

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН С УЧЕТОМ ДИССИПАЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Н.Н. Налисько, Украинская инженерно-педагогическая академия, Украина

Обоснована методика расчета параметров распространения ударных воздушных волн по горным выработкам с учетом теплоотдачи потока в стенки выработки и массив горных пород. Предложенная методика пригодная для использования в схеме численного счета. Приведены результаты численного эксперимента модифицированным методом крупных частиц по распространению ударных воздушных волн, с учетом теплотерь.

Вступление. Аварийные участки угольных шахт, где произошли взрывы газа или возникли пожары, несут в себе опасность повторных взрывов рудничной атмосферы. Безопасность работ горноспасателей в таких условиях обеспечивается взрывозащитными сооружениями. Надежность работы таких сооружений зависит, в том числе, от правильной оценки нагрузки на них от действия ударных волн, вызванных повторными взрывами газозвушными смесей. Для расчета взрывозащитных сооружений существует нормативная база, которая была разработана в 80-х годах прошлого столетия. Однако проблема взрывов метановоздушными смесей на аварийных участках, и проблема сведение к минимуму разрушительного действия воздушных ударных волн остаётся по-прежнему актуальной. Об этом свидетельствуют случаи разрушения взрывозащитных сооружений при взрыве газа в заперемыченных пространствах и выходы ударной воздушной волны с опасным для человека избыточным давлением в места укрытия персонала, несмотря на соблюдения всех действующих методик определения безопасных расстояний. По этой причине точность существующих методов расчёта в сложных ситуациях перестала удовлетворять горноспасателей.

Состояние вопроса, выделение нерешенной части проблемы. Одним из основных поражающих факторов взрыва газозвушными смесей, в условиях горных выработок угольных шахт, является ударная волна. Её действие на взрывозащитные сооружения определяется двумя динамическими характеристиками: избыточным давлением и импульсом силы, который передается сооружению за время действия ударной волны. Ослабление ударной волны ее при движении вдоль горных выработок происходит за счет вовлечения в движение дополнительных масс воздуха, расхода энергии на деформации массива пород, процессов вязкого трения и трения газа о стенки выработки, а также за счет потерь энергии при конвективном теплообмене с породным массивом.

Учет всех факторов, влияющих на параметры ударной волны возможен только на основе численных газодинамических расчетов течения воздуха и продуктов взрыва. Для проведения таких расчетов необходимо решать систему уравнений газовой динамики, кинетики химической реакции окисления метана и других компонентов метанового ряда. Очевидно, что подходы к решению такой задачи, основанные на использовании аналитических решений, могут использоваться лишь для получения грубых оценочных результатов.

Проведение численных расчетов не является простой задачей. Для ее решения требуется разработка устойчивых, консервативных разностных схем, простых в реализации и экономичных с точки зрения затрат компьютерного времени. Одним из перспективных направлений в решение задач резко нестационарных процессов является использование численных методов расчета. В работе [1] предложено решение задачи распространения УВВ по горной выработке с помощью схемы численного счета уравнений газовой динамики модифицированным методом «крупных частиц». В задаче учитывается фактор падения энергии движения газового потока за счет вовлечения в движение возрастающих с расстоянием воздушных масс и за счет действия сил трения потока газа о стенки выработки. На данном этапе в решении задачи не учитывалось тепловое взаимодействия газового потока со стенками выработки.

Значительные результаты в этом направлении получены исследования НИИГД «Респиратор». В работе [2] предложено решение задачи распространения УВВ, путем численного решения уравнений газовой динамики разностной схемой. Моделирование диссипации энергии потока производится за счет теплотерь от нагрева вовлекаемых в движение воздушных масс шахтного воздуха.

В совместных работах Томского политехнического института, РосНИИГД и Института угля СО РАН приводится численное решение задач газовой динамики методом С.К. Годунова [3]. Для расчета теплового взаимодействия газового потока со стенками выработки используются математические зависимости механики движения жидкости и газа в каналах.

