в области физики, это выравнивание происходит со скоростью распространения звука в данном газе. Для упрощения рассмотрения процесса принимаем условия, при которых отсутствует боковой ветер, влияние электромагнитных полей и другие факторы. При расширении продуктов детонации будет уменьшаться их плотность, закон изменения которой можно установить из следующих соображений.

Запишем уравнение состояния газов для момента образования первичного облака:

$$P_1 = \rho_1 R T_1,$$

где P_1 – давление газов детонации, Н/м²; ρ_1 – плотность смеси газов, кг/м³; R – удельная газовая постоянная; T_1 – температура смеси газов, К.

При расширении облака эти параметры будут изменяться и для момента окончания процесса расширения уравнение состояния можно записать в следующем виде: $P_2 = \rho_2 R T_2$.

Разделим эти выражения друг на друга:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1 T_1}{\rho_2 T_2}.$$

Отсюда $\rho_2 = \rho_1 \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2}$. Заменяя величины ρ_1 и ρ_2

обратными $\rho_1 = \frac{1}{V_1}$; $\rho_2 = \frac{1}{V_2}$, получаем

$$V_2 = V_1 \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1}. \quad (3)$$

Здесь V_2 – объём облака по окончании процесса расширения, м³; P_2 – давление внутри облака, равное атмосферному, Па; T_2 – температура смеси газов облака после остывания, равная температуре окружающей среды, К.

Выражение (3) можно записать как

$$\frac{V_2}{V_1} = K \frac{T_2}{T_1},$$

где $K = \frac{P_1}{P_2}$ – коэффициент пропорциональности,

равный соотношению давлений в начале и конце процесса расширения облака.

Таким образом, можно сделать вывод, что при остывании и расширении пылегазового облака изменение его объёма пропорционально изменению его температуры.

В процессе расширения ПГО от исходного объёма V_1 , формирование которого заканчивается по истечении 800 мс после взрывания ВВ, до конечного объёма V_2 , формирование которого заканчивается по истечению до 30 с после взрыва, в него в результате

эжекционных процессов и за счёт поперечной диффузии газов поступает атмосферный воздух в количестве, равном разности этих объёмов:

$$V_B = V_2 - V_1,$$

где V_B – количество атмосферного воздуха, поступающего в ПГО в результате эжекционных процессов, м³.

Поэтому конечный объём ПГО при отсутствии бокового ветра можно определить по известным количествам поступивших в него взрывных газов и их концентрации в конце процесса расширения. В соответствии с данными измерения концентрации взрывных газов, приведенных в работе [6], их максимальная концентрация через 40 с после взрыва составляет: CO₂ – 5-10 %; NO, NO₂ – 0,006-0,02%; CO – 0,07-0,13%. Исходя из этого, конечный объём ПГО можно определить из выражения:

$$V_2 = \frac{V_G}{\sum c_i} \cdot 100, \text{ м}^3,$$

где $\sum_{i=1}^n c$ – суммарная концентрация взрывных газов в ПГО, %.

Известно, что при изобарном процессе изменение объёма газов от его температуры описывается линейными VT-диаграммами. А раз это так, то и скорость движения газов в облаке при его расширении уменьшается по линейному закону, то есть

$$u = u_0 - a t,$$

где u – текущее значение скорости движения газов в облаке, м/с; u_0 – начальная скорость движения газов в облаке, равная скорости движения газов в конце первого периода формирования ПГО по истечению 800 мс после взрыва, м/с; a – замедление движения газов в облаке, м/с²; t – текущее время, с.

При расширении ПГО взрывные газы остывают и отдают тепло в окружающую среду. Это тепло можно определить по выражению:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} C_{pm} dT = C_{pm} (T_2 - T_1),$$

где C_{pm} – средняя теплоёмкость газовой смеси, Дж/°К; T_1 – начальная температура газового облака, °К; T_2 – конечная температура газового облака, К.

Среднюю массовую теплоёмкость газовой смеси определим по выражению

$$C_{pm} = \sum_{i=1}^n q_i C_{pi},$$

где C_{pm} – средняя теплоёмкость газовой смеси, Дж/кг К; q_i – массовая доля i -го газа; C_{pi} – массовая теплоёмкость i -го газа, Дж/кг К; n – количество компонентов газовой смеси.

Наиболее мощным источником выделения пыли в окружающую среду при ведении открытых горных

работ являются массовые взрывы. Исследования аэропылегазодинамики карьеров [6, 7] позволили установить три основных типа пылевого облака: первичное, вторичное и взмётывание ранее осевшей пыли вследствие воздействия ударной воздушной волны и сейсмических колебаний.

