

УДК [622.812:534.222.2]:001.891.57

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Н. Н. Налисько

Стахановский учебно-научный институт горных и образовательных технологий
Украинской инженерно-педагогической академии

ул. Тельмана, 53, г. Стаханов, Луганская обл., 94000, Украина. E-mail: ntk593@rambler.ru

Представлено обоснование разработки новых подходов к расчету параметров распространения воздушных ударных волн в горных выработках. Приведено новое решение задачи по расчету параметров распространения воздушных ударных волн. Подход основан на численном решении системы уравнений газовой динамики методом «крупных» частиц. Обосновывается выбор критериев сопоставления результатов численного счета с результатами лабораторных и натурных экспериментальных исследований. Сопоставление результатов исследования можно выполнять по относительным значениям параметров ударной взрывной волны: степени изменения амплитуды и импульса на единичных участках выработки, в ближней и дальней зоне действия ударной взрывной волны. Абсолютные значения амплитуды избыточного давления и импульса ударной взрывной волны могут служить в качестве ориентиров при оценке. Показана сходимость результатов численного эксперимента.

Ключевые слова: ударная волна, импульс, горная выработка, численный расчет, газовая динамика.

ГАЗОДИНАМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОВІТРЯНИХ УДАРНИХ ХВИЛЬ У ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ

М. М. Налисько

Стахановський навчально-науковий інститут гірничих та освітніх технологій
Української інженерно-педагогічної академії

вул. Тельмана, 53, м. Стаханов, Луганська обл., 94000, Україна. E-mail: ntk593@rambler.ru

Представлено обґрунтування розробки нових підходів до розрахунку параметрів розповсюдження повітряних ударних хвиль у гірничих виробках. Наведено нове рішення задачі з розрахунку параметрів розповсюдження повітряних ударних хвиль. Підхід заснований на чисельному рішенні системи рівнянь газовой динаміки методом «великих» часток. Обґрунтовується вибір критеріїв зіставлення результатів чисельного рахунку з результатами лабораторних і натурних експериментальних досліджень. Співставлення результатів дослідження можливо виконувати за відносними значеннями параметрів ударної вибухової хвилі: ступені змін амплітуди та імпульсу на одиничних ділянках виробки, в ближній та дальній зоні дії ударної вибухової хвилі. Абсолютні значення амплітуди надлишкового тиску й імпульсу ударної вибухової хвилі можуть слугувати як орієнтири під час оцінки. Показано збіжність результатів чисельного експерименту.

Ключові слова: ударна хвиля, імпульс, гірничі виробки, чисельний розрахунок, газова динаміка

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Ликвидация аварийных взрывов на угольных шахтах, всегда сопровождается опасностью повторных взрывов рудничной атмосферы, что представляет реальную угрозу жизни и здоровью горноспасателей. В этих условиях требуются оперативности и точность прогнозирования параметров и области распространения ударной волны в горных выработках, чтобы гарантировать безопасность работ и взрывоустойчивость защитных сооружений.

В аварийных ситуациях, при потенциальной угрозе взрыва, безопасные расстояния определяются по фактору действия избыточного давления и рассчитываются по специальным методикам. На территории СНГ до 1997 г. использовалась «Методика определения параметров воздушных ударных волн при взрывах газов и пыли в горных выработках», разработанная в Карагандинском отделе ВНИИГД под руководством А.М. Чеховских [1]. С 1997 года, после критических выступлений в её адрес [2], в России была принята методика В.М. Плотникова [3], разработанная в штабе ВГСЧ Казахстана. В Украине, на сегодняшний день, продолжает действовать методика А.М. Чеховских [4].

В последнее время рядом организаций проводи-

лись работы по уточнению действующей методики расчета безопасных расстояний и параметров воздушных ударных волн на аварийных участках. Было принято несколько стандартов организаций по расчету параметров распространения воздушных ударных волн в горных выработках. Но в новых документах, в части расчета амплитуд и параметров распространения ударных воздушных волн (УВВ) по сети горных выработок, использовался старый подход, основанный на результатах экспериментальных взрывов и полученных на их основе эмпирических зависимостях [5, 6]. На сегодняшний день, проблема взрывов метано-пыле-воздушных 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 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.

Большой опыт ведения спасательных работ и анализ аварийных ситуаций позволил горноспасателям сформулировать множество критических замечаний к действующей методике. Вот некоторые из них:

– не учитывается влияние полной энергии взрыва. Это приводит к парадоксальной ситуации, когда величина безопасного расстояния не зависит от объема загазирования.

– При расчете нагрузки на защитное сооружение не учитывается действие отраженной ударной волны и величина полного импульса силы, действующего на перемычку, а расчет устойчивости сооружения производится на статическую нагрузку от падающей волны;

– в принятой модели не учитывается возможность образования нескольких участков загазирования протяженных выработок, проходя через которые ударная волна может вызывать их воспламенение;

– при определении параметров затухания УВВ на линейном участке выработки методика опирается на нормы СНиП 2.01.54–84 [7], полученные при взрывах конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Однако известно, что простой перенос закономерностей, установленных для взрыва конденсированного ВВ на случай так называемых неидеальных взрывов, к которым принадлежат и взрывы газовых смесей, невозможно [8].

С учетом всех этих недостатков действующей методики расчета безопасных расстояний, образуется значительная неопределенность в оперативном прогнозировании разрушающего действия взрывов в рудничной атмосфере, которые реально угрожают безопасности горноспасателей и устойчивости взрывозащитных сооружений.