Применительно к решению задач теплообмена и теплопередач наиболее перспективным является использование программного комплекса ANSYS, пакет FLUENT или CFX, позволяющего провести, в том числе, численный эксперимент для турбулентных течений газа с различными режимами теплопереноса [4]. Однако такая задача будет решена в общем виде, без особенностей, возникающих в условиях горных выработок.

Цель статьи. Постановка задачи. Развитие математической модели процесса распространения ударных воздушных волн по горным выработкам путем обоснования методики расчета параметров их затухания с учетом теплоотдачи потока в стенки выработки и массив горных пород.

Основной материал. В работе [1] математическая постановка задачи распространения УВВ в выработке сводится к рассмотрению движения газового потока в цилиндрическом канале с эквивалентным диаметром. Задача решалась путём использования методов численного счёта уравнений гидродинамики в системе "газовая взрывчатая среда – окружающая среда" (рис. 1).

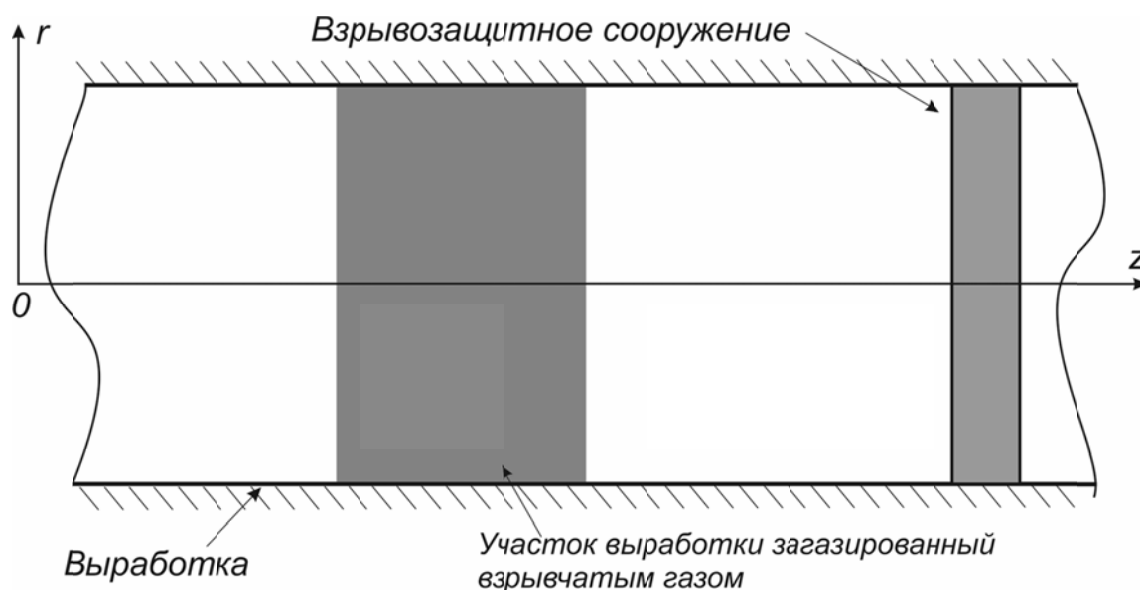


Рис. 1. Схема задачи

Движение среды в цилиндрической системе координат описывается уравнениями Эйлера (в дивергентном виде):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{W}) = 0, \quad \text{неразрывности;}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= \tau_{mp} \Pi dz, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{движения;} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{W}) + \operatorname{div}(PW) = q \Pi \Pi dz \quad \text{энергии;} \quad (2)$$

где ρ – плотность; P – давление; W – скорость; u, v – компоненты скорости W по оси z и r соответственно; z, r – цилиндрические координаты; $E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ – полная энергия; τ_{mp} – сила трения газового потока о стенки выработки; q – плотность теплового потока в стенку выработки, Дж/(м²·с); Π – периметр выработки, м.

