

УДК [622.81:534.222.2]: 622.868.42: 331.452

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВА МЕТАНА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ КАК ПРОГНОЗ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ

БЕЛИКОВ А. С.¹, *д.т.н., проф.*,
НАЛИСЬКО Н. Н.^{2*}, *к.т.н., доц.*

¹ Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, г. Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, г. Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: 59568@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

Аннотация. Цель. Повышение безопасности работ во взрывопожароопасных помещениях, путем установления закономерностей инициирования газозвуковых смесей ударной воздушной волной и их учета в оценке риска и разработки мероприятий по их снижению. Математическое моделирование прохождения прямой и отраженной ударной воздушной волны через локальные скопления метана. **Методика.** На основе анализа известных исследований по математическому моделированию взрывных процессов в газовой среде ставится задача по исследованию процесса инициирования взрыва газозвуковой смеси ударной воздушной волной. Задача решается путем проведения численного эксперимента распространения ударной воздушной волны через облако газозвуковой смеси. **Результаты.** Решение задачи производится с использованием математической модели ударной трубы. Методика расчета в данной модели построена на совместном решении уравнений газодинамики и химической кинетики горения смеси метан-кислород в воздухе численным методом. 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. Химическая реакция представлена в виде одной брутто-схемы (обобщенного кинетического механизма). Скорость реакции и соответственно тепловыделения рассчитывались по уравнению Аррениуса. Схема хорошо описывает как собственные, так и имеющиеся в литературе экспериментальные данные по воспламенению метана в ударных волнах в диапазоне избыточного давления во фронте ударной волны от 1,4 до 3 МПа. **Научная новизна.** Видимые эффекты инициирования показали сильное влияние газодинамики на кинетику химических реакций взрывного горения, что соответствует тепловому механизму воспламенения и перехода горения в детонацию. **Практическая значимость.** В численных экспериментах выявлены закономерности инициирования локальных скоплений метана, позволяющие повысить эффективность методики расчета безопасных расстояний и ударных нагрузок на строительные конструкции при аварийных взрывах.

Ключевые слова: ударная воздушная волна; газозвуковая смесь; инициирование; численный расчет; фронт горения; промотирование реакции

МОДЕЛЮВАННЯ ІНІЦІЮВАННЯ ВИБУХУ МЕТАНУ УДАРНОЮ ХВИЛЕЮ ЯК ПРОГНОЗ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *д.т.н., проф.*,
НАЛИСЬКО М. М.^{2*}, *к.т.н., доц.*

¹ Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, м. Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: 59568@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

Анотація. Мета. Підвищення безпеки робіт у вибухопожежонебезпечних приміщеннях, шляхом встановлення закономірностей ініціювання газоповітряних сумішей ударною повітряною хвилею, та врахування цього в оцінці ризику і розробки методів щодо їх зниження. Математичне моделювання проходження прямої і відбитої ударної повітряної хвилі через локальні скупчення метану. **Методика.** На основі аналізу відомих досліджень по математичному моделюванню вибухових процесів в газовому середовищі ставиться завдання по дослідженню процесу ініціювання вибуху газоповітряної суміші ударною повітряною хвилею. Завдання вирішується шляхом проведення чисельного експерименту поширення ударної повітряної хвилі через хмару газоповітряної суміші. **Результати.** Рішення завдання проводиться з використанням математичної моделі ударної труби. Методика розрахунку в цій моделі побудована на спільному рішенні рівнянь газодинаміки і хімічної кінетики горіння суміші метан-кисень в повітрі, чисельним методом. Для опису рух середовища в циліндричній системі координат використовувалися рівняння Ейлера (в дивергентному вигляді), які зазвичай використовують при розрахунку течії стискається ідеального газу і допускають розривні рішення. Хімічна реакція представлена у вигляді однієї

брутто-схеми (узагальненого кінетичного механізму). Швидкість реакції і відповідно тепловиділення розраховувалися за рівнянням Арреніуса. Схема добре описує як власні, так і наявні в літературі експериментальні дані по займанню метану в ударних хвилях в діапазоні надлишкового тиску у фронті ударної хвилі від 1,4 до 3 МПа. *Наукова новизна.* Видимі ефекти ініціювання показали сильний вплив газодинаміки на кінетику хімічних реакцій вибухового горіння, що відповідає тепловому механізму займання і переходу горіння в детонацію. *Практична значимість.* У численних експериментах виявлено закономірності ініціювання локальних скупчень метану, що дозволяє підвищити ефективність методики розрахунку безпечних відстаней та ударних навантажень на будівельні конструкції при аварійних вибухах.