Анализ последних достижений. В настоящее время, в действующих в Украине нормативных документах по определению параметров воздушных ударных волн при взрывах рудничной атмосферы, энергия взрыва газозвуковой смеси оценивается по вероятной длине участка загазирования [4, приложение 19]. В соответствии с этой длиной сопоставляется величина избыточного давления, которое возникает на границе участка загазирования. Это соответствие имеет предел нарастания с увеличением длины участка. При длине участка свыше 65 м (или 15 м, в зависимости от условий) максимальное избыточное давление далее не дифференцируется и устанавливается равным 2,8 МПа. Затухание давления во фронте УВВ рекомендуется определять по эмпирической зависимости, полученной на основании экспериментальных взрывов [5]:

$$\Delta P_x = \Delta P_\phi \exp\left(-4K\alpha x / \sqrt{S}\right)$$

где ΔP_x – избыточное давление во фронте УВВ в расчетной точке, на прямолинейном участке выработки, МПа; ΔP_ϕ – избыточное давление на границе участка загазирования выработки, МПа; x – расстояние от участка загазирования до расчетной точки, м; α – коэффициент аэродинамического сопротивления выработки; S – площадь поперечного сечения вы-

ботки, м²; K – безразмерный коэффициент затухания УВВ, определяется по эмпирическому графику или определяется по формуле $K = 1 + 9\Delta P_\phi$.

В работе [6] падение давления во фронте УВВ рекомендуется определять по эмпирической формуле:

$$\Delta P = \left(7,8 \frac{\varepsilon}{R} + 38,0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{R}}\right) e^{-\frac{\beta R}{d}},$$

где ε – начальная энергия УВВ, приходящаяся на единицу площади выработки, Дж/см²; R – расстояние от участка загазирования до расчетной точки, м; β – коэффициент потери энергии УВВ на трение о поверхность газового потока о стенки выработки (коэффициент шероховатости); d – приведенный (к цилиндрическому) диаметр выработки, м.

Из работ по физическо-математическому обоснованию расчетов параметров распространения УВВ по горным выработкам известны исследования, которые используют численные методы решения системы уравнений описывающие физическое состояние рудничной атмосферы.

В лаборатории взрывных процессов Пекинского технологического института проведены работы по численному моделированию распространения УВВ с использованием коммерческого математического пакета программ AutoReaGas для расчета динамики жидкостей. Расчет состояния системы основан на методе конечных элементов. По результатам численного моделирования взрыва метановоздушной смеси в тупиковой выработке (для условий конкретной выработки: сечение 9 м², длиной 470 м, в том числе загазированного тупикового участка 39 м, концентрация метана 11 %) получена таблица распределения избыточного давления по длине выработки [9]. На основании этого распределения, почему-то делается заключение о наличии детонации метановоздушной смеси в шахте, хотя известные минимальные размеры метановоздушного облака способного детонировать составляют не менее 398 м [10]. Применить результаты данного моделирования возможно только в строго аналогичных условиях.

В совместных работах Томского политехнического института, РосНИИГД и Института угля СО РАН проводятся исследования по математическому моделированию распространения УВВ в сети горных выработок [11–13]. Численное решение задач газовой динамики в этих работах производится методом Годунова [14]. В постановке задачи используется одномерная схема течения газа в протяженной выработке, и лишь на сопряжениях задача решается в трехмерной постановке. Используемый метод Годунова является сильно затратным с точки зрения объема вычислительных операций. Это связано с весьма сложной линеаризованной схемой необходимой для возможности счета разрывов параметров с большими градиентами в соседних точках, что возникает во фронте ударной волны. Несмотря на высокую производительность современных ЭВМ, затраты машинного времени на решения одной задачи таким методом могут быть значитель-

ними и представлять проблему в оперативности расчетов.

В Украине большая работа по совершенствованию методов расчета параметров распространения УВВ в горных выработках и изучению других эффектов сопровождающих этот процесс проводится в НИИ горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор».

В исследованиях этого института представлены аналитические решения для расчета избыточного давления в момент формирования УВВ, как для выработок загазированных по всему сечению так для слоевых скоплений метана [15, 16]:

$$\Delta \bar{P}_\phi = \frac{0,067V}{S} + 0,4 \sqrt{\frac{(1+0,029V/S)V}{S}}, \quad (1)$$

где $\Delta \bar{P}_\phi$ – относительное избыточное давление дефлаграционного горения газозвушной смеси; V – объем газозвушной смеси, m^3 ; S – средняя площадь поперечного сечения выработки, m^2 ;

Полученное решение (1) является важным, т.к. до этого оценка амплитуды взрыва производилась только по экспериментальным данным, воспроизводимость которых низка из-за неустойчивости (расслоения) метановоздушной смеси, и невозможно было учесть слоевое скопления.

В работе [17] представлено численное решение задачи распространения УВВ, приведены сравнительные расчеты с известными методиками [12]. Результаты численных расчетов, согласно [17], выводятся в относительных параметрах.

Цель работы, постановка задачи – разработать газодинамический метод расчёта параметров распространения воздушных ударных волн при взрывах газозвушных смесей в протяженных горных выработках.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В основу новой методики положено физико-математическое моделирование процессов, протекающих в выработках при взрыве газопылевоздушных смесей. Используя такой подход, представляется возможным более полно учитывать все физические эффекты и процессы, происходящие в рудничной атмосфере при взрыве и распространении воздушных ударных волн.

Для реализации газодинамического решения принята следующая постановка задачи первого этапа исследований (рис. 1). Начальные условия: длина загазированного участка, в котором мгновенно формируется заданное избыточное давление, общая длина выработки, характеристики выработки. Необходимо рассчитать параметры распространения ударной воздушной волны по протяженной горной выработке в динамике: изменение давления, плотности, температуры, скорости движения газов в выработках, полную энергию газового потока во времени и в пространстве в зависимости от объема загазирования; учесть фактор падения энергии движения газового потока за счет вовлечения в движение и нагрев возрастающих с расстоянием воздушных масс.