Моделирование теплового взаимодействия газового потока со стенками выработки предлагается следующим образом. В правой части уравнения энергии учитывается тепловое взаимодействие газового потока со стенками выработок в форме уравнения теплового баланса, основанное на законе сохранения энергии.

Вследствие конвективных и турбулентных течений газа в возмущенной среде скорость выравнивания температуры по сечению выработки намного больше скорости ее изменения за счет теплоотвода в стенки канала. На основании этого, решение уравнений теплового баланса (1) произведено для всего объема газа в целом:

$$qPdz = QSdz \quad (2)$$

где q – плотность потока тепла в стенку, Дж/(м²·с);

Q – удельная объемная скорость теплотерь в газе, Дж/(м²·с);

P – периметр выработки, м;

S – площадь поперечного сечения выработки, м².

Температурное поле в расчетной области определяется на основании уравнения термодинамики (3):

$$T = j/C_m, \quad (3)$$

где T – температура газа, К;

j – удельная внутренняя энергия газа, Дж/кг;

C_m – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К), $C_m = C_\mu/\mu$;

C_μ – молярная теплоемкость газа, Дж/(моль·К);

μ – молярная масса воздуха, кг/моль.

Конкретная реализация методики в численном расчете выражается в уменьшении внутренней энергии газового потока на величину энергии передаваемой стенкам выработки и массиву горных пород [5]:

$$\tilde{E}v_{i,j}^n = E_{i,j}^n - Ek_{i,j}^n \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n} - 2\alpha(Ts_{i,j} - T_{i,j}) \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}, \quad (4)$$

где $\tilde{E}v_{i,j}^n$ – значение внутренней энергии потока на временном слое t^{n+1} ;

$E_{i,j}^n$ – значение полной энергии потока на текущем временном слое;

$Ek_{i,j}^n$ – значение кинетической энергии потока на текущем временном слое;

Δt – величина дискретизации расчета по времени;

$\rho_{i,j}$ – плотность газового потока;

α – коэффициент теплообмена;

T_s – температура стенки выработки;

T – температура газа;

T – температура газа;

Значения коэффициента теплообмена для стенок выработки и массива горных пород, в формуле (4) могут быть приняты по известным исследованиям в этой области.

В качестве критерия адекватности рассмотренной методики расчета была принята оценка влияния теплообмена на степень затухания ударной воздушной волны при ее распространении по горной выработке. Для этого были проведены тестовые расчеты быстрого горения метановоздушной смеси, которой заполнена часть горной выработки. На некотором расстоянии от загазованного участка расположено взрывозащитное сооружение (рис. 2). На рис. 2а изображена расчетная схема задачи, на рис. 2б, 2в – графики параметров газовой среды в начальный момент времени, вдоль оси выработки.

