

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ МГНОВЕННОЙ И ЦЕПНОЙ РЕАКЦИЯХ ГОРЕНИЯ МЕТАНА И ПЫЛИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко, Научно-исследовательский институт горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор», Донецк, Украина

Проанализированы результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований по возникновению и распространению ударных волн в горных выработках. Показано, что при взрывах большой мощности необходимо пользоваться моделью не мгновенной, а цепной реакция горения метана и пыли, так как задание начального большого избыточного давления на участках выработки 100 – 200 м и более приводит к длительному угасанию ударных волн и не соответствует действительности.

Постановка проблемы. Последние достижения и публикации. В работах [1–5] проанализированы публикации, в которых приведены условия возникновения взрывов, образования и распространения ударных волн по горным выработкам. Показаны недостатки существующей методики определения параметров воздушных волн при взрывах газов и пыли в горных выработках. В работах [4, 6–8] сформулирована математическая модель газодинамических явлений при взрывах газовых смесей, приводящих к возникновению ударных волн. Получено и проанализировано аналитическое решение задачи. Показано, что расчет давления в зоне взрыва необходимо вести с заданием объема загазирования выработки и ожидаемой температуры в результате быстрого воспламенения смеси.

При мгновенном распространении горения метана и пыли в горной выработке, образуется зона высокого давления в зависимости от объема взорванной массы, что позволяет, как и ранее, задавать участок выработки с наперед заданным давлением.

С другой стороны, при быстром, но не мгновенном распространении горения метана и пыли необходимо задавать не скачок давления на некоторой длине выработки, а включать мощный мгновенный тепловой источник, распространяющийся с большой скоростью на указанной длине.

Цель статьи. Формулировка задачи, получение решения и моделирование процесса распространения ударной волны по горным выработкам с использованием мгновенного мощного источника тепловыделения при взрыве.

Материалы исследований. Для моделирования распространения ударных волн использована система уравнений [4, 8], в которую добавлен мгновенный источник мощного тепловыделения при взрыве:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + c \frac{\partial(\bar{u})}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial(\bar{u})}{\partial t} + c \frac{\partial(\bar{P} + \bar{u}^2 / \bar{\rho})}{\partial x} &= - \frac{\lambda_0 \Pi c}{8S} \bar{u} |\bar{u}| / \bar{\rho} \\ \frac{\partial(\bar{E})}{\partial t} + c \frac{\partial[(\bar{E} + \bar{P})\bar{u} / \bar{\rho}]}{\partial x} &= \frac{\alpha \Pi}{\rho_0 B S} (1 - \bar{P} / \bar{\rho}) + \frac{q(x, t)}{\rho_0 B T_0}, \end{aligned} \quad (1)$$

где,

$\bar{\rho} = \rho / \rho_0$ – относительная плотность газа; $\bar{P} = P / P_0$ – относительное давление; $\bar{u} = \rho u / \rho_0 c$ – относительная массовая скорость; $c = \sqrt{P_0 / \rho_0}$ – скорость, пропорциональная звуковой, м/с; \bar{E} – относительная внутренняя энергия газа; λ_0 – коэффициент гидравлического сопротивления; α – коэффициент теплоотдачи стенкам канала, Вт/(К·м²); Π – периметр поперечного сечения выработки, м; S – площадь поперечного сечения выработки, м²; B – газовая посто-

янная, Дж/(кг·К); T_0 – температура при нормальных условиях, К; ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³; P_0 – давление при нормальных условиях, Па; q – количество теплоты, выделяемой в единице объёма выработки при цепной реакции горения, как функция мгновенного источника, перемещающегося вдоль зоны загазования с определённой скоростью, Вт/м³.

Входящая в третье уравнение системы (1) безразмерная функция внутренней энергии имеет вид

$$\bar{E} = \frac{1}{\gamma-1} \bar{P} + \frac{\bar{u}^2}{2\bar{\rho}}, \quad (2)$$

где γ – отношение удельных теплоёмкостей газов.

Для моделирования численными методами процессов цепной реакции горения и распространения ударных волн система уравнений (1) и (2) представлена в конечных разностях

