

УДК 331.452:519.6: 622.81

Налисько Н.Н., канд. техн. наук, доцент
(ГВУЗ «ПГАСА»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВАХ ШАХТНОЙ АТМОСФЕРЫ С УЧЕТОМ ОТРАЖЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН В ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТКАХ

Налисько М.М., канд. техн. наук, доцент
(ДВНЗ «ПДАБА»)

ВИЗНАЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ ВІДСТАНЕЙ ПРИ АВАРІЙНИХ ВИБУХАХ ШАХТНОЇ АТМОСФЕРИ З УРАХУВАННЯМ ВІДБИТТЯ УДАРНИХ ПОВІТРЯНИХ ХВИЛЬ У ТУПИКОВИХ ВИРОБКАХ

Nalisko N.N., Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(SHEI «PSACEA»)

HOW TO DETERMINE SAFETY DISTANCE AT EMERGENCY AT- MOSPHERIC EXPLOSIONS IN THE BLIND DRIFTS IN VIEW OF RE- FLECTION OF SHOCK AIR WAVES

Анотация. Для повышения точности расчета безопасных расстояний при взрывах газа на аварийных участках угольных шахт были проведены численные эксперименты с использованием математической модели ударной трубы по распространению ударных воздушных волн в цилиндрических каналах. Ударные волны генерировались взрывом вытянутых газозвуковых облаков которые заполняют протяженные участки каналов.

Изучались закономерности распространения фронта ударной воздушной волны при взрыве вблизи тупикового забоя. Показано как в динамике изменяются давление, скорость, плотность и температура газового потока вдоль оси выработки. Установлено, что эффект отражения ударной волны от плоскости забоя может увеличивать амплитуду головной волны на величину до 36 % (для типовых сечений выработок), силовой импульс, создаваемый волной до 70 %. Максимальное расстояние от места взрыва до забоя, при котором возникают заметные волновые эффекты составляет 180 м. Получены закономерности изменения степени интенсивности ударной волны и расстояния до точки слияния отраженной и головной волны в зависимости от начальных условий. Закономерности представлены в виде графиков и регрессионных уравнений. Разработана методика учета волновых эффектов распространения ударных воздушных волн в расчете безопасных расстояний.

Ключевые слова: ударная воздушная волна, волновой эффект, тупиковая выработка, отражение, интенсивность волны, численный расчет.

Введение. Одним из способов тушения подземных пожаров в шахте является изоляция аварийного участка взрывоустойчивыми перемычками. Для защиты горноспасателей от газовых взрывов при возведении перемычек используется метод защиты безопасным расстоянием, методика определения которого основана на закономерностях затуханий ударных воздушных волн (УВВ) в горных выработках.

Практика показывает, что в некоторых случаях повторные взрывы на аварийных участках приводят к гибели или травмированию горноспасателей, выполняющих работы как во время возведения изолирующих перемычек, так и работающие под их защитой [1]. Можно предположить, что такая ситуация возникает из-за неполноты учета факторов в процессе определения параметров УВВ.

Анализ последних исследований. В направлении численного моделирования действия взрывов в горных выработках известны работы, проводимые в университетах Китая [2–4], в Институте угля и углехимии СО РАН [5].

При разработке планов ликвидации аварии или в реальной ситуации при локализации аварийного взрыва возникает задача прогнозирования параметров течения ударной воздушной волны в тупиковых выработках (рис. 1). Это может быть взрыв газа в призабойном пространстве, на некотором расстоянии от тупикового забоя.

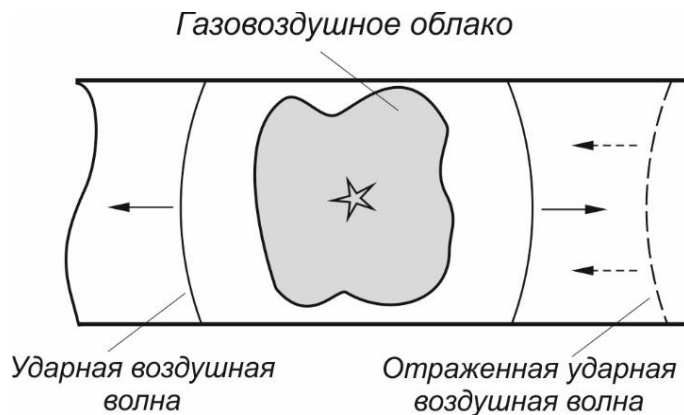


Рисунок 1– Распространения ударной воздушной волны вблизи тупикового забоя

В существующей методике расчета (Устав ГВГСС Украины) параметры УВВ в этом случае определяются как течение газового потока по прямолинейному участку, в сторону от тупика, начиная от границы загазирования. Начальное избыточное давление во фронте УВВ определяется длиной участка загазирования. Однако, исходя из физики процесса на распространение УВВ в данных случаях могут оказывать влияния волновые процессы, возникающие у плоскости забоя при отражении фронта УВВ движущегося в сторону тупика. Об этом свидетельствуют исследования, проведенные в 70-х годах прошлого столетия на экспериментальных участках рудников под руководством А.М. Чеховских, В.М. Плоникова. Результаты в виде только качественной оценки были использованы в методике расчета параметров УВВ и лишь в случае т-образного сопряжения выработок: при наличии примыкающего к сопряжению тупиковой выработки длиной не более 130 м коэффициент затухания избыточного давления принимался равным единице (т.е. избыточное давление во фронте УВВ не уменьшалось), в противном случае влияние тупикового забоя не учитывалось.

Теоретические и экспериментальные исследования по распространению газовых потоков, в т.ч. УВВ в горных выработках, в Украине, проводились в ИГТМ НАН Украины [6, 7], НИИГД «Респиратор», Криворожском национальном университете и Национальном горном университете [8]. Детального рас-

смотрения волновых эффектов на сопряжениях и в тупиках не выполнялось.

Более полные теоретические исследования в рассматриваемом вопросе были проведены на базе Института угля и углехимии СО РАН, для случая т-образного сопряжения [9]. Путем математического моделирования показано влияние отраженных волн в тупике на избыточное давление во фронте УВВ. Установлена возможность увеличения амплитуды УВВ в случае примыкания к сопряжению тупиковой выработки. Однако, в работе не установлено как влияет на эту величину амплитуда входящей в сопряжение УВВ и другие параметры УВВ существенные для газовых взрывов.

Таким образом, вопрос окончательно не решен, не установлены закономерности изменения избыточного давления во фронте УВВ под влиянием отраженных в тупике волн. Так же, кроме избыточного давления не рассматриваются другие поражающие факторы УВВ входящие в понятие интенсивность волны, а именно импульс силового воздействия газового потока, который будет передаваться взрывозащитному сооружению.