Задача решалась путём использования методов численного счёта уравнений гидродинамики в системе "газовая взрывчатая среда–окружающая среда". Для решения задачи применялась цилиндрическая система координат: z – координата вдоль выработки, r – координата поперек выработки (рис. 2).

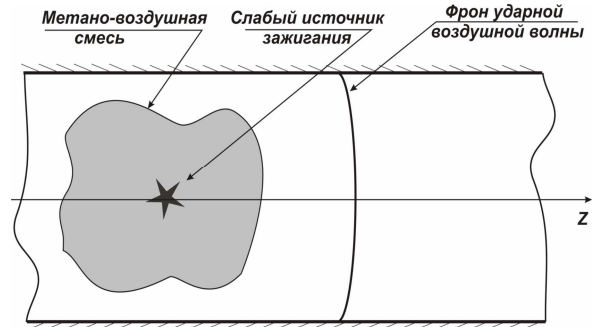


Рисунок 1– Схема распространения воздушной ударной волны в выработке

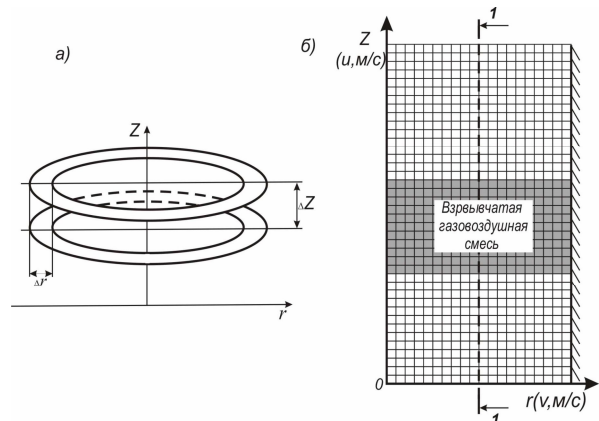


Рисунок 2 – Общая структура расчётной сетки: а) в объёмном; б) в плоском представлении, в цилиндрической системе координат

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

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{W}) &= 0, && \text{неразрывности;} \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ движения; } \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{W}) + \operatorname{div}(P \bar{W}) = 0, \text{ энергии,}$$

где ρ – плотность; P – давление; W – скорость; u, v – компоненты скорости W по оси z и r соответственно; z, r – цилиндрические координаты;

$$E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) - \text{полная энергия.}$$

Для замыкания этой системы используются уравнение состояния (УРС) среды. В качестве УРС продуктов взрыва и рудничной атмосферы исполь-

зують рівняння стану газу:

$$P = (\gamma - 1)\rho \cdot j$$

де j – внутрішня енергія частиць газу; γ – показник адиабати; ρ – густина газу.

Таким чином, система рівнянь (2) є замкнутою і повністю описує середовище при розв'язанні газодинамічних динамічних завдань.

Для розв'язання розглянутої задачі використовувалися однорідні схеми сквозного рахунку, які дозволяють проводити обчислення без попереднього виділення особливостей, використовувати спільне ейлерово-лагранжево-представлення рівнянь гідродинаміки.

В якості такої схеми був застосований модифікований метод чисельного рахунку – метод Давидова, або метод «великих» частиць (МКЧ) [18]. Цей метод поєднує в собі переваги лагранжевого та ейлерового підходів. МКЧ дозволяє досліджувати складні вихреві течії стислого газу в динаміці. З МКЧ за допомогою було здійснено ряд чисельних експериментів з дослідження складних газодинамічних течій. Ідея МКЧ полягає в накладенні на розрахункову область ейлерово-лагранжевої сітки (рис. 3). Визначення еволюції параметрів розрахункової області відбувається шляхом розщеплення за фізичними процесами початкової нестационарної системи рівнянь Ейлера, записаних у формі законів збереження (2). Структура розрахункової сітки зображена на рис. 3.

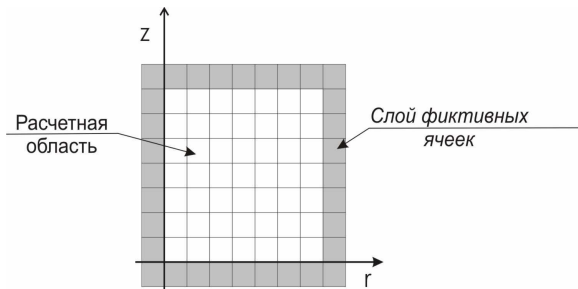


Рисунок 3 – Структура розрахункової сітки, фіктивні клітинки заштриховані

Загальні принципи розщеплення, з допомогою якого послідовно вибираються чисельні схеми для рівнянь Ейлера, наступні:

– моделююча середовище заміняється системою з N

великих «рідких» частиць, які розподілені в просторі в початковий момент часу по клітинкам ейлерової сітки.

– еволюція такої системи здійснюється шляхом наступного «розщеплення»: спочатку досліджується зміна внутрішнього стану підсистем, розташованих в клітинках, в положенні їх нерухомості (ейлеров етап), а потім розглядається зміщення всіх частиць пропорційно їх швидкості без зміни їх внутрішнього стану, з наступним перенесенням на початкову сітку (лагранжев та заключительний етап).

Розрахунок кожного часового кроку (чисельного циклу), таким чином, розбивається на три етапи.

Ейлеров етап. Тут ігноруємо ефекти, пов'язані з переміщенням речовини через межі клітинки, враховуємо ефекти прискорення речовини лише за рахунок тиску. Для великої частинки визначаються проміжні значення шуканих параметрів потоку.