Ключові слова: ударна повітряна хвиля; газоповітряна суміш; ініціювання; чисельний розрахунок; фронт горіння; промотування реакції

SIMULATION OF INITIATION OF METHANE EXPLOSION SHOCK WAVE FORECAST AS SAFETY ASSESSMENT

BELIKOV A. S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
NALISKO N. N.^{2*}, *Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Vital Activity Safety, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo st., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 47-16-01, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Vital Activity Safety, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 47-16-01, e-mail: 59568@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

Abstract. Purpose. Increase the safety of work in explosive and fire hazardous areas by establishing the patterns of initiation of air-gas mixtures by a shock air wave and their consideration in risk assessment and development of measures to reduce them. Mathematical modeling of the passage of a direct and reflected shock air wave through local accumulations of methane. **Methodology.** Based on the analysis of known studies on the mathematical modeling of explosive processes in a gaseous medium, the task is to study the process of initiating the explosion of a gas-air mixture by a shock air wave. The problem is solved by performing a numerical experiment of propagation of a shock air wave through a cloud of a gas-air mixture. **Results.** The solution of the problem is made using the mathematical model of the shock tube. The calculation technique in this model is based on the joint solution of the equations of gas dynamics and the chemical kinetics of combustion of a methane-oxygen mixture in air by a numerical method. To describe the motion of the medium in a cylindrical coordinate system, the Euler equations (in the divergent form) were used, which are usually used in calculating the flow of a compressible ideal gas and allow discontinuous solutions. The chemical reaction is presented in the form of one gross-scheme (generalized kinetic mechanism). The reaction rate and, accordingly, the heat release were calculated by the Arrhenius equation. The scheme well describes both own and available in the literature experimental data on the ignition of methane in shock waves in the range of excess pressure in the front of the shock wave from 1.4 to 3 MPa. **Scientific novelty.** Visible initiation effects have shown a strong influence of gas dynamics on the kinetics of chemical reactions of explosive combustion, which corresponds to the thermal mechanism of ignition and the transition of combustion to detonation. **Practical value.** Numerical experiments revealed regularities in the initiation of local methane accumulations, which make it possible to increase the efficiency of the method for calculating safe distances and shock loads on building structures during emergency explosions.

Key words: shock air wave, gas-air mixture, initiation, numerical calculation, combustion front, reaction promotion.

Постановка проблеми. Взрывы газоздушных смесей (ГВС) в зданиях и на промышленных объектах являются наиболее распространенными видами аварийных взрывов. Такие взрывы происходят, как правило, в жилых газифицированных зданиях и в помещениях категории А, Б, где возможна утечка взрывоопасного вещества. Это прежде всего, объекты химии и нефтехимии, газораспределительные пункты, котельные и другие объекты [1]. Так же, к таким объектам относятся подземные сооружения и горные выработки где условия добычи и переработки полезных ископаемых допускают возможность образования взрывчатых газоздушных смесей (ГВС).

Одним из вариантов аварийных выбросов являются случаи образования нескольких участков с локальными скоплениями ГВС, ударная волна от взрыва одного из которых может вызвать взрывы остальных [2]. Для прогнозирования аварийных ситуаций и сведения к

минимуму последствий необходимо изучить закономерности в распространении ударных воздушных волн (УВВ) через локальные скопления ГВС и возможность инициирования горения и взрыва.

Анализ последних исследований выделение нерешённой части проблемы. Взаимодействиям УВВ со скоплениями метана посвящены работы Э.О. Миндели (1972), Б.И. Вайнштейна (1974) где рассматривается воспламеняющая способность УВВ при взрыве промышленных ВВ. Устанавливаются критерии по массе воспламеняющего заряда, и на их основе совершенствуются методики испытания предохранительных ВВ в уголкового мортуре. В работе [3] изучается время инициирования метановоздушной смесей ударной волной в камере сгорания двигателя. Значительное количество исследований в этом направлении проводится в университетах Китая [4].

Однако закономерностей инициирования ГВС с учетом химической кинетики горения метана не получено.