Цель работы. Оценка влияния волновых эффектов отражения ударной воздушной волны при газовых взрывах на безопасные расстояния. Установление закономерностей изменения параметров ударных воздушных волн вблизи тупиковых выработок на основании математического моделирования ее распространения по сети горных выработок. Разработка методики учета волновых эффектов в расчете безопасных расстояний.

Метод исследований. Для исследований используется численное моделирование течений газового потока с использованием математической модели ударной трубы, в которой реализован газодинамический подход.

Задача решалась путём использования метода численного счёта уравнений газодинамики в системе "газовая взрывчатая среда – окружающая среда". Движение среды в цилиндрической системе координат описывается уравнениями Эйлера (в дивергентном виде):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{W}) &= 0, && \text{неразрывности} \\ \left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= -\tau_{mp} \frac{\Pi}{S}, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} &&& \text{движения} \quad (1) \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{W}) + \operatorname{div}(P \bar{W}) &= q\Pi + q_x \rho \frac{\partial \alpha}{\partial t}, && \text{энергии,} \end{aligned}$$

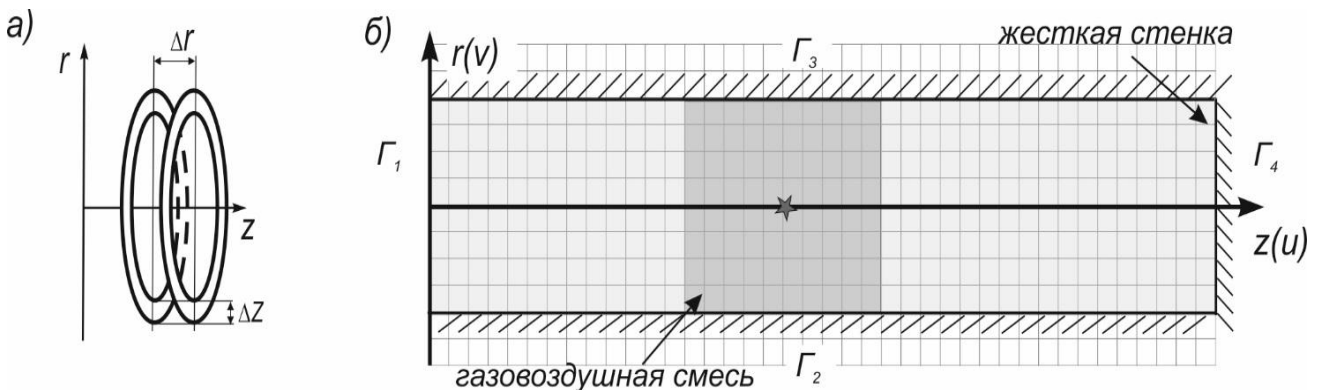
где ρ – плотность, кг/м³; P – давление, Па; W – вектор скорости, м/с; u , v – компоненты скорости W по оси z и r соответственно, м/с; z , r – цилиндрические координаты; $E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ – полная энергия, Дж; J – внутренняя энергия газа, Дж; τ_{mp} – напряжение поверхностных сил трения газового потока о

стенку, H/m^2 ; q – плотность теплового потока в стенку канала, $\text{Дж}/(\text{m}^2 \cdot \text{с})$; S, Π – периметр выработки, м; q_x – тепловой эффект химической реакции горения углеводородов, $\text{Дж}/\text{кг}$; α – мольная доля углеводорода в шахтной атмосфере; t – время, с.

Для замыкания этой системы используется уравнение состояния идеального газа: $P = (\gamma - 1)\rho \cdot J$, где J – удельная внутренняя энергия; γ – показатель адиабаты; ρ – плотность газа.

Таким образом, система уравнений (1) является замкнутой и полностью описывает среду при решении газодинамических задач. Решения системы уравнений (1) производилось с использованием однородной схемы сквозного счёта. В качестве такой схемы был применен модифицированный метод крупных частиц (МКЧ).

Рассматриваемая задача решена в цилиндрической системе координат, в которой расчетная область представлена в виде цилиндрического канала. По сути, такая схема представляет собой ударную трубу с участком, заполненным газовой смесью. Быстрое горение смеси (дефлаграция или детонация) вызывает формирование и распространение ударных воздушных волн в цилиндрическом канале (рис. 2). Схема метода крупных частиц, вопросы его устойчивости и порядка аппроксимации достаточно подробно рассмотрены в литературе (Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М., 1982).



а) в объёмном представлении, в цилиндрической системе координат; б) в плоском представлении; $\Delta r, \Delta z$ – размеры расчетной ячейки; Γ_1 – тип границы расчетной области «свободный выход», Γ_2, Γ_3 – тип границы расчетной области «непротекание», Γ_4 – тип границы расчетной области «жесткая стенка»; v, u – компоненты вектора скорости

Рисунок 2 – Общая структура расчётной сетки

Научная новизна в решении данной задачи с помощью МКЧ заключается в ее постановке (соответственно учет факторов течения газа в канале: теплообмен со стенкой, трение потока о стенку) и модификации метода для течения гетерогенных газовых потоков с учетом кинетики химических реакций между газами, в частности, реакции горения углеводородов в воздухе [10]. Разностная схема решения нестационарных системы дифференциальных уравнений (1) основывается на идее расщеплении этой системы по физическим процессам. За-

дача решается в три этапа: эйлеров, лагранжев и заключительный. На эйлеровом этапе, промежуточные значения скорости \tilde{u} , \tilde{v} и энергии потока \tilde{E} определяются из условия «замораживания» поля плотности $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0\right)$, поэтому численная аппроксимация уравнений движения и энергии (1), в момент времени t^n , в цилиндрической системе координат r, z будет представлена следующими явными конечно-разностными алгебраическими уравнениями первого порядка точности по времени и второго порядка по пространству:

$$\begin{aligned}\tilde{u}_{i,j}^n &= u_{i,j}^n - \frac{P_{i+0,5,j}^n - P_{i-0,5,j}^n}{\Delta z} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \\ \tilde{v}_{i,j}^n &= v_{i,j}^n - \frac{P_{i,j+0,5}^n - P_{i,j-0,5}^n}{\Delta r} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \\ \tilde{E}_{i,j}^n &= E_{i,j}^n - \left[\frac{jP_{i,j+0,5}^n v_{i,j-0,5}^n - (j-1)P_{i,j-0,5}^n v_{i,j-0,5}^n}{(j-0,5)\Delta r} + \frac{P_{i+0,5,j}^n u_{i+0,5,j}^n - P_{i-0,5,j}^n u_{i-0,5,j}^n}{\Delta z} \right] \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n},\end{aligned}$$

где i, j – адрес ячейки прямоугольной расчетной сетки.