Лагранжев етап. На цьому етапі обчислюються ефекти переносу, які враховують обмін між клітинками при їх реструктуризації на стару ейлерову сітку.

Заключительний етап. На цьому етапі враховується перерозподіл маси, імпульсу, енергії по простору і визначаються остаточні значення ейлерових параметрів потоку на фіксованій сітці на наступному часовому шарі.

На межі розрахункової області $j = j_{max}$, $i = i_{max}$ необхідно задавати умови, які не спотворюють параметри в розрахунковій області. Для цього в схему введені фіктивні розрахункові клітинки, в яких значення параметрів визначаються екстраполяцією (рис. 3).

При розробці різницької схеми розрахунку методом «великих» частиць використовувалися наступні граничні умови (рис. 2,б). Ліва межа розрахункової області (вісь симетрії) – умови непротікання: швидкості потоку $u=0$, $v=-v$, тиск $p=p$; права межа – умови пружної стінки $u=-u$, $v=v$, тиск $p=f(r, v)$; нижня та верхня межі – умови вільного протікання $u=u$, $v=v$.

Результати чисельного рахунку за цим алгоритмом стану системи «газовоздушна суміш – руднична атмосфера» наведені на графіках тиску, швидкості, густини, густини та повної енергії (рис. 4–7).

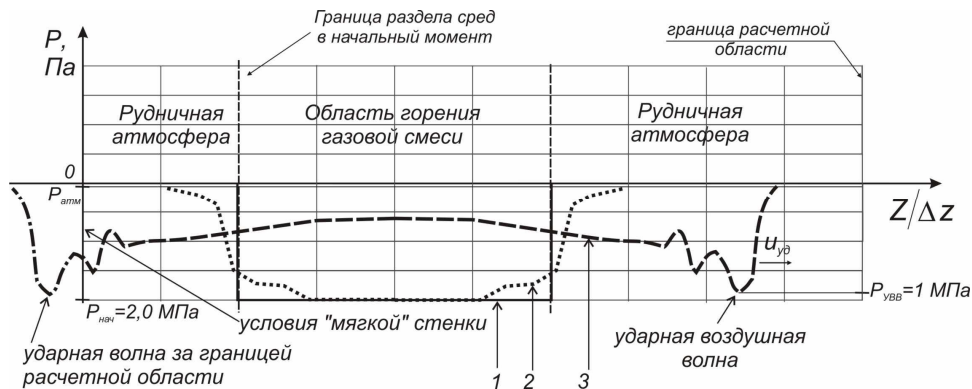


Рисунок 4 – Розподіл тиску за результатами чисельного експерименту, в розрізі 1–1 (рис. 2,б): довжина загазованого ділянки 1 м, початковий тиск 2 МПа; 1 – тиск в початковий момент часу, 2 – через 0,1 мс, 3 – через 0,7 мс

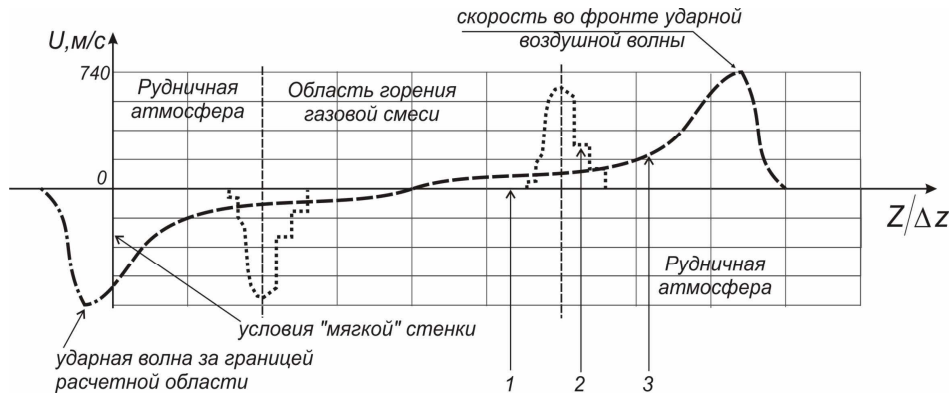


Рисунок 5 – Распределение скорости газового потока в разрезе 1–1 (рис. 2,б):
1 – скорость в начальный момент времени, 2 – через 0,1 мс, 3 – через 0,7 мс

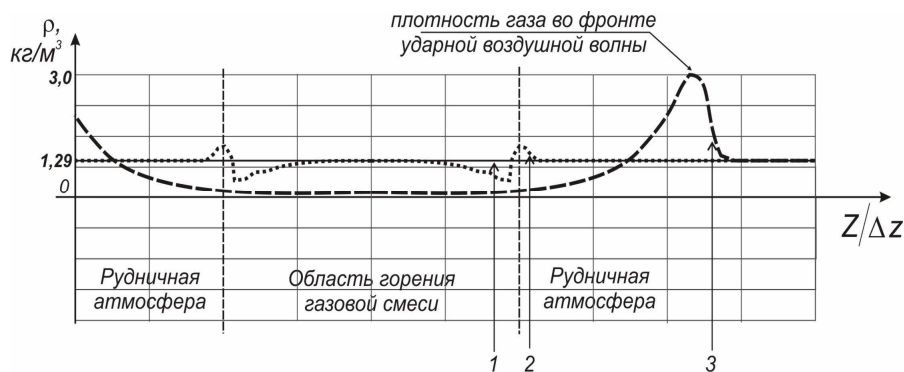


Рисунок 6 – Распределение плотности газового потока в разрезе 1–1 (рис. 2,б):
1 – плотность в начальный момент времени, 2 – через 0,1 мс, 3 – через 0,7 мс

