

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

для простой реакции $A \longrightarrow B$

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

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

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

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

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.

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

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

Анализ процесса

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

$$B = 0$$

и система уравнений примет вид:

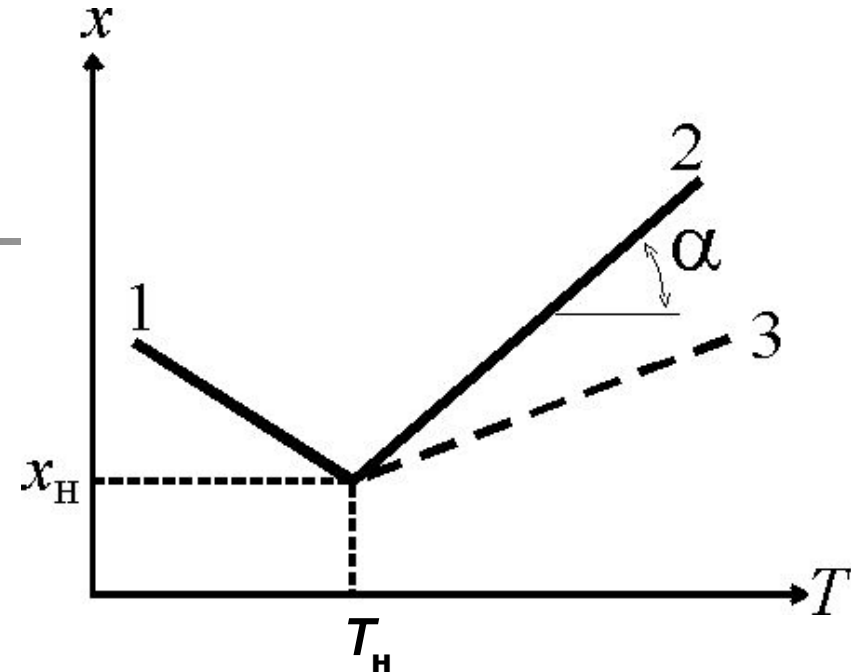
$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= r(x, T) \end{aligned} \right\}$$

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

$$\text{при } \tau = 0 \quad x = x_{\text{н}}, \quad T = T_{\text{н}}$$

$$T - T_{\text{н}} = \Delta T_{\text{ад}} (x - x_{\text{н}}),$$

где $(T - T_{\text{н}})$ – разогрев реакционной смеси до достижения степени превращения x .



