

**ВЗРЫВ ГАЗО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ****Петров А.В., Крехов А.А.****Научный руководитель канд. техн. наук Дектерев А.А.*****Сибирский федеральный университет***

Теоретически и экспериментально установлено, что при взрыве любой горючей смеси, в том числе и метановоздушной (далее МВС), происходит скачкообразное изменение состояния среды, по которой распространяется ударная волна. Ударная волна является особым видом возмущения, порождаемого зоной химической реакции (фронтом пламени), и представляет собой область сжатия среды с резким скачком давления, плотности и температуры, перемещающаяся со сверхзвуковой скоростью. При этом оценку динамического действия взрыва обычно производят по основным параметрам ударной волны, т.е. по энергии волны, ее импульсу, величине максимального давления и др [6; с. 26].

Воспламенение горючих смесей дает начало горению, скорость протекания которого в зависимости от физико-химических свойств смеси [3; с. 26], геометрических размеров горной выработки, термодинамического состояния среды и других факторов изменяется в широких пределах: от дефлаграции до детонации.

Дефлаграция характеризуется наличием узкой зоны химической реакции, которая разграничивает исходные компоненты и продукты реакции. При этом скорость распространения пламени относительно исходных компонентов - постоянная и меньше скорости звука. Определяющую роль в процессе дефлаграционного горения смеси играет химическая кинетика реакции, теплопроводность и диффузия.

Детонация характеризуется постоянством скорости распространения химической реакции и сформированной ударной волной. Комплекс ударной волны и фронта пламени распространяется по реагирующей смеси со сверхзвуковой, вполне определенной скоростью, зависящей от термодинамических характеристик исходной горючей смеси.

Установлено, что между дефлаграцией и детонацией существует широкий диапазон скоростей распространения пламени, которые не подчиняются отмеченным выше закономерностям. Однако характерной особенностью любой из промежуточных скоростей распространения пламени является наличие ударной волны, движущейся впереди пламени. Такой процесс распространения взрыва принято называть нестационарным двойным разрывом. Любой нестационарный двойной разрыв является нестабильным процессом и, в зависимости от конкретных условий, он переходит в дефлаграционный или в детонационный режимы горения.

Способы подавления взрывов в начальной стадии основаны на подавлении пламени и снижении температуры газового потока в ударной волне (или в волне сжатия) путем введения различных пламегасителей (воды, пены, паст и т.д.). Локализация ударных волн развившихся взрывов основана на торможении газового потока волны.

В практических условиях температура взрыва не достигает максимальных значений и возникающие давления ниже указанных, однако они вполне достаточны для разрушения зданий, металлических конструкций, если в них произойдет взрыв.

Пределы взрываемости смесей горючих газов с воздухом различны и зависят от химического свойства газов.

Для получения данных при распространении взрыва, проведен эксперимент.

1. Подготовка эксперимента:

Для проведения опыта были приняты следующие данные:

1) Температура окружающей среды: от -15 до -25 °С

2) Бытовой газ (данные взяты при Н/У)

2.1) Химический состав:

этан (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>),

пропан (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>),

бутан (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>).

водород (H<sub>2</sub>),

сероводород (H<sub>2</sub>S),

диоксид углерода (CO<sub>2</sub>),

азот (N<sub>2</sub>),

гелий (He).

2.2) Физические свойства:

Плотность:

от 0,68 до 0,85 кг/м<sup>3</sup> (сухой газообразный);

400 кг/м<sup>3</sup> (жидкий).

Температура самовозгорания: 650 °С;

Взрывоопасные концентрации смеси газа с воздухом от 5 % до 15 % объёмных;

Удельная теплота сгорания: 28—46 МДж/м<sup>3</sup> (т.е. это 8-12 кВт-ч/м<sup>3</sup>);

3) Пленка полиэтиленовая т.100мкм ш.1500мм прозрачная (рукав),

4) Дымный порошок, состав (по весу): 75 % калиевой селитры, 15 % угля, 10 % серы,

5) Кислород из компрессора,

6) Лампочка 12 V,

7) Провод изолированный двухжильный,

8) Камера (съемка 120 кадров/сек),

9) Звуковые датчики,

10) Турбулизаторы,

11) Динамометр,

12) Леска (давление на разрыв 9кг),

13) ЭВМ.

