#### Белорусский национальный технический университет



# Кафедра ЮНЕСКО "Энергосбережение и возобновляемые источники энергии"

# Топливо и его использование

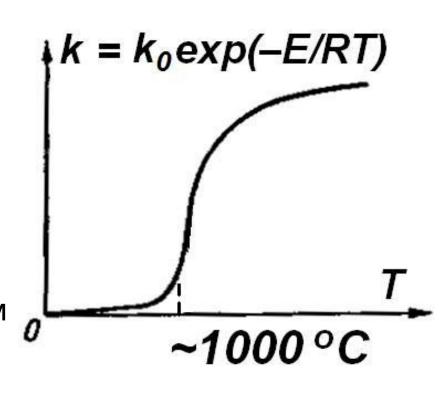
Лекция 8. **Теория теплового** воспламенения газовых смесей.



### Способы воспламенения горючих смесей

При низких температурах скорость химических реакций в горючих газовых смесях мала, и заметного реагирования не наблюдается.

При высоких температурах (≥1000°С) реакции так ускоряются, что происходит быстрое реагирование с бурным выделением теплоты и образованием пламени.



Переход горючей смеси от состояния медленных реакций к быстрому реагированию называется воспламенением.

Существует 2 способа воспламенения:

- самовоспламенение и
- 🗖 вынужденное воспламенение.

Самовоспламенение — это процесс самопроизвольного реагирования во всем объеме горючей смеси с прогрессирующим превышением скорости тепловыделения над скоростью теплоотвода от реагирующей смеси в окружающую среду, что приводит ко всё более резкому росту температуры и завершается бурным выделением теплоты и взрывом.

**Взрыв** – процесс высвобождения большого количества энергии в ограниченном объёме за короткий промежуток времени.

В топочных устройствах и камерах сгорания, в которых процесс горения должен быть непрерывным и устойчивым, метод самовоспламенения не применяется.

Вынужденное воспламенение (зажигание) отличается от самовоспламенения тем, что смесь доводят до состояния воспламенения не во всём объёме одновременно, а только в малой его части, откуда волна реакции (процесс горения) может распространиться на весь объём.

При зажигании смеси необходимо в зоне воспламенения создать намного более высокую температуру, чем при самовоспламенении, т.к. из этой зоны теплота интенсивно отводится к холодной смеси.



#### Известны *3 способа зажигания* горючей смеси:

- раскалёнными телами
- электрическим разрядом (искрой)
- факелом или раскалёнными продуктами сгорания.

## В последнем случае зажигание называют стабилизацией горения.

Тепловая мощность источников зажигания должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить воспламенение прилегающих к источнику слоёв смеси и дальнейшее распространение зоны реакции.



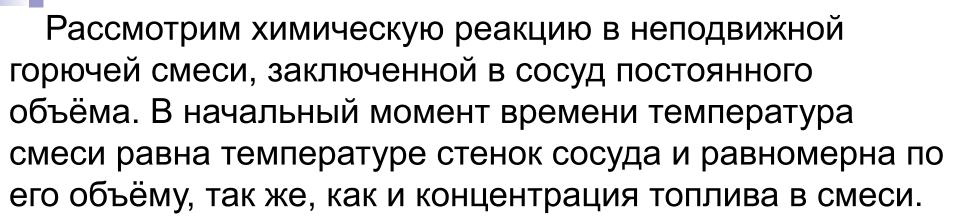
В топливно-воздушной смеси источник зажигания, например электрическая искра или рециркулирующие газы, создает *узкую зону быстрой химической реакции*, которая в результате переноса теплоты и активных радикалов распространяется от одного слоя смеси к другому.

Т. обр., процесс распространения зоны реакции представляет собой ряд последовательно идущих непрерывных процессов зажигания. Эта зона быстрой химической реакции и больших градиентов температуры и концентраций называется фронтом пламени.



## Стационарная тепловая теория самовоспламенения

рассматривает возможность наступления самовоспламенения как достижение предельно возможного (критического) стационарного теплового состояния ( $T = T_{\kappa p}$ ), при котором незначительное повышение температуры приводит к её лавинообразному росту, вызванному экспоненциальным ростом скорости реакции горения.