На лагранжевом этапе вычисляем перетоки газа за время Δt между ячейками по следующим алгебраическим уравнениям, полученным из численной аппроксимации уравнения неразрывности (1).

Потоки масс по оси z (в зависимости от направления):

$$\Delta M_{i\pm 0,5,j}^n \begin{cases} (j-0,5)\Delta r^2 \rho_{i,j}^n \frac{\tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} \Delta t, & \text{если } \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n > 0, \\ (j-0,5)\Delta r^2 \rho_{i+1,j}^n \frac{\tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} \Delta t, & \text{если } \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n < 0; \end{cases}$$

Поток масс по оси r (в зависимости от направления):

$$\Delta M_{i,j\pm 0,5}^n \begin{cases} (j-0,5)\Delta r \Delta z \rho_{i,j}^n \frac{\tilde{v}_{i,j+1}^n + \tilde{v}_{i,j}^n}{2} \Delta t, & \text{если } \tilde{v}_{i,j+1}^n + \tilde{v}_{i,j}^n > 0, \\ (j-0,5)\Delta r \Delta z \rho_{i,j+1}^n \frac{\tilde{v}_{i,j+1}^n + \tilde{v}_{i,j}^n}{2} \Delta t, & \text{если } \tilde{v}_{i,j+1}^n + \tilde{v}_{i,j}^n < 0; \end{cases}$$

На заключительном этапе рассчитываем новые значения всех параметров потока с учетом перетока масс:

$$\begin{aligned}X_{i,j}^{n+1} (j-0,5)\Delta r^2 \Delta z \rho_{i,j}^{n+1} &= \{D_{i,j}^n (1) \tilde{X}_{i-1,j}^n \Delta M_{i-0,5,j}^n + D_{i,j}^n (2) \tilde{X}_{i,j}^n \Delta M_{i,j-0,5}^n + D_{i,j}^n (3) \tilde{X}_{i+1,j}^n \Delta M_{i+0,5,j}^n + \\ &+ D_{i,j}^n (4) \tilde{X}_{i,j+1}^n \Delta M_{i,j+0,5}^n + \tilde{X}_{i,j}^n \{ (j-0,5)\Delta r^2 \Delta z \rho_{i,j}^n - \\ &- [1 - D_{i,j}^n (1)] \Delta M_{i-0,5,j}^n - [1 - D_{i,j}^n (2)] \Delta M_{i,j-0,5}^n - [1 - D_{i,j}^n (3)] \Delta M_{i+0,5,j}^n - \\ &- [1 - D_{i,j}^n (4)] \Delta M_{i,j+0,5}^n \}\}\end{aligned}$$

где $D_{i,j}^n$ – функция-признак направления перетока масс через границу расчётных ячеек; $X_{i,j}^{n+1}$, $\tilde{X}_{i,j}^n$ – значение параметра на новом временном слое и промежуточное его значение.

В результате этих расчётов нам становятся известными величины ρ^{n+1} , u^{n+1} , v^{n+1} , E^{n+1} на новом временном слое.

Зная эти величины, можно определить внутреннюю энергию $J = \frac{E - W^2}{2}$, где $W^2 = u^2 + v^2$, а следовательно, определить значение давления по формулам уравнений состояния.

В расчетной ячейке могут присутствовать сразу несколько веществ, поэтому для расчёта давления в ней необходимо знать концентрации этих веществ. Для этой цели вводится концентрационная функция $C_{i,j}^n(k)$, для которой $k = 1$ соответствует углеводороду (метан), $k = 2$ – кислород, $k = 3$ – азот.

Перед тем как рассчитать потоки массы через поверхность расчетной ячейки, необходимо знать массивы $C_{i,j}^n(k)$, т.е. знать концентрации веществ.

В начальный момент времени $t = 0$ объемные доли газов задаются в каждой расчетной ячейке следующим образом:

– в области загазирования метаном массивы концентраций имеют значения $C_{i,j}^n(1) = 0,09$; $C_{i,j}^n(2) = 0,205$; $C_{i,j}^n(3) = 0,705$;

– в области чистой шахтной атмосферы (не загазированной) $C_{i,j}^n(1) = 0$; $C_{i,j}^n(2) = 0,21$; $C_{i,j}^n(3) = 0,79$;

При расчетах потоков массы через границы счётных ячеек будем учитывать тот факт, что общий поток массы равен сумме потоков масс отдельных компонентов. Вначале рассчитываем общие потоки массы, затем потоки отдельных компонентов (предполагается односкоростная модель). Для этого делается замена $\rho_{i,j} \rightarrow \rho_{i,j} C_{i,j}$. Таким образом, определяются $\rho_{i,j}^n(\alpha)$, $\alpha = 1..3$.

После этого определяем концентрации $C_{i,j}^{n+1} = \frac{\rho_{i,j}^{n+1}(\alpha)}{\rho_{i,j}^{n+1}}$.

Расчёт давления необходимо вести по формуле $P_{i,j}^{n+1} = \sum_{\alpha=1}^4 P_{i,j}^{n+1}(\alpha) \cdot C_{i,j}^{n+1}(\alpha)$,

где парциальное давление определяется по уравнениям состояния для каждой компоненты.

Данная расчетная схема позволяет моделировать распространения УВВ вблизи призабойного пространства подготовительной выработки (рис. 1). Форма и величина поперечного сечения выработки в расчете переводятся в эквивалентное сечение круглой формы.

Экспериментальная часть. Для установления закономерностей изменения параметров УВВ при ее распространении вблизи тупиковых выработок была

