

## ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Лектор: Болегенова Салтанат Алихановна

+7 701 386 97 55

e-mail.: [Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz](mailto:Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz)

### ТЕОРИЯ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА ПО ФРАНК-КАМЕНЕЦКОМУ (СТАЦИОНАРНОЕ ОДНОМЕРНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ)

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

#### 7.1 Графическое решение

Для того, чтобы выяснить, при каких условиях возникает взрыв, воспользуемся графическим построением. В целях дальнейшего упрощения предположим, что до момента воспламенения в сосуде не происходит изменения реагирующих веществ, т.е. концентрация  $c$  постоянна и равна  $c_0$ . Такое предположение оказывается достаточно точным в области слабого разогрева смеси вблизи температуры воспламенения.

Система кривых  $q_1$  на рисунке 11 соответствует скорости выделения тепла для трех различных скоростей реакции (например, для трех разных давлений) в зависимости от температуры внутри сосуда (уравнение (43)). Прямая  $q_2$  соответствует скорости отдачи тепла в зависимости от температуры внутри сосуда, т.е. соответствует уравнению (44).

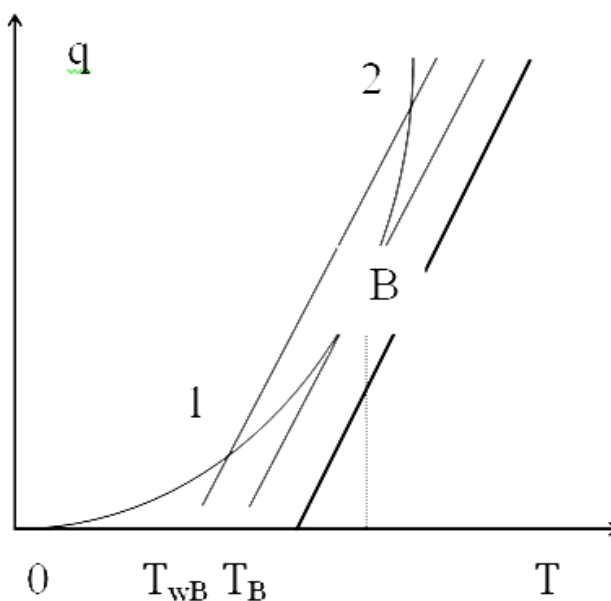


Рисунок 11 – Графическое решение системы уравнений (43) –(44)

Когда реакция идет по нижней кривой, то сначала, начиная с  $T_w$ , смесь будет разогреваться до температуры  $T_1$ , так как до этого момента теплоприход превышает теплоотвод. В точке  $T_1$  нагрев прекратится и система придет в равновесие. Реакция будет идти дальше с постоянной скоростью (если при этом количество реагирующих молекул не будет изменяться – мы это приняли, фактически же скорость начнет прогрессивно падать).

В случае, когда реакция протекает по верхней кривой, тепловыделение всегда превышает теплоотвод и, следовательно, система с самого начала будет непрерывно наращивать температуру; скорость реакции быстро перейдет к очень высоким значениям и приведет к появлению взрыва.

