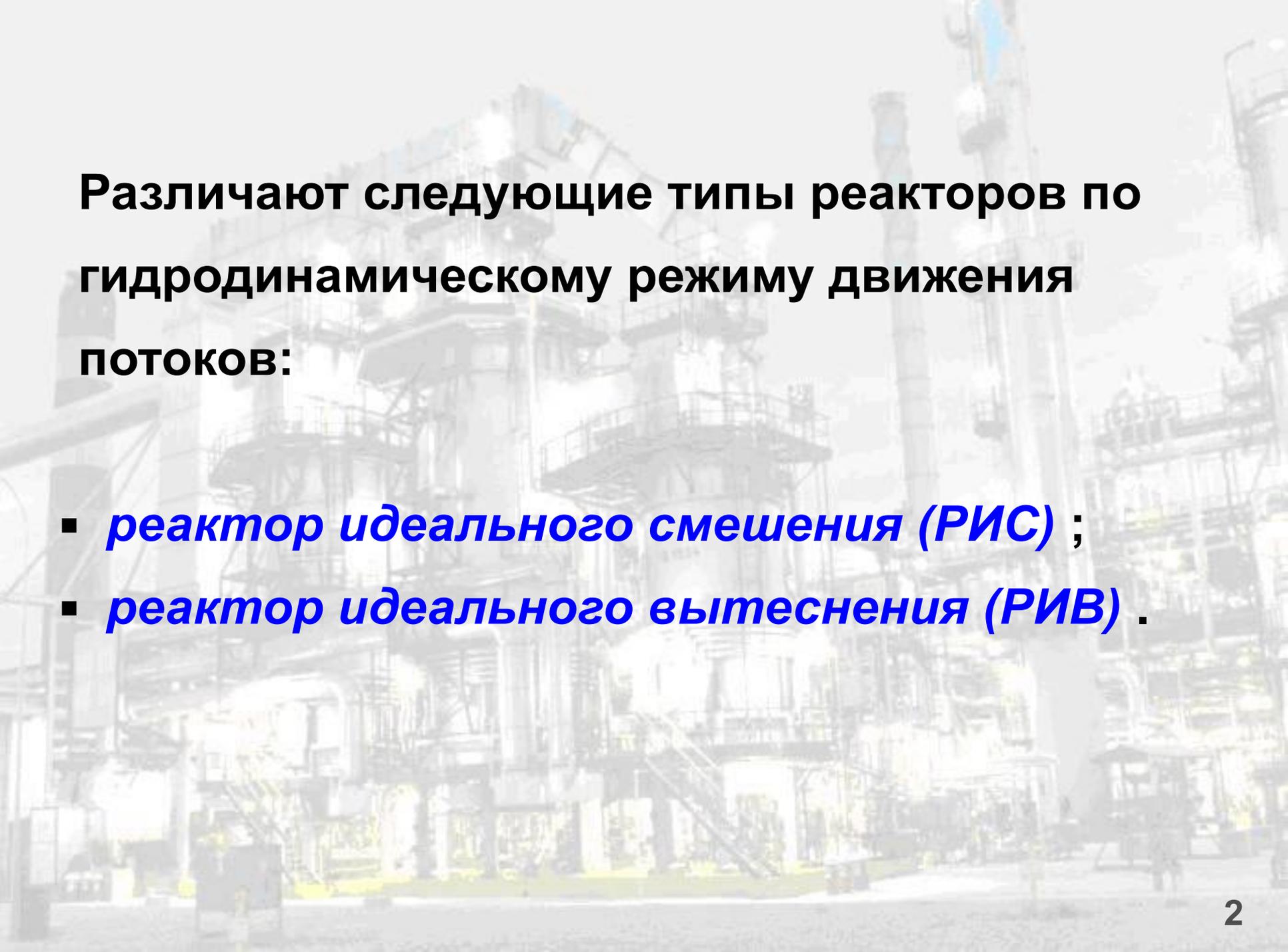


# Лекция № 2

## Гидродинамические модели реакторов

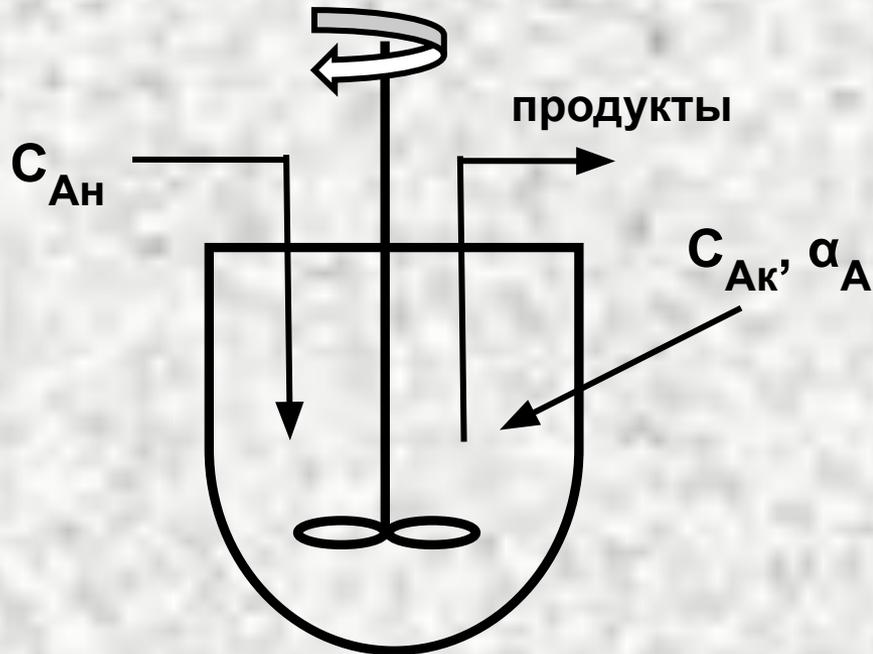




**Различают следующие типы реакторов по гидродинамическому режиму движения потоков:**

- ***реактор идеального смешения (РИС) ;***
- ***реактор идеального вытеснения (РИВ) .***

# Реактор идеального смешения периодического действия (РИС-П)



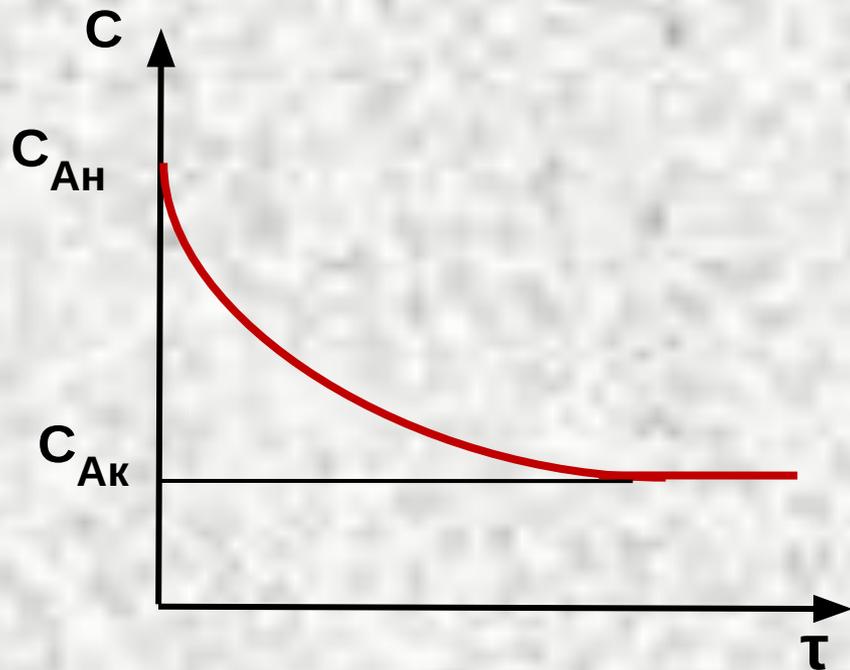
Время одного цикла равно:

$$T_{\text{ЦИКЛА}} = T_{\text{ХИМ.Р.}} + T_{\text{ВСПОМ. ОПЕРАЦИЙ}}$$

- В аппарат с мешалкой загружают реагенты, проводится химическая реакция;
- после достижения заданной степени превращения реагента  $\alpha_A$  процесс останавливают, продукт выгружают;
- в таком реакторе создаётся интенсивное перемешивание, в любой момент времени концентрация реагентов одинакова во всём объёме реактора;
- изменение концентрации происходит за счёт протекания химической реакции;
- время пребывания в зоне реакции  $\tau$  – время от загрузки исходного реагента до выгрузки продуктов реакции.

# Изменение концентрации по времени и месту в РИС-П

Изменение концентрации по времени



Изменение концентрации по месту



# Изменение скорости химической реакции в РИС-П

Скорость хим. реакции выражается законом действия масс:



$$r = k \cdot C_A^n \cdot C_B^m$$

где  $k$  – константа скорости реакции;

$C_A, C_B$  – концентрации реагентов;

$n, m$  – числа молекул, вступающих в реакцию

Согласно закону действующих масс, скорость пропорциональна концентрации реагирующих веществ, возведённых в степень стехиометрических коэффициентов.