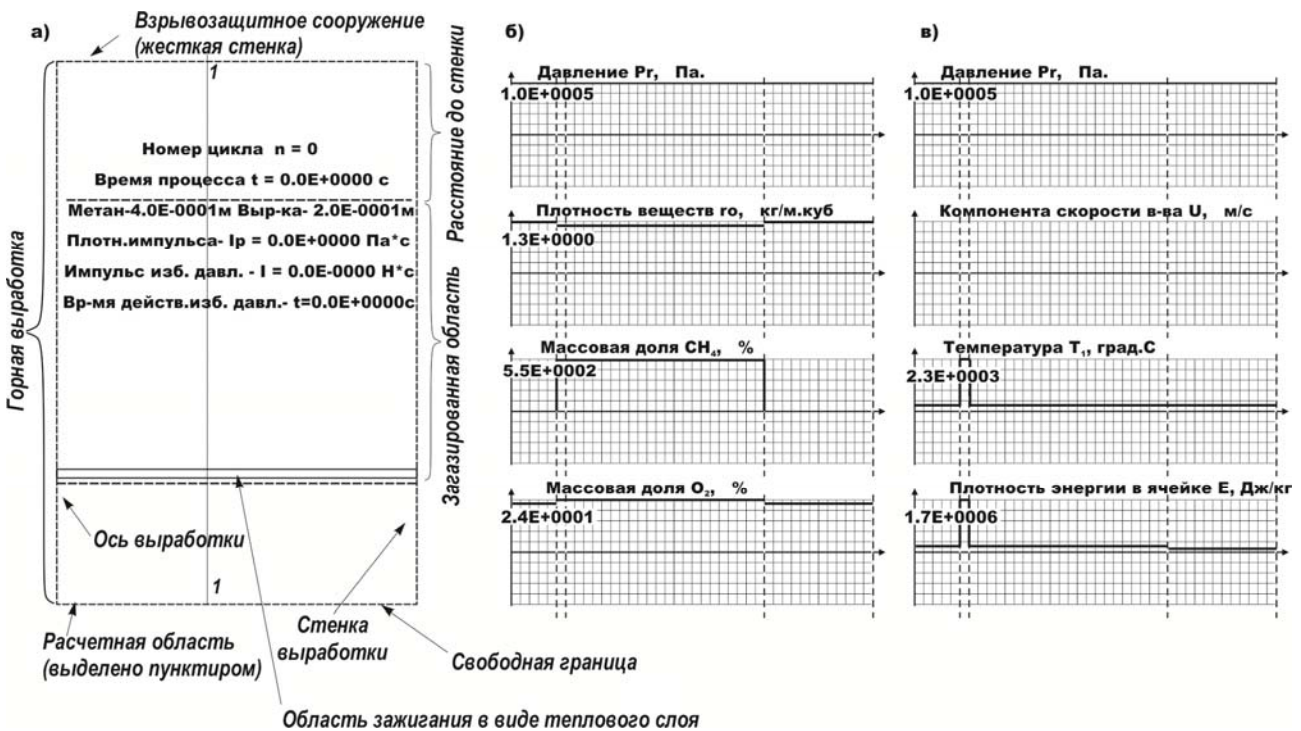


Рис.2. Начальные условия численного счета: а) схема задачи; б),в) графики параметров газовой среды в начальный момент времени, вдоль оси выработки (в сечении 1-1)

Согласно графикам часть выработки заполнена стехиометрической метановоздушной смесью. С одной стороны газового облака имеется слой газа с высокой температурой, который вызывает заживание смеси. Быстрое горение (детонация) распространяется вдоль оси выработки, вызывает возникновение ударной воздушной волны (рис. 3). На графиках рис. 3 приведена динамика изменения параметров газовой среды в результате быстрого горения загазованного участка, с учетом различных коэффициентов теплообмена: темная линия графика – процесс без теплообмена, линия среднего тона – теплообмен соответствует паре "газ-плотные песчаные сланцы", линия светлого тона – коэффициент теплообмена увеличен в 3 раза по сравнению с предыдущим условием.

Как видно из последовательных снимков экрана в динамическом расчете (рис. 3а–3в) зависимость степени изменения амплитуды ударной воздушной волны на единичных участках выработки от теплообмена имеет линейный характер и хорошо согласуется с логикой диссипации энергии газового потока. Аналогичным образом меняется также зависимые параметры потока: температура, полная энергия газа и как следствие падение скорости течения потока.

