



II РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.66.18.003

УДК 622.272:516.02

© С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, А.Ю. Ерастов, С.И. Голоскоков, Д.Н. Батраков,
В.В. Сатонин, 2021

С.В. ЧЕРДАНЦЕВ

д-р техн. наук,
главный научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: svch01@yandex.ru



П.А. ШЛАПАКОВ

канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: shlapak1978@mail.ru



А.Ю. ЕРАСТОВ

старший научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: erastov_a_y@mail.ru



С.И. ГОЛОСКОКОВ

канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: s.goloskokov@nc-vostnii.ru



Д.Н. БАТРАКОВ

заведующий лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: vostnii-bvr@yandex.ru



В.В. САТОНИН

заместитель заведующего лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: v.satonin@nc-vostnii.ru



ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ, МОДЕЛИРУЕМЫХ ИДЕАЛЬНЫМ ГАЗОМ

При строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий, в первую очередь угольных шахт, особо актуальными являются задачи, обусловленные быстропротекающими процессами, к основным из которых относятся ударно-волновые и детонационные процессы. Причинами возникновения этих процессов являются химические реакции с практически мгновенным выделением огромной тепловой энергии, преобразуемой в кинетическую энергию ударных волн, приводящих к катастрофическим последствиям. Широкомасштабные исследования ударно-волновых и детонационных процессов особенно актуальны при создании методов и средств управления этими процессами в газообразных, жидких и твердых взрывчатых веществах. В статье обсуждается связь между ударно-волновыми и детонационными процессами. Сформулирована задача о детонационном фронте в газовой смеси, моделируемой идеальным газом в переменных Эйлера. Приведены формулы и построены графики для определения основных параметров газовой смеси на детонационном фронте.

Ключевые слова: ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ, ГАЗОВОЗДУШНЫЕ СМЕСИ, ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ МАССЫ, ИМПУЛЬСОВ И ЭНЕРГИИ, УДАРНЫЙ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ФРОНТЫ, ПОВЕРХНОСТЬ ЧЕПМЕНА – ЖУГЕ.

ВВЕДЕНИЕ

Ударно-волновые процессы играют исключительно важную роль в механизме распространения детонационных волн и представляют огромный интерес при изучении механического воздействия взрыва в различных средах.

Теория ударных волн была создана еще во второй половине XIX века главным образом трудами Римана, Ренкина, Гюгонио. Особый интерес к изучению этих процессов обусловлен их особой опасностью на промышленных и энергетических объектах, особенно на угольных шахтах. Хотя большинство взрывов газозвушных смесей и взрывчатых веществ в угольных шахтах порождают волны дефлаграции, особую опасность представляют детонационные процессы, которые чрезвычайно разрушительны, поскольку давление в них может достигать нескольких десятков мегапаскалей.

К настоящему времени ударно-волновые и детонационные процессы исследованы достаточно глубоко, однако их глобальная теория еще не завершена в полном объеме. Здесь мы сделаем краткий обзор работ в области ударно-волновых и детонационных процессов, опубликованных за последние годы.

Так, в работе [1] авторы сопоставили расчетные и экспериментальные данные параметров горения и детонации различных смесей, характерных для аварийных взрывов в шахтах в широком диапазоне изменения концентрации смеси и их стехиометрического соотношения.

В работе [2] за критерий возбуждения детонации принята критическая энергия инициирования, численно равная работе, совершаемой продуктами детонации вдоль продольного размера ячейки. На базе данного критерия выведена формула для определения критической энергии возбуждения различных видов детонационных волн.

Анализ современного состояния проблемы инициирования горючих смесей подробно выполнен в работе [3]. На основе анализа даны рекомендации по использованию различных формул для оценки критической энергии как при воспламенении смеси, так и при инициировании детонации. Отмечены нерешенные и сформулированы новые задачи теории горения и детонации. В работе [4] авторы сравнили параметры горения и детонации, полученные теоретически и экспериментально для смесей различной концентрации и

стехиометрического соотношения смесей при взрывах на угольных шахтах.

Анализ и газодинамические условия протекания дефлаграционных и детонационных процессов в атмосфере горных выработок, расположенных вблизи очагов самонагрева, рассмотрены в статье [5].

В статье [6] обсуждается задача о вынужденной детонации, сформированной в результате истечения газа из подземного резервуара в горную выработку со сверхзвуковой скоростью. Получены формулы, характеризующие изменения скоростей, давлений, плотностей, пылегазовоздушного потока на фронте ударной волны и на поверхности Чепмена – Жуге. Построены графики, с помощью которых обнаружены некоторые условия и закономерности протекания вынужденной детонации в пылегазовоздушных смесях.

В работе [7] исследованы параметры фронта ударной волны в газовой смеси с учетом ее вязкости и теплопроводности. Получена формула, характеризующая изменение скорости за фронтом ударной волны в смеси, вычислена ширина фронта и выявлены некоторые закономерности ее изменения в горных выработках.

В статье [8] обсуждается задача об истечения продуктов детонации с произвольной поверхности твердого взрывчатого вещества, к которой детонационный фронт подходит под некоторым углом. Найдены формулы, позволяющие вычислить скорости и плотности разлетающихся продуктов детонации в зависимости от углов разлета и встречи.