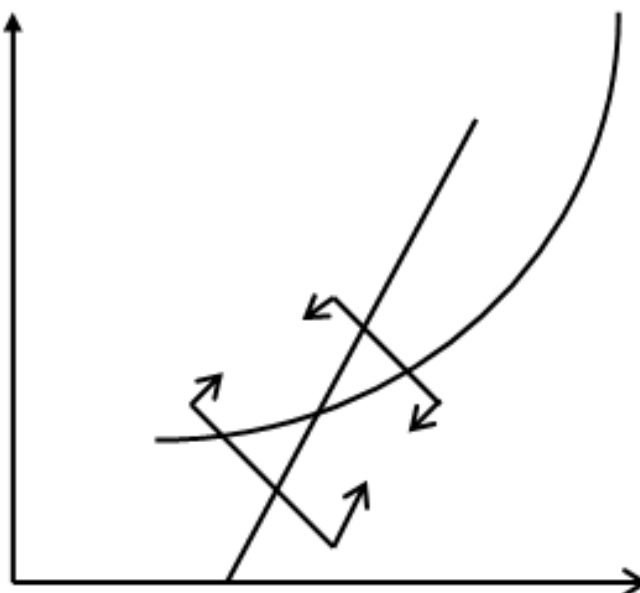


Рисунок 12 – Условия равновесия в точке 1

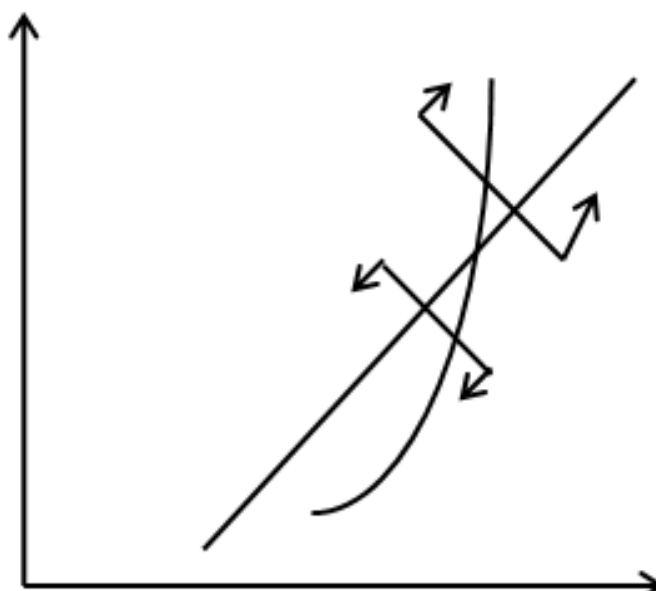


Рисунок 13 – Условия равновесия в точке 2

Существует, очевидно, определенное условие, характеризующее переход от случая ограниченного роста температуры к росту неограниченному. Это условие реализуется средней кривой для  $q_1$ . В этом случае, как и в первом, сначала будет происходить возрастание температуры газа до величины  $T_B$ . Начиная с этого момента, система будет находиться в равновесии. Что это будет за равновесие? Устойчивое или нет? Чтобы ответить на этот вопрос, исследуем состояния, соответствующие двум общим точкам кривых  $q_1(T)$  и  $q_2(T)$ , являющиеся равновесными. Для решения нашего вопроса прибегнем к обычному приему исследования устойчивости равновесных состояний любой системы.

Допустим, что в системе находящейся в состоянии равновесия, произошли незначительные (точнее, сколь угодно малые) отклонения от состояния равновесия, и проследим за характером дальнейшего изменения состояния. В точке пересечения кривых с температурой  $T_1$  система находится в равновесии (рисунок 12). Отклонение от этой точки в сторону меньшей температуры (влево) приведет к неравновесному состоянию, при котором количество выделяющегося тепла  $q_1$  превышает количество тепла  $q_2$ . В этом случае

система вновь разогреется и вернется к состоянию равновесия с температурой  $T_1$ . При повышении температуры относительно того же состояния равновесия наступит такое неравновесное состояние, при котором количество отводимого тепла будет больше количества выделяющегося тепла, следовательно, система охладится и вновь вернется к равновесию.

Таким образом, в обоих случаях случайно произошедшие отклонения температуры создают условия для возврата системы к состоянию равновесия. Следовательно, *стационарный режим 1 является устойчивым*.

Рассмотрим теперь точку 2. Аналогичный анализ рисунка 13 показывает: если  $T < T_1$ , то  $q_1 < q_2$  и следовательно, система охлаждается и переходит в точку 1. Если  $T > T_1$ , то  $q_1 > q_2$  и система разогревается и происходит взрыв. Следовательно, *стационарный режим 2 является неустойчивым* и поэтому на практике это равновесное состояние не реализуется.

## 7.2 Критические условия воспламенения

Состояние с температурой  $T_B$  также равновесное, но оно односторонне устойчиво (рисунок 14): при случайном понижении температуры системы она возвращается к состоянию равновесия, а при отклонении температуры в сторону повышения будет происходить ее неограниченное возрастание, так как при  $T > T_B$   $q_1 > q_2$  и будет происходить прогрессирующий разогрев системы. Таким образом, равновесие при температуре  $T_B$  является *односторонне устойчивым*.