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

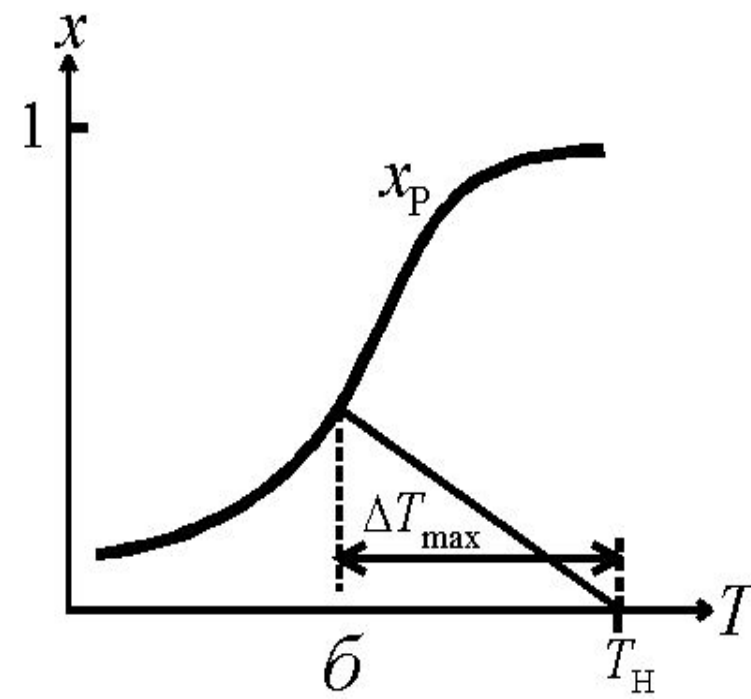
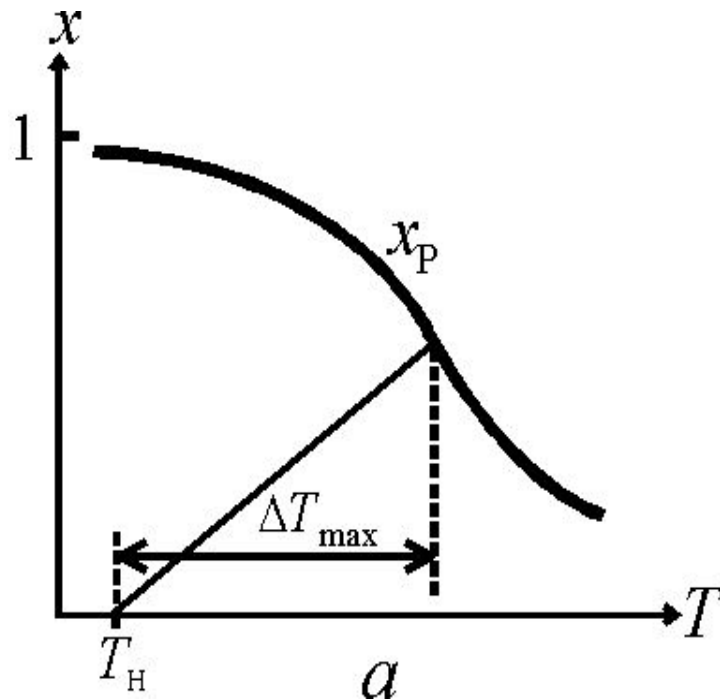
адиабатический процесс в РИВ:

1 – эндотермическая реакция;

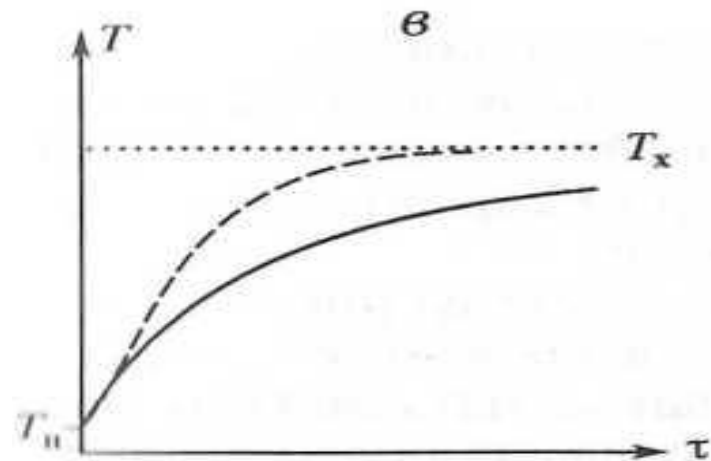
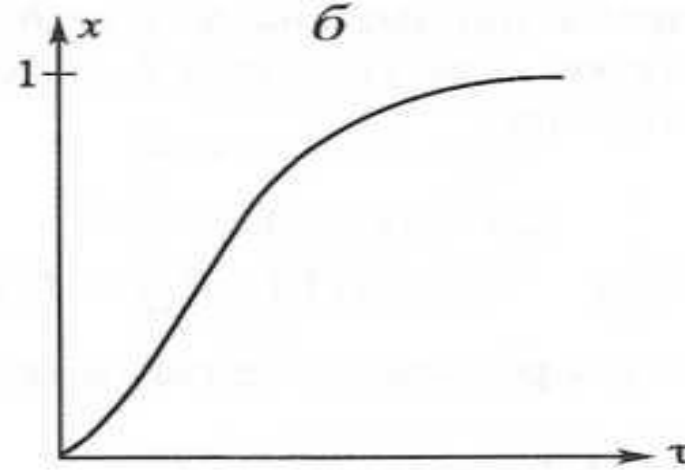
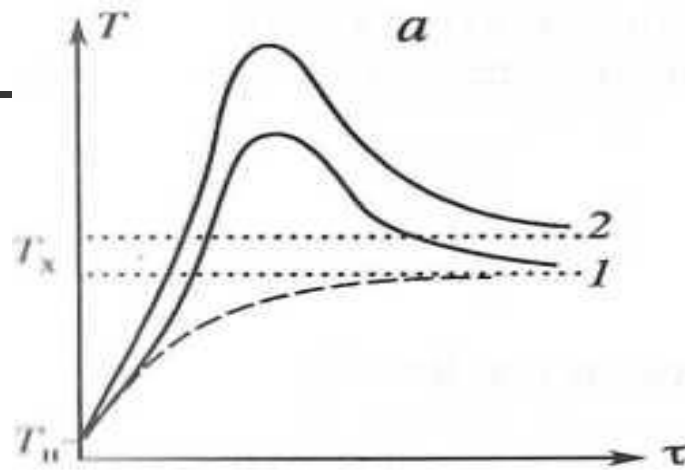
2, 3 – экзотермическая реакция

