

ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Лектор: Болегенова Салтанат Алихановна

+7 701 386 97 55

e-mail.: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz

ТЕОРИЯ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА В НЕСТАЦИОНАРНОМ НУЛЬМЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

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

8.1 Границы самовоспламенения

Рассмотренные выше графики $q_1(T)$ и $q_2(T)$ показывают, что для данных условий опыта каждой горючей смеси, характеризующейся определенным начальным составом и давлением, отвечает определенное значение T_B . Это значит, что существует целая система предельных состояний, определяющих области, где взрыв существует и где взрыв не возникает. Границы таких областей называют **взрывными границами, взрывными пределами** или, что точнее, **границами самовоспламенения**.

Рассмотрим простейшие количественные соотношения, дающие возможность установить границы самовоспламенения. Если система кривых $q_1(T)$ отвечает скоростям реагирования при различных давлениях, то из условия касания легко получить связь между p и T , отвечающую границе раздела области взрыва и области невзрываемости.

Принимая во внимание, что в точке касания

$$q_1|_{T_B} = q_2|_{T_B} \quad \text{и} \quad \left(\frac{\partial q_1}{\partial T} \right)_{T_B} = \left(\frac{\partial q_2}{\partial T} \right)_{T_B}$$

и, используя выражения (43) для q_1 и (44) для q_2 , получим:

$$QV k_0 c^v e^{-\frac{E}{RT}} - \alpha S(T - T_w) \quad (46)$$

$$c^v \frac{E}{RT_B^2} QV e^{-\frac{E}{RT}} = \alpha S \quad (47)$$

Деление первого уравнения на второе приводит к следующему соотношению:

$$\frac{RT_B^2}{E} = T_B - T_w, \quad (48)$$

откуда, переписав это квадратное относительно уравнение в виде:

$$T_B^2 - \frac{E}{R} T_B + \frac{E}{R} T_w = 0$$

нетрудно определить величину T_B :

$$T_B = \frac{E}{2R} \pm \sqrt{\left(\frac{E}{2R} \right)^2 - \frac{ET_w}{R}}. \quad (49)$$

В этом выражении следует брать минус перед радикалом, дающий наименьшее значение T_B , так как знак плюс дает бессмысленно высокое значение (он соответствует точке касания кривых q_1 и q_2 за точкой перегиба).

Итак,

$$T_B = \frac{E}{2R} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{RT_w}{E}} \right). \quad (50)$$

Из этой формулы Н.Н.Семёнова следует, в частности, что явление воспламенения в рассмотренной задаче о тепловом взрыве может существовать только в ограниченной области значений температуры стенок:

$$0 \leq T_w \leq \frac{E}{4R}$$

Максимальное значение температуры воспламенения из (45) при $T_w = \frac{E}{4R}$ будет равно

$$T_{B \max} = \frac{E}{2R}, \quad T_{B \max} = 2T_w$$

и соответствует точке перегиба на рисунке 7 и равно $(5 \cdot 10^3 \div 10^4) \text{ K}$.

Во всем теоретически неограниченном значении температуры стенок выше $T_{W \max} = \frac{E}{4R}$ при любых условиях теплоотдачи расположена область «теплового взрыва», т.е. область, в которой стационарное течение реакции невозможно. Это следует из того, что уравнение (50) решения не имеет, а значит отсутствуют точки касания кривых q_1 и q_2 .

Обычно $E \approx 16 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль}$, $T \approx 500 \div 1000 \text{ K}$, поэтому $4 \frac{RT_w}{E} \approx \frac{32 \cdot 1000}{16 \cdot 10^4} \approx 0,2$ – это

малая величина, поэтому формуле (50) можно придать более простой, приближенный вид, разлагая подкоренное выражение в ряд:

$$T_B \approx \frac{E}{2R} - \frac{E}{2R} \left(1 - \frac{2RT_{0B}}{E} - \frac{2R^2T_{0B}^2}{E^2} - \dots \right)$$

Первое приближение дает:

$$T_B \approx \frac{E}{2R} - \frac{E}{2R} + T_{0B} + \frac{RT_{0B}^2}{E}.$$

Или

$$T_B - T_{0B} \approx \frac{RT_{0B}^2}{E}$$

Полученное выражение показывает, что численное значение T_B мало отличается от T_{0B} , если E достаточно велико. Например, при $E = 50000 \text{ Дж/моль}$ и $T = 1000 \text{ K}$ разность

$$T_B - T_{0B} \approx 40 \text{ K}$$

Это интересное и важное обстоятельство показывает, что использование вместо T_B приближенной величины T_{0B} в ряде случаев не влечет за собой слишком большой ошибки.