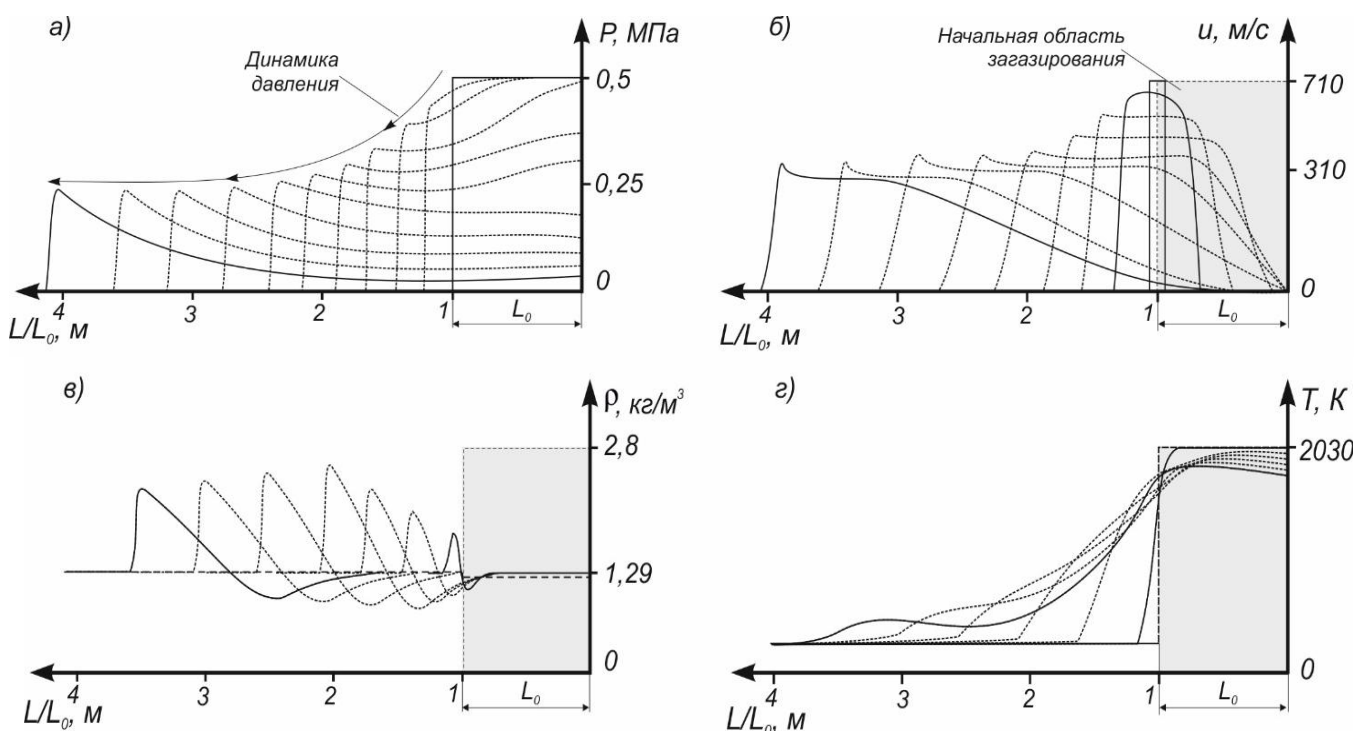
проведена серия численных экспериментов по плану дробного трехфакторного эксперимента. Пределы варьирования начальных условий приведены в табл. 1.

Таблица 1– Пределы варьирования начальных условий в плане трехфакторного эксперимента

Длина загазированного участка, L_0 , м	Расстояние от места взрыва до забоя h , м	Давление взрыва, P , МПа
1–200	5–180	0,1–2,8

В задаче принимались следующие допущения (приближения): взрывчатая газоздушная смесь равномерно распределена на прямолинейном загазированном участке, объемный газовый взрыв происходит мгновенно во всем объеме, плоскость забоя перпендикулярна направлению потока, граничные условия по теплопроводности в стенку канала – условия третьего рода с постоянным коэффициентом теплообмена газового потока со стенкой $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и теплопроводностью стенки (аргиллит) $2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, шероховатость стенки канала соответствует установленной крепи типа СВП-19 с шагом установки $1,0 \text{ м}$.

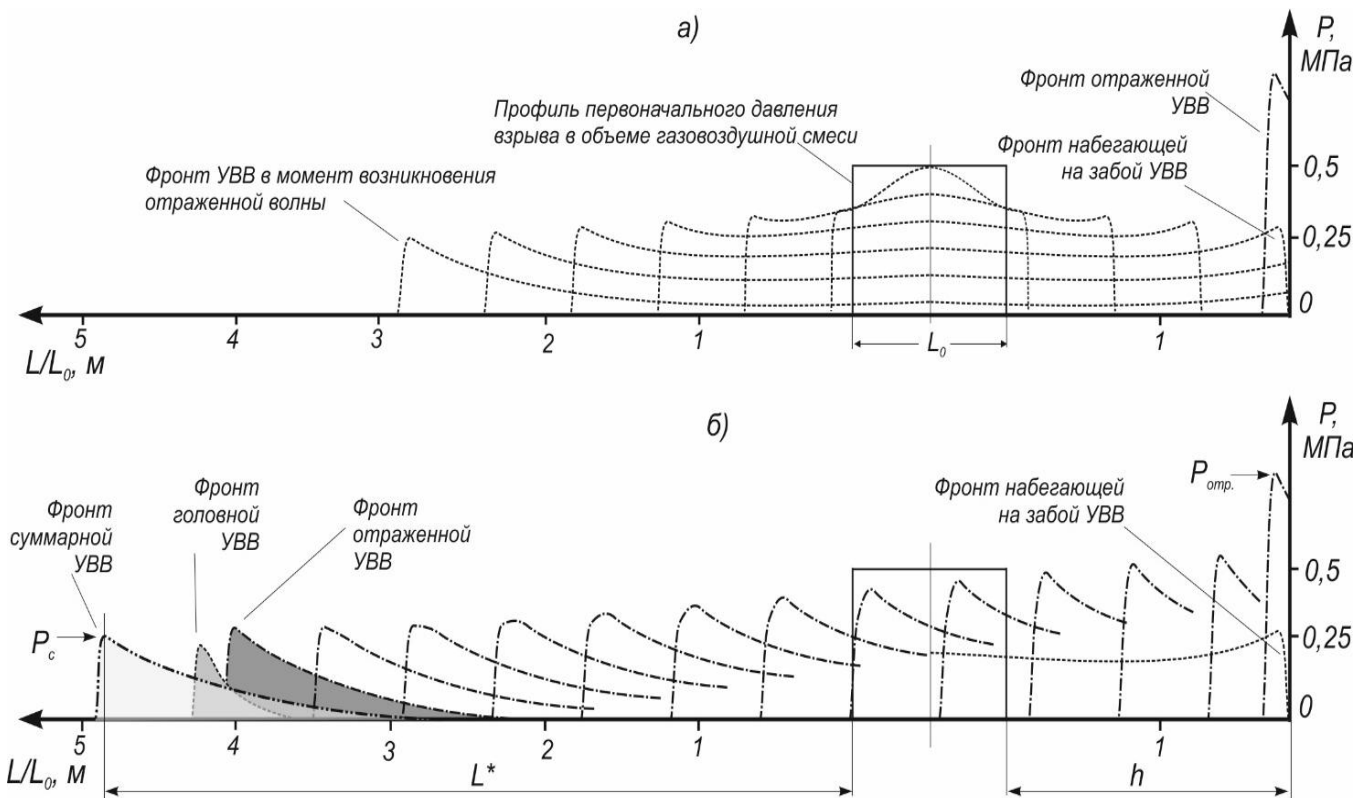
Численный эксперимент показал, что в случае взрыва газоздушной смеси непосредственно у плоскости забоя тупиковой выработки формируется фронт УВВ (рис. 3) и поток газа движущийся от забоя, объем которого в начальной стадии пропорционален объему взорвавшейся газоздушной облака (рис. 3б).



