

вішою умовою, яка забезпечує високопродуктивне використання екскаваторів і автотранспорту при мінімальній вартості гірничотранспортних робіт.

Серед науковців немає єдиного погляду на метод визначення найбільш доцільного співвідношення параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу відкритих гірничих робіт і кількісних його характеристик. Отримана аналітична залежність по визначенню необхідного співвідношення між об'ємом кузова автосамоскида і об'ємом ковша екскаватора для досягнення максимально можливої продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу при навантаженні і транспортуванні будь-яких типів гірських порід з урахуванням тривалості виконання рейсу.

Співвідношення між об'ємом кузова автосамоскида і об'ємом ковша екскаватора коливається в межах від 4 до 10 й більше при зміні тривалості транспортування від 2 до 20 хв і більше.

Наведені результати досліджень дозволяють планувати гірничотранспортні роботи на кар'єрах таким чином, щоб місця перевантаження або розвантаження гірничої маси були розміщені на відстані, при якій максимально ефективно використовувався екскаваторно-автомобільний комплекс.

Подальші дослідження будуть спрямовані на більш детальне вивчення тривалості транспортування гірничої маси в конкретних гірничо-геологічних умовах кар'єру, як основного параметра, який визначає оптимальне співвідношення між об'ємом кузова автосамоскида і об'ємом ковша екскаватора.

Список літератури

1. **Ржевский В.В.** Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Учебник, изд. 3, перераб. и доп. / В.В. Ржевский. – М.: Недра, 1980. – 631 с.
2. **Маринов П. Л.** Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы / П. Л. Маринов, А. А. Кулешов, А. Н. Егоров, И. В. Зырянов. СПб: Элмор, 2004. — 427 с.
3. **Кулешов А.А.** Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров / А.А. Кулешов. – М.: Недра, 1980. – 317 с.
4. **Васильев М.В.** Автомобильный транспорт карьеров / **М.В. Васильев, З.Л. Сироткин, В.П. Смирнов.** – М.: Недра, 1973. – 280 с.
5. **Флаксенберг П.** Погрузка и транспорт на карьерах. Перевод с англ./ П. Флаксенберг. – М.: Недра, 1967. – 160 с.
6. **Хорешок А.А.** Определение оптимального соотношения сопряженных параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов / **А.А. Хорешок, Д.В. Стенин.** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. КузГТУ. – 2007. – №5. – С. 3 - 4.
7. **Бишоп Т.М.** Автомобильный транспорт. Перевод с англ. / Т.М. Бишоп. – М.: Недра, 1971. – 142 с.
8. **Томаков П. И.** О формировании экскаваторно-автотранспортных комплексов карьеров / П. И. Томаков // Горный журнал. – 1970. – №12, с.20-23.
9. **Ржевский В.В.** Открытые горные работы. часть II. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. 4-е издание, перераб. и доп. / **В.В. Ржевский.** – М.: Недра, 1985. – 549 с.
10. **Томаков П.И.** Технология, механизация и организация открытых горных работ / **П.И. Томаков, И.К. Наумов.** М.: Недра, 1986. -312 с.
11. **Научные основы проектирования карьеров** / [Под общей редакцией **В.В. Ржевского, М.Г. Новожилова, Б.П. Юматова** и др.]. – М.: Недра, 1971. – 600 с.

Рукопис подано до редакції 12.04.17

УДК 622.8: 331.452: 519.6

Н.Н. НАЛИСЬКО, канд. техн. наук, доц.

Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВАХ ШАХТНОЙ АТМОСФЕРЫ С УЧЕТОМ МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ХАРАКТЕРА ГОРЕНИЯ

Цель. Повышение безопасности аварийных работ в горных выработках при угрозе возникновения взрывов шахтной атмосферы путем учета влияния места инициирования взрыва и режима горения в расчете безопасных расстояний. Математическое моделирование процесса закипания и горения загазированного участка рудничной атмосферы в горной выработке.

Методы исследования. Анализ и обобщение теоретических исследований, численное моделирование газодинамического процесса детонационного горения газовоздушной смеси, включая модель химической кинетики горе-

ния, что в целом позволяет проследить динамику формирования ударных воздушных волн в условиях горных выработок. Математическая обработка результатов эксперимента методом наименьших квадратов. При решении уравнений нелинейной регрессии использовалась линеаризация методом логарифмирования.

Научная новизна. В результате численного моделирования процесса зажигания и горения загазированного участка рудничной атмосферы получены закономерности формирования и распространения ударных воздушных волн, зависимости их параметров от режима горения и места инициирования газовой смеси.

Практическая значимость. Проведенные исследования позволяют усовершенствовать методику расчета безопасных расстояний и таким образом повысить безопасность работ горноспасателей по локализации аварийных взрывов рудничной атмосферы и ликвидации последствий подземных пожаров.

