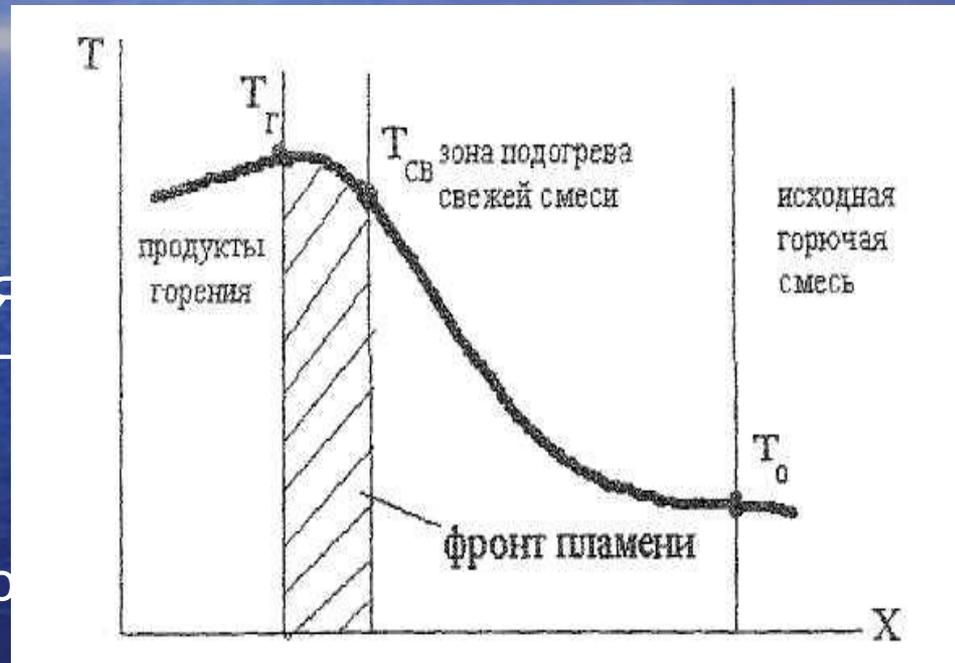


Теория нормального горения

Лекция 5 по теории горения и взрыва
ДБЖ-09

При адиабатическом горении энергия химической реакции переходит в тепловую энергию продуктов реакции. Температура продуктов адиабатического сгорания не зависит от скорости реакции, а от суммарного теплового эффекта и теплоёмкости конечных продуктов.

Согласно теории нормального горения (Я. Б. Зельдович, Д.А. Франк, Каменецкий) распространение пламени происходит путём передачи тепла от продуктов горения к несгоревшей смеси



Распределение температур в газовой смеси с учетом тепловыделения

Химическая реакция сосредоточена в узкой зоне и уравнение теплопроводности в зоне подогрева выглядит:

$$c \cdot \rho \cdot dT/dt = \eta \cdot d^2T/dx^2$$
$$\mu = \eta / (c \cdot \rho)$$

Скорость горения:

$$U \cdot dt/dx = \mu \cdot d^2T/dx^2$$

Адиабатическая температура горения:

$$T = T_0 + (T_B - T_0) \cdot e^{-U \cdot x / \mu}$$

Температура воспламенения горючего вещества:

$$(T_B - T_0) / (T - T_0) = e^{-U \cdot x / \mu}$$

Важной характеристикой является зона прогрева и толщина прогрева: если зона прогрева и зона химической, то $U \cdot x / \mu = 1$;
 $x = \mu / U$

толщина зоны прогрева обратно пропорциональна скорости горения, если скорость горения $0,1/\text{с}$, то толщина зоны прогрева равна 10^{-2} см, а если скорость горения 10 м/с, а толщина зоны прогрева 10^{-4} см

Толщина зоны прогрева зависит от времени протекания химической реакции:

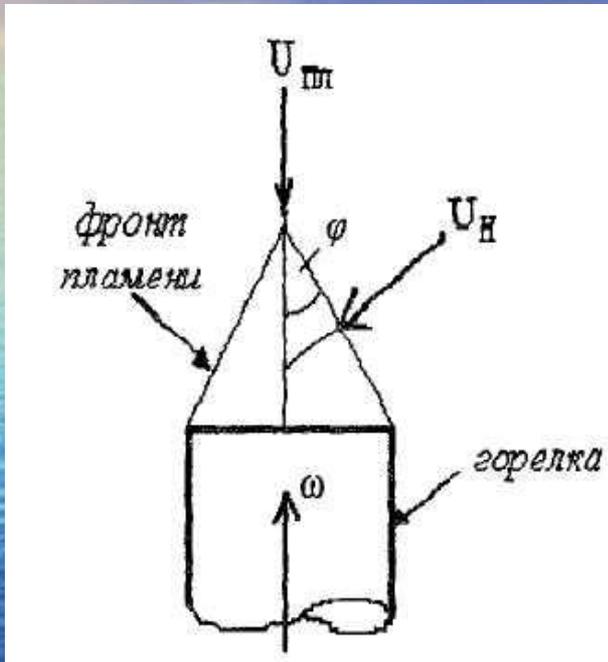
$$x = U \cdot t$$

t – время протекания химической реакции

тогда скорость горения

$$U = \sqrt{\mu \cdot \Phi / t}$$

Тепломассообмен при горении



Количество тепла подводимого путем теплопроводности описывается уравнением: $Q = \lambda \cdot (T - T_0) \cdot \delta$

