

# Режимы идеального смешения периодический РИС-п и идеального вытеснения РИВ с теплообменом

для простой реакции  $A \longrightarrow B$

$$W_A(c, T) = -r(c, T) \quad \frac{r(c, T)}{c_0} = x(T, \quad )$$

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{r(c, T)}{c_0}$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{Q_p c_{\text{уд}} r(c, T)}{C_p c_0} - \frac{K F}{C_p} (T - T_x)$$

при  $\tau = 0 \quad x = x_0, \quad T = T_0$

Адиабатический разогрев  $\frac{Q_p c_0}{C_p} = \Delta T_{\text{ад}}$

Параметр теплоотвода  $\frac{K_T F_{\text{уд}}}{C_p} = B$

Система уравнений приобретает вид:

$$\frac{dx}{d\tau} = r(x, T)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \Delta T_{\text{ад}} r(x, T) - B(T - T_x)$$

при  $\tau = 0 \quad x = x_H, \quad T = T_H$

И в общем виде не имеет аналитического решения.

## Анализ процесса

При адиабатическом режиме теплообмен с окружающей средой (теплоносителем) отсутствует:

$$B = 0$$

и система уравнений примет вид:

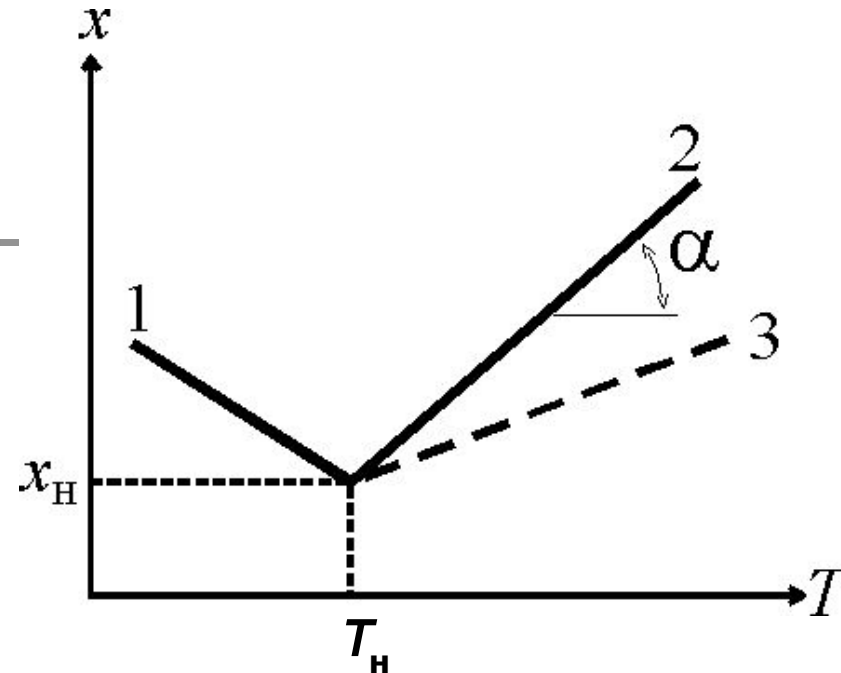
$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= r(x, T) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{d\tau} &= \Delta T_{ад} r(x, T) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{при } \tau = 0 \quad x &= x_H, \quad T = T_H \end{aligned} \right\}$$

$$T - T_H = \Delta T_{ад} (x - x_H),$$

где  $(T - T_H)$  – разогрев реакционной смеси до достижения степени превращения  $x$ .