В монографии [9] изложены вопросы математического моделирования ударно-волновых процессов в многофазных средах. Получены уравнения и найдена структура ударной волны в смеси газов. Дан вывод соотношения на комбинированном разрыве в смеси газ – частицы. Исследовано распространение ударной волны в пористом твердом теле.

В монографии [10] в систематизированном виде излагается комплекс вопросов, касающихся распространению детонации в конденсированных взрывчатых веществах, термодинамике взрывных процессов, микро-

и макрокинетике превращений взрывчатых систем, чувствительности взрывчатых веществ к внешним воздействиям, работоспособности и метательной способности взрывчатых веществ, а также действию взрыва в газах, жидкостях и грунтах.

В работе [11] изложены концептуальные вопросы распространения ударных волн в гетерогенных реагирующих средах и сделана попытка установить эффективность вклада различных по своей природе элементарных процессов в энергетические возможности локальных разогревов, определяющих возможность развития в пористой среде неравновесных физико-химических превращений.

В работе [12] представлены результаты исследований по проблемам инициирования, распространения и стабилизации детонационных волн в неподвижных и движущихся горючих газовых смесях. Для описания течений использовались уравнения идеального газа и две модели детонационной волны: классическая и модель, учитывающая протекание химических реакций за ударным фронтом.

Двумерные нестационарные течения газа в пористых средах с очагами гетерогенного горения при вынужденной фильтрации и свободной конвекции обсуждаются в работе [13], где с помощью численных методов показано, что при горении твердых пористых сред могут возникать сложные течения газа, в том числе вихревые. В случае принудительной фильтрации газ стремится огибать нагретую часть объекта, предпочитая течь по холодным областям.

Детонационная активность аэровзвесей частиц вторичного взрывчатого вещества со среднеобъемной плотностью $0,14 \div 1,28 \text{ мг/см}^3$ при начальных давлениях воздуха в интервале $0,01 \div 0,3 \text{ МПа}$ исследована в работах [14, 15]. Определены параметры и выявлена структура детонационных волн в зависимости от концентрации взрывчатого вещества и начального давления воздуха. Установлены условия движения детонационных волн во взрывчатых аэровзвесах. Для ряда начальных давлений воздуха экспериментально определены критические среднеобъемные плотно-

сти взрывчатого вещества, ниже которых детонация в аэровзвесьях не распространяется. В работе [16] установлена возможность передачи детонации из газожидкостной среды, содержащей пузырьки химически активной газовой смеси, в объем взрывчатого газа.

В работах [17, 18] отмечено, что основной причиной неконтролируемых взрывов являются отложения угольных частиц на различных поверхностях. Под действием ударной волны угольные частицы поднимаются в воздух, образуя пылегазовоздушную смесь. При наличии источников зажигания может возникнуть дефлаграционная волна, способная перейти в самоподдерживающуюся гетерогенную детонацию, распространяющуюся со сверхзвуковой скоростью. Рассчитаны одномерные структуры детонационной волны при различных соотношениях между горючим веществом и реагирующим газом.

В работе [19] рассмотрены ударно-волновые процессы в смесях газа и мелких твердых частиц. Приведены различные виды уравнений состояния для смесей. Отмечено, что при некоторых допущениях система уравнений, описывающая ударно-волновые процессы, сводится к системе уравнений гиперболического типа, для которой установлены типы ударных фронтов, имеющих место в рассматриваемой смеси. Утверждается, что математическая модель типа Андерсона позволяет описать несколько типов ударных волн в смеси газа и твердых частиц.

В работе [20] впервые эксперименталь-

но зафиксирован быстрый переход горения в детонацию в условиях высокоскоростного течения с отдельной подачей природного газа и воздуха при источнике зажигания с энергией ~ 1 Дж. Результаты исследований использованы при разработке промышленного горелочного устройства качественно нового типа — импульснодетонационной горелки для скоростного нагрева и фрагментации различных материалов.

В статье [21] на основе экспериментальных данных доказано, что турбулентность, создаваемая перекрестными сверхзвуковыми струями природного газа и кислорода, движущимися под давлением от 25 до 150 атм в гладкую детонационную трубу диаметром 74 мм, позволяет обеспечить быстрый переход горения в детонацию на расстояниях до 300 мм за время, составляющее $\sim 0,4$ мс.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

Известно, что детонационная волна представляет собой некоторую поверхность, где происходит газодинамический разрыв, при переходе через который газозвушная смесь изменяет свои параметры скачкообразно [10, 11]. В отличие от сильных разрывов изменение состояния смеси в детонационной волне сопровождается тепловыделением, обусловленным интенсивной химической реакцией [22]. За фронтом детонационной волны устанавливается новое однородное состояние вещества, представляющее собой продукты детонации (рис. 1).