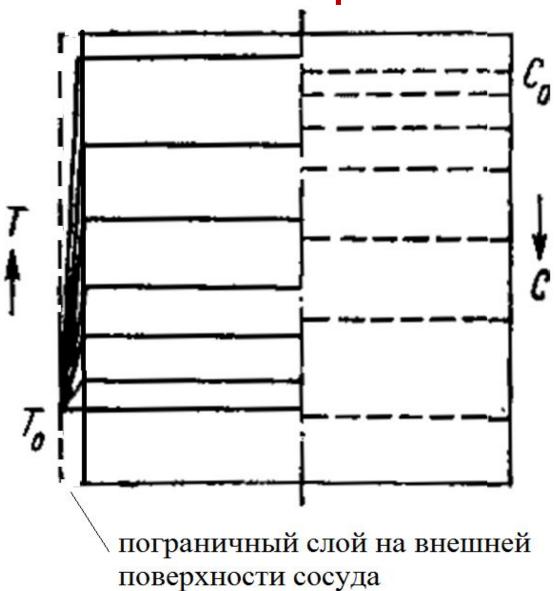
Пусть температура окружающей сосуд среды постепенно повышается, тогда вместе с ней будет повышаться и температура горючей смеси. Согласно закону Аррениуса, с ростом температуры возрастает скорость реакции горения.

При некоторой температуре смеси скорость реакции становится заметной и далее все более увеличивается. Соответственно увеличивается количество выделяющейся в сосуде *теплоты реакции*, что приводит к дальнейшему резкому *саморазогреву* смеси.

Принимаем коэффициенты теплопроводности и диффузии смеси бесконечно большими, например, вследствие интенсивного турбулентного перемешивания. Это означает, что температура смеси и концентрация в ней топлива равномерно распределены по объёму сосуда.

Полагаем также, что температура стенок сосуда равна температуре окружающей среды, т.е. теплота отводится от смеси к идеально теплопроводным стенкам, а основное *термическое сопротивление теплоотдачи* сосредоточено в узком пограничном слое смеси, прилегающем к стенкам.

# Модельное распределение Т и С в различные моменты времени

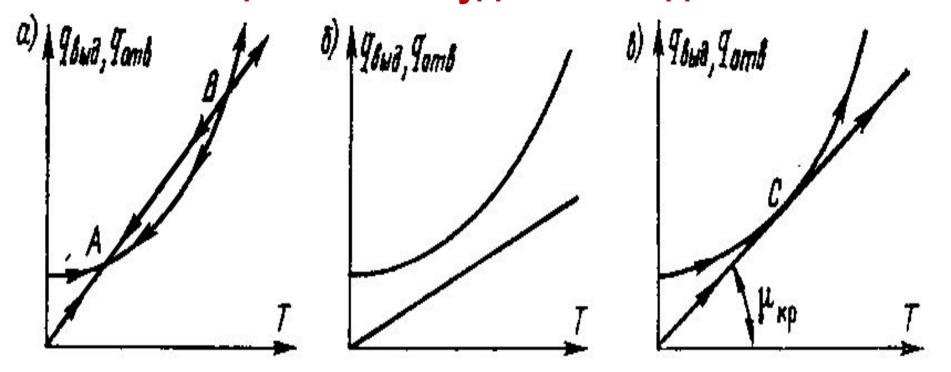


По мере протекания реакции горения смесь разогревается за счёт выделяющейся теплоты реакции, и возникает разность температур между смесью и окружающей средой.

Под действием этой разности температур происходят *темповые потери – поток темпоты* из реакционного объема в окружающую среду. С ростом температуры смеси эти потери увеличиваются. Для упрощения пренебрегаем тепловым излучением газа и принимаем теплообмен чисто конвективным.

Дальнейшее протекание процесса зависит от соотношения между теплотой, выделяемой в результате реакции (тепловыделением)  $\mathbf{Q}_{p}$  и тепловыми потерями  $\mathbf{Q}_{r}$ .

# Соотношение между плотностями потоков выделяющегося в сосуде и *отводимого тепла*



а — смесь не воспламеняется (теплоотвод больше критического); б — смесь воспламеняется (теплоотвод меньше критического); в — критический теплоотвод отвод