Ход эксперимента:

### Первый испытательный стенд

Десятиметровый рукав полиэтиленовой пленки запаивается с одной стороны, и накачивается воздухом и бытовым газом (в пропорции 5-7% от полного объема рукава) до появления натяжения стенок. В конце в рукав устанавливается собранный пиропатрон (к двухжильному проводу присоединяется патрон, в который вставляется лампочка 12V, предварительно просверленная, наполненная дымным порошком и запаянная), после чего рукав со второй стороны зажимается струбциной. Далее производится выдержка накаченного рукава в течении 10 минут, после производится подрыв пиропатрона.

Взрыву газоздушных смесей всегда предшествует образование облака, в котором горючий компонент присутствует в смеси с окислителем (как правило с кислородом воздуха) в определенном диапазоне концентраций. Инициирование взрыва этого облака может осуществляться различными способами, после чего взрывная волна распространяется в пределах облака с огромной скоростью, достигающей до тысячи м/с.

Динамика процесса взрывного горения газовой смеси в пределах облака и значения параметров, характеризующих ударную волну за его пределами, зависят от физико - химических свойств смеси, формы и объема облака на момент взрыва, от места инициирования взрыва (у центра или края облака).

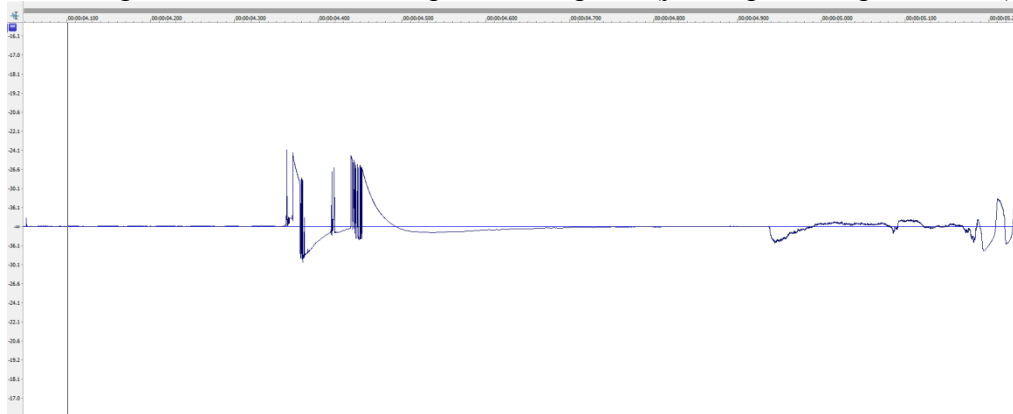


Рисунок 4 – Характеристика взрыва со звуковых датчиков

### Второй испытательный стенд

Была произведена процедура схожая с первым экспериментом, с поправкой на то, что выдержка по времени не производилась.



Рисунок 7 – Характеристика взрыва со звуковых датчиков

### Третий испытательный стенд

Была произведена процедура схожая с первым и вторым экспериментом. Для появления турбулизации были установлены преградительные стенды. Выдержка по времени не производилась.