Н.Н.Семёнов установил связь между температурой и давлением смеси в состоянии воспламенения. Чтобы его получить, подставим выражение (48) в уравнение (41):

$$QV k_0 c^{\nu} e^{-\frac{E}{RT_{0B} \left(1 + \frac{RT_{0B}}{E} \right)}} = \alpha S \frac{RT_{0B}^2}{E}$$

Но поскольку $\frac{RT_{0B}}{E} \ll 1$, то приближенно

$$QV k_0 c^{\nu} e^{-\frac{E}{RT_{0B}}} = \alpha S \frac{RT_{0B}^2}{E}$$

$$\frac{EQV k_0}{\alpha SR} e^{-\frac{E}{RT_{0B}}} = \frac{T_{0B}^2}{c^{\nu}} = \left(\frac{c^{\nu}}{T_{0B}^2} \right)^{-1}$$

Логарифмированием получим:

$$\ln \frac{EQV k_0}{\alpha SR} - \frac{E}{RT_{0B}} = -\ln \left(\frac{c^{\nu}}{T_{0B}^2} \right)$$

$$\ln \frac{EQV k_0}{\alpha SR} = \frac{E}{RT_{0B}} - \ln \left(\frac{c^{\nu}}{T_{0B}^2} \right)$$

В частности для бимолекулярной реакции $c^2 \sim p$, и тогда

$$\ln \frac{p_k}{T_{0B}^2} = \frac{E}{2RT_{0B}} + const$$

Где через p_k обозначено давление, соответствующее критическому условию воспламенения. Это соотношение Семёнова устанавливает связь между T_{0B} и p_k на границе.

Согласно этому соотношению между $\ln \frac{p_k}{T_{0B}^2}$ и $\frac{1}{T_{0B}}$ должна быть линейная связь (прямая

линия в системе координат $\frac{1}{T_{0B}}$ и p_k). В обычной системе координат p_k и T_{0B} эта зависимость

дает кривую, ограничивающую область взрыва (рисунок 16). Эта кривая дает связь между T_{0B} и p_k при заданном постоянном начальном составе смеси ($c_0 = const$).



Рисунок 16 – Связь температуры воспламенения с давлением при заданном начальном составе смеси

В случае постоянного давления ($p = \text{const}$) характер зависимости T_B от состава смеси для бимолекулярной реакции согласно (49) будет иметь вид, показанный на рисунке 17 в виде зависимости T от процентного содержания горючего. Видно, что при $p = \text{const}$ не любая смесь способна к воспламенению, а только смеси, лежащие в некоторых границах, например, между значениями c_1 и c_2 , которые носят название *концентрационных границ самовоспламенения*.



Рисунок 17 - Зависимость температуры воспламенения от процентного состава смеси при постоянном давлении

Помимо этих двух зависимостей T_B от p_k и T_B от состава смеси практический интерес представляет третий тип зависимости – зависимость p_k от состава смеси при заданном постоянном значении T_B (практически – T_{0B} , поскольку $T_B \approx T_{0B}$). Такую зависимость можно построить на основании двух последних рисунков. В этом случае контур области воспламенения будет иметь вид, изображенный на рисунке 18.

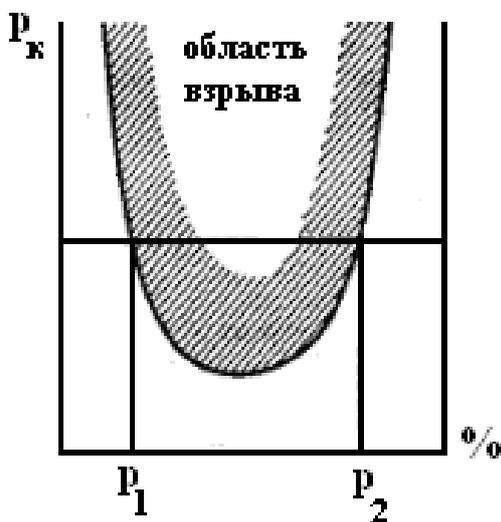


Рисунок 18 – Зависимость давления, соответствующего условиям воспламенения, от процентного состава смеси при постоянном значении T_B

Из этого рисунка 18 видно, что при заданном давлении также не любая смесь способна к воспламенению. В частности, видно, что в данных условиях теплоотвода существует такое минимальное из минимальных давление (или температуры стенки $T_B \approx T_{0B}$), при котором смесь любого состава не может самовоспламениться.

Таким образом, при любом способе представления критических (предельных) условий существуют вполне определенные и четко очерченные области, в которых только и возможно тепловое самовоспламенение газовых смесей.

Итак, мы достаточно подробно обсудили задачу о тепловом взрыве по Семенову. При этом был принят ряд упрощающих допущений. Одно из них сводилось к тому, что горючая смесь во всех точках объема сосуда нагревалась одинаково, то есть, температура смеси во всех местах сосуда была одинаковой в каждый данный момент времени. Но ведь это не реалистическое предположение, так как ясно, что слои смеси, прилегающие к стенкам сосуда будут прогреваться быстрее остальных и температура в сосуде будет различной в разных местах. Поэтому следует рассмотреть задачу о тепловом взрыве с учетом пространственного распределения температуры.

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?