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\Delta T_{ад}}$$

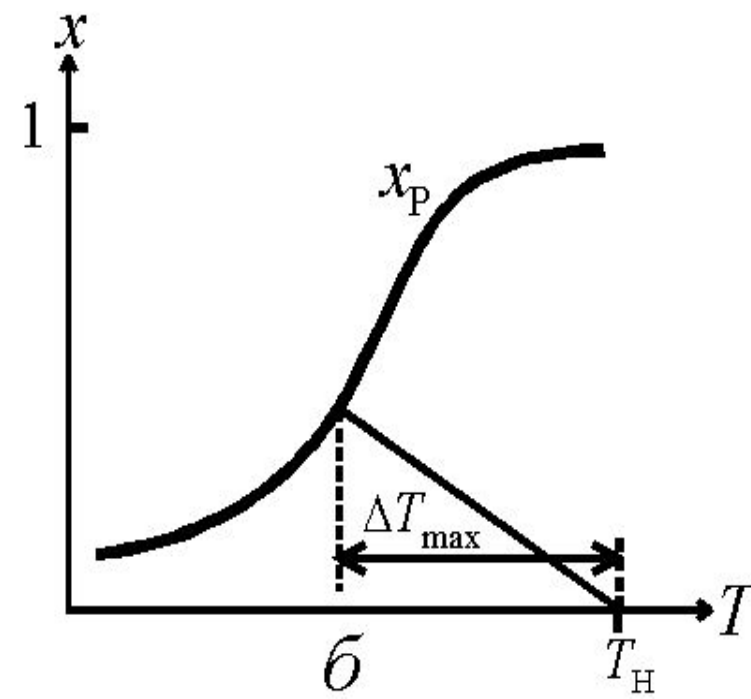
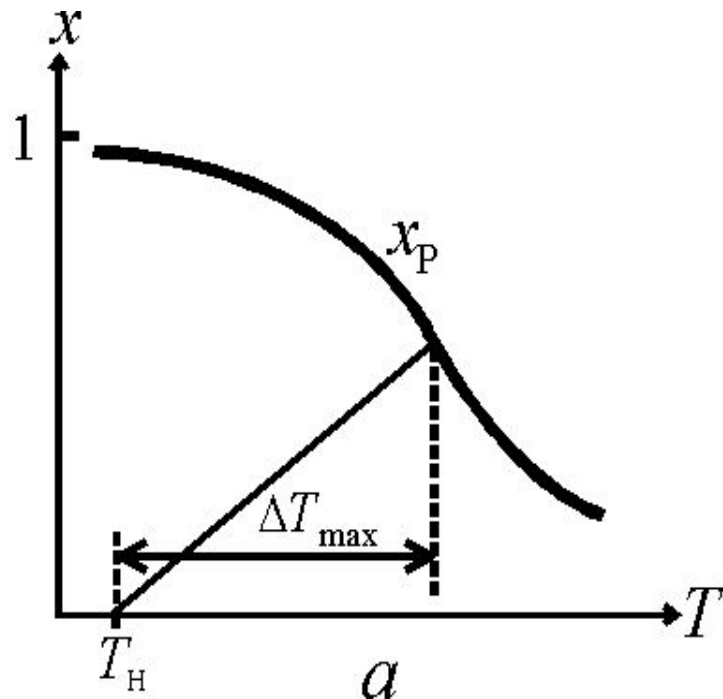
адиабатический процесс в РИВ:

1 – эндотермическая реакция;