Результаты. Установлено, что динамика горения ГВС оказывает решающее влияние на процесс формирования УВВ: в режиме дефлаграционного горения ГВС, с инициированием у края облака, длина взрывной волны увеличена в 3,6 раза в сторону противоположную горению, а амплитуда волны на 10 % в сторону горения. В режиме детонации наблюдается эффект направленного взрыва, при котором амплитуда УВВ сторону противоположную движению детонационной волны в 5 раз меньше, чем в прямой УВВ. Модель мгновенного объемного взрыва, в сравнении с моделями горения, дает заниженные значения амплитуд.

Ключевые слова: газозагазованная смесь, мгновенный взрыв, ударная волна, детонация, дефлаграционное горение, точка инициирования.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. На угольных шахтах Украины ежегодно регистрируется не менее 10 подземных пожаров, одним из способов тушения которых, является изоляция аварийного участка взрывозащитными перемычками [1,2]. Существующие случаи поражения людей как во время возведения взрывозащитных сооружений, так и работающих под их защитой свидетельствует, в том числе, и о несовершенстве методов расчета безопасных расстояний [3,4]. Надежность определения параметров ударной воздушной волны в сети горных выработок и возможных нагрузок на взрывозащитные сооружения, кроме прочего, зависит от полноты учета факторов и в частности от динамики развития взрыва газозагазованных смесей (ГВС). Действующие нормативные методики основаны на данных натурных измерений, проведенных А.М. Чеховских и В.И. Гудковым в штольне шахты «Карагайлинская» ПО «Киселевскуголь» в конце 60-х годов прошлого столетия. В опытных взрывах, проводимых в штольне площадью 4 м², на расстоянии 140 м от источника воспламенения было зарегистрировано давление 2,8 МПа [5]. При этом, исследования процесса формирования УВВ не проводились.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время, с увеличением мощности компьютеров, один из эффективных путей совершенствования методик расчета — это численное моделирование процессов взрыва, которое дает возможность детально изучать факторы, влияющие на распространения УВВ и находить закономерности эволюции параметров УВВ во времени и пространстве. Так в работах Института угля и углехимии СО РАН на основании численного расчета был принят газодинамический подход к определению параметров УВВ изменен подход к определению расчетного коэффициента затухания УВВ [6]. В работах НИИГД «Респиратор» установлены зависимости параметров распространения УВВ при наличии преград, вызывающих скачки давления [7].

Цель работы. Повышение безопасности аварийных работ при угрозе возникновения взрывов шахтной атмосферы путем учета влияния режима горения и места инициирования взрыва в расчете безопасных расстояний. Математическое моделирование инициирования газозагазованных смесей с различным расположением точки воспламенения и режимов горения.

Изложение основного материала и результатов. Для математического моделирования взрыва ГВС и распространения УВВ использовался газодинамический подход, основанный на численном решении системы уравнений газовой динамики. Задача решалась путём использования методов численного счёта уравнений гидродинамики в системе "взрывчатая ГВС – шахтная атмосфера". Для описания движения среды в цилиндрической системе координат использовались уравнения Эйлера (в дивергентном виде), которые обычно используют при расчете течения сжимаемого идеального газа и допускают разрывные решения. Решения уравнений Эйлера производилось с использованием явной конечно-разностной однородной схемы сквозного счёта. В качестве такой схемы был применен модифицированный метод крупных частиц.

В существующих численных расчетах распространения УВВ их источником принят участок выработки, в котором происходит мгновенный объемный взрыв [8]. Такой подход принимался ввиду отсутствия строгого аналитического решения задачи о динамике сгорания газа в частично ограниченных пространствах и в предположении дефлаграционного горения ГВС. Однако, можно утверждать, что процесс формирования УВВ неразрывно связан с динамикой сгорания газа, которая и определяет

амплитуду и другие параметры волны [9-11] и принятая модель может давать значительные погрешности расчета параметров УВВ. Причем, дефлаграционное горение ГВС при взрывах может происходить с различной интенсивностью. Если обратиться к графику ударной адиабаты Гюгонио для продуктов горения (рис. 1, кривая *H*), то ее участок лежащий ниже точки *И* принадлежит дефлаграции [12]. Участок адиабаты от *И* до *К* определяет возможные режимы дефлаграционного взрыва, которые зависят, согласно (2) от удельной теплоты сгорания ГВС.

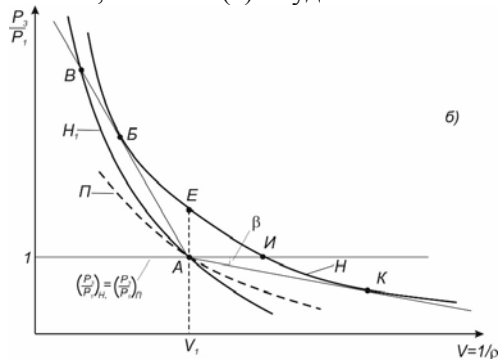


Рис. 1. Состояние ГВС и ПД в координатах *P-V*: кривые Гюгонио (*H*₁, *H*) и Пуассона (*П*); *AB*, *AK* – прямые Михельсона; *A* – исходное состояние ГВС; *B* – максимальное сжатие ГВС; *Б* – точка Чепмена-Жуге; *К* – точка Жуге