Константа скорости выражается **уравнением Аррениуса**, которое показывает зависимость константы скорости от температуры:

$$k = k_0 \cdot e^{-E/RT}$$

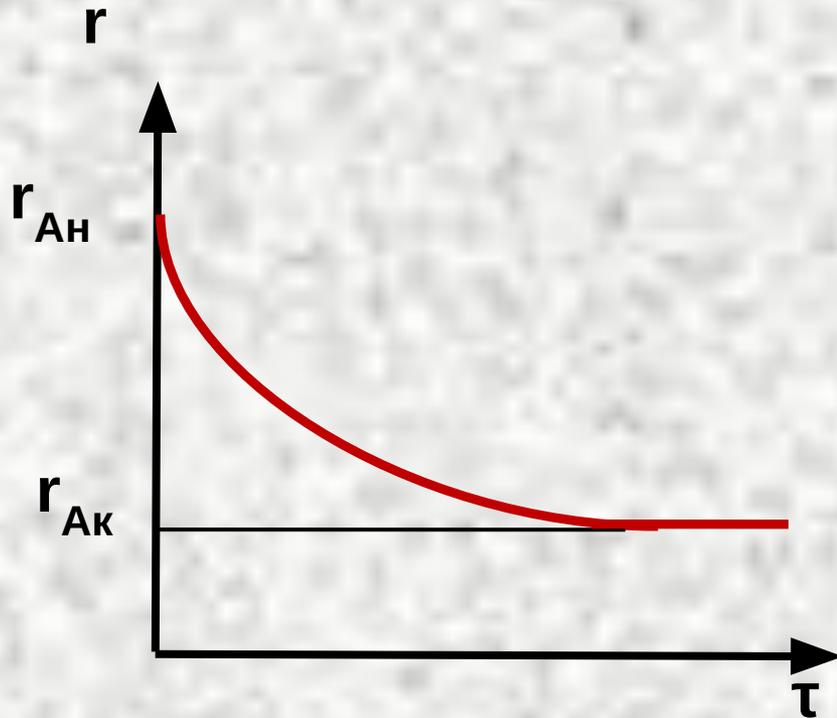
тогда  $r = k_0 \cdot e^{-E/RT} \cdot C_A^n \cdot C_B^m$

где  $k_0$  – предэкспонента, характеризующая число молекул, вступающих во взаимодействие;

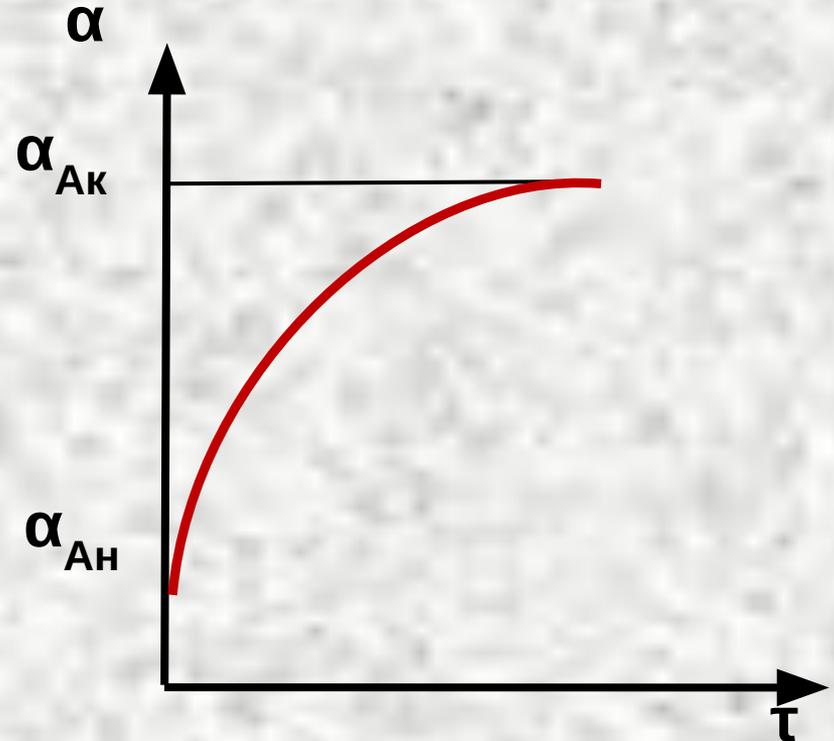
$E$  – энергия активации, это минимальная энергия, которая необходима, чтобы произошла реакция.

