

# Горение взрывчатых веществ

## **Воспламенение и горение газовых взрывчатых систем (ГВС)**

ГВС - смеси газообразного или парообразного горючего с газообразным окислителем.

Воспламенить ГВС можно двумя путями:

-путем нагрева всей газовой смеси.

При нагревании до высокой температуры химические реакции взаимодействия достигают критической скорости, что приводит к воспламенению всей смеси.

- путем поджигания от источника высокой температуры (нагретое тело, искра, пламя).

ГВС могут гореть только при определенных соотношениях горючего и окислителя, т.е. только в определенных концентрационных пределах. Концентрационные пределы устанавливаются по содержанию горючего.

Нижний концентрационный предел (НКП) - это минимальное содержание горючего, при котором смесь может воспламениться и гореть.

Верхний концентрационный предел (ВКП) - это максимальное содержание горючего, при котором смесь может воспламениться и гореть.

На величину КП оказывают влияние различные факторы:

1. Примеси. По характеру влияния они могут быть разделены на 3 группы:
  - примеси, сужающие КП или даже делающие смесь вообще неспособной к горению (галогидные производные углеводородов);
  - примеси расширяющие КП - катализаторы реакций окисления.
  - инертные примеси, способные несколько сужать КП, т.к. отбирают на себя часть тепла (избыток горючего или окислителя играет роль инертной примеси).

2. Давление и температура (с увеличением параметра они, как правило, расширяются).
3. Природа окислителя, чем окислитель активнее, тем шире КП.
4. Размеры сосуда, в котором находится ГВС. Влияние размеров связано с охлаждающим действием стенок сосуда.
5. направление поджигания: снизу вверх он шире, сверху вниз - уже.

Концентрационные пределы горючести некоторых газовых систем.

Таблица 8.1

Горючее	Окислитель - воздух		Окислитель - кислород	
	НКП, % вес.	ВКП, % вес.	НКП, % вес.	ВКП, % вес.
H <sub>2</sub>	4	75	4	95
CO	12,5	74,5	15,5	93,9
CH <sub>4</sub>	5	15	5,4	59,2
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3	12,5	3	66
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,5	80	-	-

В реальных условиях часто образуется ГВС, состоящая из нескольких горючих газов. Нахождение КП ведется следующим путем.

$$\text{НКП(ВКП)} = \frac{100}{\sum \frac{m_i}{n_i}}, \quad (8.1)$$

где

$n_i$ - соответствующий нижний или верхний предел  $i$ -того компонента.

$n_i$ - соответствующий нижний или верхний предел  $i$ -того компонента.

Теория нормального горения была разработана Зельдовичем и Франк-Каменецким.

Процесс горения протекает в узкой зоне - зоне химических реакций (ЗХР) (рис 8.1).

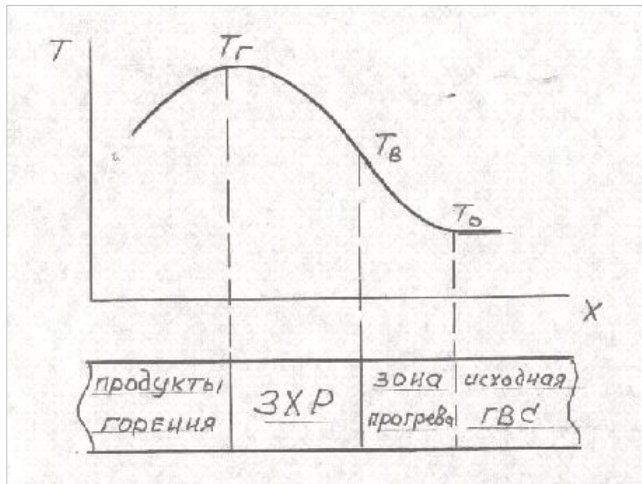


Рис 8.1 Температурный профиль горения ГВС

$T_0$  - Начальная температура ГВС

$T_в$  . Температура воспламенения ГВС

$T_г$  - Температура горения ГВС

Скорость распространения ЗХР (скорость пламени) называется нормальной линейной скоростью горения -  $U$  (ед. расстояния / ед. времени).