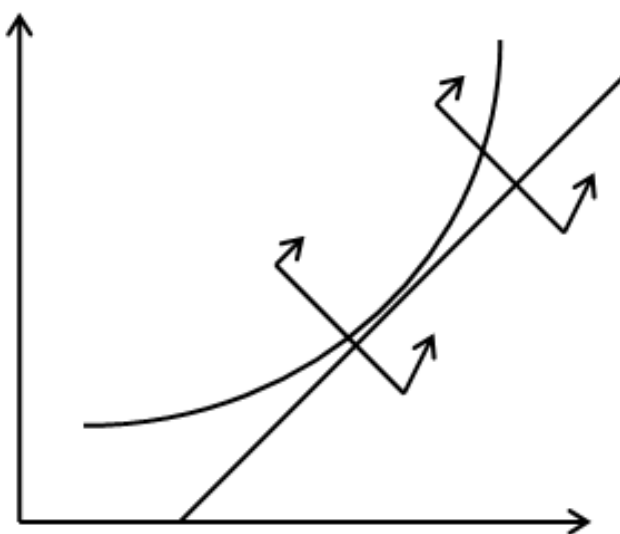


Рисунок 14 – Условия равновесия в точке воспламенения В

Это явление – переход от медленной квазистационарной реакции, сопровождающийся незначительным разогревом, к бурному, нестационарному, прогрессивно ускоряющемуся повышению температуры и выгоранию смеси (вследствие повышения температуры увеличивается скорость реакции, т.е. интенсивность тепловыделения, что приводит вновь к повышению температуры, и т.д. до полного выгорания смеси) – получило название *«теплового взрыва»*.

Граничный стационарный режим касания кривых выделения и отвода тепла (точка В) принято называть *режимом воспламенения*, а соответствующую ему температуру  $T_B$  – *температурой самовоспламенения* или просто *температурой воспламенения*. Условие, которому отвечает состояние в точке В, называется обычно *«критическим условием воспламенения»*, поскольку для режима в точке В характерно резкое, критическое изменение состояния при бесконечно малом изменении температуры.

В точке В имеют место равенства  $q_1 = q_2$  и  $\frac{dq_1}{dT} = \frac{dq_2}{dT}$ , однозначным образом определяющие величину  $T_B$ , характеризующую для данной смеси предельное условие воспламенения системы.

В рассмотренном примере неизменной поддерживалась величина  $T_W$  и изменялись горючие свойства системы, которые зависят от содержания горючего в смеси, т.е. от давления и относительной концентрации веществ. Оказалось, что при заданной температуре стенок сосуда только после достижения вполне определенной интенсивности реакции (определенного содержания горючего, определенного давления) может наступить самопроизвольное возрастание температуры и быстрое ускорение реакции, т.е. воспламенение.

Обычно в опытах состав смеси и давление задаются заранее, а переменной величиной является температура стенок сосуда  $T_W$ . Если менять  $T_W$ , то на графике это будет соответствовать параллельному переносу прямой  $q_2(T)$ . Кривая тепловыделения  $q_1$  задана. При постепенном повышении температуры стенки от значения  $T_{W1}$  соответствующая прямая теплоотдачи перемещается параллельно самой себе вправо (величина  $x$  считается постоянной).

До тех пор, пока прямая теплоотвода пересекает кривую теплоприхода, разогрев системы стационарен. Последней температурой стенки сосуда, при которой происходит лишь стационарный разогрев, является температура  $T_W$ . Соответствующая ей температура разогрева системы равна  $T_B$ . При незначительном дальнейшем повышении температуры стенки сосуда выше  $T_W$  стационарный разогрев уже невозможен; так как всегда теплоприход превышает теплоотвод: система, как и в ранее рассмотренном случае, прогрессивно разогревается, реагирует и приходит к воспламенению.

Очевидно, что и все другие температуры стенки выше  $T_W$  также будут приводить к воспламенению. Величина  $T_W$  отделяет, таким образом, температурную область нагрева стенки, в которой не происходит воспламенения, от области нагрева, в которой воспламенение происходит.

В отличие от определенной выше температуры самовоспламенения, как температуры стационарного разогрева системы, выше которой система способна к самоускорению реакции, обычно принято называть **температурой воспламенения** ту наименьшую температуру стенок сосуда, при которой в данных условиях и для данного вещества наступает взрыв. В рассмотренных примерах такой температурой является температура сосуда  $T_W$ . Очевидно, что  $T_W$  и  $T_B$  в большей или меньшей степени отличаются друг от друга, причем всегда  $T_B > T_W$ .

Следует заметить, что при строгом (в первоначальном смысле) определении температуры самовоспламенения она не является константой, характеризующей газовую систему, но больше или меньше зависит от обстановки опыта, размеров сосуда – в особенности. Это следует из уравнения (44), где  $q_2$  зависит от величин  $S$  и  $x$ , характеризующих параметры экспериментальной установки.