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

РИВ: обратимая реакция, зависимости x – τ и T – τ 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



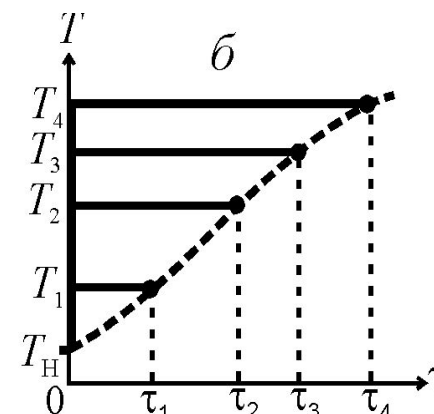
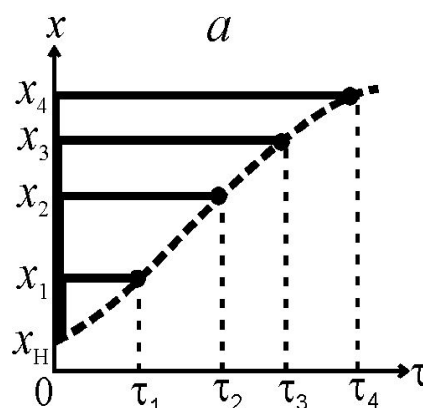
Температурный режим в проточном реакторе идеального смешения РИС-Н

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

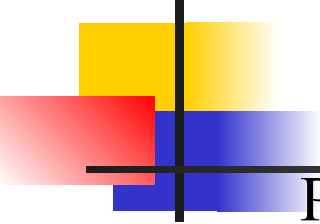
В адиабатическом режиме
(параметр теплоотвода $B = 0$):