Массовая скорость горения  $U_m$ , это количество исходной ГВС, сгоревшей в единицу времени с единицы поверхности фронта

$$U_m = U \cdot \rho_0 \quad (\text{г/см}^2 \text{ с}) \quad . \quad (8.2)$$

Согласно теории нормального горения скорость распространения ЗХР обуславливается совокупностью двух процессов: переносом тепла из ЗХР в зону прогрева за счет теплопроводности; массопереносом вещества из зоны прогрева в ЗХР за счет диффузии.

При совместном решении уравнений теплопроводности и диффузии:

$$U_m = \sqrt{\frac{2\lambda}{Q} \cdot m' \cdot \left(\frac{RT_r}{E}\right)^{m+1} \cdot (T_r - T_0)^{-m} \cdot W_{\pi}} \quad , (8.3)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;

$m'$  - порядок реакции;

$T_r$  - температура горения;

$E$  - энергия активации;

$T_0$  - начальная температура;

$W_{\pi}$  - скорость реакции при температуре горения;

$$W_{\pi} = \rho_0^m \cdot z \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_r}\right). \quad (8.4)$$

Чем выше плотность или температура, тем выше скорость реакции (горения).

Скорость горения зависит от соотношения компонентов и имеет максимальную величину при стехиометрическом соотношении. Добавки влияют на скорость горения, также как и на КП. Кроме этого, ГВС горят устойчиво, если диаметр сосуда больше некоторого критического значения. В процессе горения выделяющаяся в ЗХР тепловая энергия передается слоям непрореагировавшего вещества. При этом часть энергии рассеивается в окружающую среду (стенки сосуда). При диаметрах сосудов меньше критических, энергии, передаваемой непрореагирующему веществу, оказывается недостаточно для возбуждения химической реакции.



## **Горение конденсированных взрывчатых систем (КВС)**

Конденсированные ВС представляют собой как гомогенные системы (индивидуальные ВВ), так и гетерогенные, представляющие смесь горючего и окислителя.

В процессе горения зарядов конденсированных ВС следует различать три основных процесса:

- зажигание от источника воспламенения с торца заряда;
- послойное горение (параллельными слоями);
- воспламенение заряда с боковой поверхности (при отсутствии бронировки боковой поверхности).

Процесс горения КВС можно характеризовать линейной и массовой скоростью горения.

Скорость горения зависит от ряда факторов:

- геометрических размеров заряда (его диаметра, если он в форме цилиндра);
- внешних условий (температуры и давления);
- дисперсности ВС (размера частиц);
- наличия примесей.

Для смесевых систем дополнительно оказывают влияние:

- химическая природа компонентов, их теплофизические характеристики;
- соотношение компонентов и дисперсность каждого из них.

Величина критического диаметра не является постоянной и зависит от внешних факторов: температуры и давления; при их повышении величина критического диаметра снижается.

Для учета влияния температуры заряда на скорость горения существует ряд эмпирических выражений типа

$$U = U_0 \cdot \exp(\beta(T - T_0)) , (8.5)$$

где

$$\beta = (0.8 \div 14) \cdot 10^{-3} , \text{град}^{-1} .$$

При практическом использовании порохов, ракетных топлив важнейшей характеристикой является закон горения - зависимость скорости горения от давления:

$$U = a + b \cdot p^n, \quad (8.6)$$

Закон горения находится экспериментальным путем и действителен только для какого-то диапазона давлений (в зависимости от давления может измениться закон горения)

Показатель степени закона горения ( $\nu$ ) является важнейшим параметром. При устойчивом горении  $0 \leq \nu \leq 1$ . Если же  $\nu > 1$ , то горение происходит с ускорением и может перейти в детонацию.

Коэффициент ( $\alpha$ ) в значительной мере зависит от процессов, протекающих в конденсированной фазе ВС, а коэффициент ( $\beta$ ) - в газовой. Механизм горения ВС зависит от ее природы и от условий, в которых происходит процесс горения.