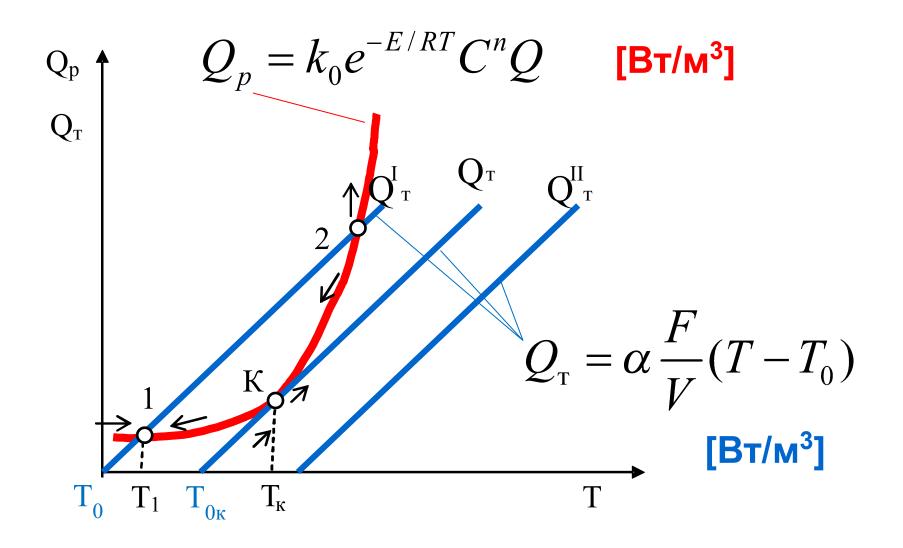
 $F,\ V$  — площадь поверхности стенок и объём сосуда;  $\alpha$  — к-т теплоотдачи,  $\rho$  — плотность смеси,  $c_{_V}$  — изохорная уд. теплоёмкость, n — порядок реакции.



При  $Q_p = Q_T$  наступает *тепловое* равновесие и в сосуде устанавливается стационарная температура, несколько превышающая температуру окружающей среды.

При  $Q_p > Q_T$  всё большее повышение температуры приводит к самопроизвольному прогрессивному (лавинообразному) росту скорости реакции, бурному выделению теплоты, т.е. к самовоспламенению горючей смеси.

# Зависимость тепловыделения Q<sub>р</sub> и тепловых потерь Q<sub>т</sub> от температуры. Критические условия самовоспламенения



**Стационарным тепловым режимам** соответствуют точки пересечения кривых  $Q_{p} = (T)$  и  $Q_{T} = (T)$ .

При температуре окружающей среды  $T_o$  (теплопотери  $Q_{\tau}^{I}$ ) возможны два стационарных режима: *нижний* (т.1) и верхний (т.2).

При T <  $T_1$  смесь разогревается ( $Q_T < Q_p$ ). Разогрев длится до тех пор, пока смесь не достигнет  $T_1 (Q_{T,1} = Q_p)$ , после чего разогрев прекратится, т.к. при T >  $T_1 Q_T > Q_p$ .

Если по каким-либо причинам в т.1 температура смеси отклонится в большую сторону, равновесие восстановится из-за высоких теплопотерь.

Следовательно, *нижний* стационарный режим является *устойчивым*; в смеси протекает квазистационарная реакция медленного горения с малым тепловыделением при относительно низких температурах.



При температуре смеси выше Т<sub>2</sub> (т.2), тепловыделение превысит теплопотери, в результате начнётся прогрессирующий разогрев, приводящий к самовоспламенению.

Попасть из точки 1 в т.2 путём саморазогрева смеси невозможно. Таким образом, верхний стационарный режим практически нереализуем.

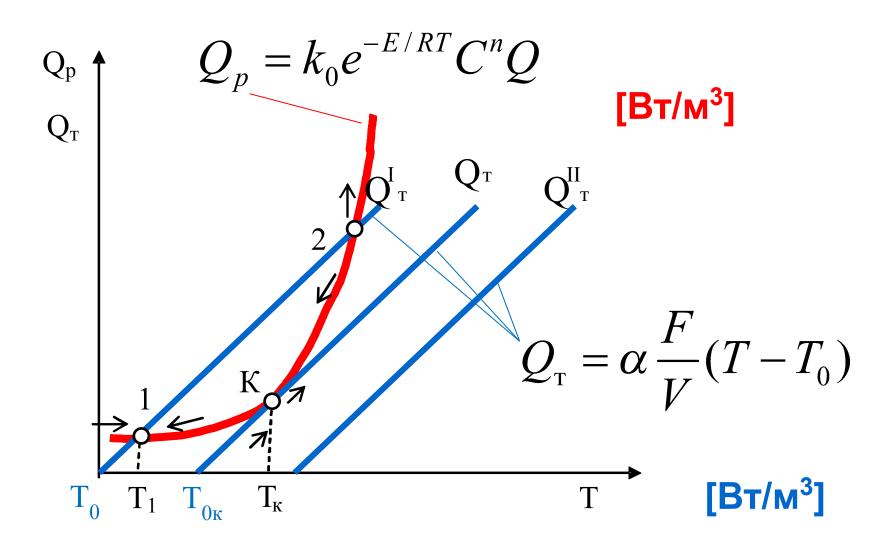


Если повышать температуру окружающей среды  $T_{o}$ , что графически соответствует переносу прямой  $Q_{T}$  параллельно вправо, при некотором значении  $T_{o\kappa}$  кривые  $Q_{p}$  и  $Q_{T}$  будут иметь *только одну общую точку* (K).