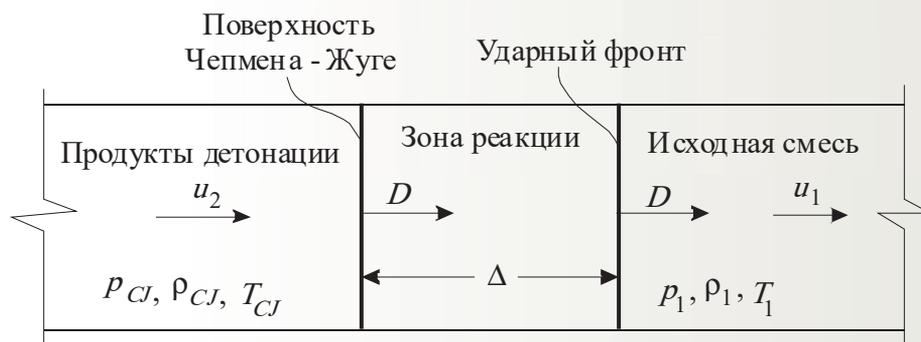


Рис. 1. Схема основных элементов детонационного процесса

Если детонационный процесс протекает стационарно, то поверхность, отделяющая зону химической реакции от продуктов детонации, является поверхностью Чепмена – Жуге (рис. 1), а параметры продуктов детонации на ней будем называть параметрами детонации в точке Чепмена – Жуге и снабжать их индексом «СJ».

Начало химической реакции взрывчатого вещества, как правило, обусловлено скачкообразным изменением давления и температуры на некоторой поверхности, называемой ударным фронтом внутри области, занятой взрывчатым веществом (рис. 1).

Таким образом, для протекания детонационного процесса необходимы три обязательных элемента: ударная волна, зона химической реакции и поверхность Чепмена – Жуге (рис. 1). Такое схематичное описание детонационного процесса возможно вследствие малой ширины Δ зоны химической реакции, по сравнению с размерами области, в которой происходит процесс.

Одной из примечательных особенностей детонационного процесса является то обстоятельство, что фронт ударной волны и поверхность Чепмена – Жуге являются поверхностями разрыва, на которых функции, характеризующие состояние взрывчатого вещества и продуктов детонации, претерпевают разрывы первого рода [23]. Следовательно, с математической точки зрения описание функций на ударном фронте и на поверхности Чепмена – Жуге представляется идентичным.

Поскольку функции, характеризующие состояние газовой среды, изменяются скачкообразно, то ширина ударного и детонационного фронта, в общем, равна нулю, в связи с чем, некорректно называть волновыми процессами распространение детонации и ударного фронта, поскольку длина волны как физический параметр в этих процессах отсутствует. Более уместно было бы представить ударный и детонационный процессы как распространение одиночного возмущения в рассматриваемой среде с некоторой скоростью D , которую далее будем называть скоростью распространения ударного фронта.

Одно из основных свойств ударного фронта заключается в том, что при переходе через него имеют место законы сохранения массы, импульсов и энергии [23], которые в переменных Эйлера будут выглядеть следующим образом:

$$\rho_1(D - u_1) = \rho_2(D - u_2), \quad (1)$$

$$p_2 - p_1 = \rho_1(D - u_1)(u_2 - u_1), \quad (2)$$

$$\rho_1(D - u_1) \left(\epsilon_2 + \frac{u_2^2}{2} - \epsilon_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) = p_2 u_2 - p_1 u_1. \quad (3)$$

В уравнениях (1) – (3) приняты следующие обозначения: D — скорость распространения ударного фронта; $p_1, \rho_1, u_1, T_1, \epsilon_1$ — соответственно давление, плотность, скорость, температура и внутренняя удельная энергия газовой смеси перед ударным фронтом; $p_2, \rho_2, u_2, T_2, \epsilon_2$ — давление, плотность, скорость, температура и внутренняя удельная энергия смеси за ударным фронтом.

Преобразуем соотношения (1) – (3). Учитывая, что величина $V = 1/\rho$ — является удельным объемом, перепишем (1) в виде

$$\frac{D - u_1}{V_1} = \frac{D - u_2}{V_2}, \quad (4)$$

откуда найдем вначале

$$D = \frac{u_1 V_2 - u_2 V_1}{V_2 - V_1}, \quad (5)$$

а затем получим соотношение

$$\frac{D - u_1}{V_1} = \frac{u_2 - u_1}{V_1 - V_2}. \quad (6)$$

Далее из (4) имеем:

$$\frac{D - u_1}{V_1} = \frac{p_2 - p_1}{u_2 - u_1}. \quad (7)$$

Сопоставляя два последних выражения, получим:

$$u_2 - u_1 = \sqrt{(p_2 - p_1)(V_1 - V_2)}. \quad (8)$$

Умножим и разделим правую часть равенства (8) на $(V_1 - V_2)$:

$$u_2 - u_1 = \frac{V_1 - V_2}{V_1 - V_2} \sqrt{(p_2 - p_1)(V_1 - V_2)},$$

откуда получаем равенство

$$u_2 - u_1 = (V_1 - V_2) \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{V_1 - V_2}}. \quad (9)$$

Из соотношений (7) и (8) получаем выражение для скорости распространения ударного фронта:

$$D - u_1 = V_1 \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{V_1 - V_2}}. \quad (10)$$

Используя формулы (6) и (10), преобразуем уравнение сохранения энергии (3) к виду:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = \frac{1}{2} (u_2 - u_1)^2 \left(\frac{p_2 + p_1}{p_2 - p_1} \right),$$

и, подставив сюда формулу (8), получим:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = \frac{p_2 + p_1}{2} (V_1 - V_2). \quad (11)$$

Следовательно, согласно законам сохранения массы, импульса и энергии, для фронта прямой ударной волны должны выполняться соотношения (1), (2) и (11).

