

УДК 519.6

Компьютерное моделирование развития, распространения и локализации взрывов метано-воздушных смесей в горных выработках

В. Г. Агеев, С. П. Греков, И. Н. Зинченко, Т. Г. Салахутдинов
*Научно-исследовательский институт горноспасательного
дела «Респиратор», Украина*

Рассмотрен численный метод расчета параметров воздушных ударных волн в сети горных выработок. Предложена численная схема для определения параметров воздушных ударных волн на сопряжениях горных выработок. Для описания процесса горения метановоздушной смеси использована модель цепных реакций. Разработаны алгоритм и программа, реализующая описанный метод и позволяющая прогнозировать расположение безопасных мест ведения горноспасательных работ в сети горных выработок при взрывах метановоздушной смеси.

Ключевые слова: *воздушная ударная волна, местное сопротивление, цепная реакция, сеть горных выработок.*

Розглянуто чисельний метод розрахунку параметрів повітряних ударних хвиль у мережі гірничих виробок. Запропонована чисельна схема для визначення параметрів повітряних ударних хвиль в місцях сполучення гірничих виробок. Для опису процесу горіння метаноповітряної суміші використана модель ланцюгових реакцій. Розроблені алгоритм і програма, які реалізують описаний метод і дозволяють прогнозувати розташування безпечних місць ведення гірничорятувальних робіт в мережі гірничих виробок при вибухах метаноповітряної суміші.

Ключові слова: *повітряна ударна хвиля, місцевий опір, ланцюгова реакція, мережа гірничих виробок.*

The numerical method of calculation of parameters of air shock waves in the mine workings network is considered. The numerical scheme to determine the parameters of the shock waves at the mine workings connections is suggested. Chain reaction model to describe combustion action of methane-air mixture is used. The algorithm and the program realizing the method described and allowing the forecast of the situation of the safe places of carrying-out the mine-rescue operations in the mine workings network by methane explosions are worked out.

Key words: *shock wave, local resistance, chain reaction, mine workings network.*

1. Постановка проблемы и обзор публикаций по теме исследования

В газовых шахтах открытое пламя, короткое замыкание в электросиловых или осветительных сетях и взрывные работы могут явиться источниками воспламенения метано-воздушных или пылевоздушных смесей. Процесс воспламенения при определенных условиях может переходить в горение, а затем и во взрыв большой разрушительной силы. Взрывы метано-воздушных и пылевоздушных смесей вызывают образование воздушных ударных волн (ВУВ), которые, распространяясь на большие расстояния, разрушают сооружения, коммуникации, оборудование и прочие устройства, как в подземных условиях, так и на поверхности. Это обуславливает значительные расходы средств на ремонтно-восстановительные работы, увеличивает время проветривания шахт и

влечет за собой вынужденные простои горных предприятий. Кроме того, ВУВ представляют опасность для людей.

Ранее выполненные исследования дали основания для создания методики расчета безопасных расстояний при взрывах газа и пыли в сети горных выработок [1]. Однако, упомянутая методика не учитывает динамического поведения ВУВ, отражения ВУВ от стенок выработок, увеличения давления во фронте ВУВ за счет наложения нескольких ВУВ. В работе [2] использован газодинамический подход к решению задачи распространения ВУВ, однако решение находится только лишь на прямолинейных участках горных выработок в случае стационарного режима. Авторами [3] предложен численный метод решения задачи распространения и взаимодействия ВУВ в сети горных выработок. Особенностью этого метода является решение двумерной системы Эйлера на сопряжениях горных выработок. Однако такой подход значительно увеличивает время расчета параметров ВУВ в сети горных выработок. Особенно это заметно в случае крупных шахт, число выработок и сопряжений в которых достигает порядка нескольких сотен.