Цель работы. Повышение безопасности работ во взрывопожароопасных помещениях, путем установления закономерностей инициирования газозвушных смесей ударной воздушной волной. Математическое моделирование прохождения прямой и отраженной ударной воздушной волны через локальные скопления метана.

Изложение основного материала. Наиболее близким существующим аналитическим решением является задача возбуждения детонации в конденсированных ВВ, которая представлена в работах К.П. Станюковича. В них, механизм возбуждения обосновывается созданием ударной волной зоны сжатия конечных размеров. В этой зоне, непосредственно за фронтом УВ, в «горячих точках», возникают экзотермические реакции. Причины возникновения «горячих точек» могут быть следующие: трение между кристаллами и твердыми частицами; «вязкостный разогрев» в результате быстрого течения вещества; трение на поверхности сдвига при прочностном разрушении локального объема под действием касательных напряжений; взаимодействие элементарных косых УВ, возникших в неоднородной системе; адиабатическое сжатие газовых включений. В случае инициирования газозвушных смесей, механизмом зажигания будет являться адиабатическое сжатие. Поскольку количественная химико-кинетическая теория процесса возбуждения детонации чрезвычайно сложна то для конденсированных ВВ, в работах Б.И. Шехтера, была установлена интегральная характеристика процесса, в виде первого и второго условия возбуждения. Первое условие – это минимальная интенсивность инициирующей УВ, второе – время разгрузки волны сжатия должно быть меньше времени возбуждения и размер очага зажигания (часть фронта сжатия, не охваченного разгрузкой) должен быть больше критического диаметра. Критические параметры, также, зависят от природы КВВ, размера поверхности фронта ИУВ, длительность действия волны, крутизны спада давления за фронтом ИУВ и кривизны фронта волны.

Для ГВС таких критериев, на сегодняшний день, не установлено. В данной работе, для установления критериев зажигания локальных скоплений метана используется численное моделирование течений газового потока с применением математической модели ударной трубы, в которой реализован газодинамический подход.

Математическая постановка задачи следующая. Технологическое помещение моделируется цилиндрическим каналом (рис. 1). С одной стороны, канал имеет свободный выход, с другой канал закрыт жесткой стенкой. Внутри канала, в расчетной области, находится участок, заполненный метановоздушной средой (у тупиковой стенки). На некотором расстоянии от этого участка находится область теплового взрыва, которая является источником УВВ.



Рис. 1. Общая структура расчётной сетки: а) в объёмном представлении, в цилиндрической системе координат; б) в плоском представлении / The general structure of the computational grid

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

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{W}) &= 0, & \text{неразрывности} \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= -\tau_{\text{тр}} \frac{\Pi}{S}, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0, & \text{движения (1)} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}(\rho E \vec{W}) + \text{div}(\rho P \vec{W}) = q\Pi + q_x \rho \frac{\partial \alpha}{\partial t} \text{энергии,}$$

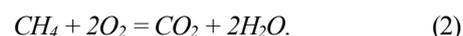
где ρ – плотность; P – давление; \vec{W} – вектор скорости; u, v – компоненты скорости \vec{W} ; z, r – цилиндрические координаты; $E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ – удельная полная энергия;

$\tau_{\text{тр}}$ – напряжение поверхностных сил трения; q – плотность теплового потока в стенку канала; S, Π – поперечное сечение и периметр выработки; q_x – тепловой эффект химической реакции горения углеводородов; α – мольная доля углеводорода в шахтной атмосфере; t – время.

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.

Решения системы уравнений (1) производилось с использованием однородной схемы сквозного счёта. В качестве такой схемы был применен модифицированный метод крупных частиц.

Для реализации учета скорости энерговыделения при горении, в расчетной схеме используется суммарное кинетическое уравнение химической реакции горения смеси метана и кислорода в воздухе [5]. Химическая реакция представлена в виде одной брутто-схемы (обобщенного кинетического механизма):



Скорость реакции по i -ому компоненту $i=1, 2$ задается в форме Аррениуса:

$$-\frac{dc_i}{dt} = Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \Pi c_i^{v_i} \quad (3)$$

где Z, E_a, v_i – эффективные предэкспоненциальный множитель, энергия активации и порядок реакции по i -му компоненту

Уравнения химической кинетики решались численным методом совместно с уравнениями газовой динамики и уравнениями состояния. Разностный аналог

уравнения (3) представлялся в следующем виде:

$$-\frac{[c_1]_{i,j}^{n+1} - [c_1]_{i,j}^n}{\Delta t} = k \cdot ([c_1]_{i,j}^n)^{v_1} ([c_2]_{i,j}^n)^{v_2},$$

где k – константа скорости химической реакции горения; i, j – целочисленные координаты расчетной ячейки; n – номер временного слоя.