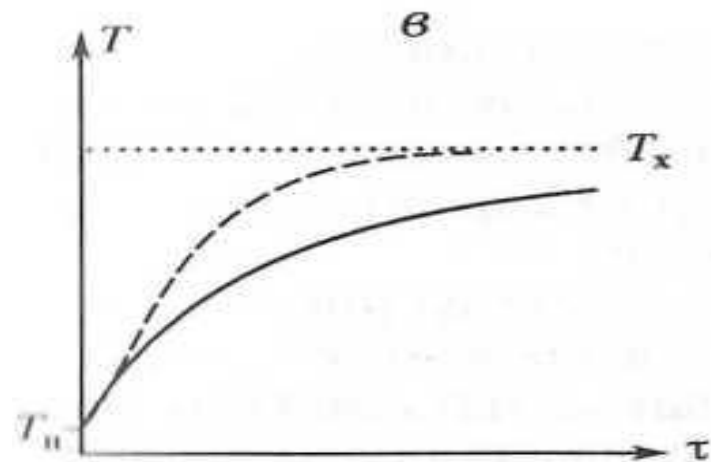
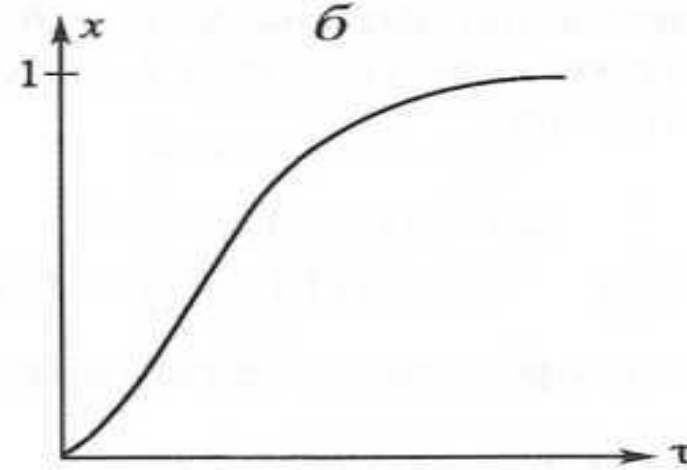
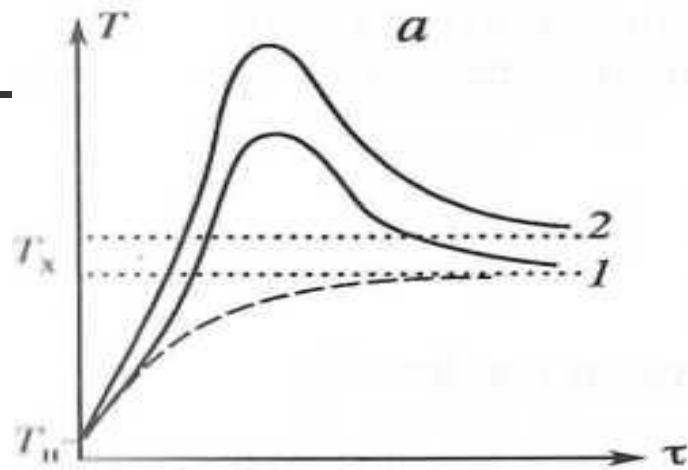
2, 3 – экзотермическая реакция

(2 – для  $\Delta T_{ад}$ , 3 – для  $\Delta T'_{ад} > \Delta T_{ад}$ )

РИВ: обратимая реакция, зависимости  $x$ – $\tau$  и  $T$ – $\tau$  для экзо- (а) и эндотермических (б) реакций, адиабатический процесс будет протекать только до равновесной степени превращения. Максимальный разогрев  $\Delta T_{\max}$  можно определить из диаграммы  $x$ – $T$ : пересечение адиабаты с равновесной линией ( $x_p$ ) определяет максимальный разогрев  $\Delta T_{\max}$  в адиабатическом процессе в РИВ.



Профили температуры  $T$  (а, в) и степени превращения  $x$  (б) в реакторе РИВ с теплообменом без реакции (штриховые линии) и при протекании (сплошные линии) экзотермической (а) и эндотермической (в) реакции



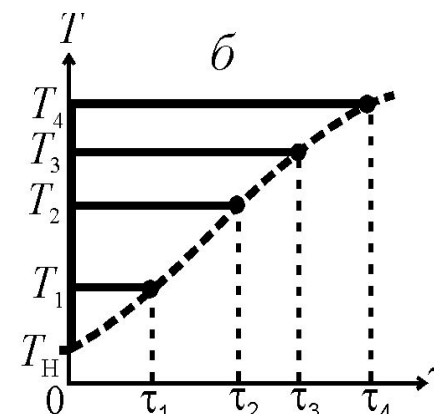
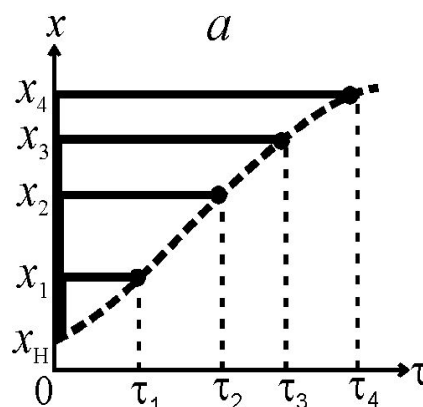
# Температурный режим в проточном реакторе идеального смешения РИС-Н

$$\left. \begin{aligned} \frac{x}{\tau} &= r(x, T); \\ \frac{T - T_{\text{H}}}{\tau} &= \Delta T_{\text{ад}} r(x, T) - B(T - T_{\text{X}}). \end{aligned} \right\}$$

В адиабатическом режиме  
(параметр теплоотвода  $B = 0$ ):

$$\left. \begin{aligned} \frac{x}{\tau} &= r(x, T); \\ \frac{T - T_{\text{H}}}{\tau} &= \Delta T_{\text{ад}} r(x, T). \end{aligned} \right\}$$

Зависимости степени превращения  $x$  (а) и температуры  $T$  (б) от условного времени  $\tau$  для проточных реакторов ИС (реакция экзотермическая)



Разделив второе уравнение на первое системы получим линейную зависимость  $T - T_{\text{H}} = \Delta T_{\text{ад}}(x - x_{\text{H}})$ , совпадающую с уравнением для РИВ.

