

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

Н.Н. Налісько, Придніпровська державна академія будівництва і архітектури, Україна

Л.И. Барташевская, Национальный горный университет, Украина

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.

Введение. При возникновении подземных пожаров резко возрастает вероятность взрыва шахтной атмосферы и около 10 % от всех взрывов на шахтах происходит именно при тушении пожаров путем изоляции. Работы по изоляции аварийных участков выполняются силами горноспасательных подразделений, которые и попадают под взрывы. Статистика в этих случаях показывает, что из общего числа пострадавших 11 % – составляют с летальным исходом, 24 % – тяжелые последствия. Основным травмирующим фактором являлись ударная волна, для защиты от которой устанавливаются безопасные расстояния. 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.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время, с увеличением мощности компьютеров, один из эффективных путей совершенствования методик расчета — это численное моделирование процессов взрыва ГВС в условиях горных выработок 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 [1]. В работах НИИГД «Респиратор» установлены зависимости параметров распространения УВВ при наличии преград, вызывающих скачки давления [2].

Цель работы. Повышение безопасности аварийных работ в горных выработках при угрозе возникновения взрывов шахтной атмосферы путем учета влияния места инициирования взрыва в расчете безопасных расстояний. Математическое моделирование инициирования газозовоздушных смесей с различным расположением точки воспламенения.

Изложение основного материала. В существующих численных расчетах распространения УВВ их источником принят участок выработки, в котором происходит мгновенный объемный взрыв. В результате взрыва во всем объеме ГВС устанавливается равномерное давление [3]. 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 [4-6] 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 *II* принадлежит дефлаграции и строится по уравнению [7]:

$$\frac{p_3}{p_1} = \left[\chi - \frac{p_1}{p_3} + \frac{2\gamma Q}{c_1^2} \right] / \left[\chi \frac{p_1}{p_3} - 1 \right], \quad (1)$$

где $\chi = \frac{\gamma+1}{\gamma-1}$; γ – отношение теплоемкостей ГВС; $c_1^2 = \gamma p_1 / \rho_1$, c_1 – скорость звука в исходном газе; Q – тепловой эффект реакции.

Участок адиабаты от $И$ до $К$ определяет возможные режимы дефлаграционного взрыва, которые зависят, согласно (2) от удельной теплоты сгорания ГВС.

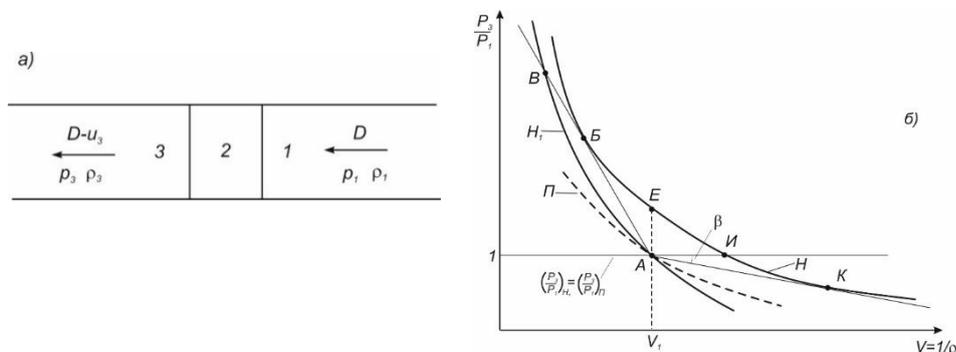


Рис. 1. Схема волны детонации в системе координат относительно фронта волны (а): 1, 2, 3 – состояние исходной ГВС, ударно-сжатой смеси, конечные продукты детонации; Состояние ГВС и ПД в координатах P - V (б): кривые Гюгонио (H_1 , H) и Пуассона (Π); AB , AK – прямые Михельсона; A – исходное состояние ГВС; B – максимальное сжатие ГВС; $Б$ – точка Чепмена-Жуге; K – 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:

$$\left(\frac{v_3}{v_1} \right)_И = \left[1 + (\gamma - 1) \frac{Q}{c_1^2} \right], \quad (2)$$

где $\left(\frac{v_3}{v_1} \right)_И$ – относительная скорость продуктов реакции за зоной горения в точке $И$ (система координат связана с фронтом горения, т.е. фронт неподвижен).