λ – коэффициент теплопроводности; δ – ширина фронта пламени.

Тепло расходуемое на нагрев свежей смеси от T_0 до T

$$Q = U \cdot c \cdot \rho (T - T_0)$$

c – удельная теплоемкость; ρ – плотность смеси.

Скорость распространения пламени, при условии равенства скорости подачи газа:

$$U = \lambda / c \cdot \rho \cdot \delta$$

Коэффициент температуропроводности

$$a = \lambda / c \cdot \rho$$

Согласно кинетической теории газов время химической реакции:

$$t = \lambda \cdot \gamma / c$$

где λ – длина свободного пробега молекулы; c – скорость теплового движения молекул (численно равна скорости звука); γ – число столкновений молекул, обладающих энергией активации

а температуропроводность: $\mu = \frac{1}{3} \lambda \cdot c$

тогда скорость распространения пламени: $U = c / \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{\Phi} / 3$

если $\sqrt{\gamma} > 1$, то скорость распространения пламени намного меньше скорости звука.

Скорость горения зависит от температуры, поэтому скорость распространения пламени: $U = b \exp(-E/RT)$

b – показатель зависящий от свойств смеси

Предельное значение скорости пламени определяется:

$$U_{\text{пред}} = U_{\text{max}} \sqrt{e}$$

Уравнение теплового баланса:

$$c_p \cdot \rho \cdot dT/dt = U \cdot c_p \cdot \rho \cdot dT/dt + \eta \cdot d^2T/dx^2 + F$$

где $c_p \cdot \rho \cdot dT/dt$ – изменение температуры в какой-то точке в единице объёма; $U \cdot c_p \cdot \rho \cdot dT/dt$ – тепло, которое вносит газ, обладающий температурой T и втекающий в зону реакции; $\eta \cdot d^2T/dx^2$ – тепло которое образуется в результате теплопроводности вещества в зоне горения; F – количество тепла, выделяющееся в единицу времени и единицу объёма

Упрощения:

при стационарном режиме $c_p \cdot \rho \cdot dT/dt = 0$

зона реакции чрезвычайно тонкая, поэтому пренебрегаем количеством тепла которое вносит протекающий через него газ:

$$U \cdot c_p \cdot \rho \cdot dT/dt = 0$$

Тогда упрощенный вид уравнения теплового баланса будет выглядеть:
 $\eta \cdot d^2T/dx^2 + F = 0$

Вводим дополнительные переменные:

$$\varphi = d^2T/dx^2$$

$$dx = dT/\varphi$$

$$d^2T/dx^2 = \varphi \cdot d\varphi$$

Тогда уравнение теплового баланса:

$$\eta \cdot \varphi \cdot d\varphi = -F \cdot dT$$

Полученное уравнение теплового баланса интегрируем по зоне горения от T_0 до T :

$$\frac{\eta \cdot \varphi^2}{2} = \int_{T_1}^{T_2} (-F \cdot dT) \approx \int_{T_1}^{T_2} (-F \cdot dT) = \int_{T_2}^{T_1} F \cdot dT$$

Для теплового потока в зоне горения:

$$\eta \cdot \frac{dT}{dx} = \eta \cdot \varphi = \sqrt{2 \cdot \eta \cdot \int_{T_2}^{T_1} F \cdot dT}$$

Массовая скорость горения:

$$U_m = \sqrt{\frac{2 \cdot \eta}{Q} \cdot \int_{T_2}^{T_1} \varphi \cdot dT}$$

Скорость горения определяется теплопроводностью газа и объемной скоростью тепловыделения.

Концентрацию продуктов реакции рассчитывают по уравнению:
 $c = (T_f - T) / (T_f - T_0)$

Массовая скорость принимает вид:

$$U_m = \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot (RT_f)^{n+1}}{Q \cdot E} \cdot (T_f - T_0)^{-n} \cdot \omega_f}$$

где n – порядковый номер химической реакции, ω_f – объёмная скорость химической реакции при температуре горения.

Массовая скорость горения и давления взаимосвязаны уравнением:

$$U_m = B \cdot p^{n/2} \rightarrow \omega \sim p^n$$