Как показано в работах К.И. Щелкина, в дефлаграции осуществимы любые состояния на отрезке *ИК*. В точке *И* наблюдается минимальная скорость дефлаграции равная нормальной скорости распространения пламени, определяемой теплопроводностью, диффузией и скоростью химической реакции в зоне горения

$$(v_3 / v_1)_И = [1 + (\gamma - 1)Q / c_1^2], \quad (1)$$

где $(v_3/v_1)_И$ – относительная скорость продуктов реакции за зоной горения в точке *И* (система координат связана с фронтом горения); *Q* – тепловой эффект реакции; γ – отношение теплоемкостей ГВС; *c*₁ – скорость звука в исходном газе; 1, 2 – индекс свежей смеси и ПД.

По мере перемещения точки состояния продуктов горения вниз, скорость продуктов растет. Более высокие скорости достигаются за счет увеличения поверхности горения, вызываемого турбулизацией потока. Максимальная скорость дефлаграции определяется углом наклона (β) прямой Михельсона – *AK*, которая касается кривой Гюгонио в точке Жуге – *К*. Из условия Жуге определено максимальное число Маха для газа, втекающего в покоящуюся зону горения или, что тоже самое, максимальную безразмерную скорость дефлаграции

$$(M_1^2)_{\max} = \left(1 + \frac{\gamma + 1}{\gamma} q\right) - \sqrt{\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma} q\right)^2 + 2 \frac{\gamma + 1}{\gamma} q} \quad (2)$$

где *M* – число Маха; *q* – отношение теплового эффекта реакции к внутренней энергии газа.

Уравнения (2)-(3) показывают состояние ГВС в процессе горения в определенный момент времени, т.е. квазистатическое состояние. Для определения динамики дефлаграционного горения ГВС необходимо совместное решение уравнений (2)-(3) и уравнения скорости тепловыделения (на основе кинетики химической реакции), которое на сегодняшний день отсутствует.

В связи с этим, для моделирования процесса дефлаграционного горения метановоздушной смеси воспользуемся численным решением системы уравнений газовой динамики (1).

Численный эксперимент проведен для условий горной выработки в виде цилиндрического канала диаметром 2 м. Часть выработки, приведенной (к диаметру) длиной *L*₁=15 заполнено метановоздушной смесью с содержанием метана 9,0 % по объему (рис. 2).

Для уменьшения влияния эффектов отражения ударной волны от стенок канала в эксперименте создается плоский фронт дефлаграционного горения с помощью теплового источника зажигания (рис. 3).

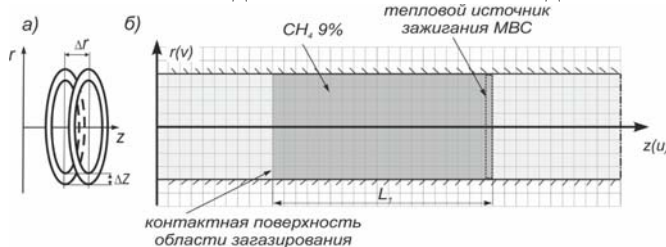


Рис. 2. Математическая постановка задачи взрыва метановоздушной смеси и формирования УВВ в горной выработке

В численном исследовании рассматривалось два случая расположения источника зажигания внутри облака: на контактной поверхности ГВС и в центре участка. В первом случае режим дефлаграционного горения устанавливался через 0,12 мс от момента начала инициирования и был близкий к стационарному.

Ускорение распространения фронта горения на участке не превышало 17 % от начальной скорости.

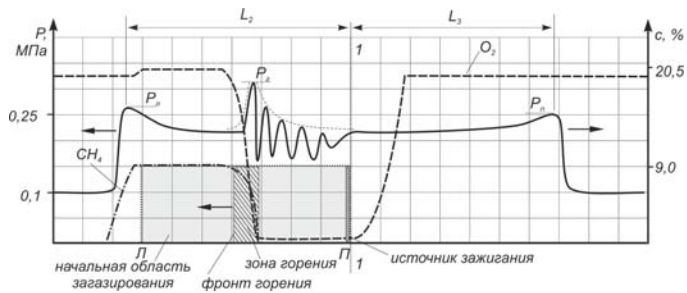


Рис. 3. Профиль графиков давления, концентрации метана и кислорода, на момент времени 1 мс после инициирования ГВС, вдоль оси канала z. Стрелки у скачков параметров указывают направления распространения ударной волны и фронта горения