При расчете уравнения сохранения энергии (1) в правую часть добавляется слагаемое:

$$\Delta t \cdot Q \exp(-E_a/RT) \cdot ([c_1]_{i,j}^n)^{v_1} ([c_2]_{i,j}^n)^{v_2},$$

где Q – теплотворная способность горения метана в воздухе при стехиометрическом составе метан-кислород.

Численный эксперимент проводился для канала диаметром 2 м, длина участка ГВС $L_0 = 5$ м, расстояние от границы загазированной области до источника УВВ $L_2 = 3$ м, длина источника УВВ $L_1 = 3$ м (рис. 1). Участок загаживания располагался у тупика с таким расчетом, что бы УВВ пройди сквозь него могла отразиться от жесткой стенки. Таким образом, исходная смесь сжимается дважды и можно проследить действие отраженной УВВ на ГВС.

При распространении УВВ по каналу происходит падение амплитуды волны, а при ее вхождении в облако ГВС происходит изменения положения контактной поверхности и концентрации метана внутри облака за счет приведения в движения газа за фронтом УВВ (рис. 2). Поэтому характерным параметром взаимодействия УВВ с ГВС будем считать амплитуду волны в момент прохождения фронта волны через контактную поверхность области загаживания (рис. 1).

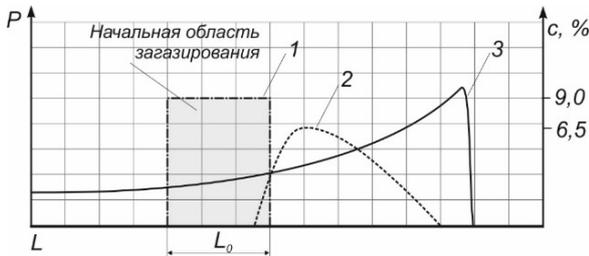


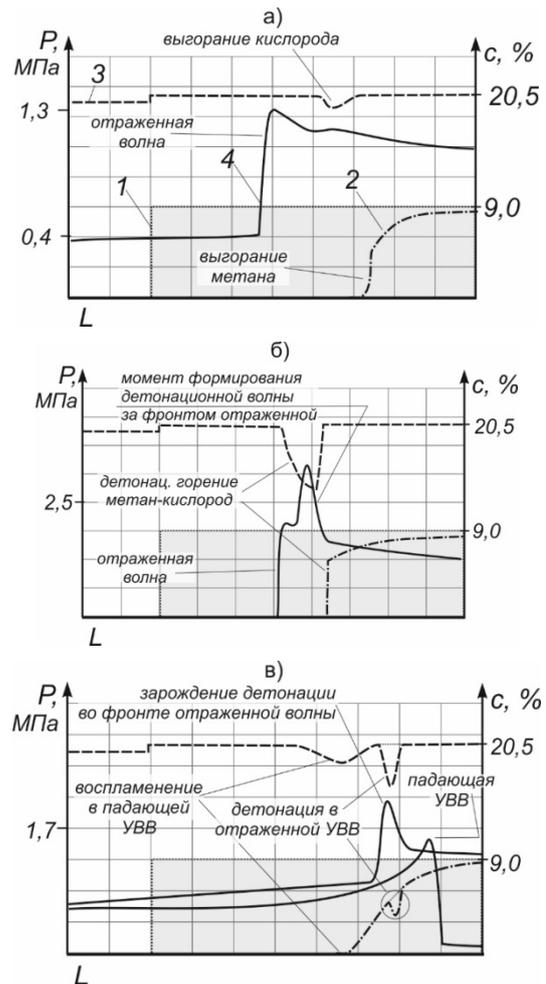
Рис. 2. Динамика изменения профиля концентрации метана при прохождении УВВ через ГВС без ее инициирования: 1 – начальная концентрация метана, 2 – профиль после прохождения УВ, 3 – давление в УВ / Dynamics of the change in the methane concentration profile during the passage of the shock wave through the methane-air mixture without initiating it

В действующих нормативных методиках расчета параметров распространения УВВ максимальное значение избыточного давления ограничивается величиной 2,8 МПа, поэтому область варьирования характерного параметра взаимодействия УВВ с ГВС составляла от 0,1 до 3 МПа.