Для идеального газа, участвовавшего в политропном процессе, внутреннюю удельную энергию можно определить по формуле [22]:

$$\varepsilon_1 = \frac{p_1 V_1}{k-1}, \quad \varepsilon_2 = \frac{p_2 V_2}{k-1}, \quad (12)$$

где $k = c_p/c_v$ — показатель адиабаты Пуассона, а c_p, c_v — удельные теплоемкости смеси соответственно при постоянном давлении и при постоянном объеме.

Подставляя формулы (12) в равенство (11) и выполняя преобразования, получаем соотношение:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\frac{k+1}{k-1} \frac{V_2}{V_1}}{\frac{k+1}{k-1} \frac{V_2}{V_1} - 1}. \quad (13)$$

Далее рассмотрим стационарный процесс детонации, для описания которого необходимо учитывать кинетику протекания реакции в зоне реакции, ширина которой Δ зависит в первую очередь от типа взрывчатого вещества. В такой постановке описание детонационного процесса существенно усложняется. Поэтому примем упрощения. Во-первых, будем полагать, что ширина зоны реакции $\Delta \rightarrow 0$, в силу чего, сама зона вырождается в плоскость и, следовательно, ударный и детонационный фронты совпадают, а скорости их движения будут одинаковыми. Во-вторых, протекающую на плоскости химическую реакцию мы будем оценивать только удельной теплотой взрывчатого превращения q , представляющую собой количество теплоты, приходящееся на единицу массы газовой смеси.

Поскольку ударный и детонационный фронты совпадают, то при переходе от ударных волн к детонационным, уравнения сохранения массы, импульсов и энергии остаются в силе, а параметры газовой смеси с индексом «2» нужно заменить на параметры с индексом «CJ», соответствующим параметрам в точке Чепмена – Жуге, т. е. $p_2 \rightarrow p_{CJ}, \rho_2 \rightarrow \rho_{CJ}, u_2 \rightarrow u_{CJ}, T_2 \rightarrow T_{CJ}, \varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_{CJ}$. Поскольку $u_1 \ll u_{CJ}$ то можно пренебречь u_1/u_{CJ} по сравнению с единицей. Поэтому формулы (9) и (10) можно представить в виде:

$$u_{CJ} = (V_1 - V_{CJ}) \sqrt{\frac{p_{CJ} - p_1}{V_1 - V_{CJ}}}, \quad (14)$$

$$D = V_1 \sqrt{\frac{p_{CJ} - p_1}{V_1 - V_{CJ}}}. \quad (15)$$

Так как для детонационных процессов $D = \text{const}$, то, заменяя в формуле (15) значения p_{CJ}, V_{CJ} текущими значениями p, V и выполняя преобразования, получаем уравнение прямой линии:

$$p = p_1 + \frac{V_1 - V}{V_1^2} D^2, \quad (16)$$

которая проходит через начальную точку (p_1, V_1) , причём квадрат скорости D определяется тангенсом угла наклона этой прямой к оси абсцисс.

Если формулы (14), (15) для детонационного процесса идентичны соответствующим формулам для ударного фронта, то уравнение, описывающее детонационный процесс,

$$\varepsilon_{CJ} - \varepsilon_1 = \frac{p_{CJ} + p_1}{2}(V_1 - V_{CJ}) + q \quad (17)$$

отличается от уравнения (11) наличием величины q , представляющим собой удельную теплоту взрывчатого превращения в процессе детонации.

Первое слагаемое правой части уравнения (17) представляет собой изменение внутренней энергии вследствие сжатия газовой смеси ударным фронтом, а второе слагаемое характеризует приток внутренней энергии за счёт удельной теплоты химической реакции.

С помощью выражений (12) и (17) получим формулу

$$\frac{p_{CJ}}{p_1} = \frac{\frac{k+1}{k-1} - \frac{V_{CJ}}{V_1} + \frac{2k}{k-1} \cdot q}{\frac{k+1}{k-1} \cdot \frac{V_{CJ}}{V_1} - 1}, \quad (18)$$

идентичную формуле (13), но отличающуюся от нее наличием слагаемого, содержащего величину q .

