



# Топливо и его использование

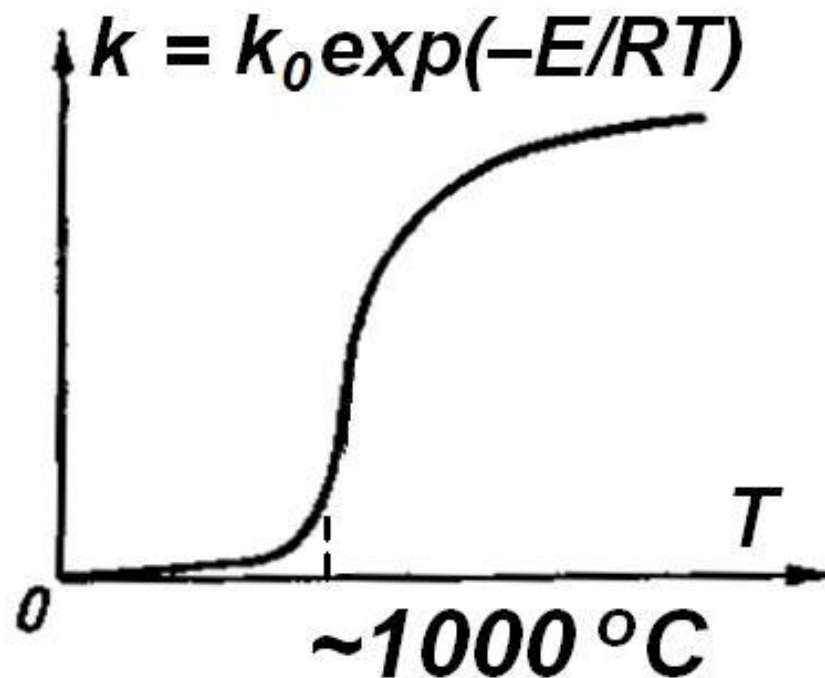
**Лекция 8. Теория теплового  
воспламенения газовых смесей.**

# Способы воспламенения горючих смесей

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

При высоких температурах ( $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ ) 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 ( $T = T_{кр}$ ), при котором незначительное повышение температуры приводит к её лавинообразному росту, вызванному экспоненциальным ростом скорости реакции горения.

Рассмотрим химическую реакцию в неподвижной горючей смеси, заключенной в сосуд постоянного объёма. В начальный момент времени температура смеси равна температуре стенок сосуда и равномерна по его объёму, так же, как и концентрация топлива в смеси.

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.