а) давление, б) мгновенная скорость потока, в) плотность газового потока, г) адиабатическая температура; L_0 – длина загазированной части канала

Рисунок 3 – Динамика изменения параметров газоздушной среды при взрыве в призабойном пространстве (вдоль оси z)

При газовом взрыве на некотором расстоянии от плоскости забоя фронт УВВ формируется с обеих сторон от газоздушного облака, направление движения одного из них направлено в сторону плоскости забоя (рис. 4). Достигнув забоя, последний отражается от жесткой стенки и движется вслед за головным. Поскольку в процессе отражения увеличивается амплитуда УВВ и распространяется он будет по сжатому газу то скорость отраженной волны будет выше скорости головного фронта УВВ и соответственно через некоторое время отраженная волна может догонять передовую и усиливать ее.



а) возникновение отраженной волны, б) динамика изменения давления во фронте головной, отраженной и суммарной УВВ

Рисунок 4 – Динамика процесса возникновения отраженной УВВ и ее слияние с головным фронтом

Результаты эксперимента выявили, что на амплитуду отраженной волны влияет не только амплитуда набегающей волны, но и объем газового потока.

При взрыве значительных объемов газа, в плоскости тупикового забоя происходит не одномоментное отражение УВВ, как при взрыве конденсированных ВВ, а процесс отражения растянут во времени за счет сравнительно длительного времени набегания газового потока на забой.

Фронт набегающего потока отразившись от забоя начинает двигаться по встречному потоку газа что вызывает возникновения пульсаций параметров газа и формирование несколько отраженных волн сжатия первая из которых будет ударная остальные – волны сжатия. По мере распространения эти волны

сливаются в одну отраженную УВВ которая может догонять головную. Например, на рис. 5 показана динамика изменения профиля давления в газовом потоке, образованном взрывом газозвушной смеси в выработке сечением $7,2 \text{ м}^2$, длина загазированного участка 5 м, начальное давление взрыва $0,5 \text{ МПа}$.

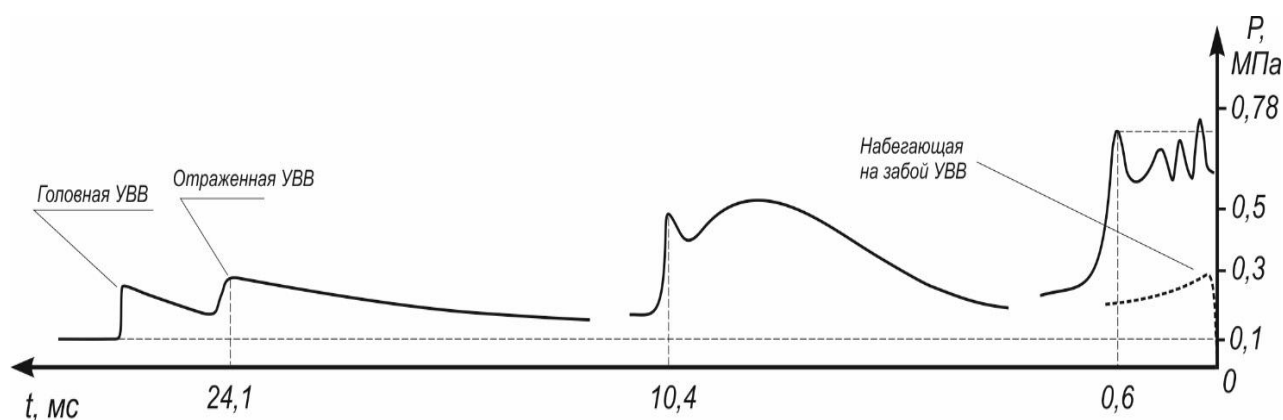


Рисунок 5 – Изменения профиля давления в тупиковой выработке при взрыве газозвушной смеси с начальным давлением взрыва $0,5 \text{ МПа}$ (счет времени от момента отражения фронта УВВ от плоскости забоя)

Амплитуда набегающей УВВ у плоскости забоя имеет значение $0,3 \text{ МПа}$, в результате отражения, амплитуда возрастает до $0,78 \text{ МПа}$, которая на сразу начинает убывать по мере удаления фронта от забоя: через $0,6$ мс амплитуда снижается до $0,74 \text{ МПа}$, через $10,4$ мс волны пульсации давления соединяются в одну волну сжатия, через 24 мс отраженная волна выравнивается в единый фронт. Скорость убывания амплитуды зависит от объема газового потока, движущегося на забой.

Отраженная волна, в случае слияния с головной, увеличивает интенсивность УВВ и по максимальному давлению и по создаваемой волной импульсу, что хорошо видно на графике скорости потока (рис. 6). Причем, интенсивность волны в большей степени возрастает не за счет увеличения амплитуды, а за счет увеличения создаваемого импульса. Как видно из графика (рис. 6) амплитуда в суммарной волне увеличилась на 24% , импульс увеличился на 70% (значения импульса получено путем численного интегрирования графика скорости и плотности среды). Характерно, что интенсивность УВВ возрастает даже в случае, когда амплитуда отраженной волны, движущейся вслед головной, опускается ниже амплитуды последней. При постепенном слиянии, фронт отраженной набегающей на волну сжатия головной и их амплитуды выравниваются, интенсивность в этом случае увеличивается только за счет импульса волны.

Как показал численный эксперимент, на расстояние до точки слияния и другие параметры суммарной УВВ влияет (при прочих равных условиях) не только избыточное давление взрыва газозвушной смеси, но и ее объем (рис. 7): увеличение объема ведет к увеличению расстояния, что связано с значительной длиной волны сжатия и прохождением ее отраженного фронта по самому набегающему потоку.