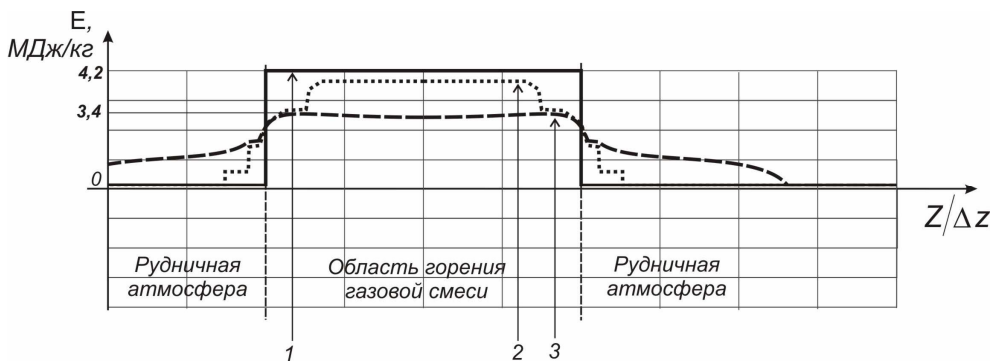


Рисунок 7 – Распределение плотности полной энергии газа в разрезе 1–1 (рис. 2,б):
1 – плотность в начальный момент времени, 2 – через 0,1 мс, 3 – через 0,7 мс

В выполненном расчете, падение энергии движения газового потока определяется за счет вовлечения в движение и нагрев, возрастающих с расстоянием, воздушных масс. На этом этапе, пока не учитывается эффект торможения газового потока в результате трения о стенки выработки, конвективный теплообмен газовой среды с породным массивом и силовое взаимодействие газового потока со стенками выработки (расход энергии на упругие деформации стенок выработок).

При сравнительно небольших значениях времени действия УВВ, определяющим параметром разрушения производимых волной и возможности травмирования или гибели человека, является удельный

импульс избыточного давления [6, 19, 20]. Удельный импульс волны определяется как действие избыточного давления во времени, в единице площади сечения выработки или как произведение массы воздуха, движущегося в волне на скорость потока:

$$I = S \int_0^{t_c} (P(t) - P_i) dt = \frac{M \cdot u}{g \cdot S},$$

где I – плотность импульса УВВ, Па·с; t_c – время существования избыточного давления больше критического, с; M – масса воздуха, вовлеченное в движение УВВ, кг; u – скорость газового потока, м/с; S – площадь сечения выработки.

Однако в реальности рассчитать аналитическим путем или определить экспериментально импульс УВВ весьма сложно. Как, например, точно установить массу воздуха, вовлеченного в движение, скорость его потока, которая будет сильно отличаться во фронте УВВ и за ним?

Генезис импульса в дальней и ближней зоне взрыва будет также различен. В первом случае на величину импульса оказывают влияние массы воздуха, приводимые в движение фронтом УВВ, во втором случае прибавится действие расширяющихся продуктов взрыва газозвушной смеси.

Из исследований величины импульса УВВ известны в основном экспериментальные опыты с использованием импульсометров различных конструкций, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки [6, 21].

Эксперименты проводились в условиях надземных взрывов конденсированных ВВ или взрывы в ударной трубе. По результатам экспериментов определены графики распределения и затухания импульсов в пространстве и во времени, найдены эмпирические зависимости (для тротила):

$$I = 2500 \frac{q}{S} e^{-\frac{\beta R}{2d}},$$

где I – плотность импульса УВВ, Па·с; q – масса тротила, кг; β – коэффициент шероховатости; R – расстояние от участка загазирования до расчетной точки, м; d – приведенный (к цилиндрическому) диаметр выработки, м.

Применение таких данных в условиях взрыва газозвушной смеси требует множества допущений (например, из-за различной степени расширения продуктов взрыва), что делает оценку величины импульса весьма приблизительной.

В разработанном газодинамическом методе расчета распространения УВВ, имеется возможность определять импульс волны очень точно. Расчет производится по специальной интегральной схеме. Так, например, в условиях тестового расчета (рис. 4), на площадке размером 1 дм³, расположенной на расстоянии 0,5 м от участка загазирования был определен импульс волны величиной $I=1,2$ кПа·с, время действия положительной фазы $t=4$ мс.

Оценка результатов расчета. В качестве критерия адекватности разработанной схемы численного счета была принята сходимость результатов расчета с известными экспериментальными данными и эмпирическим зависимостям.

В связи с тем, что в расчете учитываются не все факторы, влияющие на распространение УВВ, а также не полное подобие взрывов конденсированных ВВ и газовых смесей, сопоставления можно выполнять по относительным значениям параметров УВВ: степени изменения амплитуды и импульса на единичных участках выработки, в ближней и дальней зоне действия УВВ.

Абсолютные значения амплитуды избыточного

давления и импульса УВВ могут служить для ориентиров в оценке.

В работе [6] приводятся результаты лабораторных (в ударной трубе) и натуральных экспериментальных взрывов конденсированных ВВ (рис. 8).