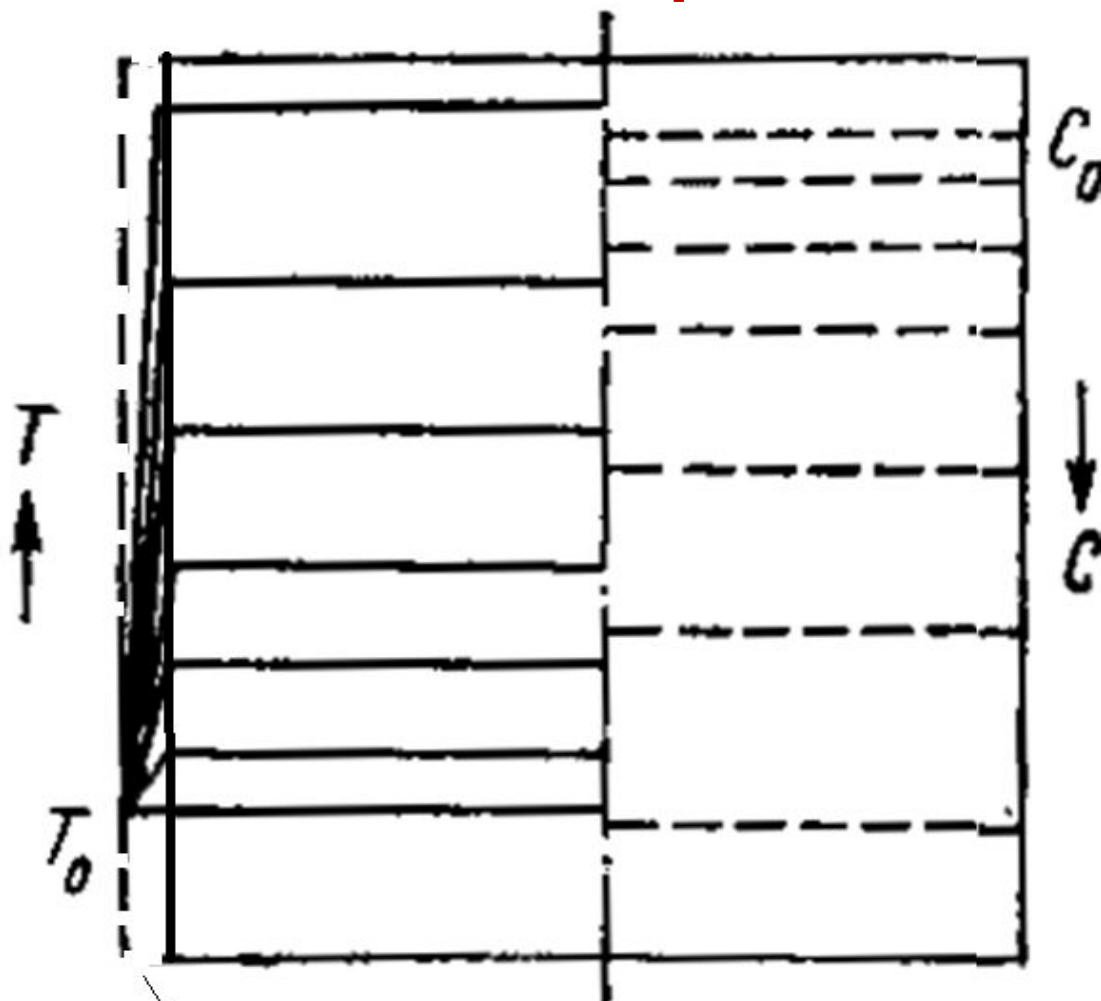
При некоторой температуре смеси скорость реакции становится заметной и далее все более увеличивается. Соответственно увеличивается количество выделяющейся в сосуде *теплоты реакции*, что приводит к дальнейшему резкому *саморазогреву* смеси.



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 $T$ и $C$ в различные моменты времени