Проведенные численные эксперименты показали, что УВВ с амплитудой до 1,1 МПа проходя через ГВС не оказывает на нее инициирующего действия, происходит только снижение концентрации и смещение облака за счет движения потока. При амплитуде 1,1 МПа происходит вспышка ГВС, но только в отраженной УВВ.

Причем вспышка наблюдается вблизи контактной поверхности, в которую входил фронт прямой УВВ и под действием которого она значительно сместилась от начального положения (рис. 3а). На момент прихода отраженной волны в точку вспышки, ГВС имело давление 0,4 МПа, амплитуда отраженной волны составляла 1,3 МПа. Возникновение вспышки на границе облака происходит по причине максимального времени воздействия на эту область прямой волны сжатия (т.е. реализуется необходимое время индукции) и снижения энергии активации под действием давления.

В диапазоне характерного давления на фронте УВВ от 1,4 МПа происходит воспламенение ГВС под действием отраженной волны, а начиная с 1,8 МПа возникает переход начавшегося горения в детонацию (рис. 3б), что обусловлено первоначальным адиабатическим сжатием газа в падающей УВВ. Зарождение детонационной волны сопровождается резким скачком давления более чем в 10 раз в точке перехода горения в детонацию. Это хорошо согласуется с данными работ [6, 7] в которых показано повышение термодинамической эффективности сжигания газов в режиме детонации и увеличение при этом степени сжатия газов в 20-30 раз.



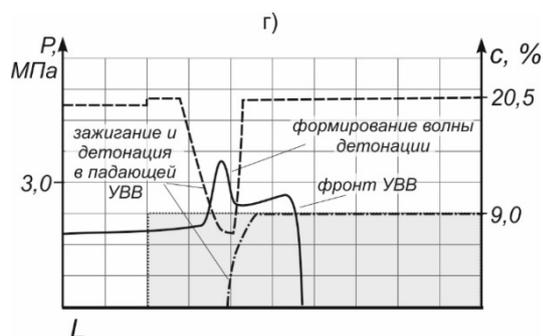


Рис. 3. Профили давлений и концентраций газов при различных эффектах инициирования локальных скоплений метана: а) вспышка в отраженной волне, б) воспламенение и детонация в отраженной волне, в) воспламенение в падающей и детонация в отраженной волне, г) воспламенение и детонация в падающей волне; 1 – профиль начальной концентрации метана в локальном скоплении, 2 – концентрация метана при прохождении УВВ, 3 – концентрация кислорода, 4 – давление в отраженной волне / Gas pressure profiles and gas concentrations for various initiation effects of local methane accumulations

Начиная с величины амплитуды 2,3 МПа происходит интересное явление: прохождении падающей волны вызывает воспламенение смеси, а отражённая волна, возвращаясь к очагу горения, промотигирует реакцию горения переводя ее в режим детонации (рис. 3в). Такой эффект происходит при синхронизации выделения энергии химической реакции горения и газодинамических процессов [8].

Устойчивое зажигание и детонацию ГВС метан-воздух вызывает прямая УВВ с амплитудой 2,6 МПа (рис. 3г). Причем вначале происходит зажигание смеси, а затем через 1,7 мс горение переходит в детонацию, волна которой догоняет фронт ударной волны. Зажигание происходит, как и в предыдущих экспериментах на контактной поверхности (которая успевает сместиться) и за фронтом УВВ, т.е. до момента зажигания фронт волны успевает продвинуться вглубь ГВС. С увеличением амплитуды УВВ время от возникновения горения до перехода процесса в детонацию сокращается, точка зажигания смещается во фронт ударной волны, а само зажигание происходит в момент входа фронта волны в локальное скопление метана. Такой процесс наблюдался при амплитуде 3,7 МПа, время от зажигания до детонации смеси составило 0,15 мс. При амплитуде 4,9

МПа зажигание и детонация смеси возникают одновременно в момент входа фронта УВВ в ГВС.