# Изменение скорости и конверсии в РИС-П

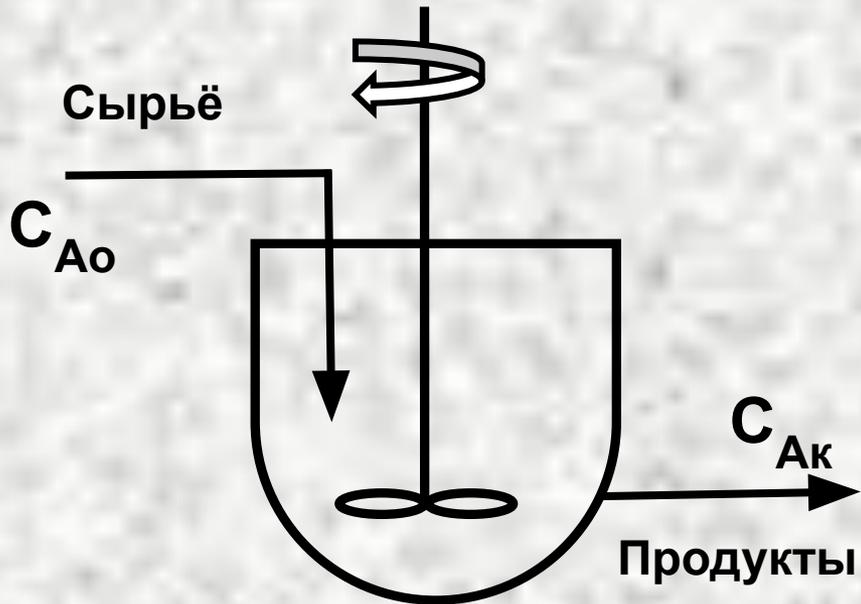
Изменение скорости



Изменение конверсии



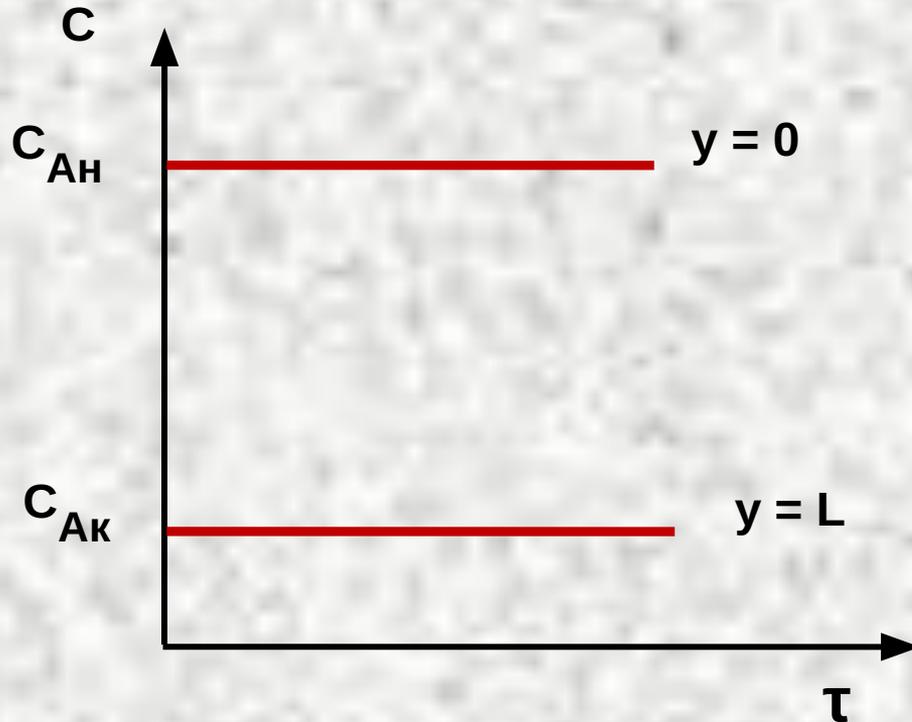
# Реактор идеального смешения непрерывного действия РИС-Н



