

ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Лектор: Болегенова Салтанат Алихановна
+7 701 386 97 55
e-mail.: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz

ТЕОРИЯ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА

Цель лекции - изучить научные, теоретические основы процессов воспламенения, горения и взрыва веществ.

6.1 Два типа воспламенения.

Для того чтобы началось горение газовой смеси, необходимо создать определенные начальные условия в системе – воспламенить и зажечь смесь. Опыт указывает на возможность двоякого способа воспламенения газовых смесей. В практике оба способа находят широкое применение.

Первый способ заключается в том, что данная воспламеняемая смесь вся целиком доводится до такой температуры, выше которой она самостоятельно, без внешнего воздействия воспламеняется.

Второй способ заключается в том, что холодная смесь загорается только в какой-либо одной точке пространства посредством какого-либо температурного источника (обычно это – искра, накалившее тело, посторонняя пламя и пр.) и дальнейшее воспламенение всего объема газа происходит затем без внешнего вмешательства самопроизвольно, но с определенной пространственной скоростью распространения скорости горения.

Соответственно этим двум способам воспламенения говорят о *самовоспламенении* и о *вынужденном зажигании, вынужденном воспламенении* или просто *зажигании*.

Характеристики обоих процессов оказываются в значительной степени различными, но в их основе лежит действие одного общего фактора – теплового.

Поскольку на практике имеется наличие разогрева системы и связанного с этим теплового возбуждения реакций, естественно рассмотреть явление воспламенения с позиций теплового механизма процесса. Это тем более полезно, что позволит составить себе ясное физическое представление о явлении и разобраться в сущности основных характеристик воспламенения, являющихся удобными и важными для практики сжигания.

Приближения и предположения:

$$1. \quad \frac{\partial}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial x} \neq 0 \quad \Rightarrow \quad T=T(x)$$

$$2. \quad T_w = T_0$$

$$3. \quad c_i = \text{const}$$

$$4. \quad v = 0$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p \vec{v}, \text{grad} T) = \lambda \Delta T + \rho Q w_A$$

$=0$ $=0$ $= \lambda \frac{d^2 T}{dx^2}$

6.2 Теория теплового взрыва по Н.Н.Семенову

6.2.1 Кривые тепловыделения и теплоотвода

Мы знаем, что скорость химических превращений зависит от состава смеси (количества исходных веществ) и температуры. В реальных условиях и, в особенности в случае явлений горения тепловые условия в реагирующей среде, во-первых, определяются самим процессом и, во-вторых, никогда не могут быть однородными. В самом деле, воспламенение или горение происходит всегда в определенном ограниченном объеме. Выделяющееся тепло тем или иным способом теряется в окружающую среду, что приводит к возникновению больших или меньших разностей температур внутри реагирующей системы. Это различие температур влечет за собой различие в скоростях реагирования в разных точках пространства и возникновение неоднородности в составе смеси наряду с температурной неоднородностью.

Более удаленные от стенок сосуда области характеризуются большим количеством продуктов реакции и более высокой температурой. Слои, примыкающие к стенкам, будут холоднее, но там, соответственно, больше исходных продуктов реакции. Вследствие этого в такой системе неизбежно возникнут явления переноса как тепла, так и веществ, и для анализа процесса в этом случае необходимо прибегать к решению системы двух дифференциальных уравнений: уравнения теплопереноса и уравнения диффузии, которые даже в простейшем случае реакции в неподвижной среде выглядели бы следующим образом:

$$-\frac{\partial c}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} T) - k_0 c^{\nu} e^{-\frac{E}{RT}} \quad (41)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q k_0 c^{\nu} e^{-\frac{E}{RT}} \quad (42)$$

Решение этой существенно нелинейной системы уравнений в общем случае встречает огромные математические трудности, что заставляет получать решение задач о воспламенении посредством значительных упрощений. Одни упрощения сводятся к тому, что рассматриваются лишь стационарные режимы и выявляются условия, когда такие решения невозможны. При других – отвлекаются от наличия температур и концентраций внутри сосуда и занимаются анализом хода процесса во времени.

Физически наиболее наглядно процесс самовоспламенения можно представить на примере простейшего случая. Пусть некоторый объем газа V заключен в сосуд, стенки которого неизменно поддерживаются при заданной температуре T_w . Предположим, что при реакции температура внутри сосуда везде одинакова и равна T . В виду этого вся разница температур между газом и стенкой сосредоточена на границе между стенкой и газом. Соответственно этому внутри сосуда, в газе, не существует и различия в концентрациях реагирующих веществ.

Весь объем газа V реагирует, поэтому концентрации всех компонент смеси и температура одинаковы во всех точках, и нет надобности прибегать к системе уравнений (41), (42). Вместо них можно написать два выражения – выражение для скорости выделения тепла во всем объеме V и выражение для отдачи тепла через стенки сосуда.