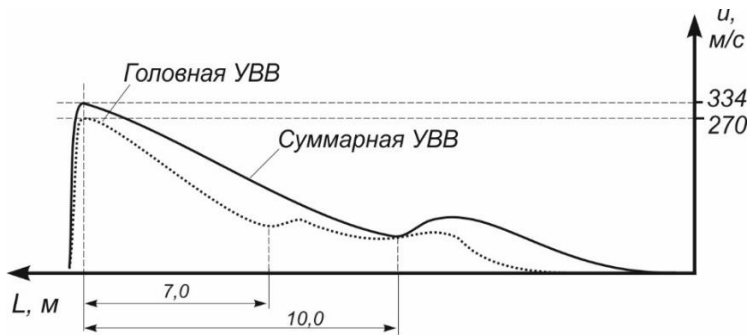


Рисунок 6 – Профиль скорости газового потока головной одинарной и суммарной УВВ в момент слияния волн (вариант задачи): u – скорость ударной волны относительно сжатого газа

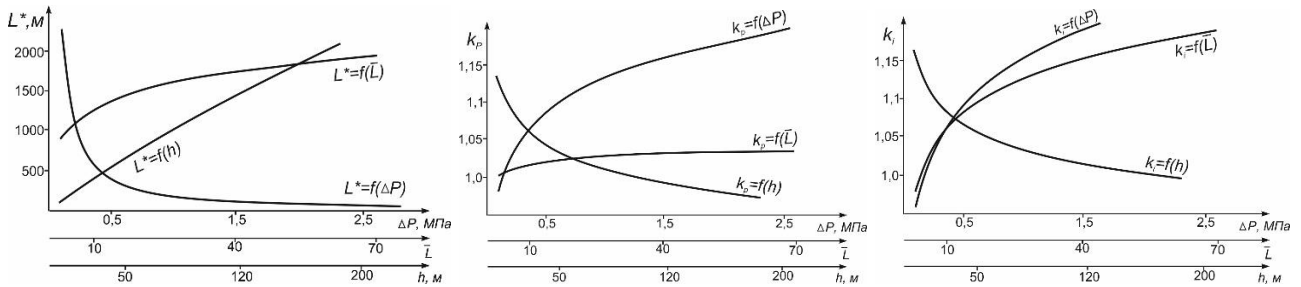


Рисунок 7 – Зависимости расстояния до точки слияния волн L^* , коэффициента увеличения амплитуды фронта УВВ k_p и импульса k_i суммарной волны от начальных параметров взрыва: избыточное давление взрыва ΔP , относительная длина загазированного участка \bar{L} , расстояние от места взрыва до тупикового забоя h

Характерное влияние на процесс диссипации энергии УВВ оказывает также соотношение длины участка загазирования к его диаметру. Чем меньше это значение, тем выше скорость падения амплитуды и импульса волны (хотя в этом случае меньшее влияние на диссипацию энергии оказывают сила трения потока газа и теплообмен со стенкой, но по отношению к предыдущему фактору они незначительны) (рис. 8). Поэтому при установлении закономерностей, мерой объема должна выступать относительная длина загазированного участка, как принято в действующей методике расчета безопасных расстояний, но уточненная в зависимости от формы сечения выработки:

$$\bar{L} = \frac{L_0}{d_2}, \quad d_2 = \frac{4S}{\Pi},$$

где L, L_0 – относительная и фактическая длина загазированного участка, м; d_2 – гидравлический диаметр выработки, м; S – площадь сечения выработки, m^2 ; Π – периметр выработки, для формы сечения арочная – $3,84\sqrt{S}$, трапециевидная – $4,16\sqrt{S}$, круглая – $3,56\sqrt{S}$, квадратная – $4\sqrt{S}$, м

С практической точки зрения для конкретных условий нам необходимо знать, произойдет ли влияние отраженной волны, где произойдет слияние волн и как увеличится интенсивность УВВ.

Приближенное аналитическое решение такой задачи для слабых ударных

волн в звуковом приближении впервые было получено в работе М.А. Цикулина 1960, экспериментальная проверка теоретических положений были представлены в работах А.А. Гурина, 1983. В качестве источников УВВ, в последней работе, использовались два заряда конденсированных ВВ, генерирующие УВВ треугольного профиля (рис. 9).

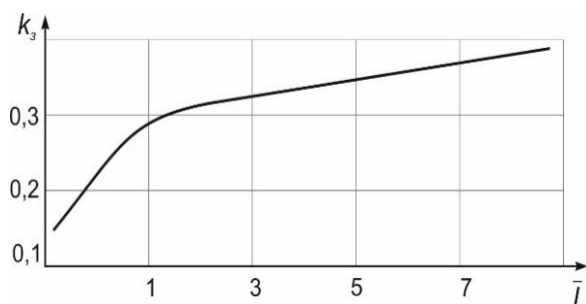


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента затухания УВВ от относительной длины загазированного участка

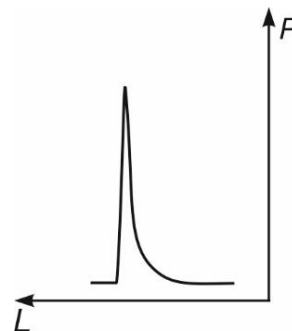


Рисунок 9 – Профиль ударной волны взрыва открытого заряда конденсированного ВВ

Однако, результаты этих исследований не дают возможности использовать их в практических расчетах взаимодействия отраженных и прямых волн, имеющих различные параметры, с профилем сильно вытянутого треугольника, что характерно для газовых взрывов. Так же в полученных аналитических зависимостях в качестве исходных данных необходимо знать начальные импульсы волн, их длины, что не реализуемо на практике.

По результатам обработки данных эксперимента методом наименьших квадратов получены регрессионные уравнения определения расстояния до точки слияния отраженной и головной волны, и значения коэффициентов увеличения амплитуды и импульса УВВ в точке слияния:

$$L^* = \frac{25\bar{L}^{0,2} h^{0,9}}{\Delta P^{1,12}}, \quad k_p = \frac{1,23\bar{L}^{0,01} \Delta P^{0,06}}{h^{0,05}}, \quad k_i = \frac{1,5\bar{L}^{0,04} \Delta P^{0,08}}{h^{0,09}}, \quad (2)$$

где L^* – расстояние до точки слияния фронтов отраженной и головной волны (рис. 4), м; k_p , k_i – коэффициенты увеличения амплитуды и импульса УВВ в точке слияния; L – приведенная длина загазированного участка от очага воспламенения до границы раздела «горючая смесь–воздух» (1); h – расстояние от загазированного участка до плоскости тупикового забоя, м; ΔP – избыточное давление взрыва, МПа

Граничные значения начальных параметров в (2) были приняты исходя из их максимальных значений в действующей методике расчета безопасных расстояний: $\Delta P=2,8$ МПа, $L=70$. Максимальное значение h , при котором возможно влияние отраженной волны, было установлено исходя из эксперимента. Для типичных сечений подготовительных выработок шахт Донбасса это значение не превышает 160-180 м, т.е. если взрыв газа происходит на расстояниях превышающих эти величины то влияние отраженной волны не существенно: амплитуда головной волны не увеличивается, импульс волны возрастает не более,

чем на 4 %, отраженная волна догоняет головную когда амплитуда последней падает до безопасных значений ($< 0,006$ МПа). В противном случае, влияние отраженной волны необходимо учитывать в расчете безопасных расстояний.