Границей разделения ударных волн, движущихся в противоположных направлениях, в сквозной выработке, является зона горения, которая сама движется по ГВС, со скоростью значительно ниже скорости УВВ и скорости звука. В численном эксперименте, наблюдается разница в амплитудах этих УВВ величиной 5-7 %. Это объясняется тем, что в отличие от детонации, при дефлаграции продукты горения двигаются в сторону противоположную от распространения фронта горения за счет их расширения, т.е. справа давление ниже, чем левее зоны горения, поэтому волны сжатия распространяясь в среде с меньшим давлением формируют УВВ с несколько меньшей амплитудой, чем в противоположном фронте УВВ: $P_n = (0,93 \dots 0,95)P_l$ (рис. 3). Соответственно, расстояние пройденное правым фронтом УВВ, относительно точки инициирования (прямая 1-1), будет также меньшим $L_3 < L_2$. Однако, в связи с тем, что зона горения и граница разделения взрывных волн перемещаются в левую сторону, длина взрывной волны, распространяющейся вправо λ_n , к концу горения будет больше чем с левой стороны λ_l (рис. 4). Эта закономерность важна при оценке силового воздействия взрывной волны на защитные сооружения в ближней зоне взрыва, т.к. время действия фазы сжатия пропорционально этой длине $\tau_+ \sim \lambda$.

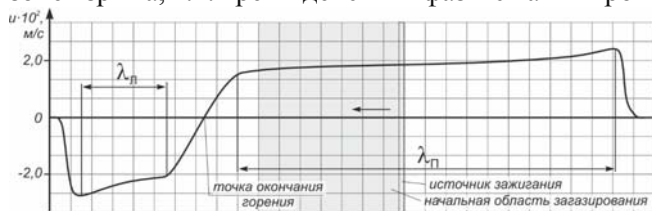


Рис. 4. График скорости газового потока вдоль оси канала в момент окончания дефлаграционного взрыва. Стрелка указывает направление распространения горения

Динамику перемещения фронта дефлаграционного горения и взрывных волн, а также границ ГВС и продуктов горения в канале можно проследить на x, t-диаграмме (рис. 5).

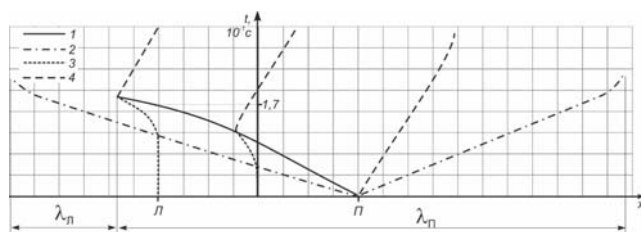


Рис. 5. Направление и скорости движения: фронт горения – 1, фронт ударной волны – 2, контактная поверхность облака ГВС с левой стороны (Л) и центра – 3, контактная поверхность с правой стороны (П) и продукты горения – 4

На основании эксперимента можно оценить параметры взрывной волны при дефлаграционном горении вытянутого облака ГВС с инициированием у границы. При эквивалентном диаметре канала 2 м длина облака составила 30 м. Время горения ГВС в численном эксперименте 171 мс, соответственно средняя скорость горения составила 175 м/с. За это время фронт УВВ распространился вправо на 56 м, при условии, что ударная волна движется со стандартной скоростью 330 м/с. За фронтом горения, газ также движется вправо, поэтому длина взрывной волны увеличится минимум до 86 м.

Длина взрывной волны, движущейся влево, согласно графиков (см. рис. 4,5), отсчитывается от точки полного сгорания ГВС и ее величина составила 23 м. Таким образом, по отношению к длине облака ГВС длина взрывной волны составит: $\lambda_n = 0,7L_l$, $\lambda_l = 2,5L_l$. При увеличении скорости горения коэффициенты при L_l изменятся, однако их соотношение будет постоянным. Таким образом, для рассматриваемого случая можно записать соотношения

$$\lambda_l = 0,28\lambda_n, \text{ поскольку } \tau_+ \sim \lambda, \text{ тогда, } \tau_+^{II} = 3,57\tau_+^I, \text{ при } P_l = (1,03-1,05)P_n. \quad (3)$$

Инициирование облака ГВС из центра. За счет меньшего рассеивания тепловой энергии источника зажигания, стационарный режим дефлаграционного горения устанавливался через 0,07 мс. Далее возникшая симметричная взрывная волна и два фронта горения, распространяются в противоположные стороны.

По результатам численного эксперимента, на x, t -диаграмме (рис. 6), можно видеть, что волны сжатия и продукты взрыва двигаясь от зоны горения к центру сталкиваются со встречным потоком и создают более высокую зону давления в границах облака ГВС.

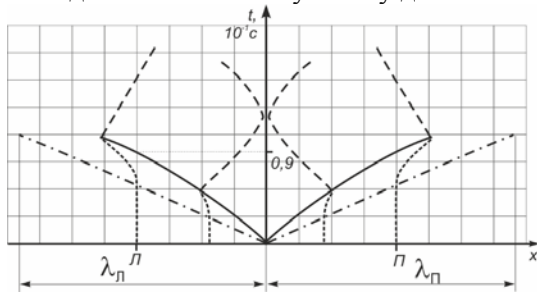


Рис. 6. Направление и скорости движения фронта дефлаграционного горения, ударной воздушной волны и продуктов горения при инициировании ГВС в центре облака

Соответственно, мы получаем бóльшую амплитуду УВВ по отношению к предыдущему случаю за счет меньшей скорости диссипации энергии за зоной горения (рис. 7). Увеличение амплитуды при этом происходит на 21 % (с 0,28 до 0,34 МПа), что качественно совпадает с аналогичными расчетами в работе [10].