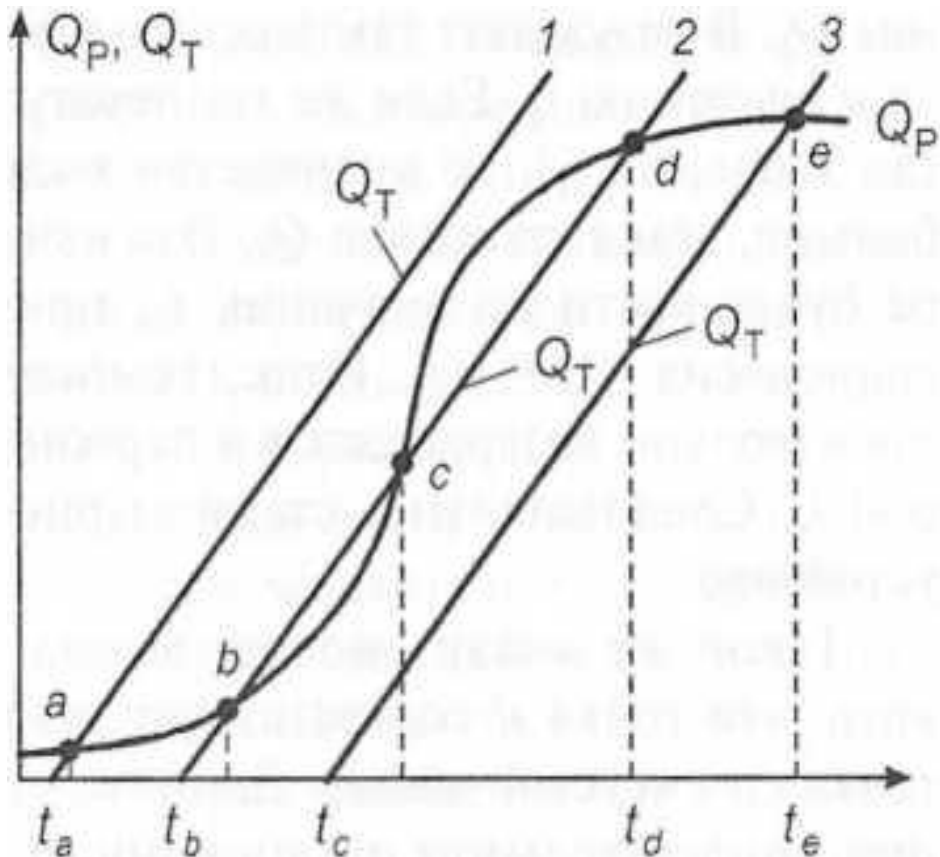
## *Число и неоднозначность стационарных режимов*

Решение системы уравнений – математической модели РИС-н в случае протекания в адиабатическом режиме реакции первого порядка ( $x_F = 0$ ):

$$\left. \begin{aligned} \frac{x}{\tau} &= k(T)(1-x); \\ \frac{T-T_H}{\tau} &= \Delta T_{ад} k(T)(1-x) \end{aligned} \right\}$$

$$\underbrace{T - T_H}_{q_T} = \Delta T_{ад} \underbrace{\frac{k(T)\tau}{1 + k(T)\tau}}_{q_p}$$

Зависимость выделения и отвода теплоты в в проточном адиабатическом реакторе идеального смешения РИС-н от температуры:  $Q_p$  — выделение теплоты в результате химической реакции;  $Q_T$  — отвод теплоты