Еще одно соотношение мы найдем, используя формулу газовой динамики [22, 23] $dp/d\rho = kp/\rho$, которую можно представить также в форме

$$\frac{dp}{dV} = -k \frac{p}{V},$$

и учитывая, что $\Delta \rightarrow 0$, полученную формулу запишем в конечных разностях:

$$\frac{p_{CJ} - p_1}{V_1 - V_{CJ}} = k \frac{p_{CJ}}{V_{CJ}}, \quad (19)$$

откуда находим

$$\frac{V_1}{V_{CJ}} = \frac{k+1}{k} - \frac{p_1}{kp_{CJ}}. \quad (20)$$

Учитывая формулу (20) и соотношение (15), приходим к формуле

$$D^2 = V_1[(k+1)p_{CJ} - p_1]. \quad (21)$$

Поскольку в рамках принятых допущений газоздушная смесь является идеальным газом, то его состояние можно описать уравнением Менделеева – Клапейрона:

$$p_{CJ}V_{CJ} = RT_{CJ}, \quad (22)$$

из которого найдем давление:

$$p_{CJ} = \frac{T_{CJ}c_v(k-1)}{V_{CJ}}. \quad (23)$$

Подставляя формулы (12) в равенство (17), получим уравнение:

$$\frac{p_{CJ}V_{CJ}}{k-1} - \frac{p_1V_1}{k-1} = \frac{p_{CJ} + p_1}{2}(V_1 - V_{CJ}) + q, \quad (24)$$

исключая из которого $V_{CJ}p_{CJ}$ с помощью формул (20) и (22), а также учитывая формулу (21), приведем равенство (24) к биквадратному уравнению относительно параметра D :

$$D^4 - 2(k^2 - 1)(c_vT_{CJ} + q)D^2 + k^2(k-1)^2c_v^2T_{CJ}^2 = 0, \quad (25)$$

корни которого представляются в виде:

$$D = \sqrt{\frac{k^2 - 1}{2}q + a_1^2} + \sqrt{\frac{k^2 - 1}{2}q}, \quad (26)$$

где $a_1 = \sqrt{kp_1V_1}$ — скорость звука в исходной газоздушной смеси.

Далее мы воспользуемся формулой (15), из которой выразим разность давлений:

$$p_{CJ} - p_1 = \rho_1^2 D^2 (V_1 - V_{CJ}) = \rho_1 D^2 \left(1 - \frac{V_{CJ}}{V_1}\right),$$

и выполним в полученной формуле преобразования, используя формулы (20), (21) и (18). В результате мы придем к следующему соотношению:

$$p_{CJ} - p_1 = \frac{\rho_1 D^2}{k+1} \left(1 - \frac{a_1^2}{D^2}\right). \quad (27)$$

Аналогично получим формулы для удельного объема смеси и ее скорости за детонационным фронтом:

$$V_1 - V_{CJ} = \frac{V_1}{k+1} \left(1 - \frac{a_1^2}{D^2} \right),$$

$$u_{CJ} = \frac{D}{k+1} \left(1 - \frac{a_1^2}{D^2} \right). \quad (28)$$

Для определения температуры воспользуемся формулой (22), из которой находим

$$T_{CJ} = \frac{p_{CJ} V_{CJ}}{R},$$

подставив сюда выражения (27), (28) и выполнив преобразования, получим формулу, связывающую температуру T_{CJ} с показателем адиабаты Пуассона, скоростью детонационного фронта и скоростью звука в невозмущенной газовой смеси:

$$T_{CJ} = \frac{(kD^2 + a_1^2)^2}{k(k+1)RD^2}. \quad (29)$$

Далее выполним анализ найденных параметров газовой смеси на поверхности Чепмена – Жуге.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По формулам (26), (27) и (29) построены графики, показанные на рис. 2–4, на которых линии, отмеченные цифрой 1, соответствуют значению показателя адиабаты Пуассона $k = 1,2$, а графики с цифрой 2 соответствуют $k = 1,3$. При этом графики на рис. 2 построены в безразмерных параметрах \bar{Q} , \bar{D} , представляющих собой соответственно относительную удельную теплоту сгорания газовой смеси и относительную скорость детонационного фронта, определяемых по формулам:

$$\bar{Q} = \frac{q}{a_1^2}, \quad \bar{D} = \frac{D}{a_1}.$$

Анализ рис. 2 показывает, что графики функции $\bar{Q}(\bar{D})$ представляют собой практически прямые наклонные линии, однако угол наклона графика, построенного при $k = 1,3$ несколько больше, а значения функции $\bar{Q}(\bar{D})$ существенно выше, чем при $k = 1,2$.

Аналогично большим значениям показателя адиабаты Пуассона соответствуют большие значения температуры газовой смеси на поверхности Чепмена – Жуге, хотя разница в значениях не очень существенная (рис. 3). Графики же самой функции $T_{CJ}(D)$, характеризующей температуру смеси представляют собой слабоогнутые параллельные линии, указывающие на монотонно возрастающий характер функции $T_{CJ}(D)$, не имеющей локального экстремума.

Наоборот, большие значения давления $p_{CJ}(D)$ на поверхности Чепмена – Жуге соответствуют меньшим показателям адиабаты Пуассона. При этом графики функции $p_{CJ}(D)$ представляют собой слабоогнутые параллельные линии, возрастающие с увеличением скорости детонационного фронта (рис. 4).

Таким образом, установлено, что с увеличением удельной теплоты сгорания газовой смеси существенно увеличивается скорость движения детонационного фронта. В свою очередь, рост скорости детонационного фронта приводит к росту температуры и давления газовой смеси на поверхности Чепмена – Жуге.