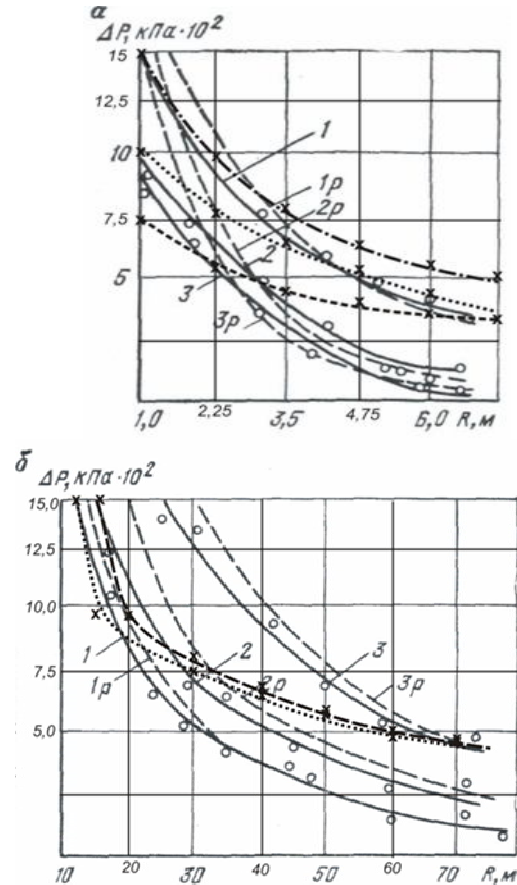


Рисунок 8 – Скан графиков изменения давления на фронте УВВ: а – в ударной трубе при различной шероховатости ее стенок: 1, 2, 3 — экспериментальные $\beta=0,01, \beta=0,03, \beta=0,05$; 1_р, 2_р, 3_р – расчетные кривые для тех же значений; б – в горной выработке: 1, 2, 3 – экспериментальные кривые при массе ВВ 40, 65, 130 кг; 1_р, 2_р, 3_р – расчетные кривые для тех же масс зарядов

Для сопоставления результатов, была проведена серия численных экспериментов, в которых начальное избыточное давление задавалась в диапазоне соответствующем условиям лабораторных взрывов (рис. 8а, ось ординат): 0,75; 1,0; 1,5 МПа. Графики результатов (линии) наложены сверху на скан данных по ударной трубе (дополнительно добавлены линии сетки). Графики численного эксперимента имеют более пологое убывание из-за отсутствия, на данный момент, учета шероховатости канала, теплообмена и других факторов торможения газового потока. Однако, четко видна установленная в [6] закономерность – большие амплитуды во фронте УВВ убывают быстрее, более низкие давления убывают медленнее и распространяются на большие расстояния, сохраняя на практике опасное значение избыточного давления для людей и ком-

муникацій. В существующих методиках коэффициент затухания принимается постоянным [4].

Для выполнения идентичности условий с натурным экспериментом (рис. 8,б), в численном эксперименте, начальный объем газов взрыва принимался равным объему газов взрыва конденсированного ВВ – 40 и 65 кг, что соответствовало 32000 и 52000 дм³ (при 800 дм³/кг). Качественно, распределение избыточного давления по длине выработки соответствует известным закономерностям. Дополнительно можно увидеть влияние расширяющихся продуктов горения в ближней зоне взрыва. После того как они быстро тормозятся, интенсивный спад давления переходит в более медленный (излом графика).

Сопоставление расчетных параметров газового потока в тестовом расчете (рис. 5–7, на момент времени 7 мс), к известным эмпирическим установленным по взрывам конденсированного ВВ [6] (расчет/эксперимент): избыточное давление – 0,9/0,9 МПа, скорость 740/880 м/с, плотность 4,5/3,2 кг/м³. Учитывая более высокую динамику взрывов конденсированных ВВ за счет большей степени расширения продуктов взрыва, их большей скорости разлета (связана со скоростью детонации, которая выше скорости дефлаграционного горения), полученные расчетные параметры газового потока соответствуют действительным.

Адекватность результатов численного счета также необходимо проверить по соответствию динамики импульса УВВ. В работе [6] приводится график распределения импульса УВВ по длине ударной трубы. На скан графика наложены результаты численного расчета импульса падающей (прямой) волны (рис. 9).

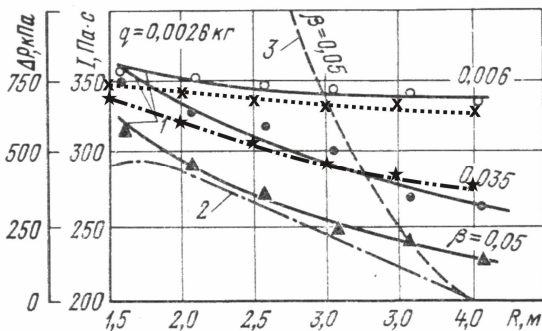


Рисунок 9 – Скан графиков влияние шероховатости стенок канала и его диаметра d на затухание импульса избыточного давления УВВ: 1 – d=150 мм; 2 – d=27 мм; 3 – затухание давления на фронте УВВ в канале d=150 мм

Маркерами «x» отмечен расчетный график распределение импульса волны, маркерами «*» отмечен расчетный график распределения амплитуды давления по длине канала. Характер убывания рассмотренных параметров соответствует установленному в экспериментальных условиях: импульс волны убывает медленнее, чем избыточное давление УВВ.

Необходимо также отметить интересную возможность разработанного метода численного счета учитывать полную энергию, запасенную во всем объеме загазированного участка выработки. Как отмечалось выше, в существующей методике энергия взрыва газоздушной смеси оценивается по избыточному давлению на границе загазированного участка, после полного сгорания смеси [4]. Несмотря на то, что нормативном документе принимается квазистационарный предел избыточного давления дефлаграционного горения газов (2,8 МПа), в реальности энергия, выделившаяся в большем объеме газов (при длине участка загазирования 65 м) будет увеличивать расстояния распространения УВВ с опасными параметрами (квазистационарный предел избыточного давления, к тому же, зависит от размера сечения выработки).

На рис. 10 приведен график зависимости избыточного давления, в точке отстоящей от участка загазирования на расстоянии 5 м. Длина участка загазирования варьируется от 0,1 до 2,0 м, квазистационарный предел избыточного давления принят 0,5 МПа, диаметр канала 1 м. График показывает прямую зависимость между рассматриваемыми параметрами.