Для большинства ВС горящих в газовой фазе (летучие ВВ), к которым относятся такие ВВ, как тетрил, нитроглицерин, ТЭН, процессы идущие в конденсированной фазе не играют существенной роли и (8.6) используется в виде

$$U = b \cdot p^v \quad (8.7)$$

Для летучих ВС теплота испарения ( $\sim 60 \text{ кДж/моль}$ ) значительно уступает энергии активации процесса ( $\sim 120 \text{ кДж/моль}$ ), поэтому при подводе тепла происходит испарение вещества, пары которого в последствии воспламеняются (рис 8.2). Летучие ВВ горят по такому механизму только при сравнительно небольших давлениях ( $\leq 10^7 \text{ Па}$ ), при больших давлениях процесс превращения может перейти в конденсированную фазу.

Для нелетучих ВС (бездымные пороха) по гипотезе Зельдовича в конденсированной фазе происходит процесс газификации - разложения вещества до промежуточных газообразных продуктов, которые в последствии воспламеняются (рис 8.3).

При горении смесевых твердых ракетных топлив происходят следующие процессы:

- прогрев поверхностного слоя;
- термическое разложение (пиролиз) частиц горючего и окислителя;
- смешение продуктов пиролиза и их химическое взаимодействие

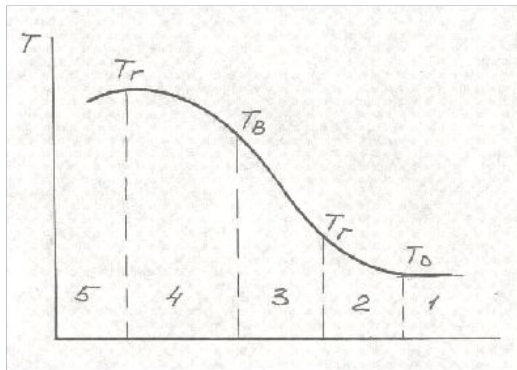


Рис. 8.3 Распределение температур в горящем нелетучем ВВ.

- 1- исходное ВВ;
- 2- зона прогрева ВВ до газификации;
- 3- зона газификации;
- 4- зона горения ;
- 5- зона продуктов горения

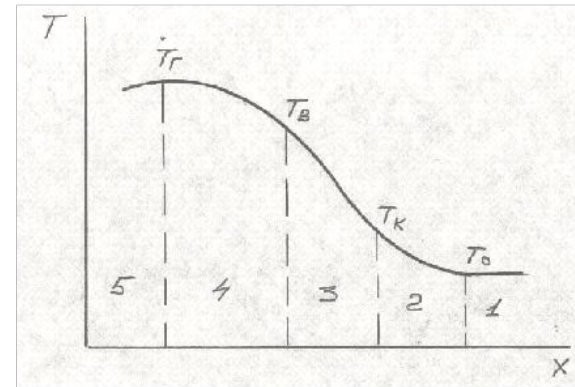


Рис. 8.2 Распределение температур в горящем летучем ВВ.

- 1- исходное ВВ;
- 2- зона прогрева ВВ до температуры кипения ( $T_k$ );



## Переход горения в детонацию

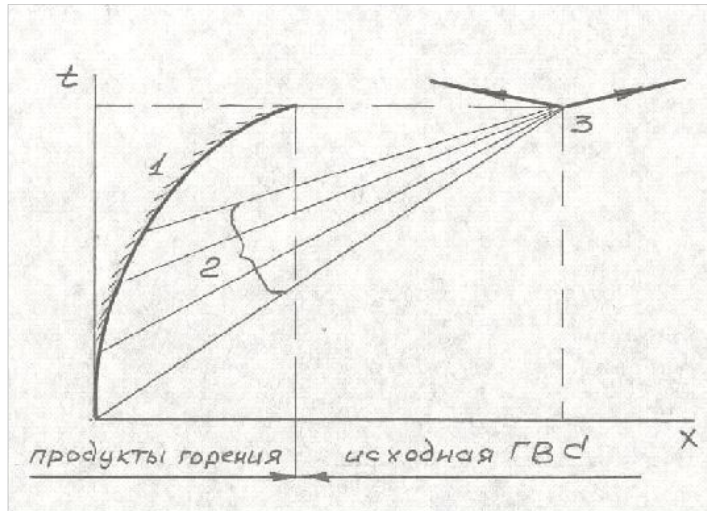


Рис 8.4  $t, x$  - диаграмма процесса перехода горения в детонацию для ГВС.