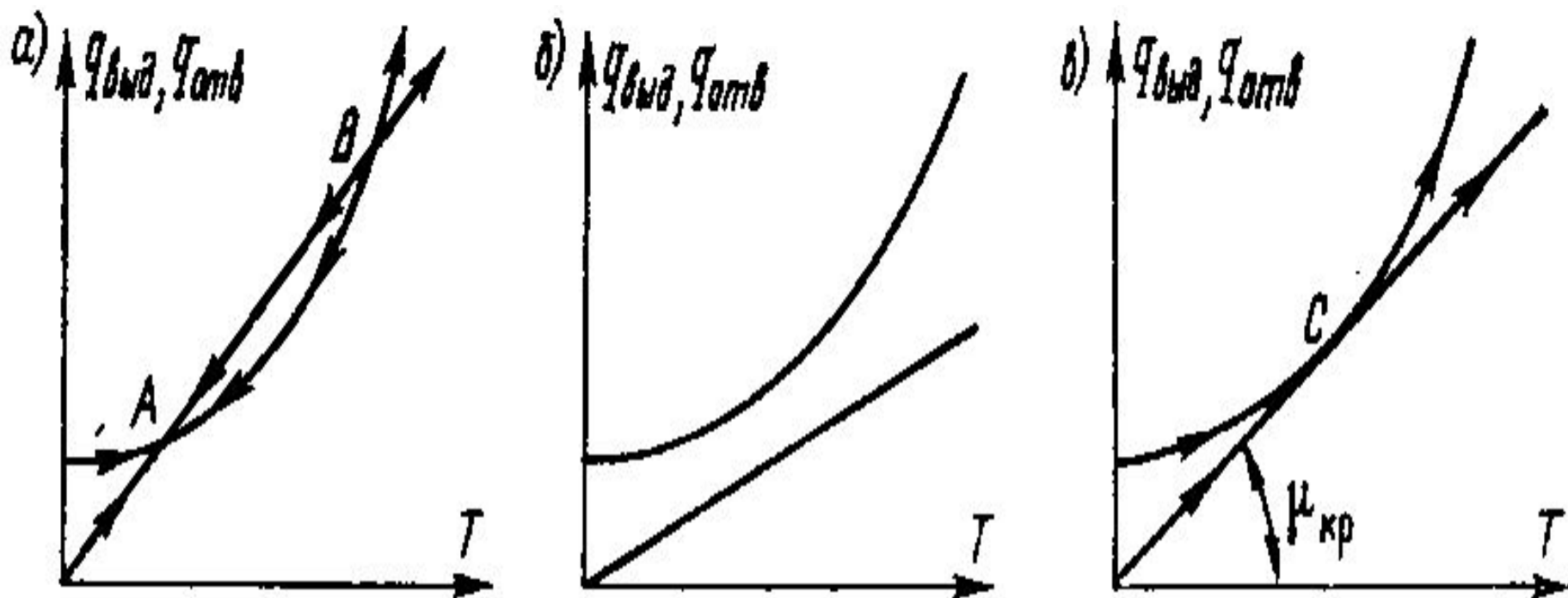
пограничный слой на внешней поверхности сосуда

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 тепловые потери – поток теплоты** 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)  $Q_p$  и тепловыми потерями  $Q_T$ .