Первичное облако вредных аэрозолей образуется в результате выброса пылегазовой смеси из устья скважины со скоростью 10^2-10^3 м/с за счёт кинетической энергии взрыва (динамического фактора). В это облако попадает измельчённая порода, оторвавшаяся от стенок зарядной камеры и расположенная в районе устья скважины, и буровой шлам. Дальнейший подъём пылегазового облака (всплывание) происходит под действием аэродинамических сил, возникающих за счёт разности температур газообразных продуктов взрыва и окружающей среды (температурного фактора). В процессе подъёма аэрозольное облако охлаждается за счёт расширения и присоединения к его объёму (вовлечению) более холодных масс окружающей атмосферы. Подъём пылегазовых аэрозолей происходит до момента, когда их температура становится соизмеримой с температурой окружающей среды. Главным фактором, определяющим высоту подъёма первичного облака, является мощность взрыва, термическая и ветровая стратификация атмосферы.

Обычно высота подъёма h_0 не превышает 200-250 м и более точно может быть определена по формуле [8]

$$h_0 = t / [(y_a - y) - (t_c/g) (c \ v)^2 R^{-4/3}],$$

где t – разность температур продуктов взрыва и окружающей среды t_c на высоте 10-15 м от взрывающей поверхности, °С; $y_a = 0,98$ °С/100 м – адиабатический градиент; y – вертикальный температурный градиент, °С/100 м; g – ускорение свободного падения, м/с; $c, \ v$ – экспериментальные постоянные ($c = 11,5; \ v = 0,2$); R – начальный радиус пылегазового облака, м, равный

$$R = \frac{\sqrt[3]{3V}}{4\pi},$$

где V – объём газов, выделившихся при взрыве ВВ, м³.

Здесь $V = m A V_0$, где $m = 0,6-0,75$ – коэффициент, учитывающий действительное количество газов, поступивших в атмосферу (часть газов остаётся во взорванной горной массе); $V_0 = 0,7-1,1$ м³ – объём газов, образующихся при взрыве 1 кг ВВ; A – расход ВВ, кг.

Сформировавшееся на определённой высоте первичное пылегазовое облако под влиянием ветра распространяется на значительные расстояния с постепенным снижением концентрации вредностей в своём объёме. Наблюдения, проведенные ВНИИБТГ, показали, что объём пылегазового облака при взрывании 200-300 т ВВ достигает 15-19,5 млн м³, начальная концентрация пыли в нём превышает 4000 мг/м³, а визуально наблюдаемое его распространение по ветру достигает 15 км.

Исследованиями установлено, что с повышением удельного расхода ВВ интенсивность пылевыделений резко возрастает. Такое явление объясняется как повышением концентрации ВВ в массиве, так и увеличением длины заряда, что приводит к преждевременному раскрытию воронки взрыва на поверхности и свободному истечению пылегазовой смеси в атмосферу.

Вторичное пылевое облако образуется после взрыва в зоне отброса пыли и газов на подошве уступа в радиусе разлёта кусков породы.

Источники образования пылевого облака третьего типа располагаются в зоне взмётывания ранее осевшей пыли вследствие воздействия на неё ударной воздушной волны и сейсмических колебаний.

Большой интерес у исследователей вызывает дисперсный состав пылевого облака при массовом взрыве [3, 6, 7]. Аэровзвеси и крупнодисперсная пыль оседают непосредственно после взрыва, а тонкодисперсная увлекается восходящим потоком газозвушной смеси. Процесс её осаждения происходит дифференцировано в зависимости от веса и размера частиц. Необходимо провести теоретические исследования по определению высоты подъёма частиц пыли в ПГО в зависимости от их плотности, диаметра и начальной скорости движения, обусловленной мощностью массового взрыва.

Выводы

В результате теоретических исследований параметров пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах установлено, что объём облака при его расширении и скорость подъёма пылегазового смеси изменяется по линейному закону.

Разработанная методика определения температуры смеси газов в процессе зарождения и формирования облака позволяет вычислить количество теплоты, отдаваемое в атмосферу при его остывании.

Список литературы

1. Савенко С.К., Морозов Е.Г., Бережной В.И. Аэрогазодинамика массовых взрывов в рудниках. – М.: Недра, 1976. – 183 с.
2. Баум Ф.А. Физика взрыва. – М.: Физматгиз, 1959. – 800 с.
3. Зберовский А.В. Охрана атмосферы в экосистеме «карьер-окружающая среда-человек». – Д.: РИО АП ДКТ, 1997. – 136 с.
4. Ушаков К.З., Михайлов В.А. Аэрология карьеров. – М.: Недра, 1985. – 272 с.
5. Беляев Н.М. Термодинамика. – К.: Вища школа, 1987. – 343 с.
6. Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах / Э.И. Ефремов, П.В. Бересневич и др. – Д.: Січ, 1996. – 178 с.
7. Гороновский И.Т. Краткий справочник по химии. – К.: Наук. думка, 1965. – 835 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.Є. Колесником 03.12.09