

I. Охрана труда

УДК [622.81:534.222.2].001.103:004.9

В.Г. Агеев, канд. техн. наук, директор НИИГД «Респиратор», Донецк

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

V.G. Ageyev, Cand. Sci. (Tech.), director (NIIGD “Respirator”, Donetsk)

CALCULATION OF PARAMETERS OF AIR SHOCK WAVES IN THE NETWORK OF MINE WORKINGS

Цель. Обоснование необходимости применения газодинамического подхода к решению задачи распространения ударных волн в сети горных выработок, описание метода решения, выбора алгоритма и разработки программы.

Методика. Базируется на фундаментальных уравнениях газовой динамики и численных решениях многомерных задач.

Результаты. Предложен приближенный метод решения одномерных дифференциальных уравнений Эйлера для расчета распространения волн давления по прямолинейным выработкам и двумерная система Эйлера для моделирования поведения воздушных ударных волн на сопряжениях горных выработок. Для приближенного решения предложен метод центральных разностей с искусственной схемной диффузией. Согласно предложенному методу разработаны алгоритм и программа расчета распространения воздушных ударных волн в сети горных выработок.

Научная новизна. Предложенные метод, алгоритм и программа позволяют выполнять расчеты распространения воздушных ударных волн в сети горных выработок и находить границы опасных зон их влияния.

Практическая значимость. Разработанные алгоритм и программа расчета параметров воздушных ударных волн позволяют находить безопасные места ведения горноспасательных работ при взрывах метана и пыли в угольных шахтах.

Ключевые слова: взрыв метана, предотвращение, локализация, ударные волны, безопасные расстояния.

Постановка проблемы и обзор публикаций по теме исследования

В шахтах, опасных по газу, открытое пламя, короткое замыкание в электросиловых или осветительных сетях и взрывные работы могут стать источниками воспламенения метановоздушных или пылевоздушных смесей. Процесс воспламенения при определенных условиях может переходить в горение, а затем и во взрыв большой разрушительной силы. Взрывы метановоздушных и пылевоздушных смесей вызывают образование воздушных ударных волн, которые, распространяясь на большие расстояния, разрушают сооружения, коммуникации, оборудование и прочие устройства в подземных условиях и на поверхности.

Ранее выполненные исследования дали основания для создания методики расчета безопасных расстояний при взрывах газа и пыли в сети горных выработок, приведенной в Уставе ВГСЧ 1983 г. Однако упомянутая методика

не учитывает динамического поведения воздушных ударных волн, отражения их от стенок выработок, увеличения давления во фронте этих волн за счет наложения нескольких воздушных ударных волн. На основании ряда исследований процессов формирования и распространения воздушных ударных волн во время взрывов метановоздушной смеси в горных выработках рекомендованная норма безопасного давления на человека была порядка 0,006...0,02 МПа. Однако следует отметить, что такое давление может быть безопасным для человека только в тех случаях, когда он не подвергается действию скоростного напора. В шахтных условиях необходимо учитывать скорость потока воздуха, поскольку таким способом могут переноситься куски угля, породы, части крепи горных выработок, что может привести к травмированию людей. Предложенная методика позволяет выполнять расчет давления при распространении воздушных ударных волн по эмпирическим зависимостям, что исключает возможность определения скорости потока.

В работе [1] использован газодинамический подход к решению задачи распространения воздушных ударных волн, но решение находится только на прямолинейных участках горных выработок в случае стационарного режима. Авторами монографии [2] предложен численный метод решения задачи распространения и взаимодействия воздушных ударных волн в сети горных выработок. Особенностью этого метода является решение двумерной системы Эйлера на сопряжениях горных выработок. Однако такой подход значительно увеличивает время расчета параметров воздушных ударных волн в сети горных выработок. Это существенно влияет на время расчета для крупных шахт, когда количество выработок и сопряжений достигает порядка нескольких сотен.

Нерешенные части проблемы. Решение задачи распространения воздушных ударных волн 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 [2] в качестве начального условия для задачи распространения воздушных ударных волн в горных выработках использовали условие

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

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 воздушных ударных волн происходит медленное горение метана. Постепенно с увеличением температуры давление во фронте пламени, а также его скорость растут. Достигая границ загазованной области, фронт пламени переходит во фронт воздушной ударной волны. Заметим, что соотношение параметров этих волн (1) не достигается ни в один момент времени. Поэтому для корректного описания формирования воздушной ударной волны необходимо задать другие начальные условия.