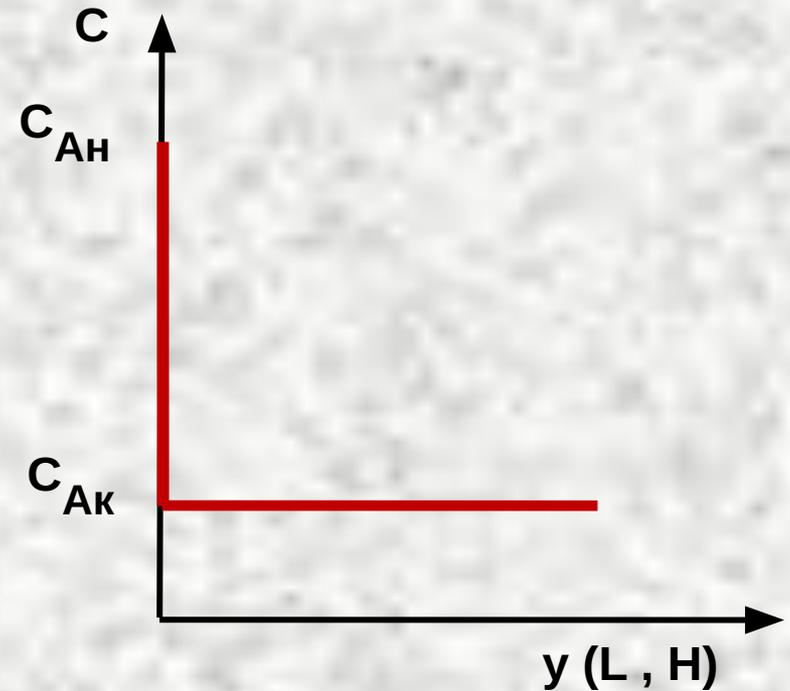
- Реактор идеального смешения непрерывный РИС-Н представляет собой аппарат с мешалкой, в который непрерывно подают реагенты, а также непрерывно выводят из него продукты реакции;
- благодаря интенсивному перемешиванию потоков реагентов в реакторе мгновенно устанавливаются по всему объёму реактора одинаковая концентрация  $C_{Ak}$ , равная её концентрации на выходе;
- для РИС-Н характерным является отсутствие градиента параметров как