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_m^{n+1} &= \bar{\rho}_m^n + Cu(\bar{u}_{m-1}^n - \bar{u}_{m+1}^n)/2 + kCu(\bar{\rho}_{m-1}^n - 2\bar{\rho}_m^n + \bar{\rho}_{m+1}^n); \\ \bar{u}_m^{n+1} &= \frac{(1 - \bar{r}Cu|\bar{u}_m^n|/2\bar{\rho}_m^n)\bar{u}_m^n + Cu(\bar{P}_{m-1}^n - \bar{P}_{m+1}^n + \bar{u}_{m-1}^{n2}/\bar{\rho}_{m-1}^n - \bar{u}_{m+1}^{n2}/\bar{\rho}_{m+1}^n)/2}{1 + \bar{r}Cu|\bar{u}_m^n|/2\bar{\rho}_m^n}; \\ \bar{P}_m^{n+1} &= \bar{P}_m^n + (\gamma-1)(\bar{u}_m^{n2}/\bar{\rho}_m^n - \bar{u}_m^{n+12}/\bar{\rho}_m^{n+1})/2 + \\ &+ Cu\{\gamma\bar{P}_{m-1}^n + (\gamma-1)\bar{u}_{m-1}^{n2}/2\bar{\rho}_{m-1}^n\}\bar{u}_{m-1}^n/\bar{\rho}_{m-1}^n - \\ &- [\gamma\bar{P}_{m+1}^n + (\gamma-1)\bar{u}_{m+1}^{n2}/2\bar{\rho}_{m+1}^n]\bar{u}_{m+1}^n/\bar{\rho}_{m+1}^n\}/2 + kCu(\bar{P}_{m-1}^n - 2\bar{P}_m^n + \bar{P}_{m+1}^n) + \\ &+ \bar{\alpha}Cu(1 - \bar{P}_m^n/\bar{\rho}_m^n) + Cu\bar{q}_m^n, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{r} = \frac{\lambda\Delta x}{2\sqrt{S}}$ – относительное аэродинамическое сопротивление участка выработки;

$\bar{\alpha} = \frac{(\gamma-1)\alpha\Pi\Delta x}{\rho_0 cBS}$ безразмерный коэффициент теплоотдачи стенкам выработки;

$\bar{q}_m^n = \frac{(\gamma-1)q_m^n\Delta x}{c\rho_0 BT_0}$ безразмерная функция тепловыделения при цепных реакциях горения.

Здесь использовались центральные разности по пространственным координатам со схемными диффузией газов и диссипацией энергии, а также комбинированная схема для аэродинамического трения о стенки выработки.

Верхний индекс « n » в формулах (3) соответствует предыдущему временному слою, а индекс « $n+1$ » – искомому временному слою. Нижний индекс « m » соответствует данным в центральной точке на определённой длине выработки, а с плюсом и минусом соответственно справа и слева от центральной точки.

При расчётах вначале принималось начальное распределение давления в виде его скачка на некоторой длине выработки при отсутствии цепной реакции горения ($\bar{q}_m^n=0$). При этом отношение удельных теплоёмкостей газов принималось равным $\gamma = 1,4$; а периметр выработки равным $\Pi = 4\sqrt{S}$.

Как показали расчёты, коэффициенты схемных диффузии и диссипации энергии могут быть приняты одинаковыми, однако они должны зависеть от начального удельного давления.

Данные расчётов при $P_1/P_0 \leq 30$ показывают, что указанные коэффициенты могут быть определены по формуле

$$k = 0,05 P_1/P_0. \quad (4)$$

При расчётах с учётом формулы (4) исключаются огромные осцилляции, не соответствующие действительности при числе Куранта $Cu \leq 0,1$ и коэффициенте аэродинамического сопротивления $\lambda \geq 0,02$.

На рис. 1 приведены результаты численного моделирования распространения ударных волн в тупиковой выработке при взрыве метана, как и принималось ранее в работе [4], с начальным скачком давления $P_1/P_0 = 4$ на длине выработки 50 м от её забоя. В остальной части выработки начальное давление $P_1/P_0 = 1$.

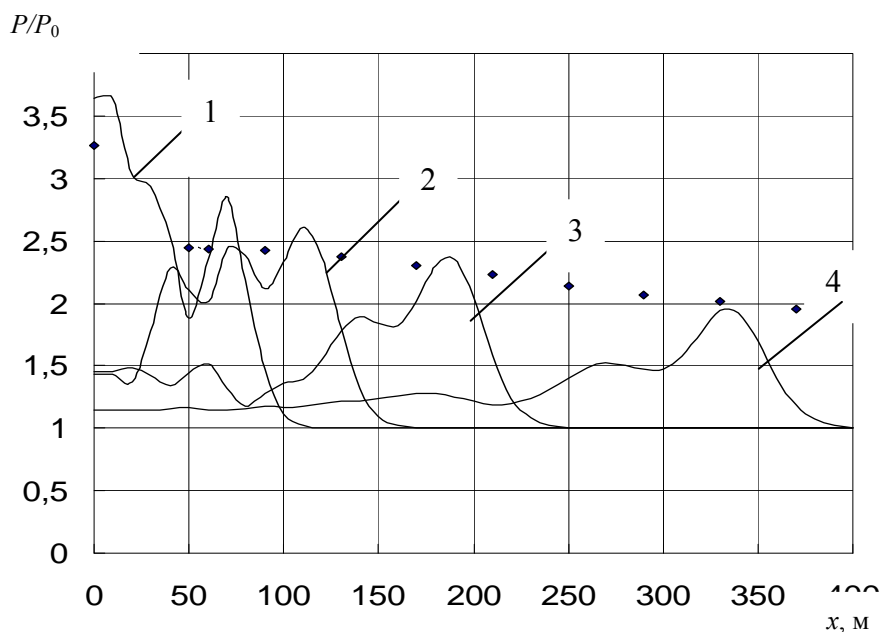


Рис. 1. Распределение давления в тупиковой выработке в различные моменты времени после взрыва метана (1 – 0,066 с; 2 – 0,165 с; 3 – 0,33 с; 4 – 0,66 с)