2. Нерешенные части проблемы

Решение задачи распространения ВУВ в сети горных выработок зависит от многих факторов. Концентрация метана в загазованной области, скорость распространения пламени, наличие или отсутствие пыли обуславливают вид начального условия для поставленной задачи. Ранее [3] в качестве начальных условий для задачи распространения ВУВ в горных выработках использовались условия вида:

$$\begin{aligned} \bar{P}(x,0) &= \begin{cases} 1, & x \notin [x_1; x_2]; \\ \bar{P}_1, & x \in [x_1; x_2]. \end{cases} \\ \bar{U}(x,0) &= 0; \\ \bar{\rho}(x,0) &= 1; \end{aligned} \quad (1),$$

где $\bar{P}(x,0)$, $\bar{U}(x,0)$, $\bar{\rho}(x,0)$ - распределение по длине выработки относительных давления, скорости и плотности газов в начальный момент времени; $[x_1; x_2]$ - загазованная область; \bar{P}_1 - постоянная величина ($\bar{P}_1 \neq 1$).

Это условие задает постоянное избыточное давление во всей загазованной области. Подобный подход не соответствует физике процесса горения и взрыва, поскольку на начальном этапе формирования ВУВ происходит медленное горение метана. Постепенно с увеличением температуры давление на фронте пламени, а также его скорость растут. Достигая границ загазованной области, фронт пламени переходит во фронт ВУВ. Заметим, что соотношение параметров ВУВ (1) не достигается ни в один момент времени. Поэтому для корректного описания формирования ВУВ необходимо задать другие начальные условия.

Как отмечается в литературе [3], прохождение ударной волной сопряжений горных выработок сопровождается сложным процессом перераспределения энергии вследствие разделения фронта ВУВ на несколько фронтов, отражения и дифракции фронтов, возникновения волн разрежения. Для описания подобных процессов естественно использовать двумерную систему уравнений Эйлера [4]. Однако численное решение этой системы требует значительных вычислительных мощностей и таким образом может существенно увеличить время расчета распространения ВУВ в сети горных выработок, количество которых может достигать нескольких сотен. Поэтому для расчета параметров ВУВ, преодолевающих сопряжения необходимо предложить численную схему, которая бы требовала небольшого количества вычислений.

3. Цели работы

Целью статьи является описание схемы для определения параметров ВУВ на сопряжениях горных выработок, а также разработка алгоритма и программы, реализующей описанный метод и позволяющей прогнозировать расположение безопасных мест ведения горноспасательных работ в сети горных выработок при взрывах метано-воздушной смеси.

4. Постановка задачи

Динамика движения газа, в том числе поведение ВУВ, в горной выработке описывается системой дифференциальных уравнений Эйлера [4].

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

где $\bar{\rho}$ – относительная плотность газовой смеси, 1; \bar{u} – относительная массовая скорость смеси газов вдоль оси выработки, 1; \bar{P} – относительное давление, 1; \bar{E} – относительная полная энергия потока газов, 1; t – время, с; x – координата, направленная вдоль оси выработки, м; λ_0 – коэффициент аэродинамического сопротивления выработки, 1; Π – периметр поперечного сечения выработки, м; S – площадь поперечного сечения выработки, м²; α – коэффициент теплообмена со стенками выработок, Па·м/(с·К); R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); $c = \sqrt{\frac{P_0}{\rho_0}}$, м/с; P_0 – давление в выработках до взрыва, Па; ρ_0 – плотность воздуха в выработках при нормальных условиях, кг/м³; T_0 –

температура воздуха в выработках до взрыва, K ; q – суммарная плотность источников и стоков тепла, $Вт/м^3$.

На основании численного решения системы (2) необходимо разработать алгоритм расчета безопасных мест ведения горноспасательных работ при взрывах метана и пыли в сети горных выработок.

5. Основная часть

Для численного решения системы уравнений (2) необходимо дополнить ее начальными условиями. Как уже было сказано выше, начальные условия типа (1) не соответствуют физике взрыва метана, поэтому выберем другие начальные условия. В работе [5] описан подход, позволяющий смоделировать цепную реакцию горения на этапе, предшествующем взрыву. Численная схема представляется в виде:

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_m^{n+1} &= \bar{\rho}_m^n + Cu(\bar{u}_{m-1}^n - \bar{u}_{m+1}^n)/2 + kCu(\bar{\rho}_{m-1}^n - 2\bar{\rho}_m^n + \bar{\rho}_{m+1}^n); \\ \bar{u}_m^{n+1} &= \frac{(1 - \bar{r}Cu \left| \bar{u}_m^n \right| / 2\bar{\rho}_m^n) \bar{u}_m^n + Cu(\bar{P}_{m-1}^n - \bar{P}_{m+1}^n + \bar{u}_{m-1}^n{}^2 / \bar{\rho}_{m-1}^n - \bar{u}_{m+1}^n{}^2 / \bar{\rho}_{m+1}^n) / 2}{1 + \bar{r}Cu \left| \bar{u}_m^n \right| / 2\bar{\rho}_m^n}; \end{aligned} \quad (3),$$

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

где $Cu = \frac{c\Delta t}{\Delta x}$ – коэффициент Куранта; $\bar{r} = \frac{\lambda\Delta x}{2\sqrt{S}}$ – 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.

Искомые параметры в начальный момент времени остаются неизменными

$$\bar{P}_m^0 = 1; \bar{U}_m^0 = 0; \bar{\rho}_m^0 = 1 \quad (4),$$

а формирование ВУВ моделируется с помощью задания функции источника тепла в виде:

$$\bar{q}_m^n = \begin{cases} 3,5n\Delta x / \sqrt{S}, & n\Delta x \leq l \text{ и } m = n \\ 0, & n\Delta x > l \text{ или } m \neq n \end{cases} \quad (5),$$

где l – длина загазованной зоны, м;

Для моделирования поведения ВУВ в местах поворотов и разветвлений горных выработок используется система двумерных уравнений газовой динамики [4]. Чтобы сократить количество вычислений и время расчета параметров ВУВ и безопасных мест ведения горноспасательных работ численный метод будем организовывать так, чтобы непосредственно в месте разветвления горных выработок находилась только одна точка разбиения. В этой точке будем решать двумерную систему Эйлера. Наиболее распространённым способом задания граничных условий при решении таким методом является способ отражения [6]. В этом случае вводятся дополнительные узлы (3, 4), которые располагаются за пределами ветвей, как это показано на рис. 1.

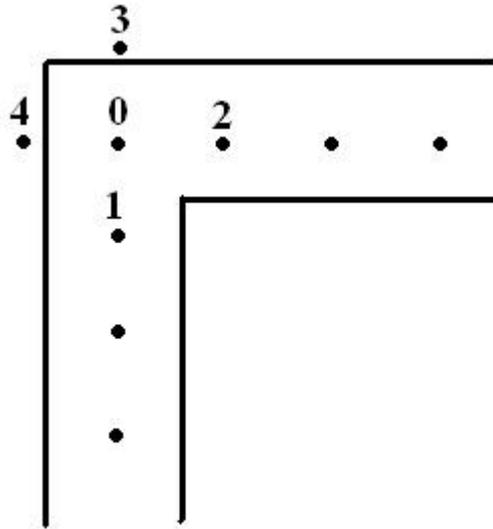


Рис. 1. Схема сопряжения горных выработок.

Расчет в точке 0 на новом временном слое будет производиться с использованием значений в точках 0 – 4 на предыдущем временном слое. В точках 3, 4 будут задаваться граничные условия вида:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} = \bar{u} = 0 \quad (6),$$

Алгоритм расчета можно условно разделить на несколько блоков. Первый блок включает в себя задание исходных данных (конфигурация сети горных выработок, параметры выработок, параметры взрыва, параметры численного расчета, координаты мест сопряжений выработок на схеме), проверка корректности исходных данных, вычисление вспомогательных переменных (матрица инцидентности узлов горных выработок согласно топологии сети).

Во втором выполняется вычисление параметров ВУВ согласно численной схеме (3)-(5). После того, как будет выполнен расчет на заданном количестве временных слоев, проводится расчет максимальных по времени относительных давлений во всех горных выработках заданной сети. Места, в которых максимальное относительное давление меньше заданного порогового значения, считаются безопасными для ведения горноспасательных работ. В противном случае – опасными.

Третий блок содержит процедуры и функции, которые обеспечивают визуализацию динамического поведения параметров ВУВ с указанием безопасных мест ведения горноспасательных работ на графиках, в таблицах и на схеме сети горных выработок (рис. 2,3,4).