# Изменение концентрации по времени и месту в РИС-Н

Изменение концентрации по времени



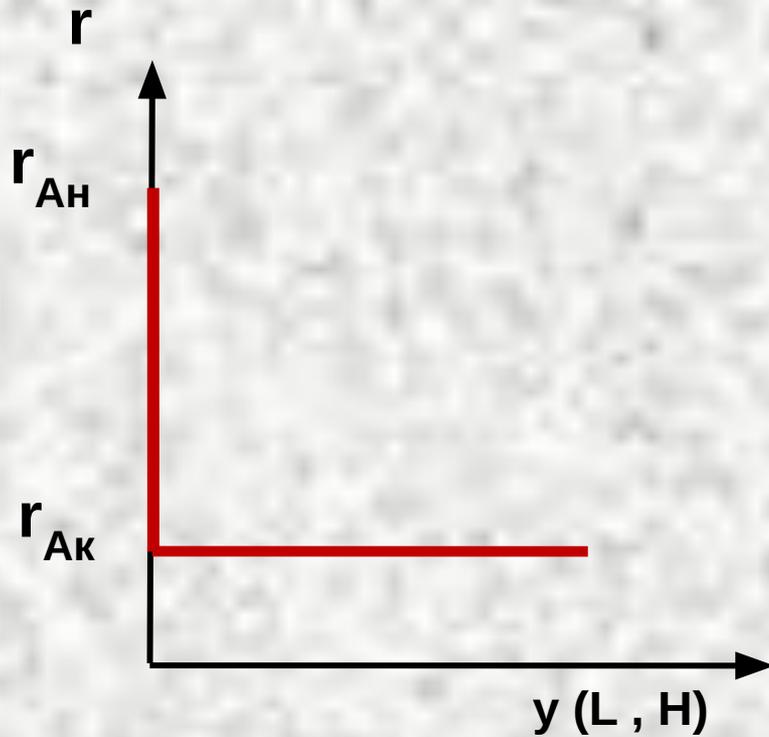
Изменение концентрации по месту



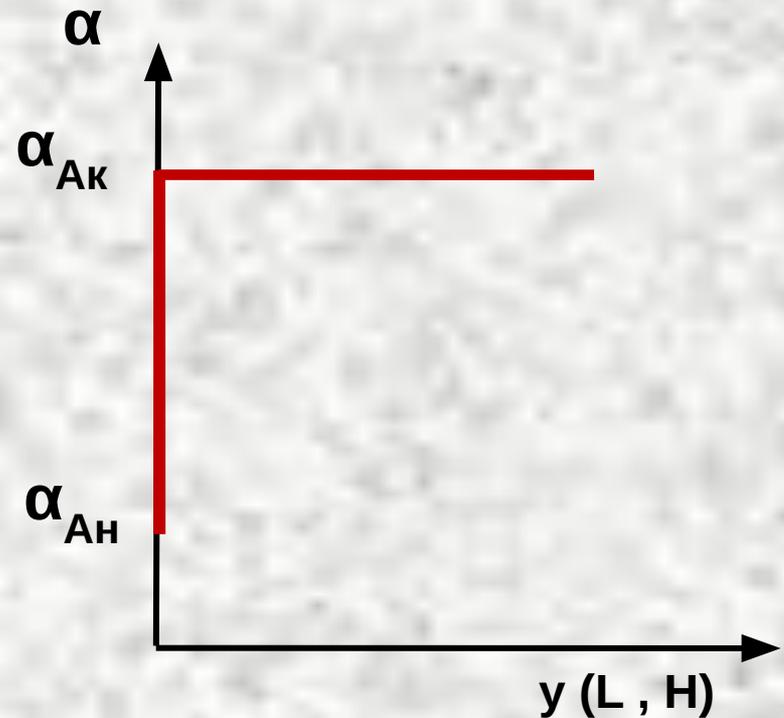
$y$  – координата места;  $L$  – длина реактора;  $H$  – высота реактора

# Изменение скорости и конверсии в РИС-Н

Изменение скорости



Изменение конверсии



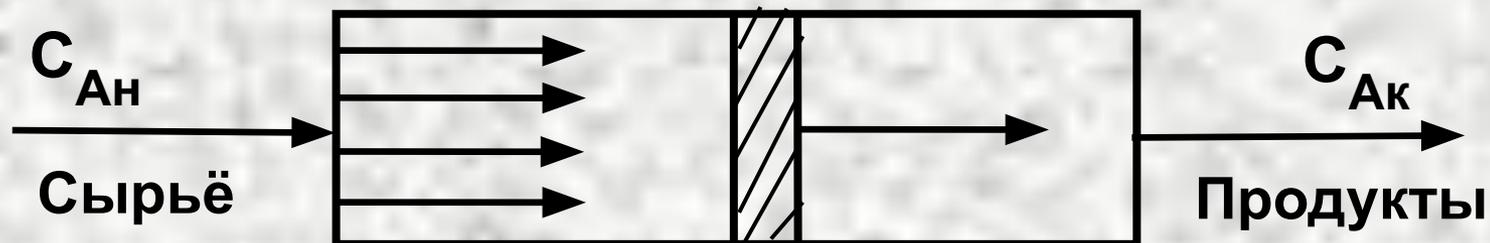
## Реактор идеального смешения непрерывного действия РИС-Н

- **В**еличина перепада начальной концентрации  $C_{A_0}$  до конечной концентрации  $C_{A_K}$  зависит от величины скорости химической реакции ( $r_A$ ), от времени пребывания в зоне реакции  $\tau$ ;
- **Ч**ем больше время пребывания реагентов в реакторе, тем ниже концентрация реагента;
- **Ч**ем выше скорость химической реакции, тем больше будет перепад от  $C_{A_0}$  до  $C_{A_K}$ , тем меньше концентрация  $C_{A_K}$  в реакторе;
- **П**о всему объёму реактора одинакова также и степень превращения  $\alpha_A$ , и скорость реакции  $r_A$ .

## Реактор идеального вытеснения (РИВ)

**РИВ** является проточным реактором.

Представляет собой трубчатый реактор с большим соотношением между длиной реактора и диаметром  $L / D > 20$ .