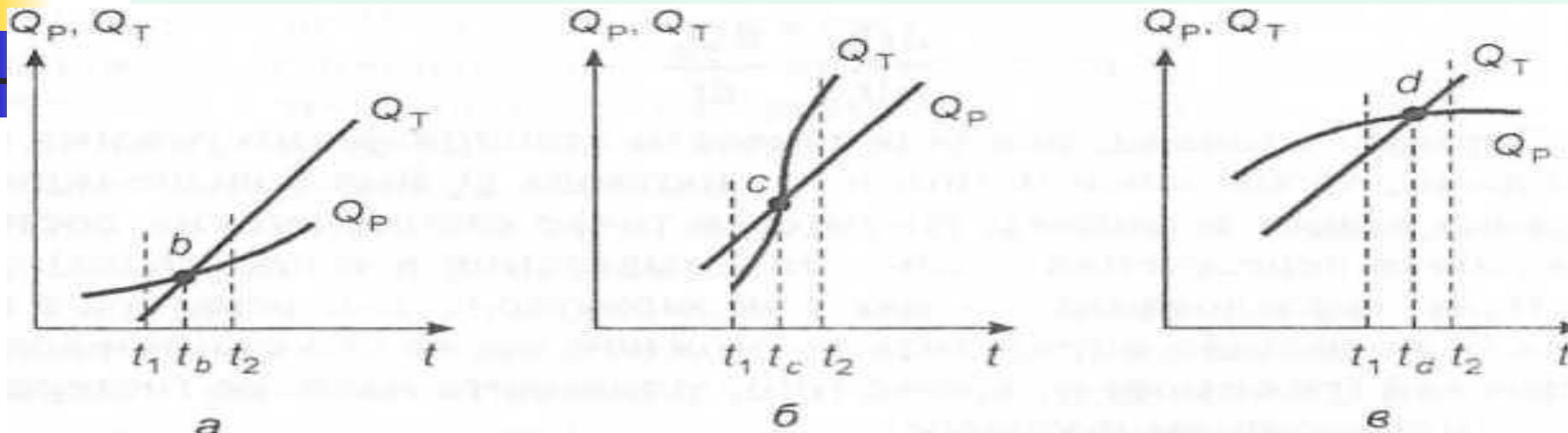
Значения температуры, при которой пересекаются кривые  $Q_T$  и  $Q_p$ , есть решение уравнения. Возможно 1 или 3 решения и, следовательно, **возможно существование одного или трёх стационарных режимов процесса.**

*Положительная обратная связь между нелинейными стадиями процесса обуславливает возможность появления неоднозначности стационарных режимов.*

Стационарные состояния называются устойчивыми, если в них выполняется условие

$$dq_p/dT < dq_T/dT$$

Определение устойчивости стационарных состояний: а — устойчивое; б — неустойчивое; в — устойчивое



Какой режим будет реализован, зависит от предистории пуска процесса.

Если возможно существование трёх режимов и в начале температура в реакторе будет близка к  $t_b$ , то установится низкотемпературный режим  $b$ .

Если при пуске реактора температура в нём будет высокая, близкая к величине адиабатического разогрева, то установится высокотемпературный режим  $d$ .

**Устойчивое стационарное состояние** характеризуется самопроизвольным восстановлением первоначального состояния системы, нарушение которого вызвано внешним возмущением