Методика учета волновых эффектов в тупиковых выработках с использованием уравнений (2) следующая. Вначале составляется расчетная схема распространения УВВ от вероятных источников взрыва шахтной атмосферы по стандартной методике. Далее, если вероятный источник взрыва находится ближе 180 м к забою тупиковой выработки, то необходимо выполнить проверку возможности влияния волновых эффектов на интенсивность УВВ. Для этого по соответствующей формуле (2) определяют расстояние до точки слияния фронтов отраженной и головной УВВ. На расчетную схему наносят точку слияния. В случае если в пределах расстояния до точки слияния встречаются разветвления выработок, то таких точек может быть несколько, соответственно, по одной каждом направлении. Поскольку каждое сопряжение выработок или ответвление уменьшают амплитуду фронта УВВ, то оставшееся расстояние от сопряжения (ответвления) до точки слияния пропорционально увеличивается (рис. 8). В качестве коэффициента пропорциональности используется стандартный коэффициент местного сопротивления сопряжений и ответвлений выработок K_M (Устав ГВГСС Украины, приложение 19). Для корректировки этого расстояния, его значение после каждого сопряжения (ответвления) необходимо умножить на корректирующий коэффициент $k' = 2 - K_M$.

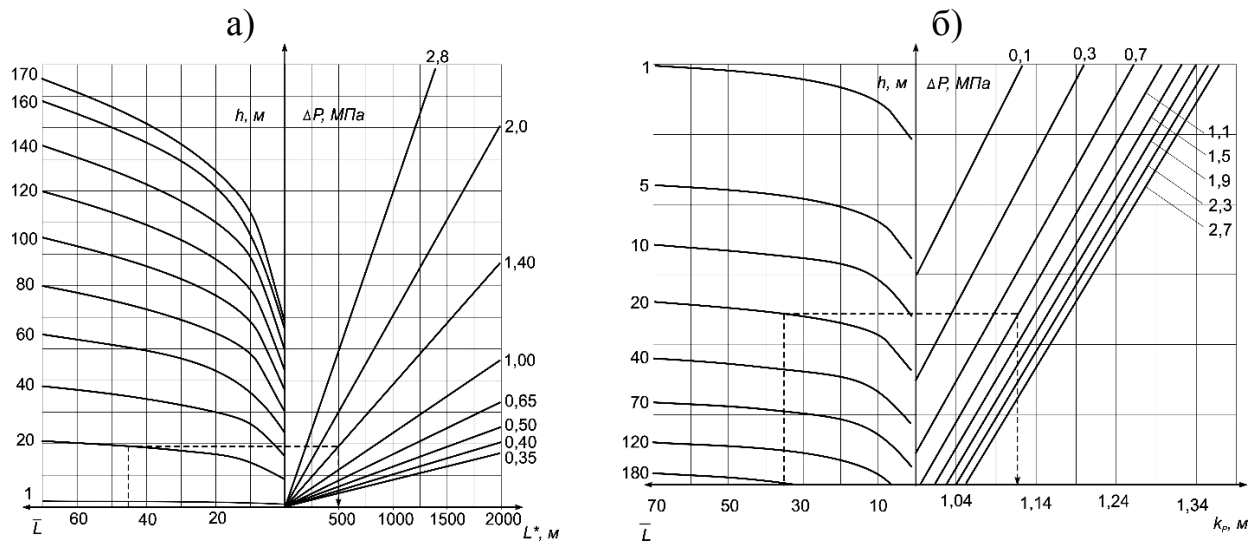
После того как будут установлены точки слияния с учетом корректировки, необходимо определить коэффициент увеличения амплитуды головной волны k_P по соответствующей формуле (2). Этот коэффициент также необходимо скорректировать в случае наличия местных сопротивлений, понижающих амплитуду головной волны и соответственно степень ее увеличения при слиянии с отраженной. Для этого после каждого сопряжения определяют новый k_P' по формуле $k_P' = 1 + k_P K_M - K_M$.

Если в полученных точках слияния отраженной и головной волны избыточное давление фронта головной волны, рассчитанное по стандартной методике, выше безопасного значения то мы считаем, что здесь возникает усиливающий эффект волнового взаимодействия и избыточное давление фронта умножается на k_P .

В случае, если по формуле (2) мы получаем значение $k_P \leq 1$ или же после корректировки значение $k_P' \approx 1,0$, то усиливающий волновой эффект не наступает.

Для инженерных расчетов, определение значений L^* и k_P можно производить по номограммам (рис. 10).

В настоящее время в действующей методике расчета безопасных расстояний и прочности взрывоустойчивых перемычек не учитывается временной фактор силового воздействия УВВ – импульс, хотя известно, что в газовых взрывах его влияние в некоторых случаях может быть решающим. Поэтому полученную закономерность увеличений импульса в волновых эффектах в виде коэффициента k_i (2) можно использовать как дополнительную прогнозную оценку разрушающих факторов УВВ.

Рисунок 10 – Номограммы определения L^* (а) и k_p (б)

Выводы. Результаты численного эксперимента позволяют установить закономерности распространения ударных воздушных волн по сети горных выработок с учетом волновых эффектов возникающих в тупиковых забоях. Установлено, что для типовых сечений подготовительных выработок относительное увеличение амплитуды УВВ от волновых эффектов не превышает 36 %, а расстояние от места взрыва до тупикового забоя, при котором возможно возникновение значительных эффектов, не превышает 180 м. Для каждого конкретного случая степень изменения параметров УВВ определяется по формулам (2) с использованием разработанной методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюханов, А.М. Анализ обстоятельств взрывов метана на шахтах и мероприятия по их предотвращению / А.М. Брюханов, А.Г. Мнухин, К.К. Бусыгин // Уголь Украины. – 2003. – № 4. – С. 37-40.
2. Chen, C.Y. (2010), “Numerical simulation on airflow effects in local ventilate network of gas explosion”, in Xiangchun Li (ed.), *Progress in Mine Safety Science and Engineering II*, CRC Press, Balkema Book, London, UK, pp. 167-175.
3. Wang, K., Zhou, A., Wei, G. and Zhang J. (2012), “Study of the Formation and Propagation Characteristics of Shock Wave and Gas Flow of Outburst at Straight Roadway”, *Journal of Mining & Safety Engineering*, issue 4, pp. 197-202.
4. Wang, K., Zhou, A., Zhang, P., Li C. and Guo, Y. (2011), “Study on the propagation law of shock wave resulting from coal and gas outburst” *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, vol. 17, issue 2, pp. 142–146.
5. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т.3 № 2. – С. 155-163.
6. Бунько, Т.В. Обоснование метода расчета воздухораспределения в реконфигурируемой шахтной вентиляционной системе в условиях неполной информации об объекте управления / Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, А.Ш. Жалилов // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 116. – С. 203-210.
7. Совершенствование метода расчета концентраций метана по сети горных выработок, включающих рассредоточенные источники метановыделения / Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, А.Ш. Жалилов, А.Б. Бокий // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 120. – С. 31-43.
8. Русских, В.В. Определение фактических параметров ударных воздушных волн при производ-

стве массовых зрывов в подземных условиях // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип.55. – С. 176-182.