# Соотношение между плотностями потоков выделяющегося в сосуде и отводимого тепла



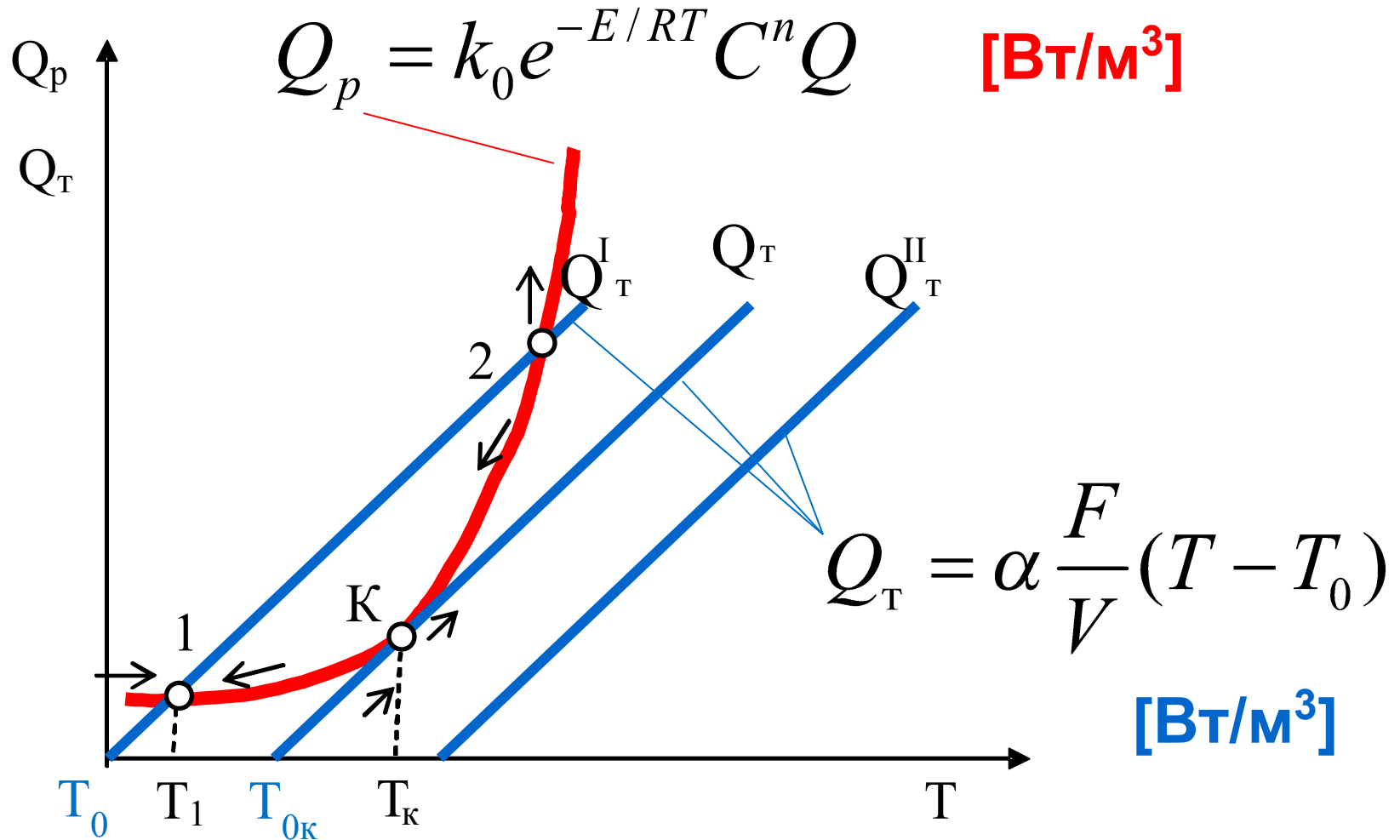
а — смесь не воспламеняется (теплоотвод больше критического); б — смесь воспламеняется (теплоотвод меньше критического); в — критический теплоотвод

$F$ ,  $V$  — 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 $Q_p$ и тепловых потерь $Q_T$ 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  $Q_T^I$ ) 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  $T_2$  (т.2), **тепловыделение превысит теплопотери**, в результате начнётся прогрессирующий разогрев, приводящий к **самовоспламенению**.