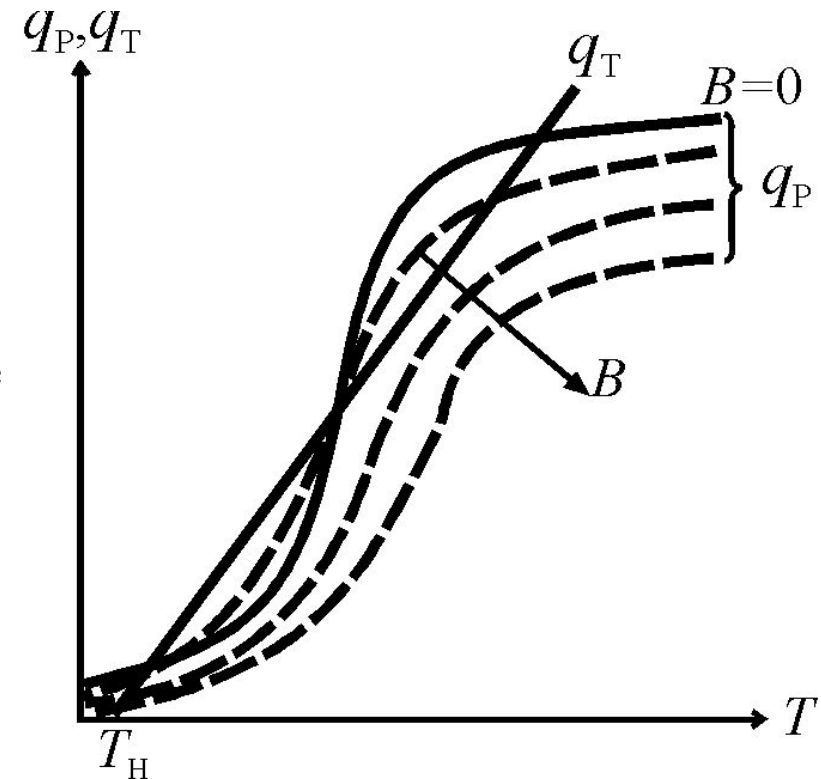


# Процесс с теплоотводом.

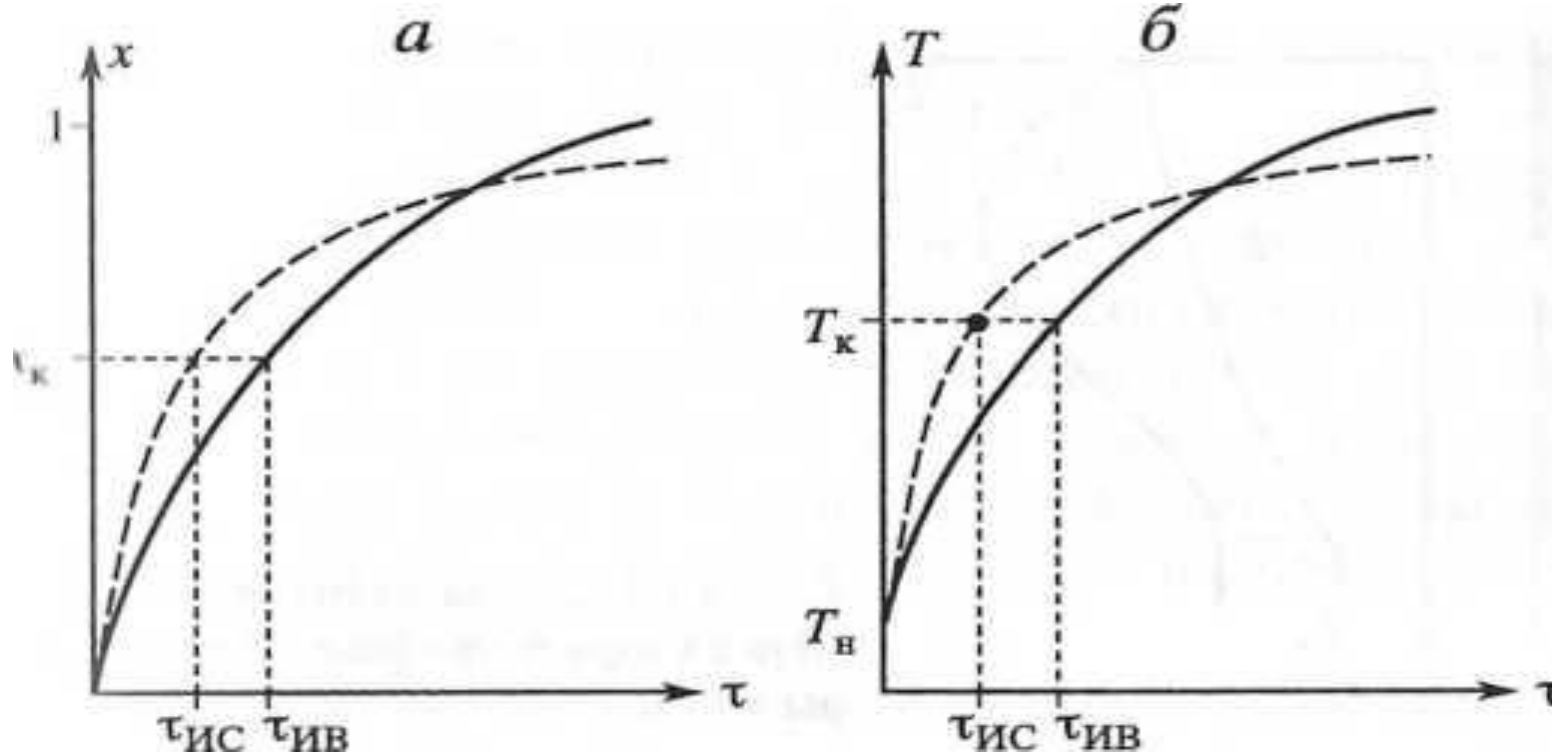
Влияние теплоотвода на возможное число стационарных режимов при протекании реакции первого порядка ( $T_X = T_H$ )