Параллельно с экспериментами для стехиометрической смеси (с небольшим обеднением) выполнялись расчеты для сниженных концентраций метана. Уменьшение концентрации до 6,2 % незначительно увеличивает пределы избыточных давлений в ударной волне при которых наступает тот или иной эффект зажигания и детонации. Далее, величина давлений для инициирования детонации сильно возрастает и начиная от нижнего концентрационного предела горения и до 3,9 % происходит горение метана за фронтом УВВ, при амплитуде не менее 2,7 МПа, без образования ударных волн. При дальнейшем снижении содержания метана инициирование горения, для возможных в горных выработках амплитуд УВВ не происходит.

Полученные результаты имеют хорошую корреляцию с данными экспериментов по определению минимальных масс предохранительных ВВ воспламеняющих метановоздушную среду (МВС), проведенными МакНИИ в опытном штреке [9]. В результатах приведены значения критических амплитуд в прямых УВВ генерируемых зарядами ВВ с учетом содержания ингибиторов горения в продуктах детонации. Эти значения, как и ожидается, выше величин полученных в численных экспериментах, а экстраполяция в нулевую сторону содержания солей-ингибиторов позволяет выйти на критические давления, которые определены в численном расчете для зажигания и инициирования ГВС в прямой волне. Это позволяет утверждать, что критические параметры ударных волн, полученные в данной работе для различных эффектов инициирования, являются достоверными и сравнимыми между собой.

Как видно из результатов численных экспериментов ударные воздушные волны представляют опасность с точки зрения возможного воспламенения локальных скоплений метана хотя и в небольшом диапазоне амплитуд (от 2,6 МПа). Если на пути распространения УВВ встречается отражающие поверхности в виде загроможденного сечения или резких поворотов, то диапазон амплитуд расширяется до 2,3 МПа (табл. 1). Поскольку УВВ с такими амплитудами, в условиях горных выработок затухают достаточно быстро, то инициирующая способность УВВ сохраняется вблизи действия источников взрывов.

Таблица 1

Закономерности инициирования локальных скоплений метана ударной воздушной волной / Laws initiating shock air wave methane local accumulations

Амплитуда во фронте УВВ*, МПа	Падающая УВВ			Отраженная УВВ		
	Инициирующий эффект	Время перехода горения в детонацию	Место инициирования горения	Инициирующий эффект	Амплитуда отраженной волны в момент инициирования ГВС, МПа	Давление ГВС в месте инициирования, МПа
< 1,1	–	–	–	–	–	–
1,1	–	–	–	вспышка	1,3	0,4
1,4	–	–	–	воспламенение	1,9	0,8

				во фронте и частичное выгорание метана		
1,8	–	–	–	воспламенение во фронте, переход в детонацию за фронтом через 350 мкс	2,4	1,0
2,3	воспламенение	–	за фронтом	детонация	4,6	1,0
2,6	воспламенение, переход в детонацию	1,26 мс	непосредственно за фронтом	–	–	–
3,6	воспламенение, переход в детонацию	0,4 мс	непосредственно за фронтом	–	–	–

* характерный параметр взаимодействия УВВ с ГВС

Выводы. Полученные результаты численных экспериментов по инициированию метановоздушной смеси ударной воздушной волной, в условиях горных выработок, хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. Видимые эффекты инициирования показывают сильное влияние газодинамики на кинетику химических реакций взрывного горения.