По мере перемещения точки, описывающей состояние 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 – K . Из условия Жуге определено максимальное число Маха газа, втекающего в покоящуюся зону горения или, что тоже самое, максимальную безразмерную скорость дефлаграции:

$$(M_1^2)_{\max} = \left(1 + \frac{\gamma+1}{\gamma} q \right) - \sqrt{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma} q \right)^2 + 2 \frac{\gamma+1}{\gamma} q} \quad (3)$$

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

Уравнения (1) – (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 (1) – (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 по методике приведенной в работе [9]. Численный эксперимент проведен для

условий горной выработки в виде цилиндрического канала диаметром 2 м. Часть выработки, приведенной (к диаметру) длиной $L_I = 15$ заполнено метановоздушной смесью с содержанием метана 9,0 % по объему (рис. 2).

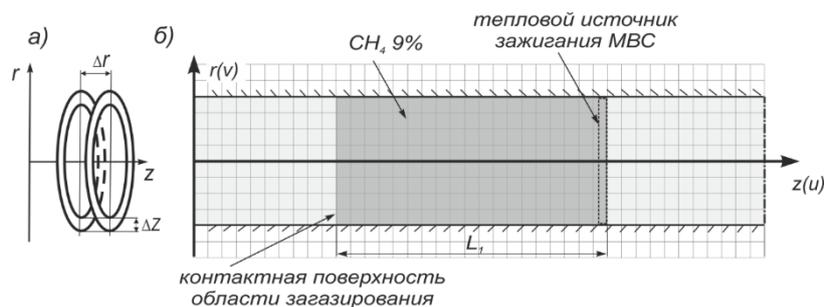


Рис. 2. Математическая постановка задачи взрыва метановоздушной смеси и формирования УВВ в горной выработке

Для уменьшения влияния эффектов отражения ударной волн от стенок канала в эксперименте создается плоский фронт дефлаграционного горения с помощью теплового источника зажигания в виде тонкого слоя ГВС с заданной температурой (рис. 2). Температура (ее максимальное значение) подбиралась таким образом, чтобы получить стационарный режим дефлаграции на данном участке, не переходящий в детонацию. В данных условиях она составила 1080 К. В численном исследовании рассматривалось два случая расположения источника зажигания внутри облака: на контактной поверхности МВС 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 %.

Согласно записи профилей параметров газового потока, в процессе дефлаграционного взрыва, динамика давления такова, что в зоне горения генерируются волны сжатия, которые распространяются в обе стороны (рис. 2). Их распространения имеет вначале пульсирующий характер за счет турбулизации потока (зона А, рис. 2б). В численном эксперименте это обусловлено дискретностью счета.

Границей разделения ударных волн, движущихся в противоположных направлениях, в сквозной выработке, является зона горения, которая сама движется по объему 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. 2а).

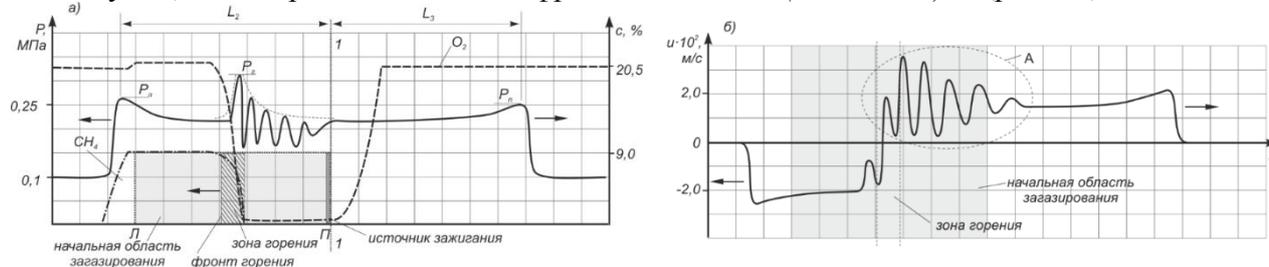


Рис. 2. Профили графиков давления, концентрации метана и кислорода (а), скорости (б) на момент времени 1 мс после инициирования ГВС, вдоль оси канала z. Стрелки у скачков параметров указывают направления распространения ударной волны и фронта горения

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. 3). 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 $\tau_+ \sim \lambda$.