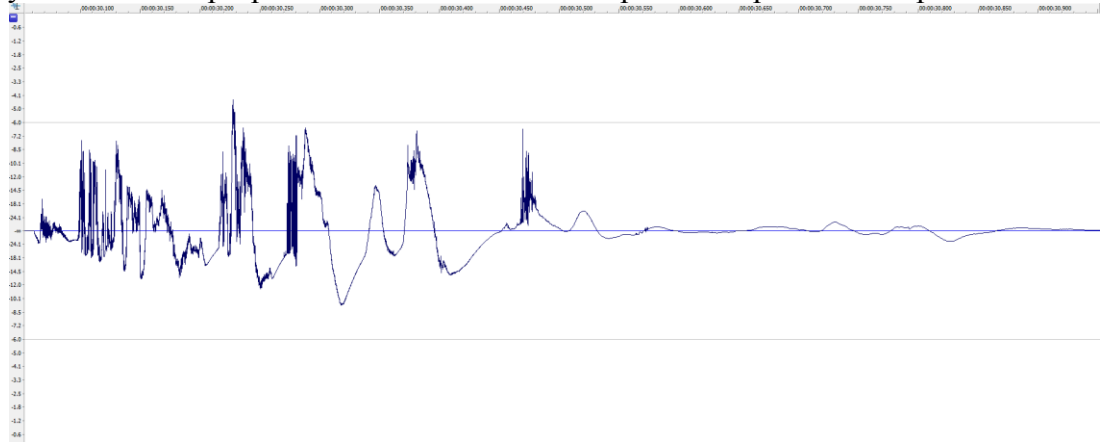


Рисунок 23 – Характеристика взрыва со звуковых датчиков

### Сравнение полученных данных:

Как видно из показаний датчиков, динамика взрыва проходила по разному:

- 1) взрыв и горение происходили выше положения датчиков, распространение мгновенное.
- 2) практически одновременное распространение взрывной волны во всех направлениях.
- 3) турбулизаторы тормозили распространение взрывной волны вследствие чего процесс наиболее равномерно растянут во времени.

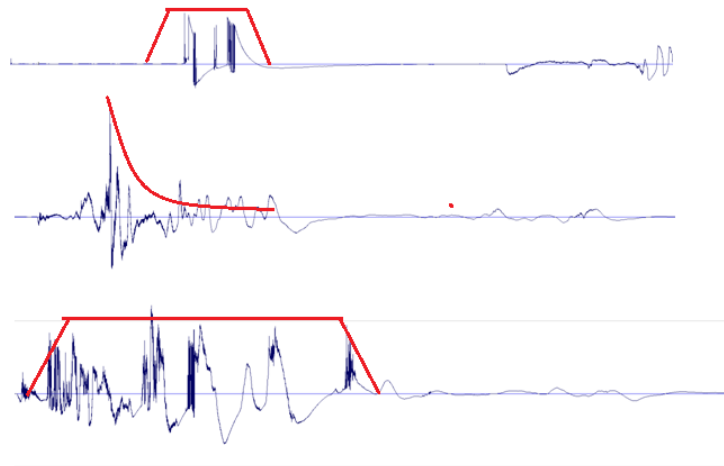


Рисунок 28 – Характеристика взрыва со звуковых датчиков для стендов

Как видно из данного графика, в случае избыточного давления, интенсивность процесса лавинообразно нарастает, а после также быстро падает. В случае наличия турбулизаторов процесс протекает более ровно.

Известно, что ламинарное распространение пламени представляет собой послойное воспламенение горючей смеси, вызванное тем, что тепло и активные промежуточные продукты из горячей зоны поступают в прилегающий слой свежей горючей смеси путем тепло- и массопереноса и создают в этом слое условие воспламенения. В отличие от воспламенения в режиме взрыва горение протекает настолько интенсивно, что происходит скачкообразный рост давления в ограниченном объеме непосредственно в зоне горения, и скорость продвижения фронта разрыва давления и температуры в среде может превышать скорость звука. Детонация же представляет собой распространяющийся в пространстве с постоянной скоростью комплекс химической реакции, протекающей в режиме взрыва, и вызванной ею мощной ударной волны, которая в свою очередь вызывает взрывную реакцию в прилегающем слое свежей смеси. Управление всеми этими широко распространенными процессами, играющими важную роль в различных областях человеческой деятельности, требует выяснения и учета специфики каждого из этих режимов.