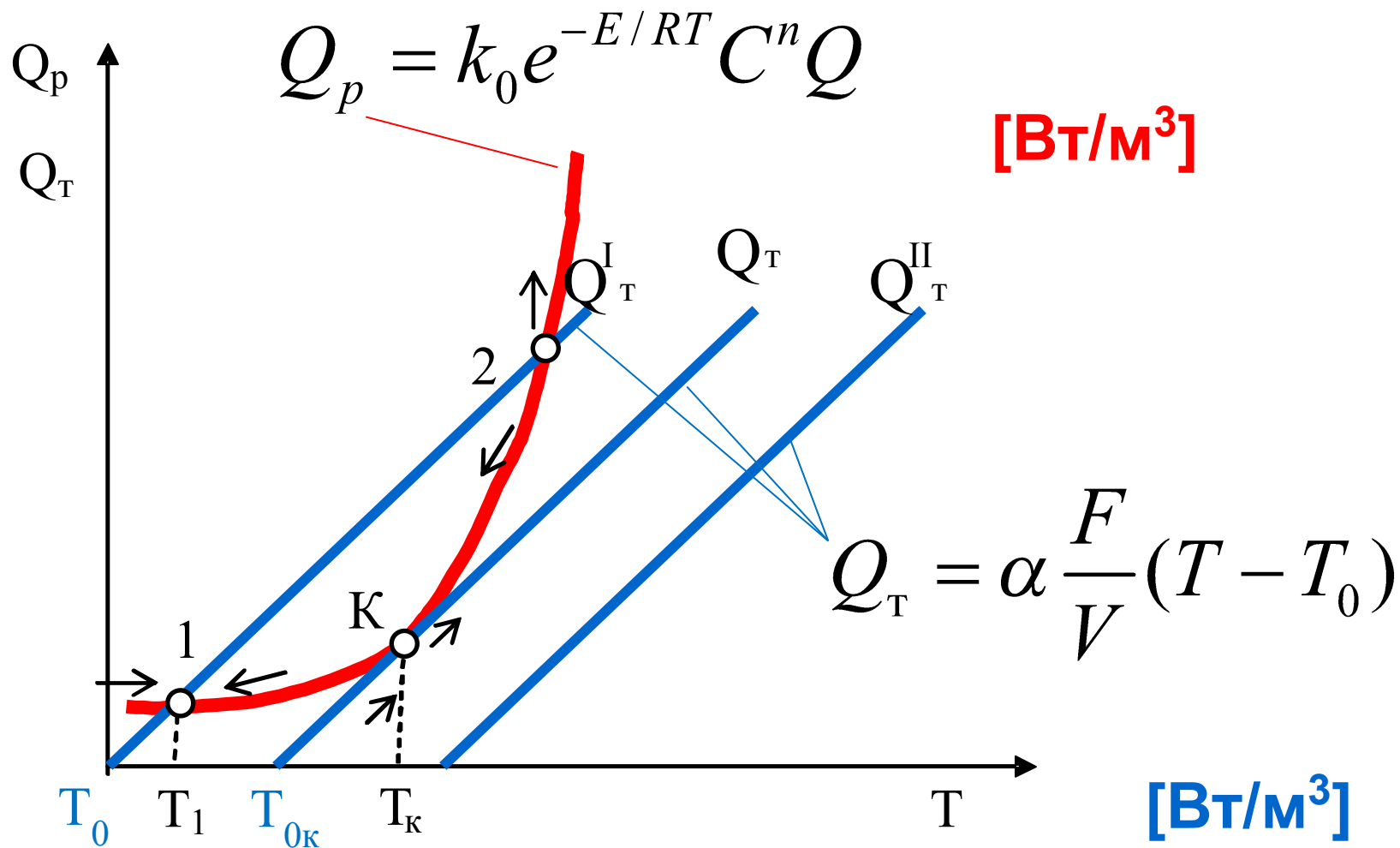
Попасть из точки 1 в т.2 путём саморазогрева смеси невозможно. Таким образом, верхний стационарный режим практически нереализуем.



Если повышать температуру окружающей среды  $T_0$ , что графически соответствует переносу прямой  $Q_T$  параллельно вправо, при некотором значении  $T_{ок}$  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 K является **критической**: ниже температуры  $T_K$  – **стационарный** режим, однако незначительное превышение **температуры окружающей среды** над  $T_{ок}$  (кривая  $Q_m^{II}$ ) вызывает лавинообразный саморазогрев смеси, приводящий к самовоспламенению



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

Разогрев горючей смеси на  $\Delta T_K = T_K - T_{ок}$  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<sub>o</sub> = T<sub>ок</sub>***)

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

$$Q_p = Q_T$$

$$\frac{dQ_p}{dT} = \frac{dQ_T}{dT}$$

Подставляя выражения для  $Q_p = Q_T$  и решая совместно полученную систему, придём к квадратному уравнению относительно  $T_K$