давления в исходной ГВС приводит к увеличению скорости горения. При самоускорении процесса формируются волны сжатия, сложение которых формирует в исходной ГВС ударную волну, способную вызвать быстрое химическое превращение- детонацию (рис 8.4).

При горении ГВС в замкнутом объеме продукты горения, нагретые до высоких температур, и находящиеся при давлениях, больших, чем исходная смесь, играют роль поршня, сжимающего исходный газ, и приводящего его в движение. Повышение

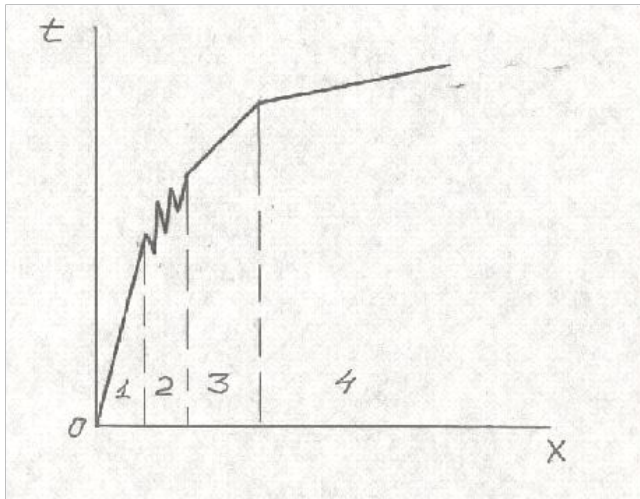


Рис 8.5  $t, x$  - диаграмма перехода горения в детонацию для конденсированных ВС.

- 1- устойчивое послышное горение
- 2- конвективное горение
- 3- низкоскоростной режим взрывчатого превращения
- 4- стационарная детонация

Основной причиной перехода горения в детонацию для конденсированных ВС является увеличение поверхности горения. Это может происходить за счет проникновения раскаленных продуктов горения:

- в технологические поры исходного ВВ(для прессованных зарядов)
- в трещины и поры, возникающие под влиянием температурных и механических воздействий, а также за счет рекристаллизации одного из компонентов и др.

За счет увеличения поверхности горения происходит повышение давления, которое увеличивает скорость горения. Переходу горения в детонацию способствует замкнутость объема, в котором находится заряд ВВ.

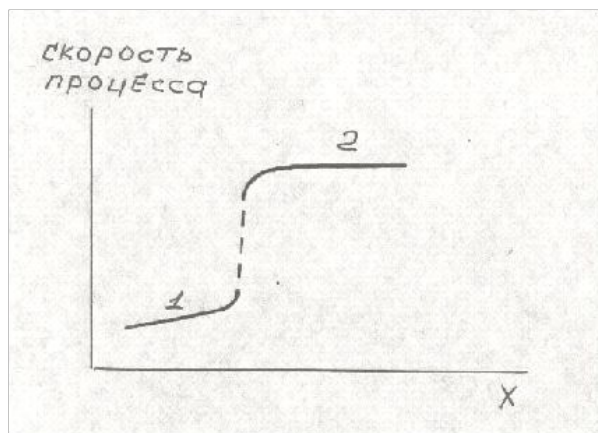


Рис 8.6 Переход горения (1) в детонацию (2) для гремучей ртути

В процессе перехода горения в детонацию послышное горение переходит в процесс конвективного горения (рис 8.5) - горение в порах, трещинах. Повышенное давление в зоне горения формирует волны сжатия и низкоскоростной режим носит уже волновой характер (процесс химического превращения инициируется слабой ударной волной), распространяющейся со скоростью  $\sim 800-3500 \text{ м/с}$ .

При определенных условиях (наличие оболочки, большой диаметр заряда) низкоскоростной режим перерастает в детонационный с нормальной скоростью (до  $7-9 \text{ км/с}$ ). Для некоторых систем стадия (2, 3) (рис 8.5) может и отсутствовать. Изучение переходных процессов зачастую осложнено быстротечностью самого процесса (рис 8.6).

УРА!  
Конец!

(Лекций)