Цель статьи – обоснование необходимости применения газодинамического подхода к решению задачи распространения воздушных ударных волн в сети горных выработок, описание метода решения поставленной задачи, разработка алгоритма и программы определения параметров воздушных ударных волн в сети горных выработок и установления границ опасных зон их влияния.

Постановка задачи. Динамика движения газа, в том числе поведение воздушных ударных волн, на прямолинейных участках горных выработок описывается системой дифференциальных уравнений Эйлера [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + c \frac{\partial (\bar{u})}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial (\bar{u})}{\partial \tau} + c \frac{\partial (\bar{P} + \bar{u}^2 / \bar{p})}{\partial x} = - \frac{k_{\text{тр}} \Pi c}{8S} \bar{u} \left| \bar{u} \right| / \bar{p}; \\ \frac{\partial (\bar{E})}{\partial \tau} + c \frac{\partial [(\bar{E} + \bar{P}) \bar{u} / \bar{p}]}{\partial x} = \frac{\alpha \Pi}{\rho_0 B S} (1 - \bar{P} / \bar{p}), \end{cases} \quad (2)$$

где \bar{p} – относительная плотность газовой смеси;

\bar{u} – относительная скорость смеси газов вдоль оси выработки;

\bar{P} – относительное давление;

\bar{E} – относительная полная энергия потока газов;

t – время, с;

x – координата, направленная вдоль оси выработки, м;

λ_0 – коэффициент аэродинамического сопротивления выработки;

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);

$$c = \sqrt{\frac{P_0}{\rho_0}}, \text{ м/с};$$

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, К;

q – суммарная плотность источников и стоков теплоты, Вт/м³.

Для моделирования поведения воздушных ударных волн на сопряжениях горных выработок использована двумерная система Эйлера:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + c \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = 0; \\ \frac{\partial (\bar{u})}{\partial t} + c \left(\frac{\partial (\bar{P} + \bar{u}^2 / \bar{\rho})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{v} / \bar{\rho})}{\partial y} \right) = -\zeta_x \bar{u} \left| \bar{u} \right| / \bar{\rho}; \\ \frac{\partial (\bar{v})}{\partial t} + c \left(\frac{\partial (\bar{u}\bar{v} / \bar{\rho})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{P} + \bar{v}^2 / \bar{\rho})}{\partial y} \right) = -\zeta_y \bar{v} \left| \bar{v} \right| / \bar{\rho}; \\ \frac{\partial (\bar{E})}{\partial t} + c \left(\frac{\partial [(\bar{E} + \bar{P})\bar{u} / \bar{\rho}]}{\partial x} + \frac{\partial [(\bar{E} + \bar{P})\bar{v} / \bar{\rho}]}{\partial y} \right) = \frac{q}{\rho_0 R T_0}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где y, \bar{v} – координата и относительная скорость на сопряжении поперек направления координаты x соответственно;

$\bar{\zeta}$ – вектор коэффициентов местного сопротивления сопряжения выработок (различный для различных видов сопряжений).

Начальные условия для прямолинейных участков:

$$\bar{P}(x,0) = \bar{\rho}(x,0) = 1; \bar{u}(x,0) = 0. \quad (4)$$

Начальные условия для сопряжений:

$$\bar{P}(x, y,0) = \bar{\rho}(x, y,0) = 1; \bar{u}(x, y,0) = \bar{v}(x, y,0) = 0. \quad (5)$$

Граничные условия для тупика выработки имеют вид

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

Граничные условия для выхода выработки на поверхность имеют вид

$$\bar{P}(x,0) = \bar{\rho}(x,0) = 1; \quad \frac{\partial \bar{u}(x,0)}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Горение метана в загазованной области моделируется с помощью заданной функции q .