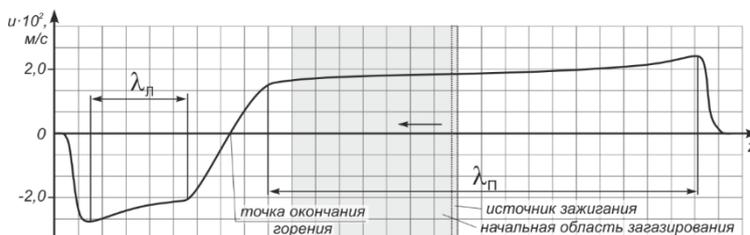


Рис. 3. График скорости газового потока вдоль оси канала в момент окончания дефлаграционного взрыва. Стрелка указывает направление распространения горения. Динамику перемещения фронта дефлаграционного горения и взрывных волн, а также границ ГВС и продуктов горения в канале можно проследить на x, t -диаграмме (рис. 4).

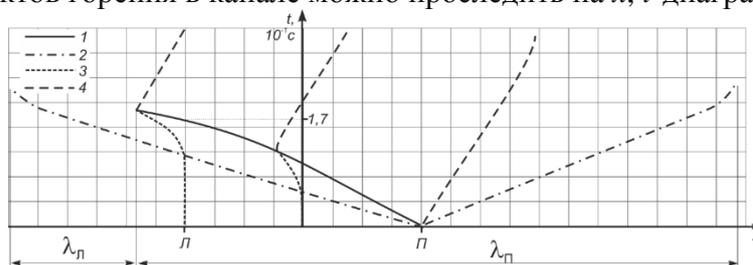


Рис. 4. Направление и скорости движения: фронт горения – 1, фронт ударной волны – 2, контактная поверхность облака ГВС с левой стороны (Л) и центра – 3, контактная поверхность с правой стороны (П) и продукты горения – 4

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 на рис. 3, 4, отсчитывается от точки полного сгорания ГВС и ее величина составила 23 м. Таким образом, по отношению к длине облака ГВС длина взрывной волны составит: $\lambda_l = 0,7L_l$, $\lambda_p = 2,5L_l$. При увеличении скорости горения коэффициенты при L_l изменятся, однако их соотношение будет постоянным. Таким образом, для рассматриваемого случая получены следующие соотношения:

$$\lambda_l = 0,28\lambda_p, \text{ поскольку } \tau_+ \sim \lambda, \text{ тогда, } \tau_+^p = 3,57\tau_+^l, \text{ при } P_p = (1,03 \dots 1,05)P_l. \quad (4/5)$$

Инициирования 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. 5), 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.

Соответственно, мы получаем бóльшую амплитуду УВВ по отношению к предыдущему случаю за счет меньшей скорости диссипации энергии за зоной горения, что соответствует расположению части облака ГВС (от точки инициирования до границы) в тупиковой части канала с инициированием взрыва у тупика (рис. 6). Увеличение амплитуды при этом происходит на 21 % (с 0,28 до 0,34 МПа), что качественно совпадает с аналогичными расчетами в работе [5].

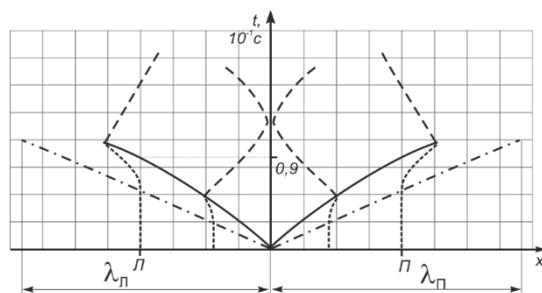


Рис. 5. Направление и скорости движения фронта дефлаграционного горения, ударной воздушной волны и продуктов горения при инициировании ГВС в центре облака

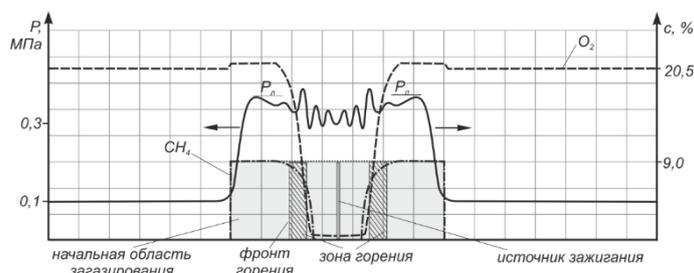


Рис. 6. Профили параметров газового потока при дефлаграционном горении и инициировании ГВС из центра загазированного участка, на момент времени 0,4 мс

Соотношения между длинами взрывной волны, времени действия фазы сжатия и величины амплитуды волн слева и с права будут иметь следующий вид:

$$\lambda_L = \lambda_P, \quad \tau_+^{II} = \tau_+^I, \quad P_L = P_P. \quad (5/6)$$

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.