Здесь же приведены известные данные [4] моделирования изменения максимального давления вдоль тупиковой выработки в виде огибающей кривой (маркеры). Расчёты проводились при общих одинаковых исходных данных: площадь поперечного сечения выработки $S = 10 \text{ м}^2$; $\bar{r} = 0,1$; $\bar{\alpha} = 0,001$.

Сравнение полученных расчётных данных с известными данными [4] моделирования показывает, что пики максимальных давлений вдоль выработки примерно совпадают с их огибающей кривой, однако сами кривые, полученные авторами работы [4], являются гладкими кривыми без осцилляций, что вызывает сомнение, как они были получены без введения в рассмотрение схемных коэффициентов диффузии массы газов и диссипации энергии в виде статического давления.

На рис. 2 приведены результаты моделирования распространения ударных волн при взрывах метана с последующим взрывом пыли на расстоянии от забоя выработки 200 – 250 м при тех же исходных данных, что и в предыдущем примере.

Данные моделирования показывают, что на расстоянии 200 – 250 м от забоя выработки слой пыли на стенках выработки переходит во взвешенное состояние и взрывается. При этом принималось в соответствии с данными [4], что дополнительное избыточное давление при взрыве пыли составляет 30 % от начального и равно 0,09 МПа.

Как видно, взрыв пыли вызывает скачок давления на расстоянии 200 м от забоя, после чего скачок быстро уменьшается, что связано с небольшой длиной выработки.

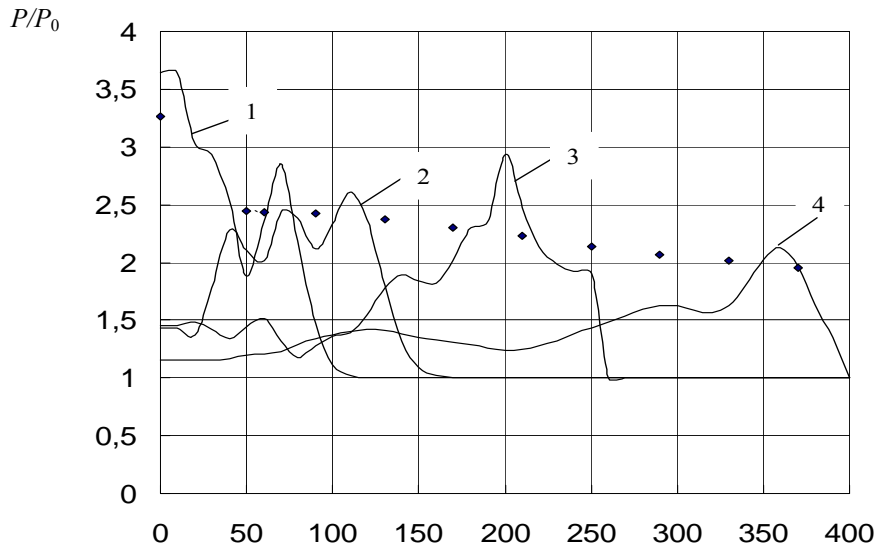


Рис. 2. Распределение давления в тупиковой выработке в различные моменты времени после взрыва метана с последующим взрывом пыли (1 – 0,066 с; 2 – 0,165 с; 3 – 0,33 с; 4 – 0,66 с)

Дальнейшие расчёты были выполнены при цепной реакции горения метана, когда не задаётся начальное распределение давления в виде скачка на некоторой площадке, а вводится в третью формулу системы (3) функция мгновенного источника тепловыделения на каждой итерации по времени в виде

$$\bar{q}_m^n = 3,5n\Delta x / \sqrt{S}, \quad (5)$$

При этом принято, что число $n < N \approx 70\sqrt{S/\Delta x}$ меньше некоторого целого числа, соответствующего длине зоны загазирования выработки при достижении в её конце максимального значения давления 2,8 МПа.

На рис. 3 приведены результаты моделирования распространения избыточного давления по тупиковой выработке при цепной реакции горения на отрезке длиной 220 м, что по данным [9] соответствует давлению 2,8 МПа на конце указанного участка от забоя выработки при площади её поперечного сечения $S = 10 \text{ м}^2$.