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

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



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



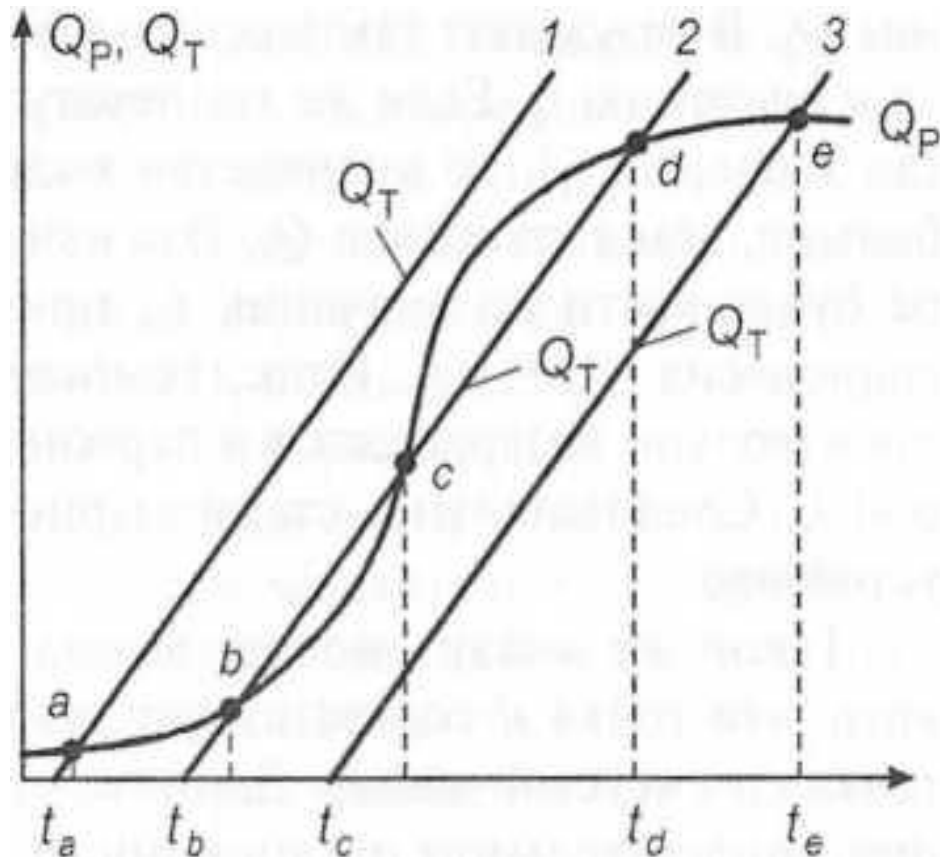
Число и неоднозначность стационарных режимов

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

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

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

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



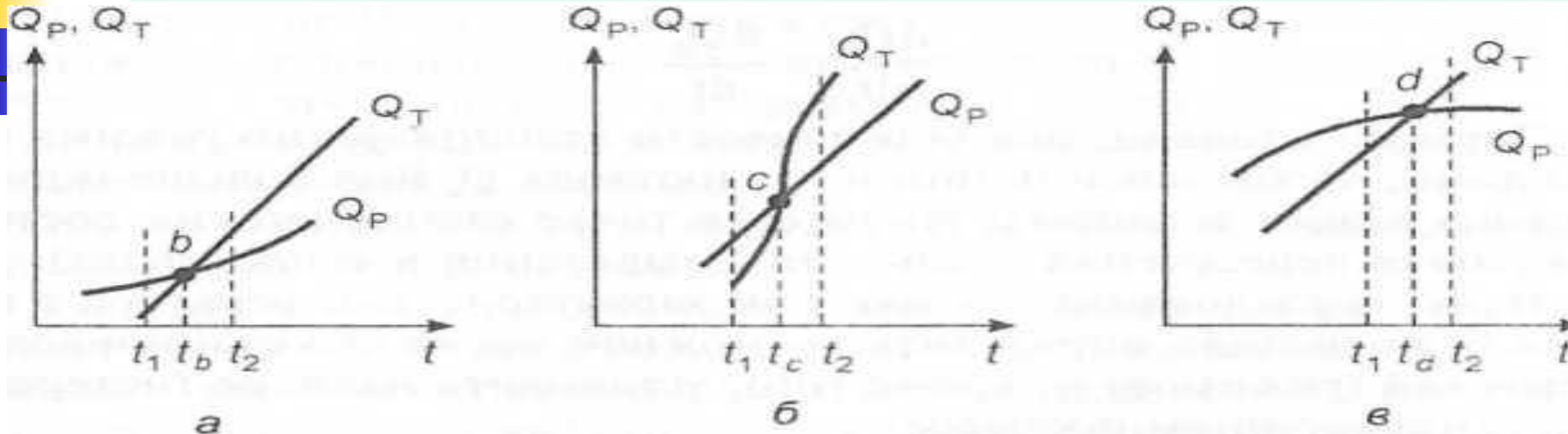
Значения температуры, при которой пересекаются кривые Q_T и Q_p , есть решение уравнения. Возможно 1 или 3 решения и, следовательно, **возможно существование одного или трёх стационарных режимов процесса.**

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 .