### 7.3 Индукционный период воспламенения

Практически, так или иначе, необходимо связывать горючие свойства вещества с какой-либо характеристикой воспламенения. Измерение  $T_B$  является большей частью экспериментально трудной задачей ввиду больших скоростей изменения температуры  $T$  внутри сосуда и вследствие общих трудностей точного измерения температур газа. Пользуются поэтому не величиной  $T_B$ , а величиной  $T_W$ , т.е. возможно минимальной температурой стенки сосуда (в случае вынужденного зажигания – минимальной температурой запала). С этой величиной оказывается связанной другая экспериментально наблюдаемая величина: **индукционный период** или **задержка воспламенения**, поскольку

переход от заданной температуры  $T_w$  к температуре  $T_B$  всегда связан с некоторым временем развития реакций и накопления тепла.

Скорость повышения температуры и соответственно увеличение скорости реакции должны быть пропорциональны разности  $q_1 - q_2$ . Согласно уравнениям (43) и (44):

$$q_1 - q_2 = QV k_0 c^v e^{-\frac{E}{RT}} - \alpha S(T - T_w).$$

Если теплоемкость системы  $c_v V$ , то отсюда:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q}{c_v} k_0 c^v e^{-\frac{E}{RT}} - \frac{\alpha S}{c_v V} (T - T_w),$$

где  $c^v$  есть функция времени. Решать это уравнение – задача нелегкая, да и ненужная. Чтобы качественно представить поведение температуры внутри сосуда во времени, можно использовать приведенные выше графики  $q_1(T)$  и  $q_2(T)$ , составляя для каждой точки разницу  $q_1$  и  $q_2$  и отождествляя ее с величиной скорости подъема температуры. Это дает рисунок 15. Нижняя кривая соответствует случаю стационарного разогрева до температуры  $T_1$ , воспламенение отсутствует; пунктирная кривая соответствует более реальному случаю, когда происходит расходование горючего (уменьшение  $c$ ).

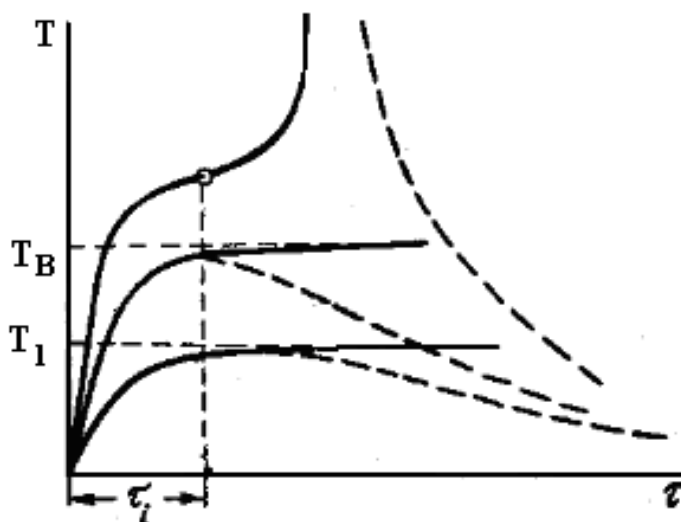


Рисунок 15 – Возрастание температуры  $T$  реагирующей смеси со временем  $t$ ;  $t_i$  – индукционный период

Кривая с обозначением  $T_B$  – предельное состояние на границе воспламенения. При повышении  $T_w$  эта кривая переходит в кривую верхнего типа. Последняя характеризуется наличием точки перегиба, после которой происходит очень быстрый скачок температуры (воспламенение). *Время, отвечающее точке перегиба, в данном случае аналогично индукционному периоду при цепном развитии реакции и может быть названо временем задержки или индукционным периодом теплового воспламенения.*

Чем больше будет осуществляться превышение температуры стенок сосуда над  $T_w$  (связанной с  $T_B$ ), тем меньше, очевидно, будет получаться время задержки. С этой точки зрения за величину  $T_w$ , характеризующую воспламеняемость системы, следовало бы брать такое значение, для которого время задержки равняется бесконечности. Такое строгое определение  $T_w$  обычно не производится, а находятся значения  $T_w$ , соответствующие тем или иным временам задержек. В практике измерений они достигают для некоторых веществ

порядка десятков секунд и очень быстро уменьшаются с увеличением температуры; они зависят также от ряда других факторов (давления и пр.).

Таким образом, мы видим, что если использовать в качестве величины температуры воспламенения значения температуры стенок сосуда, то требуется также указывать величину индукционного периода.

**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?