Основная часть

Для приближенного решения поставленной задачи используют метод центральных разностей с искусственной схемной диффузией. Введем обозначения: $Cu = \frac{c\Delta t}{\Delta x}$ – 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; $\bar{q}_m^n = \frac{(\gamma-1)q_m^n\Delta x}{c\rho_0 B T_0}$ –

безразмерная функция тепловыделения при цепной реакции горения. Система алгебраических уравнений, соответствующая исходной системе дифференциальных уравнений, которая моделирует распространение воздушных ударных волн на прямолинейных участках, имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\rho}_m^{n+1} = \bar{\rho}_m^n + Cu(\bar{u}_{m-1}^n - \bar{u}_{m+1}^n)/2 + kCu(\bar{\rho}_{m-1}^n - 2\bar{\rho}_m^n + \bar{\rho}_{m+1}^n); \\ \bar{u}_m^{n+1} = \frac{(1 - \bar{r}Cu|\bar{u}_m^n|/2\bar{\rho}_m^n)\bar{u}_m^n + Cu(\bar{P}_{m-1}^n - \bar{P}_{m+1}^n + \bar{u}_{m-1}^n{}^2/\bar{\rho}_{m-1}^n - \bar{u}_{m+1}^n{}^2/\bar{\rho}_{m+1}^n)/2}{1 + \bar{r}Cu|\bar{u}_m^n|/2\bar{\rho}_m^n}; \\ \bar{P}_m^{n+1} = \bar{P}_m^n + (\gamma-1)(\bar{u}_m^n{}^2/\bar{\rho}_m^n - \bar{u}_m^{n+1}{}^2/\bar{\rho}_m^{n+1})/2 + \\ + Cu\{[\gamma\bar{P}_{m-1}^n + (\gamma-1)\bar{u}_{m-1}^n{}^2/2\bar{\rho}_{m-1}^n]\bar{u}_{m-1}^n/\bar{\rho}_{m-1}^n - \\ - [\gamma\bar{P}_{m+1}^n + (\gamma-1)\bar{u}_{m+1}^n{}^2/2\bar{\rho}_{m+1}^n]\bar{u}_{m+1}^n/\bar{\rho}_{m+1}^n\}/2 + kCu(\bar{P}_{m-1}^n - 2\bar{P}_m^n + \bar{P}_{m+1}^n) + \\ + \bar{\alpha}Cu(1 - \bar{P}_m^n/\bar{\rho}_m^n) + Cu\bar{q}_m^n. \end{array} \right. \quad (8)$$

Искомые параметры в начальный момент времени остаются неизменными:

$$\bar{P}_m^0 = 1; \quad \bar{U}_m^0 = 0; \quad \bar{\rho}_m^0 = 1, \quad (9)$$

а формирование воздушных ударных волн моделируется с помощью задания функции источника теплоты в виде

$$\bar{q}_m^n = \begin{cases} 3,5n\Delta x / \sqrt{S}, & n\Delta x \leq l \text{ и } m = n; \\ 0, & n\Delta x > l \text{ или } m \neq n, \end{cases} \quad (10)$$

где l – длина загазованной зоны, м.

Для моделирования поведения воздушных ударных волн в местах поворотов и разветвлений горных выработок используют систему двумерных уравнений газовой динамики [3]. Чтобы сократить количество вычислений и время расчета параметров воздушных ударных волн и безопасных мест ведения

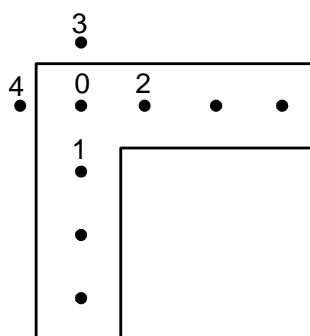


Рис. 1. Схема сопряжения горных выработок

горноспасательных работ, численный метод будем применять 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 [5]. В этом случае вводят дополнительные узлы 3, 4, которые располагают за пределами ветвей (рис. 1).

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

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \bar{u} = 0. \quad (11)$$

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

Во втором блоке вычисляют параметры воздушных ударных волн согласно численной схеме (8)-(10). После того как будет выполнен расчет на заданном количестве временных слоев, проводят 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 воздушных ударных волн с указанием безопасных мест ведения горноспасательных работ на графиках, в таблицах и на схеме сети горных выработок (рис. 2, 3).