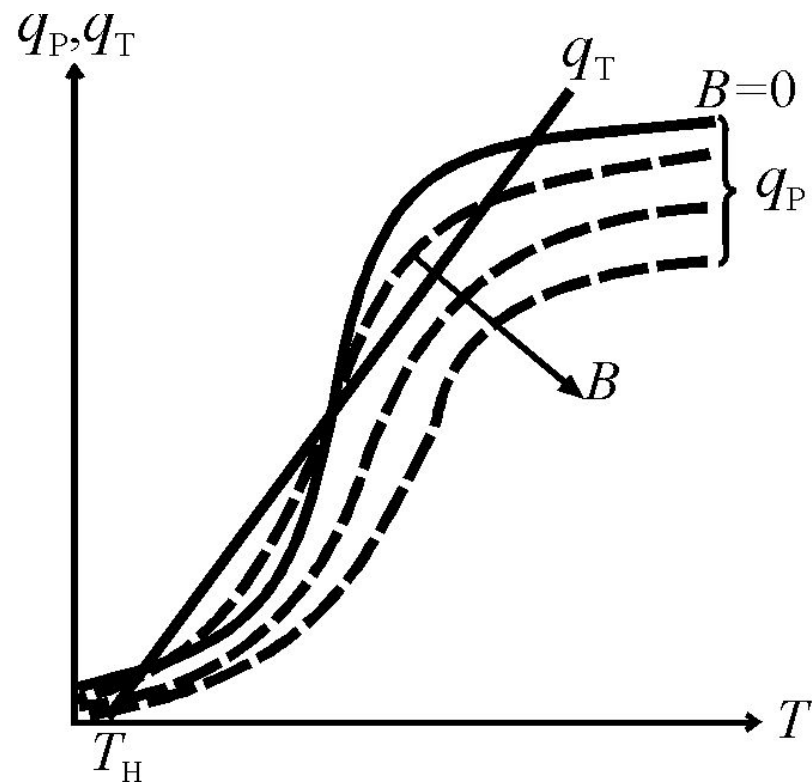
Устойчивое стационарное состояние характеризуется самопроизвольным восстановлением первоначального состояния системы, нарушение которого вызвано внешним возмущением

Процесс с теплоотводом.