Полученные закономерности воспламенения и детонации локальных скоплений метана в падающих и отраженных УВВ позволяют эффективно определять безопасные расстояния при аварийных работах и снизить риски несчастных случаев взрывоопасных производств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности аварийных взрывов внутри жилых газифицированных зданий и промышленных объектов / А. В. Мишуев, В. В. Казенов, А. А. Комаров [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 3. – С. 49-56.
2. Комаров А. А. Основы обеспечения взрывобезопасности объектов и прилегающих к ним территорий / А. А. Комаров. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 91 с.
3. Моделирование процессов задержки поджига смеси метан-воздух ударной волной [Текст] / С. А. Поняев, И. В. Апевалов, А. С. Лебедев [и др.] // Труды военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2013. – Выпуск 641. – С. 61-68.
4. Huang, J., Hill, P. G., Bushe, W. K. and Munshi, S. R. (2004), "Shock-tube study of methane ignition under engine-relevant conditions: experiments and modeling", *Combustion and Flame*, vol. 136, iss. 1-2, January, pp. 25-42.
5. Petersen, E. L., Davidson, D. F. and Hanson, R. K. (1999), "Kinetics modeling of shock-induced ignition in low-dilution CH₄/O₂ mixtures at high pressures and intermediate temperatures", *Combustion and Flame*, vol. 117, iss. 1-2, April, pp. 272-290.
6. Головастов, С. В. Управление процессами воспламенения и детонации в газовых средах [Текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.14.14: защищена 29.10.08 / С.В. Головастов – Москва: Объед. ин-т высоких температур РАН, 2008. – 136 с.
7. Агафонов, Г. Л. Воспламенение пропана в ударных волнах [Текст] / Г. Л. Агафонов, А. М. Тереза // Химическая физика. – 2015. – Т. 34, № 2. – С. 49-60.
8. Гельфанд Б. Е. Водород. Параметры горения и взрыва [Текст] / Б. Е. Гельфанд, О. Е. Попов, Б. Б. Чайванов. – Москва: Физматлит, 2008. – 288 с.
9. Калякин, С. А. Определение критических параметров ударных волн при взрыве заряда ВВ, вызывающих воспламенение метановоздушной смеси [Текст] / С. А. Калякин // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірнично-геологічна». – 2012. – Вип. 16(206). – С. 133-139.

REFERENCES

1. Mishuev, A.V., Kazenov, V.V. and Komarov, A.A. (2012), *Osobennosti avariynykh vzryivov vnutri zhilykh gazifitsirovannykh zdaniy i promyshlennykh ob'ektov* [Features of emergency explosions inside residential gasified buildings and industrial facilities], *Pozharovzryivobezopasnost*, no. 3. pp. 49-56. (in Russian).
2. Komarov, A.A. (2012), *Osnovyi obespecheniya vzryivobezopasnosti ob'ektov i prilegayuschih k nim territoriy* [Basics of ensuring explosion safety of facilities and adjacent territories], Academy of the Ministry of Emergency Situations, Moscow, Russia. (in Russian).
3. Ponyaev, S.A., Apevalov, I.V. and Lebedev, A.S. (2013), *Modelirovanie protsessov zaderzhki podzhiga smesi metan-vozduh udarnoy volnoy* [Simulation process ignition delay methane-air shock wave], *Trudyi voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo*, vol. 641, pp. 61-68. (in Russian).

4. Huang, J., Hill, P.G., Bushe, W.K. and Munshi, S.R. (2004), "Shock-tube study of methane ignition under engine-relevant conditions: experiments and modeling", *Combustion and Flame*, vol. 136, iss. 1-2, January, pp. 25-42.
5. Petersen, E.L., Davidson, D.F. and Hanson, R.K. (1999), "Kinetics modeling of shock-induced ignition in low-dilution CH₄/O₂ mixtures at high pressures and intermediate temperatures", *Combustion and Flame*, vol. 117, iss. 1-2, April, pp. 272-290.
6. Golovastov, S.V. (2008), "Process control ignition and detonation in gas media", D. Sc. Thesis dissertation, Thermal physics and theoretical heat, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. (in Russian).
7. Agafonov, G.L. (2015), Vosplamnenie propana v udarnykh volnah [Ignition of propane in shock waves], *Russian Journal of Physical Chemistry B Focus on Physics*, Vol. 34, no. 2, pp. 49-60. (in Russian).
8. Gelfand, B.E., Popov, O.E. and Chayvanov B.B. (2008), *Vodorod. Parametryi goreniya i vzryiva* [Hydrogen. The parameters of combustion and explosion], Fizmatlit, Moscow, Russia. (in Russian).
9. Kalyakin, S.A. (2012), *Opredelenie kriticheskikh parametrov udarnykh voln pri vzryive zaryada VV, vyizyvayuschih vosplamnenie metanovozdushnoy smesi* [Determination of the critical parameters of shock waves in the explosion of the explosive charge, causing inflammation of methane-air mixture], *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya «Hirnycho-heolohichna»*, Issue 16(206), pp. 133-139. (in Russian).

Стаття надійшла в редколегію 30.03.2017