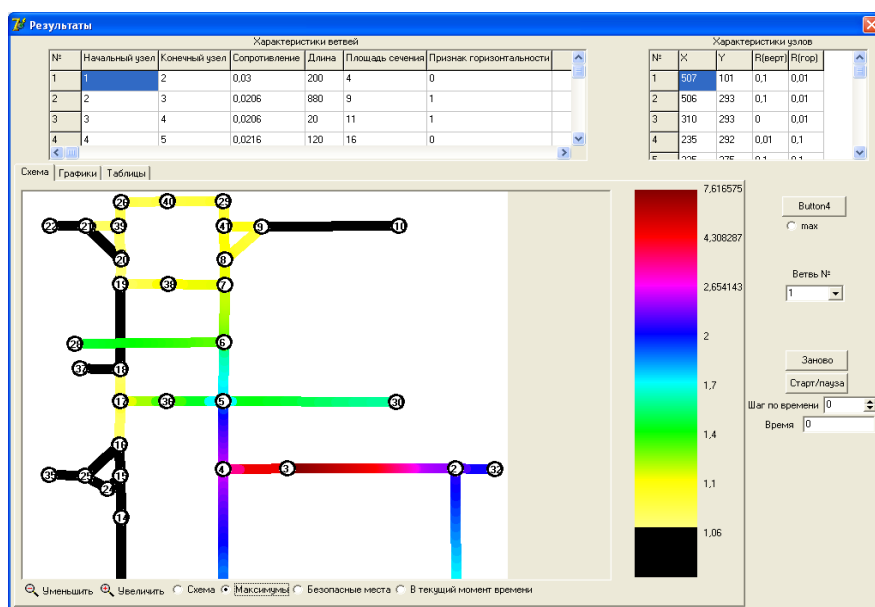


Рис. 2. Распределение максимального давления в сети горных выработок

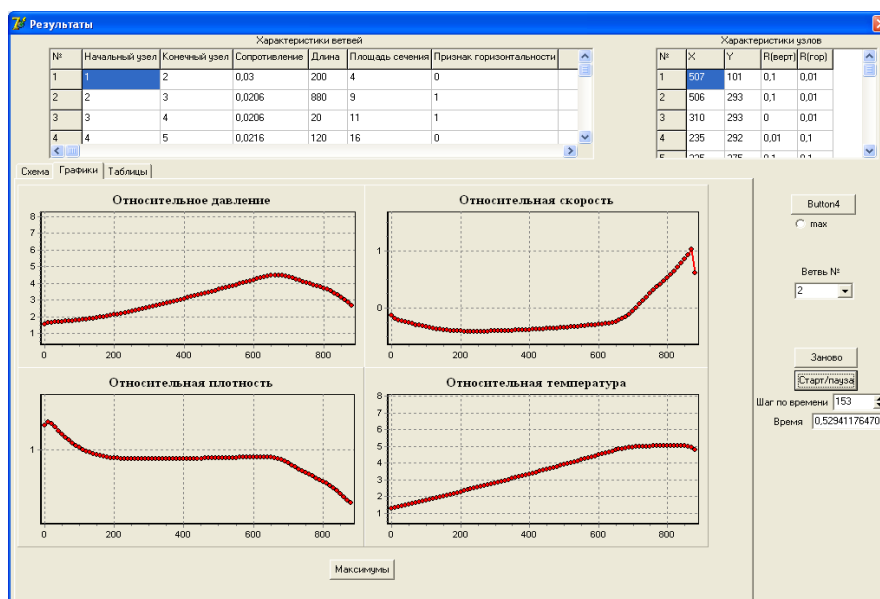


Рис. 3. Распределение параметров в выработке при $t = 0,53$ с

Выводы и направления дальнейших исследований

Разработанные алгоритм и программа расчета параметров воздушных ударных волн 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 воздушных ударных волн 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 90 или 0°. Также данная схема не в состоянии учесть влияние таких разрушаемых препятствий, как вентиляционные двери и взрывоподавляющие заслоны и перемычки.

Список литературы / References

1. Агеев В.Г. Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана / В.Г. Агеев // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 5 – 10.

Ageyev, V.G. (2010), *Matematicheskaia model formirovaniia udarnykh voln v gornykh vyrabotkakh pri vzryvakh metana* [The mathematical model of formation of shock waves in mine workings by methane explosions], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

2. 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 ун-та, 1999. – 199 с.