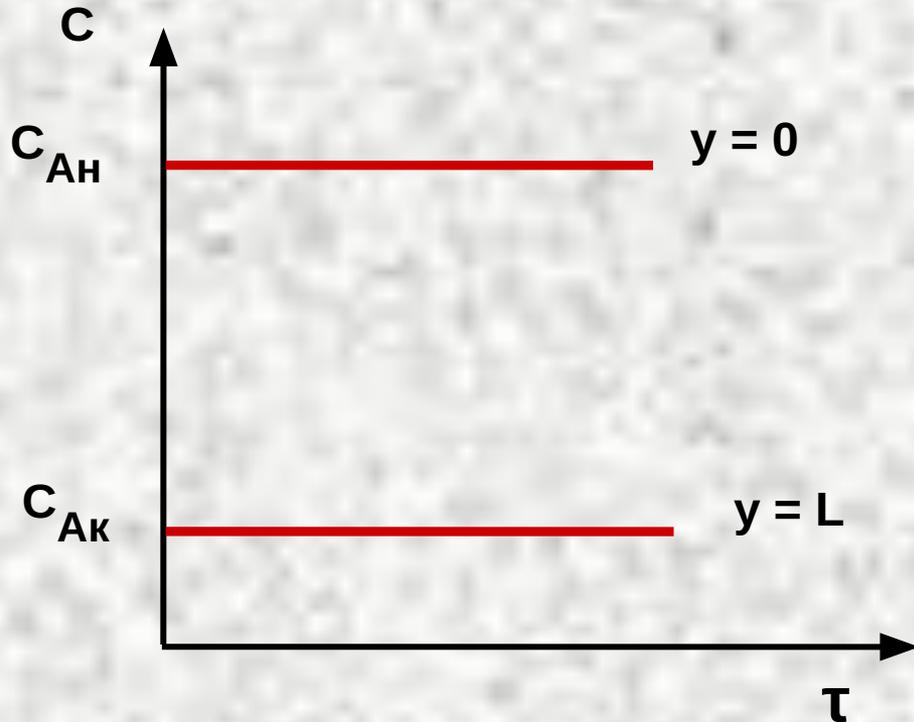


В **РИВ** подаются исходные реагенты, превращающиеся по мере перемещения их по длине реактора в продукты реакции.

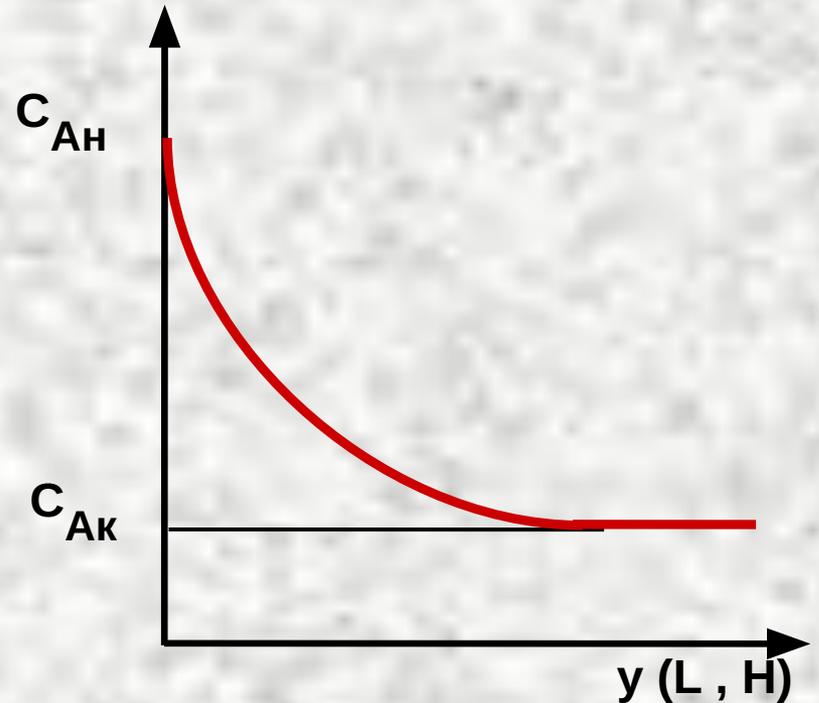
- **В** реакторе непрерывного вытеснения элемент объёма движется, не смешиваясь с предыдущим или последующим. Состав элемента объёма изменяется последовательно по длине реактора вследствие химической реакции.
- Гидродинамический режим в **РИВ** характеризуется тем, что любая частица потока движется только в направлении основного потока прямолинейно и равномерно. В нём нет продольного перемешивания, нет поперечного перемешивания. Такой режим называют поршневым.
- Поток движется равномерно, вытесняя всё, что находится перед ним, и превращаясь в продукты реакции. Реагенты **не смешиваются** с продуктами реакции.