Горение может быть вызвано двумя разными факторами. Одним из них является положительная обратная связь между скоростью реакции и повышением температуры за счет выделившегося тепла. Воспламенение, вызванное этим фактором и называемое тепловым, реализуется, если тепловыделение от химической реакции

превалирует над теплоотводом, и при этом с повышением температуры скорость тепловыделения увеличивается больше, чем возрастает скорость теплоотвода [1; с. 12]:

$$q_+ > q_-; (1)$$

$$dq_+ / dT > dq_- / dT. (2)$$

Здесь  $q_+$  – скорость тепловыделения, т.е. количество тепла, выделившегося в единицу времени в единице объема.

Эта величина равна произведению теплового эффекта и скорости реакции;

$q_-$  – скорость теплоотвода из системы;

$T$  – температура.

В традиционной теории теплового горения химический процесс представляют в виде одностадийной реакции, т.е. в виде процесса, в котором продукт получается непосредственно из исходных реагентов [7; с. 39].

Соответственно скорость реакции, например, второго кинетического порядка представляют в виде:

$$-d[B]/dt = W = k_0$$

$$[A][B] \exp(-E/RT), (3)$$

где  $[A]$ ,  $[B]$  – концентрации исходных молекулярных реагентов;

$t$  – время;

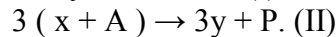
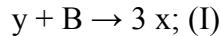
$k_0$  – предэкспоненциальный множитель константы скорости;

$E$  – энергия активации.

Обычно принимается первый кинетический порядок реакции. Поскольку концентрации исходных реагентов в ходе одностадийных процессов монотонно падают, то саморазогрев в таких реакциях является единственным фактором, определяющим самоускорение реакций горения. Поэтому тепловая теория объясняет явления горения только с позиций тепловыделения и теплоотвода.

Известно, что с повышением температуры выше определенного критического значения  $T_k$  скорость тепловыделения возрастает сильнее, чем скорость теплоотвода, т.е. выше этой температуры реализуется рассмотренное условие теплового воспламенения.

После открытия разветвленноцепных процессов стал известным также принципиально другой фактор, приводящий к воспламенению. Это – лавинообразное размножение активных промежуточных продуктов – осколков молекул, т.е. свободных атомов и радикалов в их многократно повторяющихся реакциях, образующих реакционные цепи [3; с. 26]:

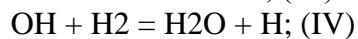


В этой схеме  $x$ ,  $y$  – свободные атомы и радикалы – активные промежуточные частицы, являющиеся носителями цепей;

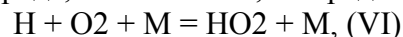
$A$  и  $B$  – исходные молекулярные реагенты;

$P$  – конечный продукт.

Из этой схемы видно, что вновь образующиеся, чередующиеся активные частицы, реагируя с исходными веществами, начинают новые ветви реакционных цепей и, таким образом, при размножении этих частиц реакционная цепь разветвляется. Примером такого типа процессов является горение водорода. В ходе развития этого процесса периодически чередуются следующие реакции регенерирующихся и размножающихся атомов  $H$ ,  $O$  и радикалов  $OH$  [8; с. 44]:



Наряду с регенерацией и размножением активные частицы вступают также в реакции гибели, т.е. реагируют с образованием малоактивных частиц, например, рекомбинируют или вступают в такие реакции и реагируют с молекулами определенного типа, в результате которых образуются малоактивные частицы. Примером реакций последнего типа в начальных стадиях горения является образование радикала  $HO_2$ , значительно менее активного в горении водорода, чем атомы  $H$ ,  $O$  и радикал  $OH$ :



где  $M$  – любая третья частица, отбирающая избыток энергии, выделяющейся при соединении атома  $H$  с молекулой  $O_2$ .

Изменению концентрации  $n$  активных частиц во времени, вызванному химической реакцией, соответствует уравнение:

$$dn / dt = \omega_0 + (f - g) n = \omega_0 + \varphi n. (4)$$

В этом выражении  $f$  и  $g$  – скорости размножения и гибели активных частиц при единичной их концентрации;

$\omega_0$  – скорость образования активных частиц в реакциях только исходных молекулярных реагентов между собой.