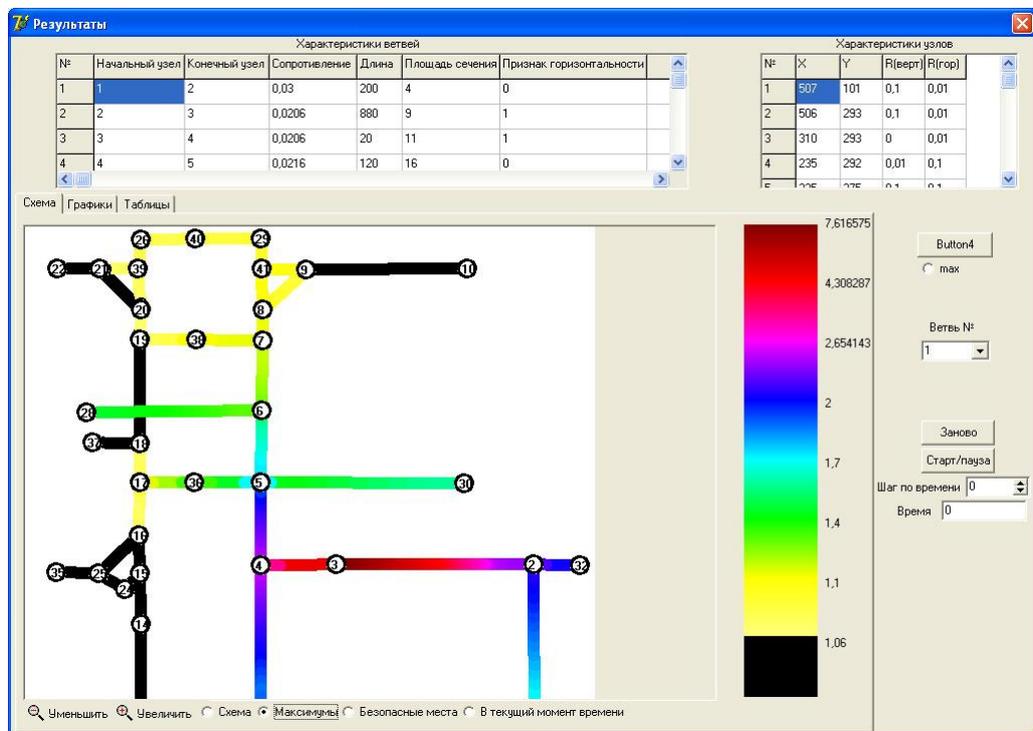


Рис. 2. Распределение максимального давления в сети горных выработок.