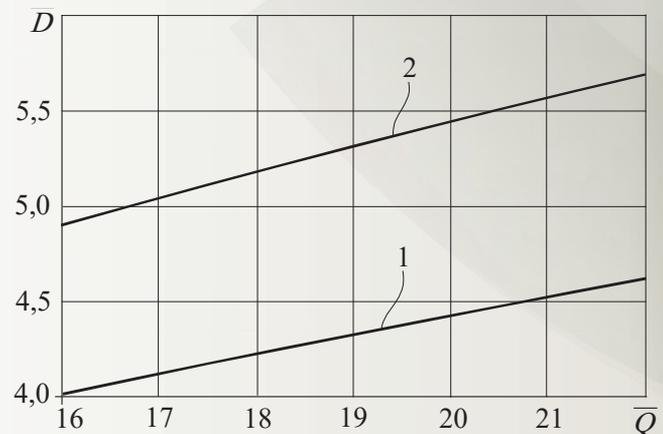


Рис. 2. Графики относительной скорости движения детонационного фронта в зависимости от относительной удельной теплоты сгорания газовой смеси для ряда значений показателя адиабаты Пуассона

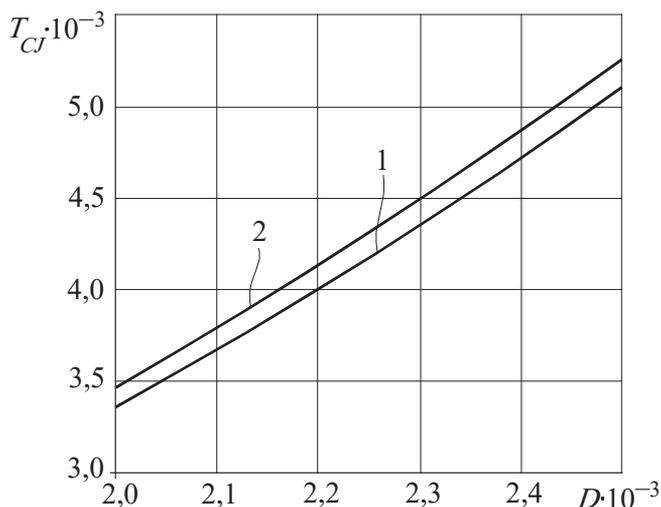


Рис. 3. Графики температуры смеси на поверхности Чепмена – Жуге в зависимости от скорости движения детонационного фронта для ряда значений показателя адиабаты Пуассона

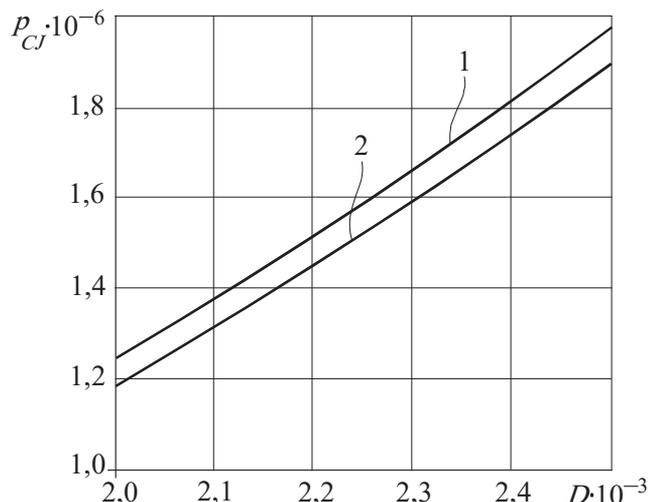


Рис. 4. Графики давления смеси на поверхности Чепмена – Жуге в зависимости от скорости движения детонационного фронта для ряда значений показателя адиабаты Пуассона

ВЫВОДЫ

1. Сформулирована задача о детонационном фронте в газовой смеси, моделируемой идеальным газом в переменных Эйлера. Решение задачи построено на базе фундаментальных законов сохранения массы, импульсов и энергии.

2. Представлены в явном виде формулы, позволяющие вычислить давление, удельный объем, скорость детонационного фронта и

температуру газовой смеси на поверхности Чепмена – Жуге.

3. Построен ряд графиков, анализ которых позволил установить, что с увеличением удельной теплоты сгорания газовой смеси скорость движения детонационного фронта существенно увеличивается, что, в свою очередь, приводит к росту температуры и давления газовой смеси на поверхности Чепмена – Жуге.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.А., Васильев В.А. Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 2. С. 8–39.
2. Васильев А.А. Дифракционная оценка критической энергии инициирования газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1998. № 4. С. 72–76.
3. Васильев А.А. Ячеистые структуры многофронтной детонационной волны и инициирование // Физика горения и взрыва. 2015. № 1. С. 9–30.
4. Васильев А.А., Пинаев А.В., Троцюк А.В. и др. Полное подавление детонации и горения метановых смесей пылевой завесой // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2015. № 4. С. 12–21.
5. Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Шлапаков Е.А., Лебедев К.С., Ерастов А.Ю. Теплофизические и газодинамические условия протекания процессов дефлаграции и детонации в пылегазовоздушных потоках горных выработок вблизи очагов самонагрева // Химическая физика и мезоскопия. 2019. Т. 21. № 2. С. 179–189.
6. Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Лебедев К.С., Колыхалов В.В. Формирование детонационного процесса при внезапном выбросе газа в горную выработку со сверхзвуковой скоростью // Горный информационно аналитический бюллетень. 2019. № 7. С. 62–73.