Здесь же круглыми маркерами приведены известные данные [9], указывающие на границы максимальных избыточных давлений в выработке, закреплённой металлической крепью с железобетонной затяжкой, сечением $S = 10 \text{ м}^2$ и аэродинамическим сопротивлением $\lambda = 0,12$, соответствующим сопротивлению, принимаемому в рудничной аэрологии равным $0,018 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$.

Результаты сравнения данных численного моделирования динамики ударных волн при цепной реакции горения с известными данными [9] показывают, что границы максимальных избыточных давлений примерно совпадают, однако в нашем случае отмечаются несколько более высокие их значения, что создаёт некоторый порог надёжности при выборе безопасных расстояний для ведения горноспасательных работ.

Кроме того, при численном моделировании установлено, что нельзя принимать начальное распределение давлений в виде скачка на участке длиной более 50 м.

Это приводит к длительному угасанию ударных волн и не соответствует действительности. Поэтому в этом случае следует рассматривать процессы с цепной реакцией горения метана и пыли.

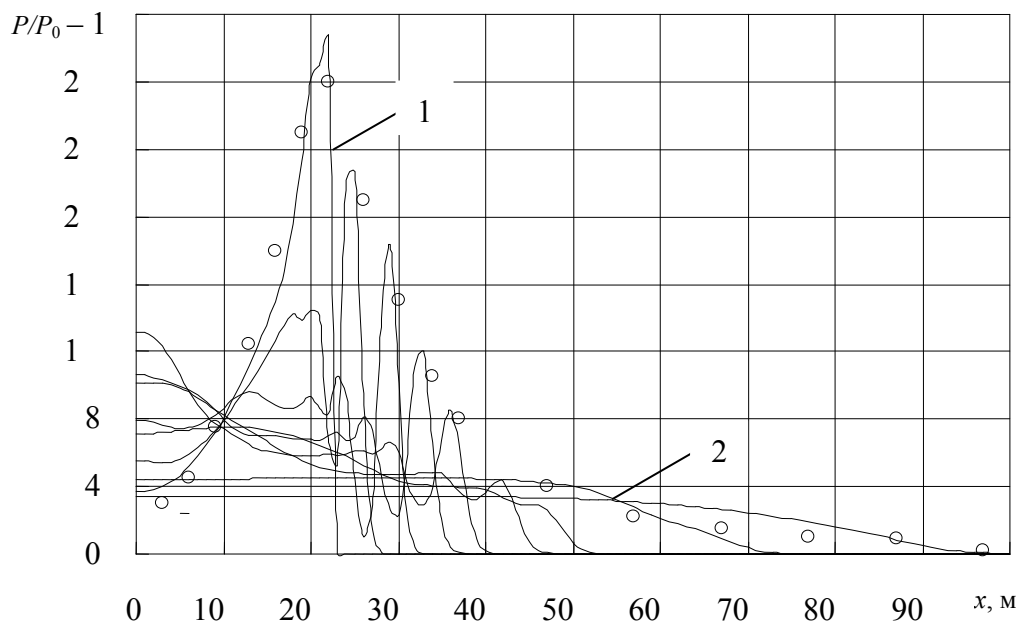


Рис. 3. Распределение относительного избыточного давления в тупиковой выработке в различные моменты времени после взрыва метана (1– 0,076 с; 2 – 1,15 с)

Выводы. Разработана математическая модель возникновения ударных волн при цепной реакции быстрого горения метана и пыли. Установлено в результате полученных численных экспериментов и их сравнения с известными данными динамики ударных волн при максимальном избыточном давлении 2,8 МПа, что они удовлетворительно согласуются друг с другом.

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н.Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
2. Бобров А.И. Борьба с местными скоплениями метана в угольных шахтах / А.И. Бобров. – М.: Недра, 1988. – 148 с.
3. Иванов Б.А. Физика взрыва ацетилена / Б.А. Иванов. М.: Химия, 1969. – 180 с.
4. Палеев Д.Ю. Математическое моделирование активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев, О.П. Бранднер. – Томск: изд-во Томского университета, 1999. – 201 с.
5. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А.Е. Усинов, А.Е. Голлик, Д.Ю. Палеев, Н.Р. Шевцов. М.: Недра, 1990. – 286 с.
6. Гурин А.А. Исследование параметров взрывов сложных газоздушных смесей, образующихся при производстве взрывных работ в подземных выработках: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Гурин. – Кривой Рог, 1967. – 159 с.
7. Тихонов А.Н. Уравнение математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
8. Агеев В.Г. Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 5 – 10.
9. Устав ВГСЧ по организации и ведению горноспасательных работ. – М.: Недра, 1986. – 254 с.