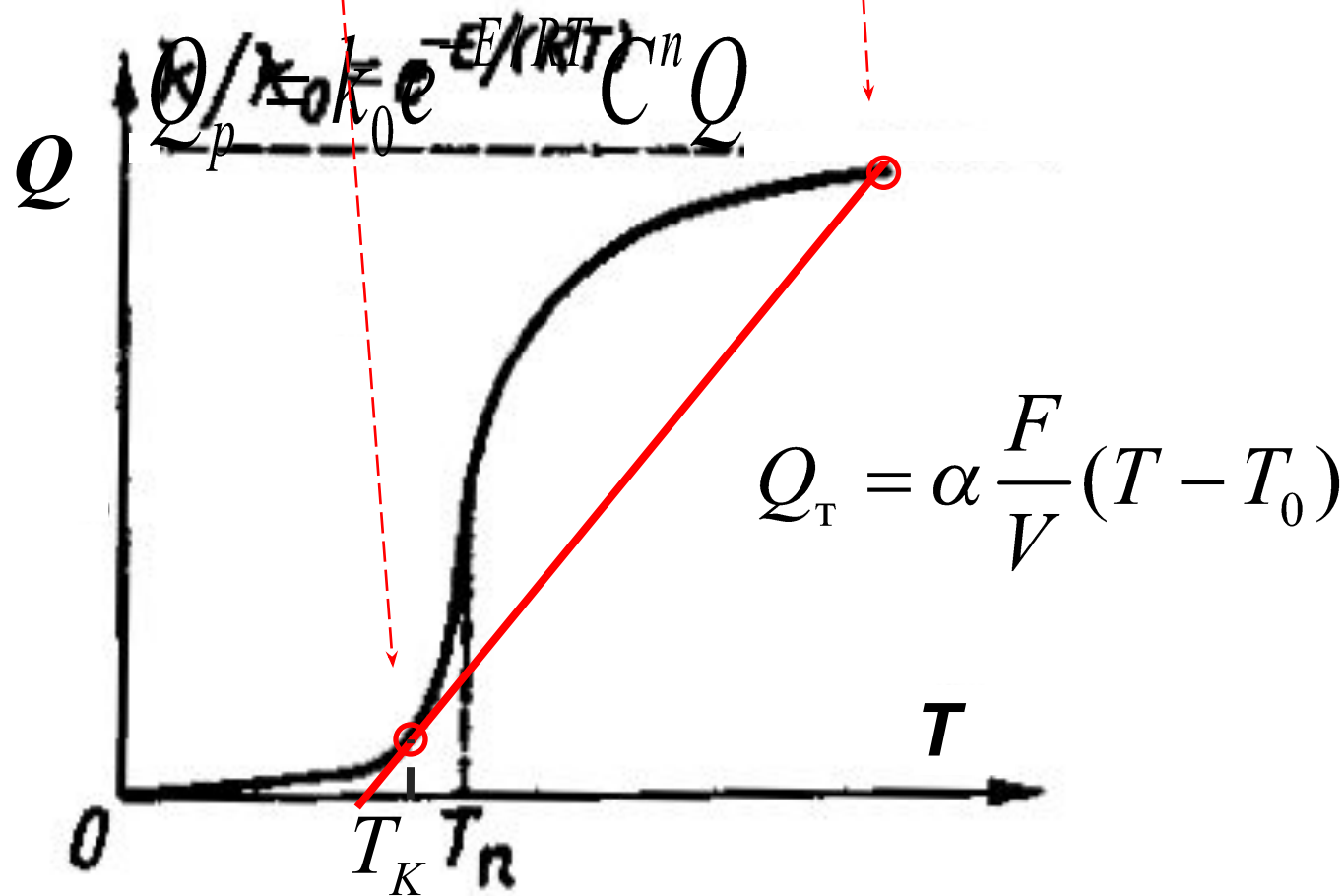
$$T_K^2 - \frac{E}{R}T_K + \frac{E}{R}T_{0K} = 0$$

откуда

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

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

# Искомое и отброшенное решения



$$T_{пер} = \frac{E}{2R} \quad \text{— точка перегиба}$$

В результате получена величина самопроизвольного разогрева, ведущего к самовоспламенению:

$$\Delta T_K = T_K - T_{OK} = \frac{RT_{OK}^2}{E}$$

**критерий 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.