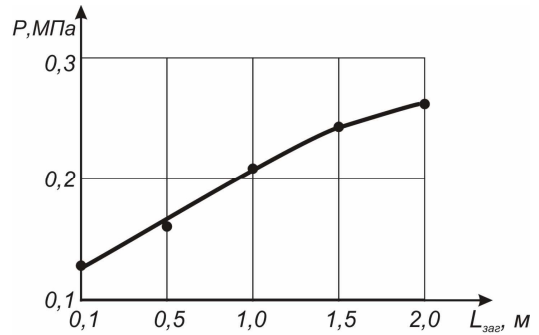


Рисунок 10 – Влияние длины загазированного участка на величину избыточного давления УВВ

ВЫВОДЫ. Разработана устойчивая разностная схема численного счета распространения ударной воздушной волны на прямолинейном участке горной выработки. По результатам численных экспериментов установлена сходимость расчетных параметров с результатами известных лабораторных и натуральных экспериментов.

Для возможности применения схемы численного счета в реальных задачах необходимо: разработка схемы численного счета прохождения воздушной ударной волной сопряжений выработок, обоснование и реализация методики расчета сил трения потока газа о стенки выработки, расчета теплообмена потока газа со стенками выработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устав ВГСЧ по организации и ведению горноспасательных работ. – М.: Недра, 1986. – 254 с.
2. Плотников В.М. Обеспечивается ли безопасность труда горноспасателей при угрозе взрыва газа и пыли в угольных шахтах // Безопасность труда в

промышленности. – 1992. – № 1. – С. 29–33.

3. Устав военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. – М., 1997. – 201 с.

4. Устав ГВГСС по организации и ведению горноспасательных работ: ДНАОП 1.1.30-4.01-97. – Киев, – 1997. – 453 с.

5. О коэффициенте затухания воздушных ударных волн при их распространении по прямолинейным участкам выработок / А.М. Чеховских, В.И. Гудков И.Л. Пономарев и др. // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1970. – № 11–12. – С. 38–39.

6. Гурин А.А., Малый П.С., Савенко С.К. Ударные воздушные волны в горных выработках. – М.: Недра, 1983. – 223 с.

7. СНиП 2.01.54–84. Защитные сооружения гражданской обороны в подземных горных выработках / Минземстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1998. – 20 с.

8. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Цыганов С.А. О моделировании волн давления, образующихся при детонации и горении газовых смесей // Физика горения и взрыва. – 1985. – № 2. – С. 90–97.

9. Чжан Ц., Ли В., Цинь Б., Дуань Ю. Оценки опасности взрывов смесей метана с воздухом в шахтах // Физика горения и взрыва. – 2010. – № 6. – С. 66–72.

10. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий / В.А. Котляревский, К.Е. Кочетков, А.А. Носач и др.; под ред. К.Е. Кочеткова, В.А. Котляревского, А.В. Забегаева. – М.: Изд. АСВ, 1995. – 320 с.

11. 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.

12. Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю., Шрагер Э.Р. Моделирование распространения воздушных ударных волн от взрыва метановоздушной смеси в разветвленной системе горных выработок угольных шахт // Математическое моделирование процессов в синергетических системах: сборник

статей. – Улан-Удэ-Томск, 1999. – С. 94–98.

13. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Мянчин В.В., Костенко В.Н. Оценка влияния волновых эффектов распространения ударных воздушных волн на величину взрывобезопасного расстояния // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах». – Кемерово, 2000. – С. 143–145.

14. Численное решение многомерных задач газовой динамики / К.С. Годунов, А.В., Забродин М.А. Иванов и др. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

15. Агеев В.Г. Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана // Горноспасательное дело. – 2010. – Вып. 47. – С. 5–10.

16. Греков С.П., Зинченко И.Н., Карманов В.С. Методика расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли в шахтах // Горноспасательное дело. – 2010. – Вып. 47. – С. 17–25.

17. Агеев В.Г., Зинченко И.Н. Моделирование распространения ударных волн при мгновенной и цепной реакциях горения метана и пыли в горных выработках // Матер. междунар. конф. «Форум горняков». – Днепропетровск: НГУ, 2012. – С. 12–16.

18. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 391 с.

19. Агеев В.Г. Проблемы предотвращения и локализации взрывов метана в шахтах // Горноспасательное дело. – 2009. – Вып. 46. – С. 5–10.

20. Сафонова С.А. Методы оценки параметров и последствий взрывов парогазового облака в информационной технологии поддержки действий диспетчера предприятия // Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Дала. – 2007. – № 3(109), част. 2. – С. 241–246.

21. Сильников М.В., Петров А.В., Сергеев В.А. Экспериментальное измерение импульса воздушной ударной волны при взрыве заряда тротила массой до 1 кг // Труды Второй междунар. научно-практической конф. «Разработка новой спецтехники для органов внутренних дел». – СПб.: Университет МВД РФ, 2000. – С. 230–236.

THE GAS-DYNAMIC CALCULATION OF THE PARAMETERS OF AIR SHOCK WAVES PROPAGATION IN MINE WORKINGS

N. Nalisko

Stakhanov Educational Scientific Institute of Mining and Educational Technologies of the Ukrainian Pedagogical and Engineering Academy

vul. Telman 53, Stahanov, Lugansk region, 94000, Ukraine. E-mail: ntk593@rambler.ru

In the paper the justification of the new approaches development to the air shock waves propagation parameters calculation in mine workings is represented. A new problem solution on the air shock waves propagation parameters calculation is offered. The developed approach is based on the numerical solution of the gas dynamics equations using the large-particle method. The comparison criteria choice of the numerical accounts results with the laboratory and full-scale experimental researches results is substantiated. The research results can be compared using the relative value of the parameters of a blast wave, such as degree of change of amplitude and impulse at detached areas of the mine working in the near-field and far-field impact zones of a blast wave. Absolute values of excess pressure amplitude and impulse of a blast wave can be considered as assessment parameters. The convergence of the experiment numerical results is shown.