7. Черданцев С.В., Филатов Ю.М., Шлапаков П.А. Структура и параметры ударного фронта в вязком теплопроводном газоздушном потоке горной выработки // Горный информационно аналитический бюллетень. 2019. № 10. С. 183–194.
8. Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Кольхалов В.В., Лебедев К.С., Хаймин С.А., Ерастов А.Ю., Шлапаков Е.А. Разлет продуктов детонации с косо́й поверхности заряда // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2020. № 2. С. 48–58.
9. Киселев С.П., Руев Г.А., Трутнев А.П., Фомин В.М., Шавалиев М.Ш. Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах. Новосибирск, 1992. 261 с.
10. Физика взрыва. М.: Физматлит, 2004. Т. 1. 832 с.
11. Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М.: Изд-во МГУ, 1990. 256 с.
12. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Возбуждение и срыв детонации в газах // Инженерно-физический журнал. 2010. № 6. С. 1174–1201.
13. Левин В.А., Луценко Н.А. Двумерные течения газа при гетерогенном горении твердых пористых сред // Доклады Академии наук. 2017. № 1. С. 30–34.
14. Пинаев А.В. Особенности детонации аэровзвесей взрывчатых веществ // Инженерно-физический журнал. 2014. № 2. С. 303–311.
15. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Влияние начального давления воздуха на детонационную активность аэровзвеси взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2014. № 4. С. 66–77.
16. Пинаев А.В. Передача детонации из пузырьковой среды в объем взрывчатого газа // Доклады Академии наук. 2015. № 1. С. 33–36.
17. Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Теоретическое и численное исследование процессов детонации в газозвесах частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 2006. № 6. С. 126–136.
18. Федоров А.В., Фомин П.А., Тропин Д.А. Простая кинетика и структура детонационной волны в метановоздушной смеси // Физика горения и взрыва. 2014. № 1. С. 97–105.
19. Федоров А.В. Структура ударных волн в гетерогенной среде с двумя давлениями // Физика горения и взрыва. 2015. № 6. С. 62–71.
20. Фролов С.М., Аксенов В.С., Авдеев К.А. и др. Переход горения в детонацию в условиях высокоскоростного течения с отдельной подачей топливных компонентов // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 6. С. 669–672.
21. Фролов С.М., Сметанюк В.А., Аксенов В.С. Переход горения в детонацию в перекрестных высокоскоростных струях топливных компонентов // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 1. С. 59–62.
22. Рахматуллин Х.А., Сагомоян А.Я., Бунимович А.И., Зверев Н.Н. Газовая динамика. М.: Высшая школа, 1965. 723 с.
23. Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 336 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.66.18.003

UDC 622.272:516.02

© S.V. Cherdantsev, P.A. Shlapakov, A.Yu. Erastov, S.I. Goloskokov, D.N. Batrakov, V.V. Satonin, 2021

S.V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences,

Leading Researcher

JSC «NC VostNII», Kemerovo

e-mail: svch01@yandex.ru

P.A. SHLAPAKOV

Candidate of Engineering Sciences,
Head of Laboratory
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: shlapak1978@mail.ru

A.Yu. ERASTOV

Senior Research Associate
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: eractov_a_y@mail.ru

S.I. GOLOSKOKOV

Candidate of Engineering Sciences,
Head of Laboratory
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: s.goloskokov@nc-vostnii.ru

D.N. BATRAKOV

Head of Laboratory
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: vostnii-bvr@yandex.ru

V.V. SATONIN

Deputy Head of Laboratory
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: v.satonin@nc-vostnii.ru

DETERMINATION AND ANALYSIS OF PARAMETERS OF DETONATION PROCESSES IN GAS-AIR MIXTURES SIMULATED BY IDEAL GAS

In the construction and operation of mining enterprises, primarily coal mines, tasks due to fast flowing processes are especially relevant, the main of which are shock wave and detonation processes. The causes of these processes are chemical reactions with almost instantaneous release of huge thermal energy, converted into kinetic energy of shock waves, leading to catastrophic consequences. Large-scale studies of shock wave and detonation processes are especially relevant in the creation of methods and means of controlling these processes in gaseous, liquid and solid explosives. The article discusses the relationship between shock wave and detonation processes. The problem of a detonation front in a gas-air mixture modeled by an ideal gas in Euler variables is formulated. Formulas and graphs are given to determine the main parameters of the gas-air mixture on the detonation front.

Keywords: MINING MINING, GAS-AIR MIXTURES, LAWS OF CONSERVATION OF MASS, IMPULSES AND ENERGY, IMPACT AND DETONATION FRONTS, CHEPMEN-ZHUGE SURFACE.