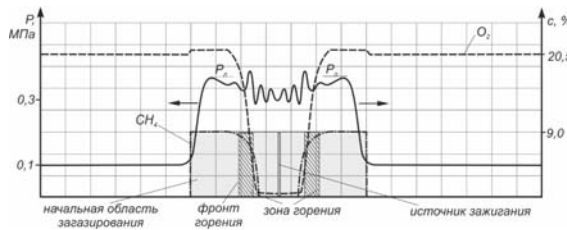


Рис. 7. Профили параметров газового потока при дефлаграционном горении и инициировании ГВС из центра загазированного участка, на момент времени 0,4 мс

Соотношения между длинами взрывной волны, временем действия фазы сжатия и величиной амплитуды волн слева и с права будут иметь следующий вид

$$\lambda_{л} = \lambda_{п}, \tau_{+}^{II} = \tau_{+}^{I}, P_{л} = P_{п}. \quad (4)$$

Как видно из численного эксперимента, избыточное давления во фронте ударной волны и время действия фазы сжатия при дефлаграционном взрыве, зависит от кинетики химической реакции взрыва, газодинамики процесса и места инициирования ГВС.

При дефлаграционном взрыве в протяженных каналах высока вероятность перехода горения в детонацию [13]. Особенно это актуально для горных выработок, загроможденных по сечению. В случае принятия модели мгновенного взрыва, в процессе расчета, необходимо решать задачу распада произвольного разрыва. Аналитическое решение данной задачи для условий детонации конденсированных ВВ приведено в работах К.П. Станюковича [14] как расчет истечения продуктов детонации (ПД) в воздух. В решении, определения параметров УВ основываются на предположении, что в начальный момент времени, вблизи заряда ударная волна движется одновременно с ПД, поэтому достаточно определить параметры разлета ПД. В этом случае расширение продуктов детонации описывается изоэнтروпийным законом $P = ap^n$, где P - амплитуда во фронте УВ, a - константа ВВ, n - показатель изоэнтропы. Показатель изоэнтропы является величиной переменной и учесть характер $n(P)$ достаточно сложно. Авторы, при анализе процесса истечения продуктов детонации в воздух заменяют реальную адиабату расширения двумя адиабатами

$$pv^n = p_n v_n^n \text{ при } p_k \leq p \leq p_n; pv^k = p_k v_k^k \text{ при } p \leq p_k, \quad (5)$$

где $n=3$, $k=1,2-1,4$ - показатель изоэнтропы для ПД и воздуха, $p_n v_n$, $p_k v_k$ - параметры ПД во фронте детонационной волны и в точке сопряжения.

В результате решения, для сильной ударной волны получают уравнение

$$p_{уд} = p_x = \frac{k+1}{2} \rho_a u_{уд}^2,$$

где $p_{уд}$, p_x - давление в ударной волне и в ПД, $u_{уд}$ - скорость фронта ударной волны, принимается равным скорости ПД.

Уравнение позволяет оценить, с определенной степенью точности, параметры УВ только в начальный момент времени разлета. Для полной оценки динамики формирования и распространения УВВ в модели мгновенного взрыва воспользуемся численным решением системы уравнений Эйлера.

В данной модели не используется решение уравнений химической кинетики детонационного горения, поэтому давление мгновенного взрыва задается по экспериментальным данным. Согласно действующей нормативной методики расчета параметров УВВ, для активного участка с относительной длиной равной 15, абсолютное давление составляет $P_n=0,5$ МПа. Запись

профиля давления в газовом потоке (рис. 8) показывает, что в проходной выработке, с двух сторон объема ГВС, формируются симметричные УВВ, а вглубь ПД распространяется волна разрежения. Причем, на контактной поверхности происходит резкое падение давления до $\approx 0,5P_n$, что соответствует принятой двухадиабатной модели (6). Длина взрывной волны в начальный момент времени составила $\approx 1/2$ длины активного участка.