Key words: shock wave, impulse, mine working, the numerical account, gas dynamics.

REFERENCES

1. The PMRD charter on the organization and carrying out the mine-rescue works (1984), *Nedra*, Moscow, Russia.
2. Plotnikov, V.M. (1992) "In coal mines by the gas and dust explosion threat the rescuers labor safety is provided, isn't it?" *Bezopastnost truda v promyshlennosti*, no.1, pp. 29–33.
3. The paramilitary mine-rescue department charter (PMRD) of the mine-rescue works organization and conduction in the coal and oil shale industries (1997), Moscow, Russia.
4. The SPMRD charter on the mine-rescue works organization and conduction (1997), DNAOP 1.1.30–4.01-97, Kiev, Ukraine.
5. Chekhovskikh, A.M., Gudkov, V.I., Ponomarev, I.L., et al. (1970), "About the air shock waves attenuation coefficient as they propagate along the straight sections of the workings", *Tekhnika bezopastnosti, okhrana truda i gornospasatelnoye delo*, no.11–12, pp. 38–39.
6. Gurin, A.A., Malyy, P.S. and Savenko, S.K. (1983) *Udarnyye vozdushnyye volny v gornykh vyrabotkakh* [The air shock waves of in the mine workings], *Nedra*, Moscow, Russia.
7. "The civil defense protective constructions in the underground mines" (1998), BNR 2.01.54–84. *Minzestroy Rossii, GUP CPP*, Moscow, Russia.
8. Borisov, A.A., Gelfand, B.E. and Tsyganov, S.A. (1985), "About the modeling of the pressure waves, formed by the gas mixtures detonation and combustion", *Fizika gorennya i vzryva*, no.2, pp. 90–97.
9. Chzhan, C., Lee, V., Tsin, B, Duan, Ju. (2010) "The danger estimation of the methane and air mixture explosions in mines", *Fizika gorennya i vzryva* no.6, pp. 66–72.
10. Kotlyarevskiy, V.A., Kochetkov, K.E., Nosach, A.A., Zabegaev, A.V., et al. Under reduction Kochetkov, K.E., Kotlyarevskij, V.A. and Zabegaev, A.V. (1995) "The accidents and disasters. The prevention and effects liquidation." Ed. *ASV*, Moscow, Russia.
11. Vasenin, I.M., Schrager, E.R., Kraynov, A.Ju., Paleev, D.Ju., et al. (2011) "The mathematical modeling of the non-stationary ventilation processes in the coal mines workings netwvol.3, no.2, pp. 155–163.
12. Vasenin, I.M., Kraynov, A.Ju., Paleyev D.Ju., Schrager E.R. (1999) "The air shock waves propagation modeling due to the methane-air mixture explosion in the coal mines workings extensive system", *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov v sinergeticheskikh sistemakh*, Collected works, Ulan-Ude, Tomsk, pp. 94–98.
13. Paleyev, D.J., Lukashov, O.J., Myachin, V.V., Kostenko, V.N. (2000) "The wave effects impact estimation of the shock air waves propagation on the explosion-proof distance size", Proceedings of the 4th International Scientific-and-Practical conference *Bezopastnost zhiznedeyatelnosti predpriyatij v ugotnykh regionakh* [The enterprises labor safety in the coal regions], Kemerovo, pp. 143–145.
14. Godunov, K.S., Zabrodin, A.V., Ivanov, M.A., et al. (1976), *Chislennoye resheniye mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [The numerical solution of the gas dynamics multi-dimensional tasks], *Nauka*, Moscow, Russia.
15. Ageyev, V.G. (2010), "The mathematical model of the shock wave formation in the mines by the methane explosions", *Gornospasatelnoye delo*, iss. 47, pp. 5–10.
16. Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. and Karmanov, V.S. (2010), "The calculation methodology of the of air shock waves parameters by the gas and dust explosions in mines", *Gornospasatelnoye delo*, iss. 47, pp. 17–25.
17. Ageyev, V.G. and Zinchenko, I.N. (2012), "The modeling of the shock waves propagation at the instant and chain reactions of methane and dust combustion in mines", Proc. Int. Conf. *Forum gornikov* [The miners' forum], NMU, Dnepropetrovsk, pp. 12–16.
18. Belotserkovskiy, O.M. and Davydov, J.M. (1982), *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike* [The large particles method in the gas dynamics], *Nauka*, Moscow, Russia.
19. Ageyev, V.G. (2009), "The prevention and localization problems of the methane explosions in mines", *Gornospasatelnoye delo*, iss. 46, pp. 5–10.
20. Safonova, S.A. (2007), "The estimating methods of the steam and gas cloud explosion parameters and effects in the enterprise dispatcher actions information technology support", *Visnik Skhidnoukraïnskogo Natsionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya*, no.3(109), part 2, pp. 241–246.
21. Silnikov, M.V., Petrov, A.V. and Sergeyev, V.A. (2000), "The experimental impulse measurement of the air shock wave at the explosion of a charge of TNT weighing up to 1 kg", Proceedings of the 4th International Scientific-and-Practical conference *Razrabotka novoy spetstekhniki dlya organov vnutrennikh del* [The development of the new machinery for the internal affair departments], The University of the Russian Federation Ministry of Internal Affairs, St. Petersburg, pp. 230–236.

Стаття надійшла 01.10.2013.