$$\underbrace{T - T_0}_{q_T} = \underbrace{\frac{\Delta T_{\text{ад}}}{1 + B\tau} \cdot \frac{k(T)\tau}{1 + k(T)\tau}}_{q_p}$$

Наличие теплоотвода эквивалентно уменьшению адиабатического разогрева  $\Delta T_{\text{ад}}$ . Сплошными линиями показаны зависимости  $q_p(T)$  и  $q_T(T)$  в адиабатическом режиме ( $B = 0$ ), а пунктиром – в режиме с теплоотводом ( $B \neq 0$ ). Теплоотвод посторонним теплоносителем в проточном реакторе идеального смешения позволяет реализовать стационарный режим процесса в нем до практически любой степени превращения.

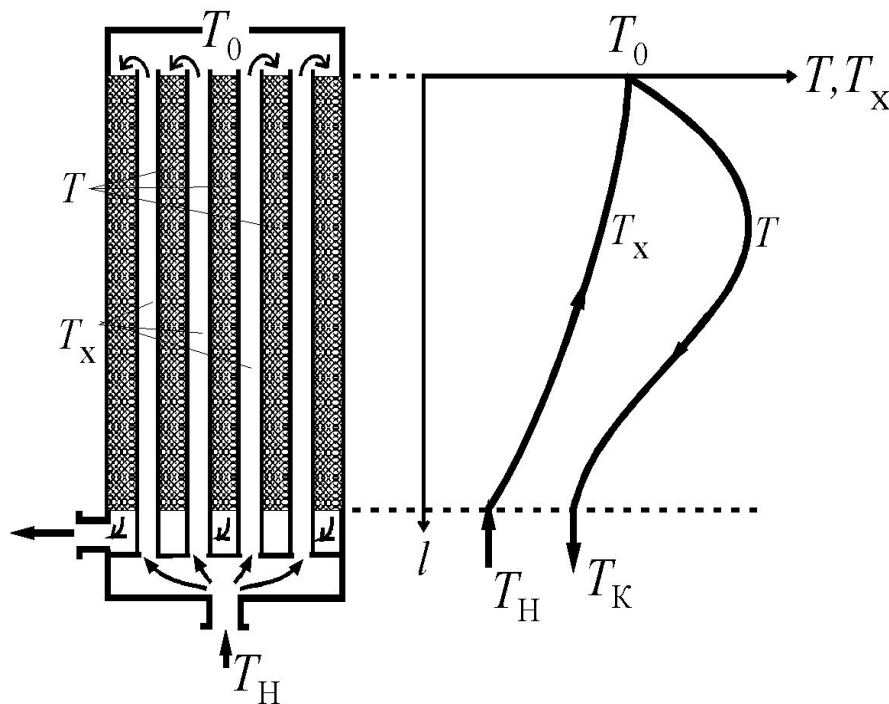


**Зависимость  $x(\tau)$  (а) и  $T(\tau)$  (б) в проточных реакторах идеального вытеснения (сплошные линии) и смешения (штриховые) в экзотермическом адиабатическом процессе**



# Автотермический реактор.

Процесс в таком реакторе – адиабатический (в системе отсутствует посторонний теплоноситель). Разность температур между входным и выходным потоками равна адиабатическому разогреву  $\Delta T_{ад}$ . Такой режим и реактор называют *автотермическими*.



Роль теплоносителя выполняет исходная реакционная смесь, которая подается в трубки реактора и нагревается теплотой, выделяющейся в ходе экзотермической реакции.