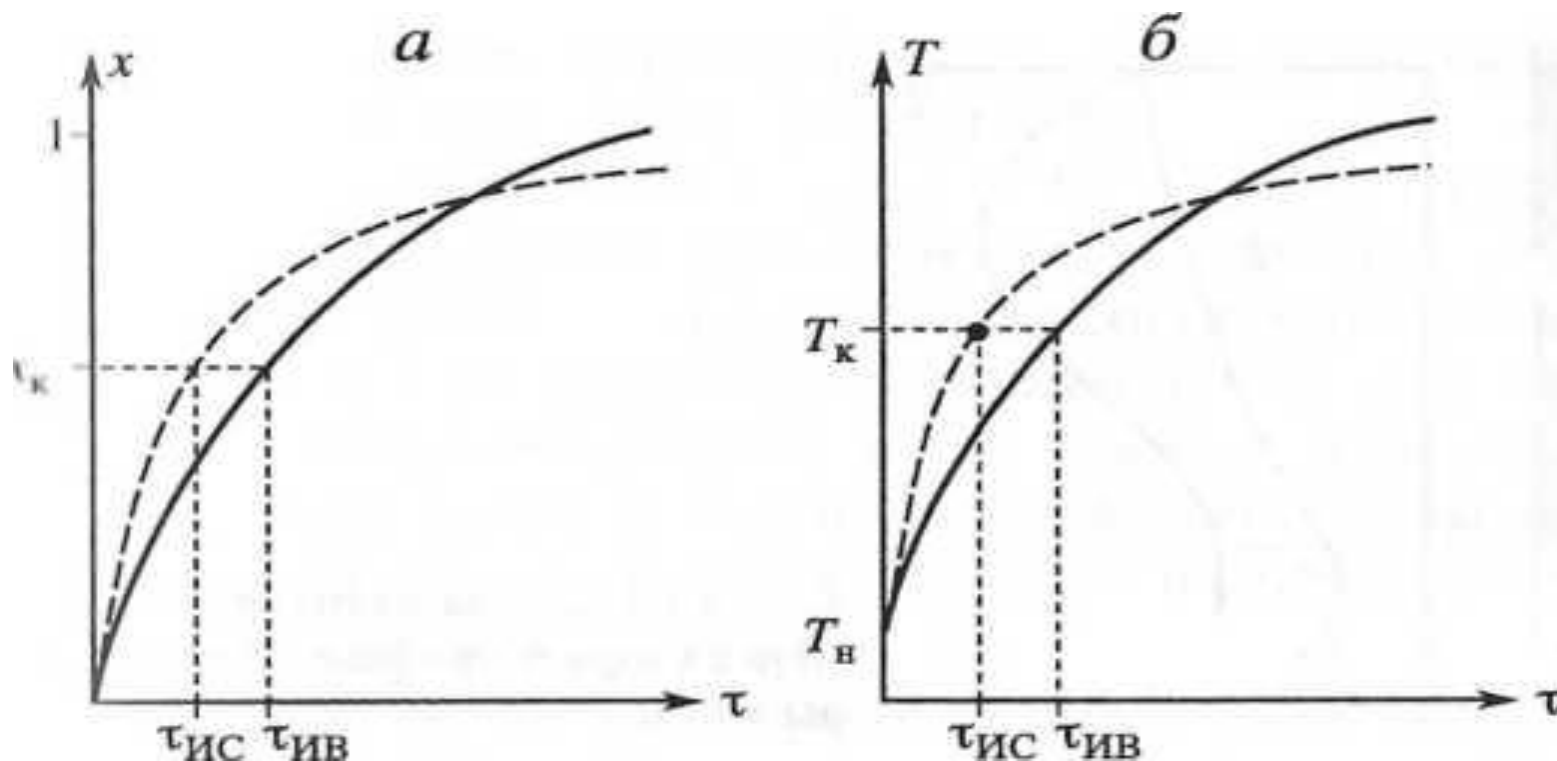
Влияние теплоотвода на возможное число стационарных режимов при протекании реакции первого порядка ($T_X = T_H$)

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

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.