Соотношение между давлением взрыва внутри облака ГВС и с обратной стороны его контактной поверхности определяется переходом ударной волны через границу двух газовых сред (рис. 2, 6). Поскольку плотности воздуха и ГВС отличаются не значительно, то заметного скачка амплитуды УВВ на границе не наблюдается.

При дефлаграционном взрыве в протяженных каналах высока вероятность перехода горения в детонацию [8]. Особенно это актуально для горных выработок, загроможденных по сечению. В случае принятия модели мгновенного взрыва, в процессе расчета, необходимо решать задачу распада произвольного разрыва.

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. 7) 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 $\approx 0,5P_n$. Длина взрывной волны в начальный момент времени составила $\approx 1/2$ длинны активного участка.

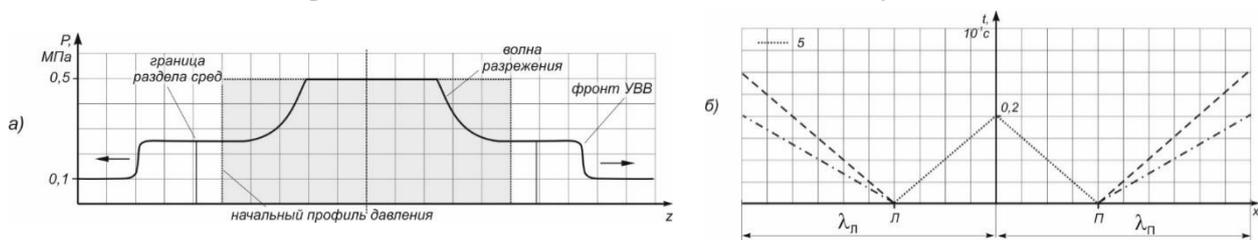


Рис. 7. Динамика состояния газа в модели мгновенного взрыва: а) давление в начальный момент времени и через 0,8 мс; б) движение УВВ, продуктов горения и волны разрежения (5)

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 $\rho_{пд}$. Величина начального давления оказывает незначительное влияние на относительную амплитуду волны: при увеличении начального давления взрыва в 10 раз, отношение $P_{yв}/P_n$ изменяется всего на 8 %, причем в сторону уменьшения за счет возрастания различных потерь (например, теплообмена со стенкой). Интерес представляет конкретный вид зависимости $P_{yд}/P_n$ от $\rho_v/\rho_{пд}$. Аналитический вид этих зависимостей был получен путем обработки результатов численного эксперимента методом наименьших квадратов. При решении уравнений нелинейной регрессии использовалась линеаризация методом логарифмирования:

$$\frac{P_{yд}}{P_n} = 0,098 \ln \left(\frac{\rho_{пд}}{\rho_v} \right) + 0,55, \quad \frac{\lambda_{yв}}{L_1} = 0,43 \left(\frac{\rho_v}{\rho_{пд}} \right)^{0,56} \quad (6/8)$$

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

$$P_{yд} = 0,55 P_n, \quad \lambda_L = \lambda_{пд} = 0,45 L_1, \quad \tau_+^{пд} = \tau_+^пд, \quad P_L = P_n, \quad (7/9)$$

Рассмотрим вариант, когда в модели взрыва учитывается процесс детонационного горения ГВС, т.е. газодинамическая модель численного счета дополняется моделью химической кинетики горения углеводородов. 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.

Результат численного эксперимента, при расположении источника инициирования на правой границе ГВС, изображен на рис. 8. На графике (рис. 8а), 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 $(P_{yв}/P_D) \cdot 100 = 17\%$. Аналогичное соотношение сохраняется и при выходе детонационной волны на границу ГВС и её переход в УВВ, при этом $(P_{yв}^{пд}/P_{yв}^пд) \cdot 100 = 21\%$. 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 режиме дефлаграции. Длина взрывной волны в сторону распространения детонации, до момента окончания горения (t_z) будет равна длине детонационной волны (рис. 8б). 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.

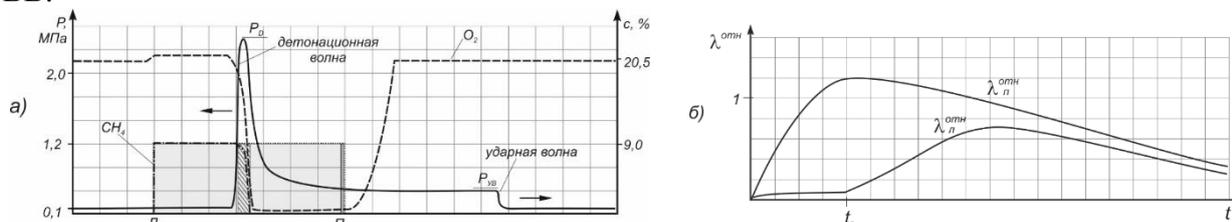


Рис. 8. Давление и концентрации газов в режиме детонации ГВС на момент времени 0,1 мс (а); изменение длины взрывной волны с двух сторон от загазированного участка (б)