## Математическая модель процесса.

Нагрев реакционной смеси в трубках представлен уравнением:

$$-C_{уд} \frac{dT_x}{d\tau_x} = -K_T F_x, \quad (T - T_x)$$

где  $T, T_x$  – температура в реакционной зоне и в трубках соответственно;

$\tau_x = \frac{v_x}{V_0}$  – условное время пребывания потока в трубках;  $v_x$  – объём трубок;

$F_{уд} = \frac{F_T}{v_x}$  – поверхность теплообмена, отнесенная к единице объёма трубок

Перейдём от переменных  $T_x$  и параметра  $F_{x,уд}$  к  $\tau = \frac{V_p}{V_0}$  и  $F_{уд} = \frac{F_T}{V_p}$

Математическая модель  
процесса в автотермическом  
реакторе:

$$\frac{dx}{d\tau} = r(x, T);$$

$$\frac{dx}{d\tau} = \Delta T_{ад} r(x, T) - B(T - T_X);$$

$$\frac{dT_X}{d\tau} = -B(T - T_X);$$

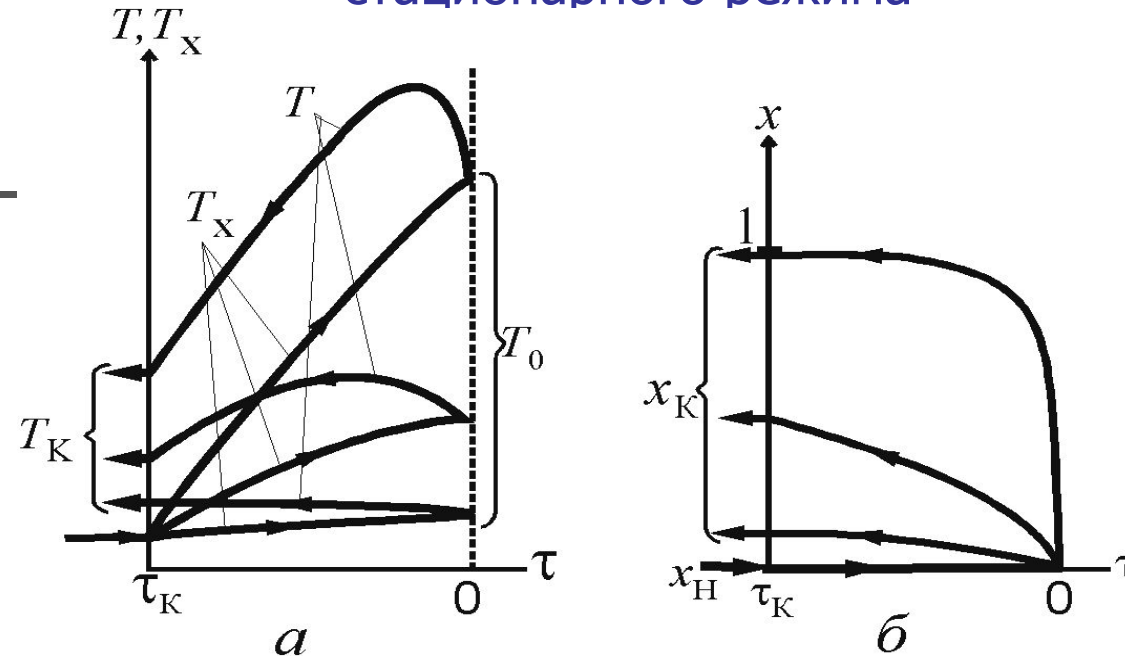
$$\text{при } \tau = 0 \quad T = T_{\text{ж}}, \quad x = x \quad ;$$

$$\text{при } \tau = \tau_k \quad T_X = T_H \quad .$$

*Неоднозначность стационарного  
режима.*

В этом реакторе можно проследить положительную обратную связь по теплу между выходящим и входящим потоками через стенки трубок. При наличии обратной связи при некоторых условиях процесса возможно возникновение неоднозначности стационарного режима – возможность существования трёх стационарных режимов при одной температуре потока на входе в реактор  $T_H$ .

Зависимость изменения температуры (*a*) и степени превращения (*б*) от  $\tau$  в автотермическом реакторе при неоднозначности стационарного режима



- В низкотемпературном стационарном режиме будут реализованы небольшие степени превращения.
- В высокотемпературном стационарном режиме достигается почти полная степень превращения и если разность температур между выходным и входным потоками равна примерно адиабатическому разогреву  $T_K - T_H \approx \Delta T_{ад}$ , то максимальная температура в реакционной зоне может быть в несколько раз больше адиабатического разогрева.
- Средний, наиболее выгодный режим является неустойчивым и потому не реализуемым.