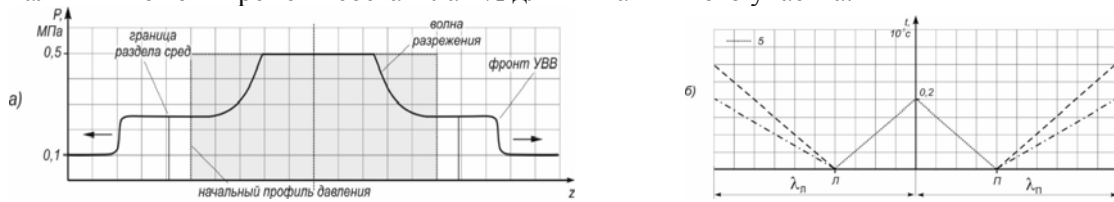


Рис. 8. Динамика состояния газа в модели мгновенного взрыва: *а* - профиль давления в начальный момент времени и через 0,8 мс; *б* - движение ударной волны, продуктов горения и волны разрежения (5)

Для установления зависимости параметров УВВ от начальных условий в модели мгновенного взрыва, была проведена серия численных экспериментов, которая показала, что наибольшее влияние оказывает здесь соотношение плотности воздуха ρ_v и ПД $\rho_{\text{ПД}}$. Величина начального давления оказывает незначительное влияние на относительную амплитуду волны: при увеличении начального давления взрыва в 10 раз, отношение $P_{\text{УВВ}}/P_n$ изменяется всего на 8 %, причем в сторону уменьшения за счет возрастания различных потерь (например, теплообмена со стенкой). Интерес представляет конкретный вид зависимости $P_{\text{УВВ}}/P_n$ от $\rho_v/\rho_{\text{ПД}}$. Аналитический вид этих зависимостей был получен путем обработки результатов численного эксперимента методом наименьших квадратов. При решении уравнений нелинейной регрессии использовалась линеаризация методом логарифмирования

$$\frac{P_{\text{УВВ}}}{P_n} = 0,098 \ln\left(\frac{\rho_{\text{ПД}}}{\rho_v}\right) + 0,55, \quad \lambda_{\text{УВВ}} = 0,43 \left(\frac{\rho_v}{\rho_{\text{ПД}}}\right)^{0,56} \quad (6)$$

При газовых взрывах в горных выработках значения плотностей $\rho_v, \rho_{\text{ПД}}$ приблизительно равны. Поэтому независимо от начального давления, соотношение параметров УВВ в модели мгновенного взрыва будет следующим

$$P_{\text{УВВ}} = 0,55P_n, \quad \lambda_{\text{УВВ}} = \lambda_{\text{ПД}} = 0,45L_1, \quad \tau_+^{\text{П}} = \tau_+^{\text{П}}, \quad P_{\text{Л}} = P_n \quad (7)$$

Рассмотрим вариант, когда в модели взрыва учитывается процесс детонационного горения ГВС, т.е. газодинамическая модель численного счета дополняется моделью химической кинетики горения углеводородов [14]. В численном эксперименте плоскую детонационную волну можно инициировать небольшим источником теплового мгновенного взрыва объема газа в форме диска толщиной 0,01 м. Начальное, минимальное давление взрыва в источнике подбиралась таким образом, чтобы длина зоны перехода горения в детонацию (ПГД) составляла не более 10 % длины загазированного участка. Величина этого давления составила 2,1 МПа (рис. 9).

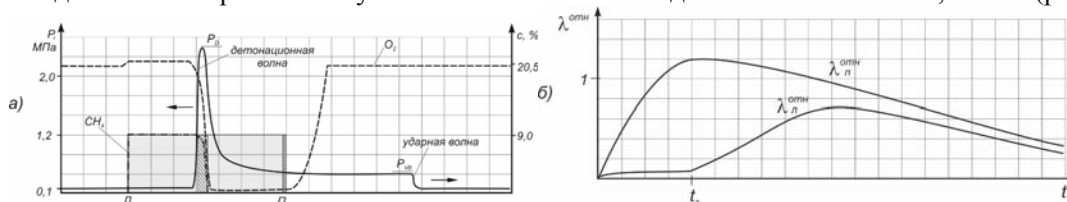


Рис. 9. Профиль давления и концентрации газов в режиме детонационного горения ГВС на момент времени 0,1 мс *а*; динамика изменения относительной длины взрывной волны с двух сторон от загазированного участка горной выработки *б*

На графике (рис. 9а), пик профиля давления (фронт ударной волны) и зона горения совпадают и движутся в сторону свежей ГВС, образуя детонационную волну. Одновременно, в противоположную сторону распространяется ударная волна, причем ее амплитуда по отношению к волне детонации составляет всего лишь $(P_{\text{УВВ}}/P_{\text{Д}}) \cdot 100 = 17 \%$. Аналогичное соотношение сохраняется и при выходе детонационной волны на границу ГВС и ее переход в УВВ, при этом $(P_{\text{УВВ}}^{\text{П}}/P_{\text{УВВ}}^{\text{П}}) \cdot 100 = 21 \%$. Таким образом, при детонации газовых смесей, с инициированием у края облака, наблюдается четко выраженный эффект направленного взрыва, который не учитывается в стандартных методиках расчета параметров УВВ. Причем, амплитуда детонационной и ударной волны (при выходе первой на границу МВС) на порядок превышает амплитуду в ре-

жиме дефлаграции. Длина взрывной волны в сторону распространения детонации, до момента окончания горения (t_c) будет равна длине детонационной волны (рис. 9б). После окончания горения ее длина увеличится за счет расширения газов и достигнет 70 % длины противоположной волны, при этом имея большую амплитуду.