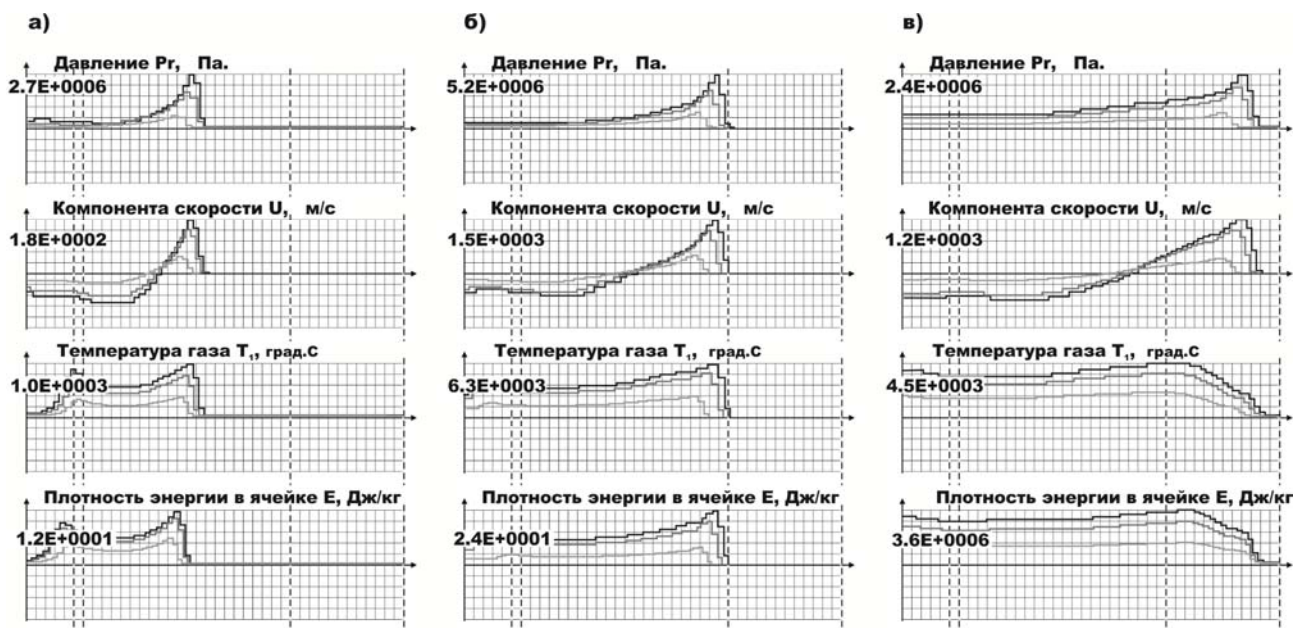


Рис.3. Динамика изменения параметров газовой среды в результате быстрого горения загазированного участка, с учетом различных коэффициентов теплообмена (линии —): а) выгорание метановоздушной смеси на 50%; б) полное выгорание смеси; в) распространение ударной воздушной волны вблизи взрывозащитного сооружения

По результатам численного эксперимента хорошо прослеживается закономерность существенного влияния теплообмена в ближней зоне взрыва. В этой зоне происходит движение расширяющихся горячих газов – продуктов взрыва, соответственно разница между температурой газа и стенкой выработки значительная, и переток тепловой энергии высокий. В дальней зоне действия взрыва, где величина кинетической энергии газового потока имеет существенный вес в балансе общей энергии газа, затухание ударной воздушной волны за счет теплообмена практически не происходит.

Выводы. Таким образом, используя в схеме численного счета рассмотренную методику можно определить близкие к реальным значениям параметры торможения газового потока за счет теплообмена потока со стенками и массивом выработки.

Список литературы

1. Налисько Н.Н. Взаимодействие ударных воздушных волн со стенками горных выработок // Горноспасательное дело. – 2014. – Вып. 51.– С. 43-57;
2. Агеев В.Г., Зинченко И.Н. Моделирование распространения ударных волн при мгновенной и цепной реакция горения метана и пыли в горных выработках / Форум гірників – 2012: матеріали міжнародної конференції, 3-6 жовтня 2012 г., Дніпропетровськ, Україна.– Дніпропетровськ: НГУ, 2012.– С. 12-16.
3. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. Палеев и др. // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т.3 №2. – С. 155–163.
4. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. – М.: Машиностроение-1, 2004.– 512 с;
5. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т.2/ пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– 352 с.