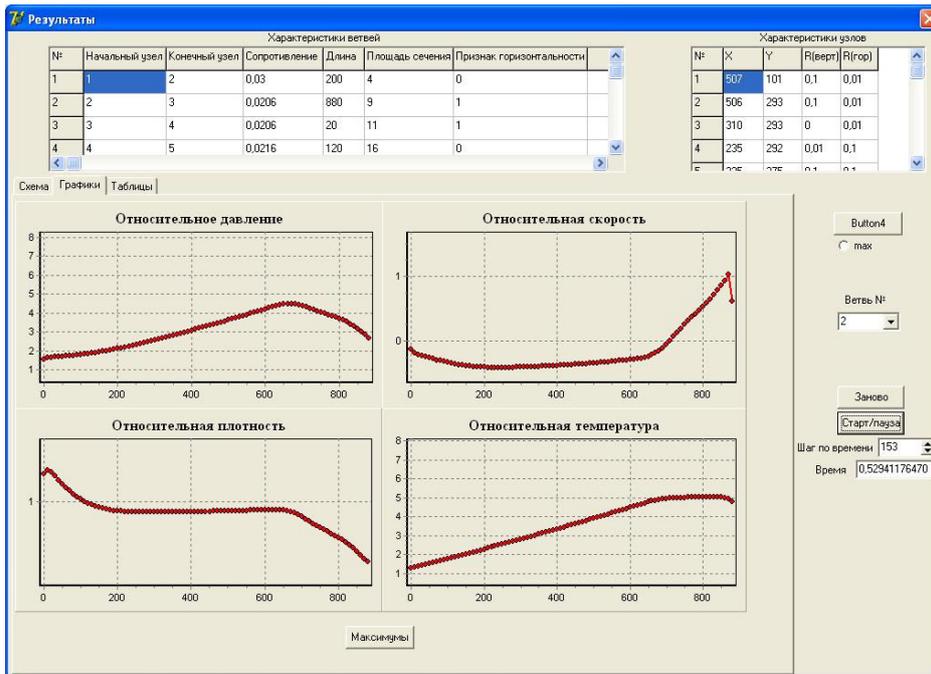


Рис. 3. Представление на графиках распределения относительного давления в выработке № 2 в момент при $t = 0.53$ с.

The screenshot shows the same software window, but with the "Таблицы" (Tables) tab selected. It displays four data tables corresponding to the graphs in Figure 3. Each table has a header row for the parameter name and a row for "Максимумы по t" (Maximums by t). The "x" column represents distance from 0 to 100.

Относительное давление											
x	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
P	3,49516	3,7826	3,79528	3,82112	3,84802	3,87647	3,90628	3,93751	3,97041	4,00537	4,04
Максимумы по t	5,60436	5,85561	5,80512	5,78149	5,75438	5,72882	5,70507	5,68352	5,66437	5,64784	5,63

Относительная скорость											
x	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U	-0,1673	-0,30559	-0,32823	-0,35422	-0,37961	-0,40482	-0,4299	-0,45489	-0,47974	-0,50432	-0,52
Максимумы по t	0,10139	0,18568	0,20052	0,2131	0,22522	0,23681	0,24781	0,2582	0,26797	0,27715	0,28

Относительная плотность											
x	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Rho	1,38618	1,40088	1,33036	1,26623	1,20808	1,1571	1,11324	1,07584	1,04403	1,0169	0,99
Максимумы по t	1,65964	1,64021	1,56204	1,49309	1,42818	1,3687	1,31482	1,26647	1,22336	1,18503	1,15

Относительная температура											
x	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
T	2,4933	2,70016	2,85282	3,01772	3,18523	3,35014	3,50893	3,65993	3,80297	3,9388	4,06
Максимумы по t	3,39614	3,58124	3,72596	3,8802	4,03607	4,19176	4,34483	4,49333	4,63597	4,77214	4,901

Рис. 4. Представление в таблицах распределения относительного давления в выработке № 2 в момент при $t = 0.53$ с.

6. Выводы по результатам и направления дальнейших исследований

Разработанный алгоритм и программа расчета параметров ВУВ позволяют находить безопасные места ведения горноспасательных работ при взрывах метана и пыли. К преимуществам можно отнести малое время расчета даже при наличии порядка 100 выработок. Представление результатов оформлено таким образом, что есть возможность наблюдать изменение параметров ВУВ во времени во всей сети горных выработок. Недостатком является тот факт, что расчет ведется в предположении, что все выработки в местах их разветвлений и поворотов имеют угол либо 90° , либо 0° . Также данная схема не в состоянии учесть влияние таких разрушаемых препятствий, как вентиляционные двери и взрывоподавляющие заслоны и перемычки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устав ВГСЧ по организации и ведению горноспасательных работ: утв. МУП СССР 22.06.1983. - М.: Недра, 1986. - 254 с.
2. 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.
3. Палеев Д. Ю. Математическое моделирование активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев, О.П. Брабандер. - Томск: Изд-Во Томского университета, 1999. - 199 с.
4. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов – М.: Наука, 1976. – 400 с.
5. Агеев В.Г. Моделирование распространения ударных волн при мгновенной и цепной реакциях горения метана и пыли в горных выработках / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко. – Форум гірників – 2012: Мат. міжнар. конф. – Дніпропетровськ: МГУ 2012. – Т.4. – С. 12 – 17.
6. Святний В.А. Паралельне моделювання складних динамічних систем // Моделирование 2006: междунар. конф. – Киев, 2006. – С. 83 – 90.