Поскольку УВВ с большей амплитудой затухает быстрее, то можно предположить, что на некотором расстоянии, с двух сторон от места взрыва, произойдет выравнивание параметров УВВ. Для оценки этого расстояния, в численном эксперименте был произведен замер импульса силового действия УВВ согласно методики [15]. В результате установлено, что на относительном расстоянии 7 длин активного участка L_1 в левую сторону и 5 длин в правую сторону, импульсы УВВ слева и справа от места взрыва становятся одинаковыми. При этом для метановоздушной смеси амплитуда выравнивания составила $P_{УВВ}=0,52$ МПа, с учетных начальных условий по шероховатости и коэффициента теплообмена стенок выработки принятых в эксперименте. Динамика детонационной и ударной волны в режиме детонационного горения ГВС представлен на x, t - диаграмме рис. 10. В результате, в режиме детонационного горения ГВС в горной выработке, соотношения параметров УВВ будут иметь вид

$$P_{уд}^II = P_D, P_{уд}^I = 0,2P_{уд}^II; \lambda_{II} = 1,2L_1; \lambda_I = 0,7\lambda_{II}; \tau_+^II = 0,7\tau_+^I \quad (8)$$

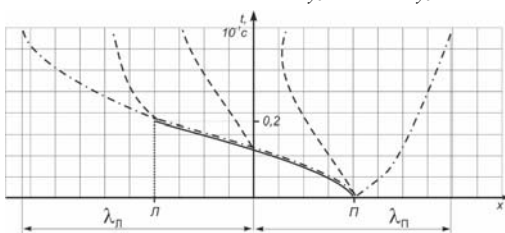


Рис. 10. Движение детонационной волны, продуктов детонации и ударной волны при инициировании ГВС на контактной поверхности

Сопоставляя полученные в численных экспериментах, закономерности формирования УВВ, в условиях дефлаграционного и детонационного режима горения (4), (5), (9) с закономерностями модели мгновенного объемного взрыва (8) можно отметить, что они имеют значительные качественные и количественные отличия. Это подтверждается графиками движения фронта горения, УВВ и ПД в различных режимах (рис. 5,6,10,13). В целом, эти различия можно выразить на графике амплитуд УВВ вблизи облака ГВС (рис. 11). Из графика видно, что модели дефлаграционного и детонационного горения дают большую амплитуду УВВ в момент ее формирования. Несмотря на быстрое ее убывание при окончании детонации ГВС, фронт ударной волны будет распространяться с опасными значениями амплитуды на большие расстояния. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в газодинамических расчетах газовых взрывов на основе численных методов, необходимо применение моделей химической кинетики горения для получения физически обоснованных параметров УВВ. Модель мгновенного объемного взрыва, в этом случае, дает заниженные значения амплитуд.

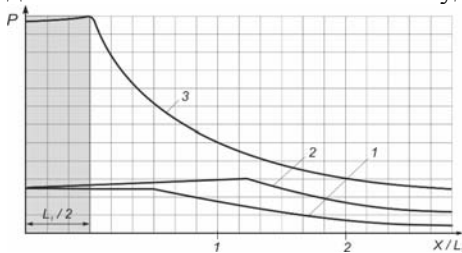


Рис. 11. Профили давления в различных моделях газового взрыва: 1 – модель мгновенного взрыва; 2 – модель с учетом динамики горения ГВС в режиме дефлаграции; 3 – тоже, в режиме детонации

Учет полученных закономерностей в действующей нормативной методике расчета безопасных расстояний предлагается выполнять по следующему алгоритму. Если в процессе составления расчетной схемы установлена возможность инициирования активного (загазированного)

участка выработки на контактной поверхности ГВС, то амплитуду УВВ распространяющуюся в сторону сгорания газа увеличить, а в противоположную уменьшить на 5 %. Если инициирование происходит в промежутке до $1/4L_1$ от края, амплитуду волны в сторону меньшей длины ГВС не уменьшать. В случае возможности возникновения детонационного режима, т.е. относительная длина активного участка более 65 (при загромождениях - 15) или расчетное избыточное давление более 1,6 МПа, то амплитуду УВВ в сторону противоположную движению детонационной волны уменьшить на 80 %.

Выводы и направления дальнейших исследований. Установлено, что динамика горения ГВС оказывает решающее влияние на процесс формирования УВВ: в режиме дефлаграционного горения ГВС, с инициированием у края облака, длина взрывной волны увеличена в 3,6 раза в сторону противоположную горению, а амплитуда волны на 10 % в сторону горения. В режиме детонации наблюдается эффект направленного взрыва, при котором амплитуда УВВ сторону противоположную движению детонационной волны в 5 раз меньше, чем в прямой УВВ. Мо-

дель мгнового об'ємного взрива, в порівнянні з моделями горіння, дає занижені значення амплитуд.