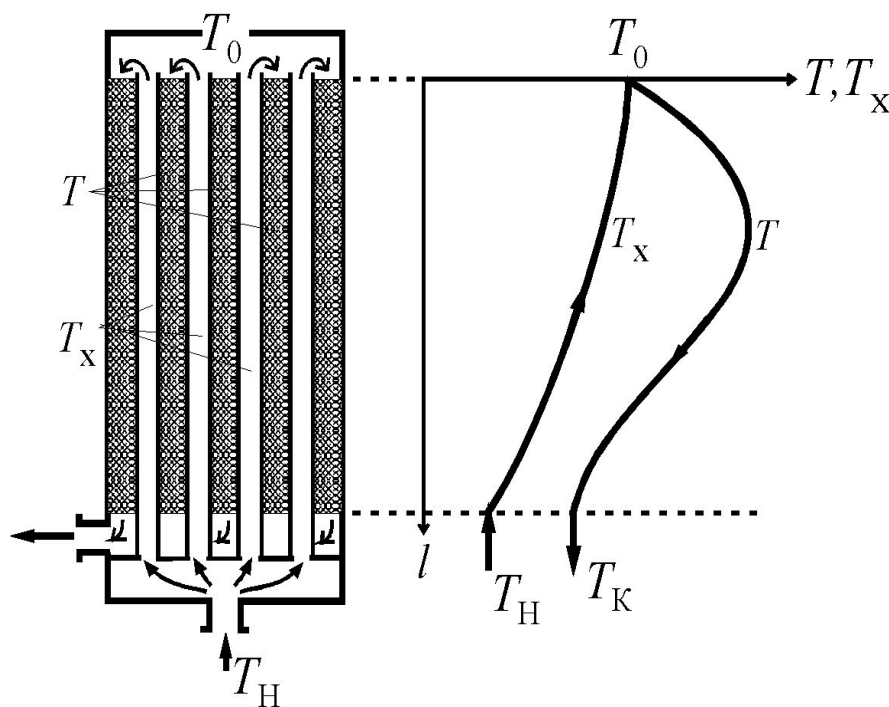


Зависимость $x(\tau)$ (а) и $T(\tau)$ (б) в проточных реакторах идеального вытеснения (сплошные линии) и смешения (штриховые) в экзотермическом адиабатическом процессе



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 – объем трубок;

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

Перейдём от переменных τ_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:

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

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

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

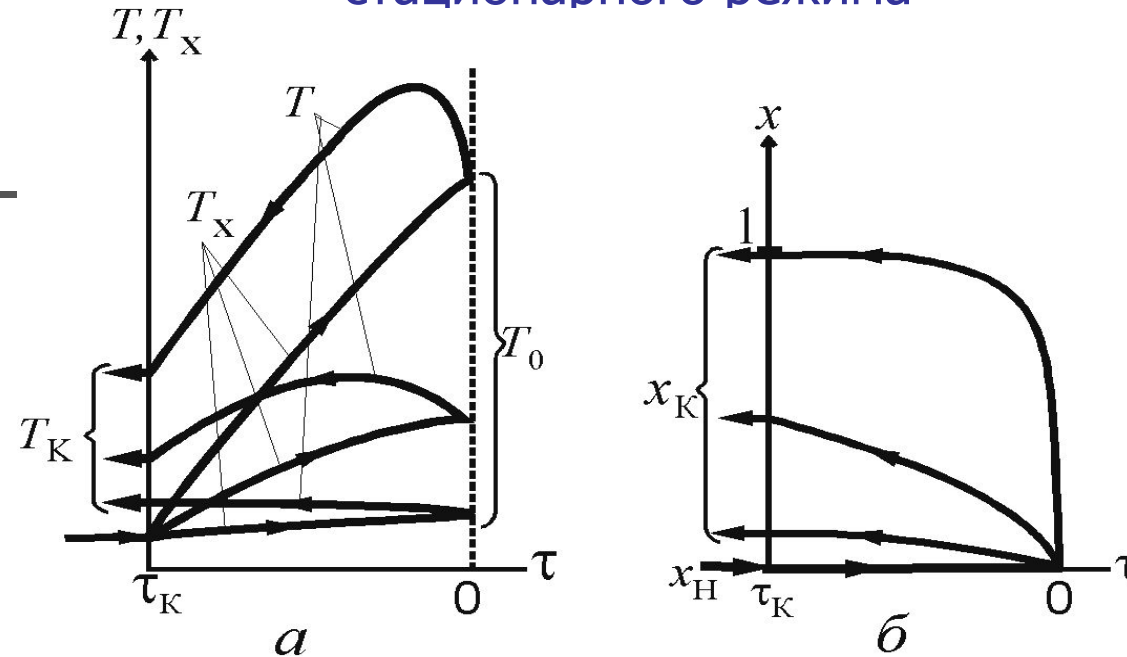
$$\text{при } \tau = 0 \quad T = T_{\text{ж}}, \quad x = x \quad ;$$

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

*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 (а) и степени превращения (б) от τ 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.