Paleyev, D.Yu. and Brabander, O.P. (1999), *Matematicheskoe modelirovanie aktivnogo vozdeistviia na vzryvoopasnye oblasti i ochagi goreniia v ugolnykh shakhtakh* [The mathematical modeling of the active influence on explosion-hazardous areas and combustion sources in coal mines], Tomsk University, Tomsk, Russia.

3. 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.

Godunov, S.K., Zabrodin, A.V., Ivanov, M.Ya., Krayko, A.N. and Prokopov, G.P. (1976), *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoi dinamiki* [Computational solution of multidimensional problems of gas dynamics], Nauka, Moscow, Russia.

4. 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: матер. міжнар. конф. – Дніпропетровськ: НГУ, 2012. – Т.4. – С. 12 – 17.

Ageyev, V.G. and Zinchenko, I.N. (2012), *Modelirovanie rasprostraneniia udarnykh voln pri mgnovennoi i tsepnoi reaktsiiax goreniia metana i pyli v gornykh*

vyrobotkakh [The modeling of spread of shock waves by hair-trigger and chain reactions of the methane and dust burning in mine workings], NGU, Dnepropetrovsk, Ukraine.

5. Святний В.А. Паралельне моделювання складних динамічних систем / В.А.Святний // Моделирование 2006: междунар. конф. – Киев, 2006. – С. 83 – 90.

Svyatny, V.A. (2006), *Paralelne modeliuvannia skladnykh dynamichnykh system* [The parallel modeling of complex dynamical systems], Kiev, Ukraine.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 07.11.2014*

Ціль. Обґрунтування необхідності застосування газодинамічного підходу до рішення завдання поширення ударних хвиль у мережі гірських вироблень, опис методу рішення, вибору алгоритму й розробки програми.

Методика. Базується на фундаментальних рівняннях газової динаміки й чисельних рішеннях багатомірних завдань.

Результати. Запропонований наближений метод рішення одномірних диференціальних рівнянь Ейлера для розрахунку поширення хвиль тиску по прямолінійних виробленнях і двовимірна система Ейлера для моделювання поведінки повітряних ударних хвиль на сполученнях гірських вироблень. Для наближеного рішення запропонований метод центральних різниць зі штучною схемною дифузиею. Згідно із запропонованим методом розроблені алгоритм і програма розрахунку розподілу повітряних ударних хвиль у мережі гірських вироблень.

Наукова новизна. Запропоновані метод, алгоритм і програма дозволяють виконувати розрахунки поширення повітряних ударних хвиль у мережі гірських вироблень і знаходити границі небезпечних зон їх впливу.

Практична значущість. Розроблені алгоритм і програма розрахунку параметрів повітряних ударних хвиль дозволяють знаходити безпечні місця ведення гірничорятувальних робіт при вибухах метану й пили у вугільних шахтах.

Ключові слова: вибух метану, запобігання, локалізація, ударні хвилі, безпечні відстані.

Purpose. Substantiation of necessity of the use of the gas dynamical approach to solve a problem of spread of shock waves in the network of mine workings, description of the method of solution, choice of an algorithm and development of a program.

Methodology. The methodology is based on fundamental equations of gas dynamics and numerical solutions of multidimensional problems.

Results. The approximate method of solution of the Euler one-dimensional differential equations to calculate spread of the pressure waves along the rectilinear mine workings and the two-dimensional Euler system to simulate the behavior of the air shock waves at the couplings of the mine workings are proposed. The method of central differences with the artificial circuit diffusion is proposed for the approximate solution. According to the method proposed the algorithm and program of calculation of spread of the air shock waves in the network of the mine workings have been worked out.

Scientific novelty. The method, algorithm and program proposed allow us to execute the calculations of spread of the air shock waves in the network of the mine workings and to find the boundaries of the hazardous zones of their influence.

Practical value. The algorithm and program of calculation of the parameters of the air shock waves worked out allow finding the safe places of carrying-out the mine-rescue operations by the methane and dust explosions in the coal mines.

Keywords: methane explosion, prevention, localization, shock waves, safe distances.