Список літератури

1. **Гурін, А.О.** Дистанційний відбір проб повітря при проведенні виробок / **А.О. Гурін, В.А. Шаповалов, А.В. Давидов** // Вісник Криворізького національного університету.– 2012.– Вип. 31.– С. 126-128.
2. **Кудинов, Ю.В.** Развитие систем взрывозащиты угольных шахт / **Ю.В. Кудинов, О.И. Кашуба, Ю.В. Манжос** // Уголь Украины. – 2007. – № 9. – С. 17 – 20.
3. Методика визначення депресій вентиляційних ділянок шахтної мережі / **І.Б. Ошмянський, О.Є. Лапшин, О.О. Лапшин, А.А. Немченко** // Вісник Криворізького національного університету.– 2012.– Вип. 31.– С. 118-122.
4. Способы оценки состава газов в шахтной атмосфере при тяжелых техногенных авариях / **А.Г. Мнухин, А.М. Брюханов, В.Г. Агеев** [и др.] // Уголь Украины. – 2012. – № 8. – С. 23 – 30.
5. Сайт горноспасателей [Электронный ресурс] / РГКП «ЦШ ПВАСС» Республика Казахстан.– Режим доступа: <http://www.gornospass.ru/vzryv-ms.html>.– 18.03.2017 г. – Загл. с экрана.
6. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / **И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов** [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование.– 2011.– Т.3 № 2.– С. 155-163.
7. **Агеев, В.Г.** Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана// Горноспасательное дело.– 2010.– Вып. 47.– С. 5–10;
8. Влияние места взрыва метановоздушной смеси на интенсивность ударной волны в горной выработке / **И.М. Васенин, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. Палеев** [и др.] // Доклады VII Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф». Т.1. – Красноярск: Ин-т вычисл. моделир. СО РАН, 2003.– С. 64-65.
9. **Горев, В.А.** Влияние формы облака и места инициирования взрыва на характер взрывной волны / **В.А. Горев, Г.М. Медведев** // Пожаровзрывобезопасность.– 2012.– № 6.– С. 29-33.
10. **Поландов, Ю.Х.** Влияние места расположения источника воспламенения в помещении на развитие взрыва газа / **Ю.Х. Поландов, В.А. Бабанков** // Пожаровзрывобезопасность.– 2014.– № 3.– С. 68-74.
11. **Гельфанд, Б.Е.** Объемные взрывы: монография / **Б.Е. Гельфанд, М.В. Сильников**.– СПб.: Астерион, 2008.– 374 с.
12. **Зельдович, Я.Б.** Теория ударных волн и введение в газодинамику / **Я.Б. Зельдович** – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. – 188 с.
13. **Фролов, С.М.** Быстрый переход горения в детонацию / **С.М. Фролов** // Химическая физика.– 2008.– Т. 27.– № 6.– С. 32-46.
14. Физика взрыва / Под ред. **Л.П. Орленко**. – В 2 т. Т.1. – М.: Физматлит, 2002. – 832 с.
15. **Налисько, Н.Н.** Численный анализ влияния объемов загазирования горных выработок на импульс ударной воздушной волны / **Н.Н. Налисько** // Вісник Криворізького національного університету.– 2015.– Вип. 39.– С. 73-77.

Рукопись поступила в редакцію 21.03.17

УДК 622.235

О. В. ШАПУРИН, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет
А.А. СКАЧКОВ, Департамент технологій і планування виробництва
«ГДД МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ»

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗДОЛАННЯ ОПОРУ ПО ПІДОШВІ ПЕРЕД ПЕРШИМ РЯДОМ ЗАРЯДІВ

Мета: Метою роботи є покращення і одночасно здешевлення буровибухових робіт, шляхом першочергового підривання зменшеного (на 30-50%) заряду ВР у другому ряду свердловин, а через розрахований інтервал сповільнення, ближнього повноцінного заряду у першому ряду. Така заміна черговості підривання зарядів відтермінує у просторі і часі взаємодію першої прямої вибухової хвилі з відображеними від вільних поверхонь укосу й покрівлі уступу, виключає утворення магістральних тріщин від такої взаємодії, продовжує час дії вибухових газів заряду у другому ряду, збільшує ККД вибуху, забезпечує, через двократність вибухових ударів по укосу уступу, покращення якості проробки підосви уступу.

Методи дослідження: Встановлення швидкості розповсюдження хвиль у досліджуваних породах, їх міцності, параметрів БВР і інтервалів сповільнення між сумісними зарядами у парі рядів, а також парами рядів.

Наукова новизна: Полягає в обґрунтованості розведення у просторі й часі взаємодії першої прямої вибухової хвилі з відображеними від вільних поверхонь укосу і покрівлі уступу, для уникнення утворення магістральних тріщин у ньому, продовження проростання радіальних тріщин навколо заряду у другому ряду, збільшення ККД вибуху.

Практична значимість. Полягає у покращенні якості проробки збільшених ЛОПП, за рахунок двократності хвильових вибухових ударів по укосу, зменшенні питомої витрати ВР.