Это состояние устойчиво по отношению к понижению температуры и неустойчиво к ее повышению.

Точка К является *критической*: ниже температуры  $T_{\kappa}$  – **стационарный** режим, однако незначительное превышение *температуры* **окружающей среды** над  $T_{\text{ОК}}$  (кривая  $Q_{m}^{\ II}$ ) вызывает лавинообразный саморазогрев смеси, приводящий к самовоспламенению





В стационарной тепловой теории за *температуру* самовоспламенения принимают температуру  $T_{\kappa}$  или более доступную измерению температуру  $T_{\kappa}$ .

Разогрев горючей смеси на  $\Delta T_K = T_K - T_{OK}$  происходит за счет самопроизвольного реагирования и называется *предвзрывным разогревом*, а время  $T_i$ , необходимое для этого – *периодом индукции*.

Температура самовоспламенения зависит не только от природы и свойств горючей смеси, но и от условий протекания процесса, определяющих теплоотдачу реагирующей смеси, поэтому не является физико-химической константой, а представляет характеристику процесса.



## Академик Ник. Ник. Семёнов определил *температуру самовоспламенения* из условия **равенства между собой** в точке касания K (при $T_O = T_{OK}$ )

- потоков тепловыделения и теплопотерь
- и их первых производных по температуре

$$\frac{Q_p}{dT} = \frac{Q_T}{dT}$$



Подставляя выражения для  $Q_p = Q_{\rm T}$  и решая совместно полученную систему, придём к квадратному уравнению относительно  $T_{\kappa}$ 

$$T_{\kappa}^{2} - \frac{E}{R}T_{\kappa} + \frac{E}{R}T_{0\kappa} = 0$$

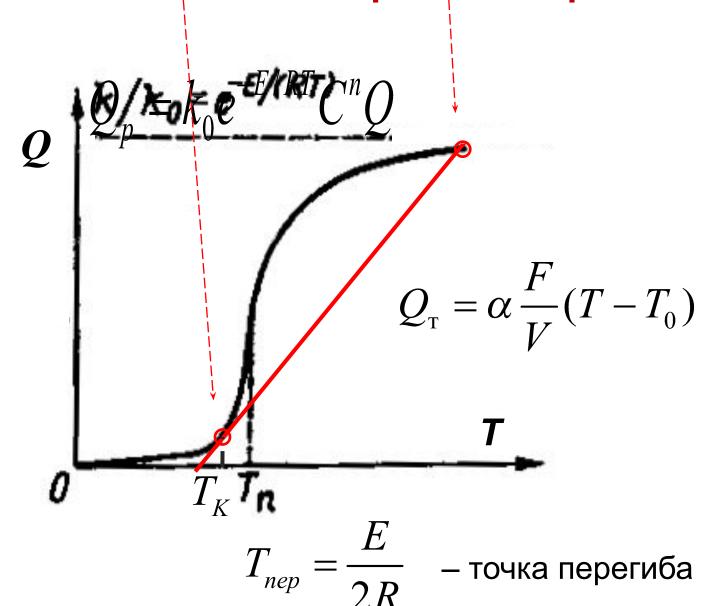
откуда

$$T_{\kappa} = 0.5 \frac{E}{R} \left( 1 \mp \sqrt{1 - \frac{4RT_{0\kappa}}{E}} \right)$$

Решение со знаком "плюс" перед радикалом отброшено, так как дает значение для температуры самовоспламенения ~ 10000 °С и выше, что не соответствует реальности.



### Искомое и отброшенное решения





В результате получена величина самопроизвольного разогрева, ведущего к самовоспламенению:

$$\Delta T_K = T_K - T_{O\!K} = \frac{RT_{O\!K}^{-2}}{$$
терий Семёнова

если  $\Delta T < \Delta T_{K}$ , то самовоспламенение невозможно; в противном случае оно может наступить при предоставлении времени, необходимого для такого самопроизвольного разогрева.



Температура  $T_{OK}$  представляет собой значение начальной температуры горючей смеси, при которой в данных условиях самопроизвольный разогрев достигает критической величины  $\Delta T_{K}$ .

Величина  $\Delta T_K$  зависит от энергии активации и температуры, и **для реакций горения**, как правило, не превышает нескольких десятков градусов.



В зависимости от условий процесс самовоспламенения может развиваться очень медленно, за значительный период времени, или очень быстро, мгновенно.

Примером первого случая может быть самовоспламенение в штабеле твердого топлива, второго – самовоспламенение со взрывом преимущественно при срыве факела в топках, особенно пылеугольных.