REFERENCES

1. Vasiliev A.A., Vasiliev V.A. Calculated and experimental parameters of combustion and detonation of mixtures based on methane and coal dust // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti robot v ugolnoy promyshlennosti]. 2016. No. 2. P. 8–39. [In Russ.].

2. Vasiliev A.A. Diffraction estimation of the critical energy of initiation of gas detonation // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 1998. No. 4. P. 72–76. [In Russ.].
3. Vasiliev A.A. Cellular structures of a multi-front detonation wave and initiation // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 2015. No. 1. P. 9–30. [In Russ.].
4. Vasiliev A.A., Pinaev A.V., Trotsyuk A.V. and others. Complete suppression of detonation and combustion of methane mixtures with a dust curtain // *Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]*. 2015. No. 4. P. 12–21. [In Russ.].
5. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Shlapakov E.A., Lebedev K.S., Erastov A.Yu. Thermophysical and gas-dynamic conditions of deflagration and detonation processes in the dust-gas-air flows of mine workings near self-heating centers // *Chemical Physics and Mesoscopy [Khimicheskaya fizika i mezoskopiya]*. 2019. Vol. 21. No. 2. P. 179–189. [In Russ.].
6. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Lebedev K.S., Kolykhalov V.V. Formation of the detonation process with a sudden release of gas into a mine working at supersonic speed // *Mining informational analytical bulletin [Gornyy informatsionno analiticheskiy byulleten]*. 2019. No. 7. P. 62–73. [In Russ.].
7. Cherdantsev S.V., Filatov Yu.M., Shlapakov P.A. Structure and parameters of the shock front in the viscous heat-conducting gas-air flow of the mine // *Mining information analytical bulletin [Gornyy informatsionno analiticheskiy byulleten]*. 2019. No. 10. P. 183–194. [In Russ.].
8. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Kolykhalov V.V., Lebedev K.S., Khaimin S.A., Erastov A.Yu., Shlapakov E.A. Scattering of detonation products from the oblique surface of the charge // *Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti.]*. 2020. No. 2. P. 48–58. [In Russ.].
9. Kiselev S.P., Ruev G.A., Trutnev A.P., Fomin V.M., Shavaliev M.Sh. Shock-wave processes in two-component and two-phase media. Novosibirsk, 1992. 261 p. [In Russ.].
10. *Explosion physics*. M.: Fizmatlit, 2004. Vol. 1. 832 p. [In Russ.].
11. Selivanov V.V., Soloviev V.S., Sysoev N.N. Shock and detonation waves. Research methods. M.: Publishing house of Moscow State University, 1990. 256 p. [In Russ.].
12. Levin V.A., Manuylovich I.S., Markov V.V. Excitation and disruption of detonation in gases // *Engineering Physics Journal [Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal]*. 2010. No. 6. P. 1174–1201. [In Russ.].
13. Levin V.A., Lutsenko N.A. Two-dimensional gas flows during heterogeneous combustion of solid porous media // *Reports of the Academy of Sciences [Doklady Akademii nauk]*. 2017. No. 1. P. 30–34. [In Russ.].
14. Pinaev A.V. Features of detonation of aerosuspensions of explosives // *Engineering Physics Journal [Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal]*. 2014. No. 2. P. 303–311. [In Russ.].
15. Pinaev A.V., Pinaev P.A. Influence of the initial air pressure on the detonation activity of an air suspension of explosives // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 2014. No. 4. P. 66–77. [In Russ.].
16. Pinaev A.V. Transfer of detonation from a bubble medium to the volume of an explosive gas // *Reports of the Academy of Sciences [Doklady Akademii nauk]*. 2015. No. 1. P. 33–36. [In Russ.].
17. Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel T.A. Theoretical and numerical study of detonation processes in gas suspensions of aluminum particles // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 2006. No. 6. P. 126–136. [In Russ.].
18. Fedorov A.V., Fomin P.A., Tropin D.A. Simple kinetics and structure of a detonation wave in a methane-air mixture // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 2014. No. 1. P. 97–105. [In Russ.].
19. Fedorov A.V. The structure of shock waves in a heterogeneous medium with two pressures // *Physics of Combustion and Explosion [Fizika goreniya i vzryva]*. 2015. No. 6. P. 62–71. [In Russ.].

20. Frolov S.M., Aksenov V.S., Avdeev K.A. et al. Combustion-to-detonation transition under high-speed flow conditions with separate supply of fuel components // Reports of the Academy of Sciences [Doklady Akademii nauk]. 2013. T. 449. No. 6. P. 669–672. [In Russ.].

21. Frolov S.M., Smetanyuk V.A., Aksenov V.S. Combustion-to-detonation transition in cross high-speed jets of fuel components // Reports of the Academy of Sciences [Doklady Akademii nauk]. 2017. Vol. 476. No. 1. P. 59–62. [In Russ.].

22. Rakhmatullin Kh.A., Sagomonyan A.Ya., Bunimovich A.I., Zverev N.N. Gas dynamics. M.: Higher school, 1965. 723 p. [In Russ.].

23. Ovsyannikov L.V. Lectures on the basics of gas dynamics. Moscow-Izhevsk: Institute for Computer Research, 2003. 336 p. [In Russ.].