Для оценки этого расстояния, в численном эксперименте был произведен замер импульса силового действия УВВ согласно методики [9]. Механический импульс это комплексный показатель, который характеризует амплитуду, длину волны, время действие фазы сжатия и скоростной напор взрывной волны. 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 $P_{УВ} = 0,52$ МПа, с учетом 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. 9.

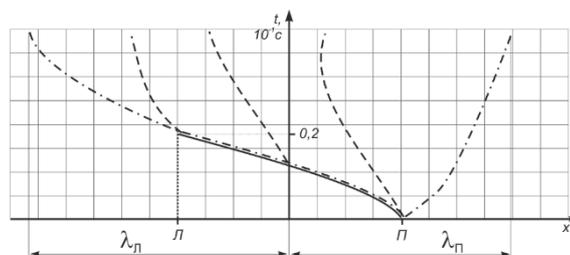


Рис. 9. Движение детонационной волны, продуктов детонации и ударной волны при инициировании ГВС на контактной поверхности

В результате, в режиме детонационного горения ГВС в горной выработке, соотношение параметров УВВ будут иметь следующий вид:

$$P_{уд}^{\Pi} = P_D, P_{уд}^{\Pi} = 0,2P_{уд}^{\Pi}, \lambda_{\Pi} = 1,2L_1, \lambda_{\lambda} = 0,7\lambda_{\Pi}, \tau_{+}^{\Pi} = 0,7\tau_{+}^{\Pi} \quad (8/10)$$

Сопоставляя полученные в численных экспериментах, закономерности формирования УВВ, в условиях дефлаграционного и детонационного режима горения (4), (5), (8) с закономерностями модели мгновенного объемного взрыва (7) можно отметить, что они имеют значительные качественные и количественные отличия. Это подтверждается графиками движения фронта горения, УВВ и ПД в различных режимах (рис. 4, 5, 7, 9). В целом, эти различия можно выразить на графике амплитуд УВВ вблизи облака ГВС (рис. 10).

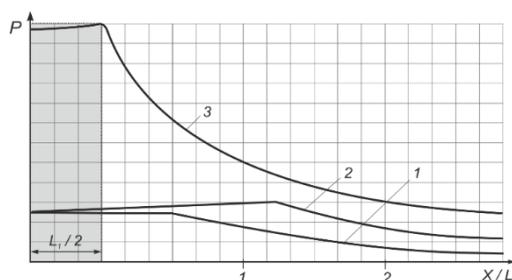


Рис. 10. Профили давления в различных моделях газового взрыва: 1 – модель мгновенного взрыва; 2 – модель с учетом динамики горения ГВС в режиме дефлаграции; 3 – тоже, в режиме детонации

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.

Учет полученных закономерностей в действующей нормативной методике расчета безопасных расстояний [10] предлагается решать по следующему алгоритму. Если в процессе составления расчетной схемы установлена возможность инициирования активного

(загазированого) 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. В рамках физико-математической модели ударной трубы, которая учитывает химическую кинетику горения метановоздушной смеси, исследована задача о влиянии режима горения и места инициирования на параметры УВВ в горных выработках. 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 в 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.

Список литературы

1. 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.
2. Агеев, В.Г. Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана // Горноспасательное дело.– 2010.– Вып. 47.– С. 5–10;
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Гельфанд, Б.Е. Объемные взрывы: монография / Б.Е. Гельфанд, М.В. Сильников.– СПб.: Астерион, 2008.– 374 с.
7. Зельдович, Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику / Я.Б. Зельдович – Москва-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2004. – 188 с.
8. Фролов, С.М. Быстрый переход горения в детонацию / С.М. Фролов // Химическая физика.– 2008.– Т. 27.– № 6.– С. 32-46.
9. Налисько, Н.Н. Численный анализ влияния объемов загазирования горных выработок на импульс ударной воздушной волны / Н.Н. Налисько // Вісник Криворізького національного університету.– 2015.– Випуск 39.– С. 73-77.
10. ДНАОП 1.1.30–4.01.97 Статут ДВГРС по організації і веденню гірничорятувальних робіт.– Київ: Мінвуглепром, 1997.– 445 с.