Если тепловой эффект реакции равен Q Дж/моль, то скорость выделения тепла в сосуде равна:

$$q_1 = Q W V.$$

Так как скорость W есть скорость реакции (моль/м³с), то

$$W = k_0 c^V e^{-\frac{E}{RT}}$$

и поэтому

$$q_1 = Q k_0 c^V e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (43)$$

Это тепло идет частично на нагревание газа, частично теряется через стенки сосуда. Количество потерянного тепла можно представить в виде:

$$q_2 = \alpha S(T - T_w), \quad (44)$$

где S – общая поверхность стенок сосуда, α – коэффициент теплоотдачи от газа к стенке.

Уравнение (41) представляет собой количество тепла, выделяющееся в результате реакции горения и называется **кривой тепловыделения**, а уравнение (42) позволяет рассчитать количество тепла, теряющегося в окружающую среду через стенки сосуда, и называется **кривой теплоотвода**.

Если $q_1 > q_2$, то будет происходить разогрев системы, температура со временем будет увеличиваться, что может привести к взрыву.

Если $q_1 < q_2$, то, наоборот, произойдет охлаждение системы, температура будет понижаться, пока не произойдет погасание.

Наконец, если $q_1 = q_2$, то будет наблюдаться стационарное горение при некоторой постоянной температуре.

Таким образом, условие стационарности процесса означает, количество тепла, выделяющегося при горении, равно количеству тепла, отводящегося в окружающую среду:

$$q_1 = q_2,$$

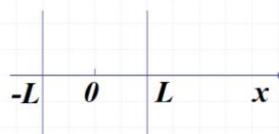
то есть:

$$Q V k_0 n_A^\alpha n_B^\beta e^{-\frac{E}{RT}} = \alpha S(T - T_0) \quad (45)$$

Это трансцендентное уравнение (аналитически не решается), решим его графически.

Уравнение энергии в стационарном одномерном приближении:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \rho Q k_0 n_A^\alpha n_B^\beta e^{-\frac{E}{RT}} = 0 \quad (1)$$



Граничные условия:

- 1) $x=0$: $\frac{dT}{dx} = 0$
- 2) $x=L$: $T = T_w = T_0$

Граничные условия:

$$x = \frac{\xi}{L},$$

$$1) \xi=0: \quad \frac{d\Theta}{d\xi} = \frac{EL}{RT_0^2} \frac{dT}{dx} = 0 \quad \Theta = \frac{E}{RT_0^2} (T - T_0)$$

$$2) \xi=1: \quad \Theta = 0$$

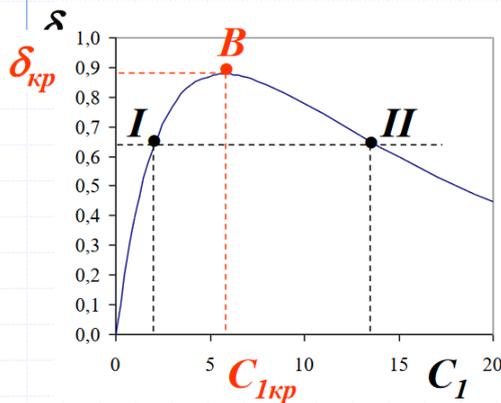
Решение уравнения (2): $\Theta = \ln \frac{C_1}{2\delta} - \ln ch^2 \frac{\sqrt{C_1}(C_2 - \xi)}{2}$ (3)

$$1) \frac{d\Theta}{d\xi} = - \frac{1}{ch^2 \frac{\sqrt{C_1}(C_2 - \xi)}{2}} \cdot ch \frac{\sqrt{C_1}(C_2 - \xi)}{2} \cdot sh \frac{\sqrt{C_1}(C_2 - \xi)}{2} \left(- \frac{\sqrt{C_1}}{2} \right) = 0$$

$\sqrt{C_1} th \frac{\sqrt{C_1} C_2}{2} = 0$ Если $C_1 = 0$, то $\Theta = \ln 0 = \infty \Rightarrow C_2 = 0$

$$2) \Theta = \ln \frac{C_1}{2\delta} - \ln ch^2 \frac{\sqrt{C_1}}{2} \xi \Big|_{\xi=1} = 0 \Rightarrow \ln \frac{C_1}{2\delta} = \ln ch^2 \frac{\sqrt{C_1}}{2}$$

$$\frac{C_1}{2\delta} = ch^2 \frac{\sqrt{C_1}}{2} \Rightarrow \delta = \frac{C_1}{2ch^2 \sqrt{C_1}}$$



$$\delta_{кр} = 0,88$$

$$C_{1кр} = 5,76$$

Контрольные вопросы:

- 1 Какие два типа воспламенения существуют?
- 2 Что такое самовоспламенение?
- 3 Запишите выражение для кривой тепловыделения и кривой теплоотвода.
- 4 Что такое тепловой взрыв?
- 5 Изобразите схематически на графике взаимное расположение кривых тепловыделения и теплоотвода:
 - а) при стационарном горении,
 - б) при нестационарном горении,
 - в) при критическом режиме
- 6 Что называют временем задержки или индукционным периодом теплового воспламенения?