9. Палеев, Д.Ю. Исследование влияния примыкающей тупиковой выработки на интенсивность ударной волны / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов // Безопасность угольных предприятий: сб. науч. тр. – Кемерово: ВостНИИ, 2004. – С. 47-55.

10. Чернай, А.В. Кинетика окисления метана кислородом и его роль в формировании взрывной воздушной волны в шахтных выработках / А.В. Чернай, Н.Н. Налыско, А.С. Деревянко // Науковий вісник НГУ. – 2016. – Вип. 1(151). – С. 63-69.

REFERENCES

1. Bryuhanov, A.M., Mnuhin, A.G. and Busyigin, K.K. (2003), "Analysis of the circumstances of methane explosions in mines and measures for their prevention", *Coal of Ukraine*, vol. 4, pp. 37–40.

2. Chen, C.Y. (2010), "Numerical simulation on airflow effects in local ventilate network of gas explosion" in Xiangchun Li (ed.), *Progress in Mine Safety Science and Engineering II*, CRC Press, Balkema Book, London, UK, pp. 167-175.

3. Wang, K., Zhou, A., Wei, G. and Zhang J. (2012), "Study of the Formation and Propagation Characteristics of Shock Wave and Gas Flow of Outburst at Straight Roadway", *Journal of Mining & Safety Engineering*, issue 4, pp. 197-202.

4. Wang, K., Zhou, A., Zhang, P., Li C. and Guo, Y. (2011), "Study on the propagation law of shock wave resulting from coal and gas outburst" *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, vol. 17, issue 2, pp. 142–146.

5. Vasenin, I.M., Shrager, E.R., Kraynov, A.Y. and Paleev, D.Y. (2011), "The mathematical modelling of nonsteady ventilation processes of coal mine working net", *Computer researches and modelling*, vol. 3, no 2. pp. 155-163.

6. Bunko, T.V., Kokoulin, I.E. and Zhalilov, A.Sh. (2014), "Justification of the method of calculation of air distribution in the mine ventilation system reconfigurable under conditions of incomplete information about the management of facility", *Geo-Technical Mechanics*, no. 116, pp. 203-210.

7. Bunko, T.V., Kokoulin, I.E., Zhalilov, A.Sh. and Boki, A.B. (2015), "Improving the method for calculating methane concentrations over the network of mine workings, including diffuse sources of methane", *Geo-Technical Mechanics*, no. 120, pp. 31-43.

8. Russkikh, V.V. (2005), "Determination of the actual parameters of shock waves of air in the production of massive explosions in underground conditions", *Geo-Technical Mechanics*, no. 55, pp. 176-182.

9. Paleev, D.Y. and Lukashov, O.Y. (2004), "Research of influence of adjacent dead-end generation of a shock wave intensity", in Belaventsev L.P. (ed.), *Bezopasnost ugolnyih predpriyatii: sb. nauch. tr.*, pp. 47-55.

10. Chernay, A.V., Nalisko, N.N. and Derevyanko, A.S. (2016), "The kinetics of the methane acidification by the oxygen and its role in the blast air wave formation in mine workings", *Scientific Bulletin of National Mining University Scientific and technical journal*, no. 1(151), pp. 63-69.

Об авторе

Налыско Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры (ПГА-СА), Днепропетровск, Украина, 0507544273@mail.ru.

About the author

Nalisko Nikolay Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of the Department of Life Safety, Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (PSACEA), Dnepropetrovsk, Ukraine, 0507544273@mail.ru.

Анотація. Для підвищення точності розрахунків безпечних відстаней при вибухах газу на аварійних ділянках вугільних шахт були проведені чисельні експерименти з використанням математичної моделі ударної труби по поширенню ударних повітряних хвиль у циліндричних каналах. Ударні хвилі генерувалися вибухом витягнутих газоповітряних хмар які заповнюють протяжні ділянки каналів. Вивчалися закономірності поширення фронту ударної повітряної хвилі при вибуху поблизу тупикового вибою. Показано як у динаміці змінюється тиск, швидкість, щільність і температура газового потоку уздовж осі виробки. Встановлено,

що ефект відбиття ударної хвилі від площини вибою може збільшувати амплітуду головної хвилі на величину до 36 % (для типових перетинів виробок), силовий імпульс, що створюється хвилею до – 70 %. Максимальна відстань від місця вибуху до вибою, при якому виникають помітні хвильові ефекти становить 180 м. Отримано закономірності зміни ступеню інтенсивності ударної хвилі й відстані до місця злиття відбитої й головної хвилі залежно від початкових умов. Закономірності представлені у вигляді графіків і регресійних рівнянь. Розроблена методика врахування хвильових ефектів поширення ударних повітряних хвиль у розрахунках безпечних відстаней.

Ключові слова: ударна повітряна хвиля, хвильовий ефект, тупикова виробка, відбиття, інтенсивність хвилі, чисельний розрахунок.

Abstract. To increase the accuracy of calculation of safety distances when a gas explosion at the damaged sections of coal mines were carried out numerical simulations using a mathematical model of the shock tube to spread shock waves of air in cylindrical channels. Shock waves generated by explosion elongated gas-filled clouds are stretches of canals. We studied the patterns of distribution of the air shock wave front in the explosion near the bottom of deadlock. It is shown as a dynamic pressure change, speed, density and temperature of the gas flow generation along the axis. It was found that the effect of the shock wave reflection from the bottom plane can increase the amplitude of the bow wave of up to 36% (for typical sections of mines), power pulse wave generated by up to 70%. The maximum distance from the scene of the explosion to the face in which there are noticeable ripple effects is 180 m. Regularities of changes in the degree of intensity of the shock wave and the distance to the point of confluence of reflected and head waves, depending on the initial conditions. The regularities presented in graphs and regression equations. The method of accounting effects of shock wave of air waves in calculating safe distances.

Keywords: air shock wave, a ripple effect, dead-end mine workings, reflection, wave intensity, numerical calculation.

Стаття постуила в редакцію 20.03.2016

Рекомендована к печати д-ром техн. наук Т.В. Бунько