Очевидно, что в условиях, при которых скорость размножения атомов и радикалов превалирует над их гибелью, их концентрация возрастает, причем в геометрической прогрессии. Это видно также из выражения (4), когда реализуется неравенство:  $f > g$ , (5) величина  $n$  прогрессивно (т.е. в геометрической прогрессии) возрастает.

Скорость расходования исходного реагента в разветвленно-цепном процессе (РЦП) равна [9; с. 56]:

$$W = -d [B] / dt = \omega_0 + kb n [B], (6)$$

где  $t$  – время;

$n$  и  $[B]$  – концентрация НЦ и исходного реагента соответственно;

$\omega_0$  – скорость зарождения цепей, т.е. образования НЦ в реакциях только исходных молекул;

$kb$  – эффективная константа скорости лимитирующей стадии процесса.

Очевидно, что с прогрессивным размножением атомов и радикалов, реагирующих с исходными молекулярными реагентами, прогрессивно возрастает также скорость расходования этих исходных веществ [2; с. 37]. Это следует также из выражения (6): при прогрессирующем увеличении  $n$  концентрации активных частиц также прогрессивно возрастет скорость процесса  $W$ .

Определяющая роль цепной лавины в горении и взрыве газов

В широко известной монографии [5; с. 52] утверждается: «Разветвленные цепные реакции не так уж часто встречаются; к тому же при температурах горения выше  $10000^\circ\text{C}$ , которые существуют даже в пламенах разбавленных водородкислородных смесей, тепловое самоускорение реакции значительно превышает ускорение, связанное с развитием разветвленных цепей. В так называемых горячих пламенах, с которыми обычно приходится иметь дело на практике, самоускорение происходит тепловым, а не цепным путем». [4; с. 26]

В большой серии наших экспериментальных и теоретических исследований, вопреки сложившимся представлениям, было установлено, что

разветвленно-цепной характер реакции в процессах горения большинства газов является определяющим не только при крайне низких давлениях, но также при любых более высоких давлениях, важных для практики. Было показано также, что цепная лавина является определяющим фактором также в процессах взрыва и детонации. В определенных условиях одновременно с цепной лавиной прогрессирующий характер приобретает саморазогрев, и тогда процесс протекает при одновременной реализации двух лавинных процессов: прогрессирующего размножения активных частиц и лавинообразного накопления тепловой энергии в системе. Это – тепловой взрыв, но с разветвленно-цепным механизмом.

Список используемой литературы:

- 1 Баратов, А.Н. Пожарная безопасность / А.Н. Баратов, В.А. Пчелинцев. - М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1997. – 171 с.
- 2 Вильямс, Ф. Теория горения / Ф. Вильямс. - М.: Наука, 1971. - 615 с. (Williams F. Combustion Theory. University of California, 1964).
- 3 Математическая теория горения / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблат, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. - М.: Наука, 1980. - 478 с.
- 4 Семенов, Н.Н. Цепные реакции / Н.Н. Семенов. – Л.: Госхимтехиздат, 1934. - 555 с.
- 5 Семенов, Н.Н. Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения / Н.Н. Семенов. - М.: Знание, 1969. - 95 с.
- 6 Льюис, Б. Горение, взрывы и пламя в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе. - М.: Мир, 1968. -604 с.
- 7 Азатян, В.В. Разветвленно-цепная природа горения водорода при атмосферном давлении / В.В. Азатян, А.Г. Мержанов // Химическая физика. -2008. -Т.27. - № 11. - С.93–96.
- 8 Невозможность теплового взрыва гремучей смеси без цепной лавины / В.В. Азатян, Д.И. Бакланов, И.А. Болодьян [и др.] // Кинетика и катализ. - 2009. - Т. 50. - № 2.- С. 176–181.
- 9 Ингибирование различных режимов горения водорода в воздухе пропиленом и изопропиловым спиртом / В.В. Азатян, А.А. Борисов, А.Г. Мержанов [и др.] // Физика горения и взрыва. - 2005. - Т.41. - № 1. -С. 3–14.