# Изменение концентрации по времени и месту в РИВ

Изменение концентрации по времени



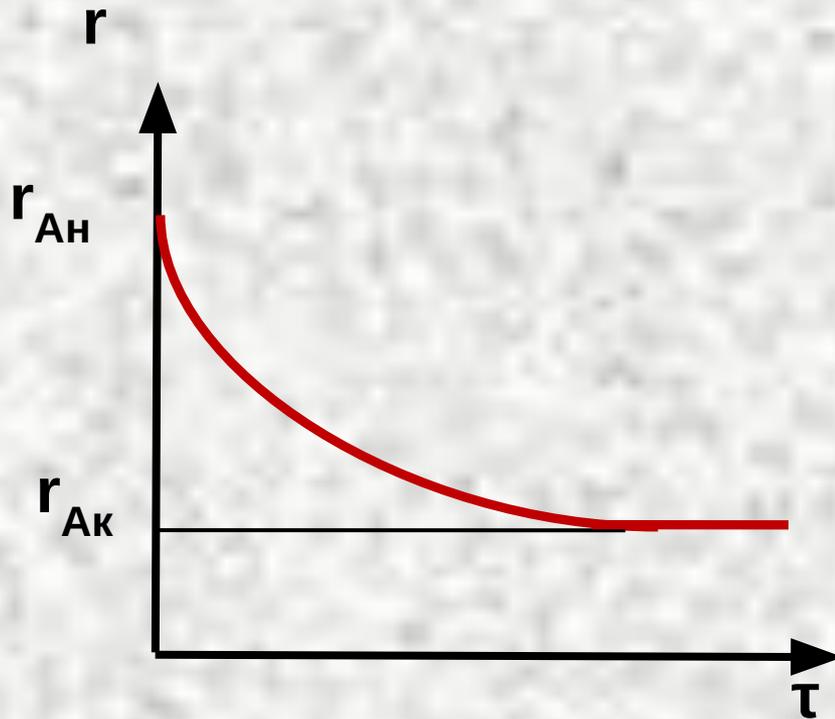
Изменение концентрации по месту



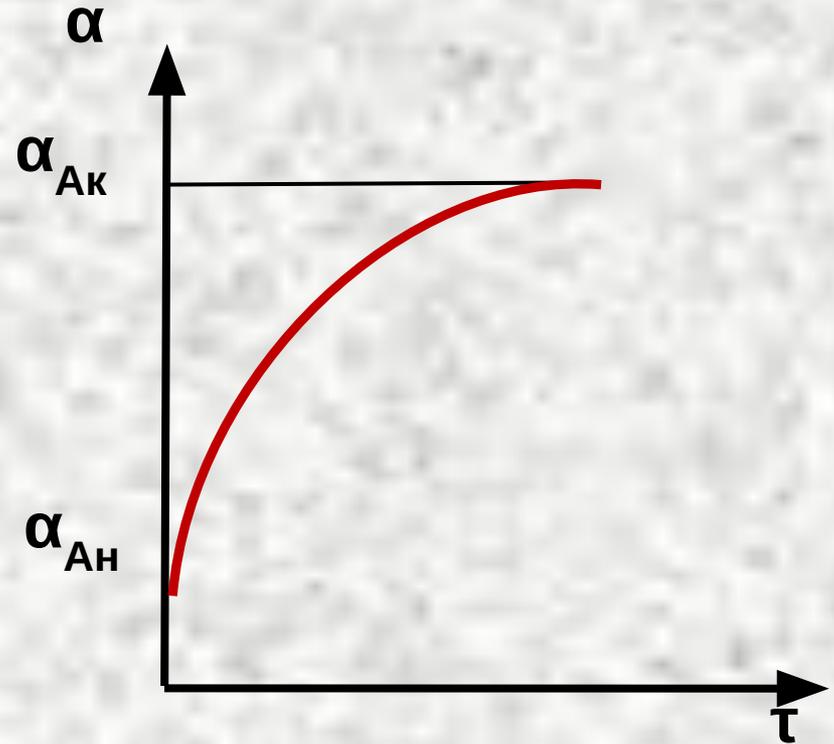
$y$  – координата места;  $L$  – длина реактора;  $H$  – высота реактора

# Изменение скорости и конверсии в РИВ

Изменение скорости

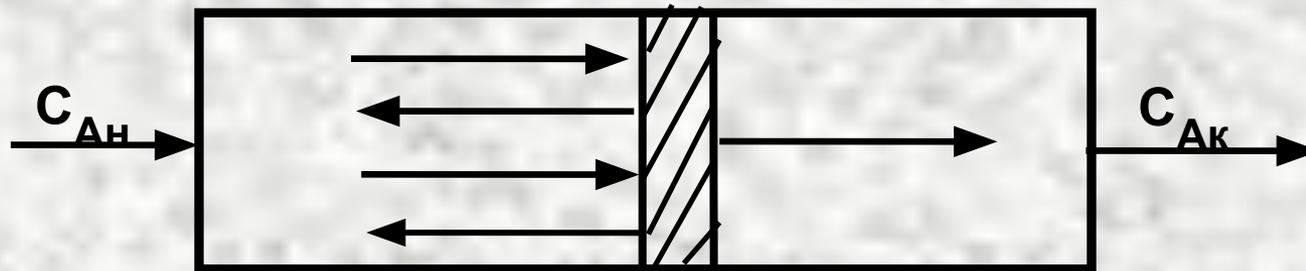


Изменение конверсии



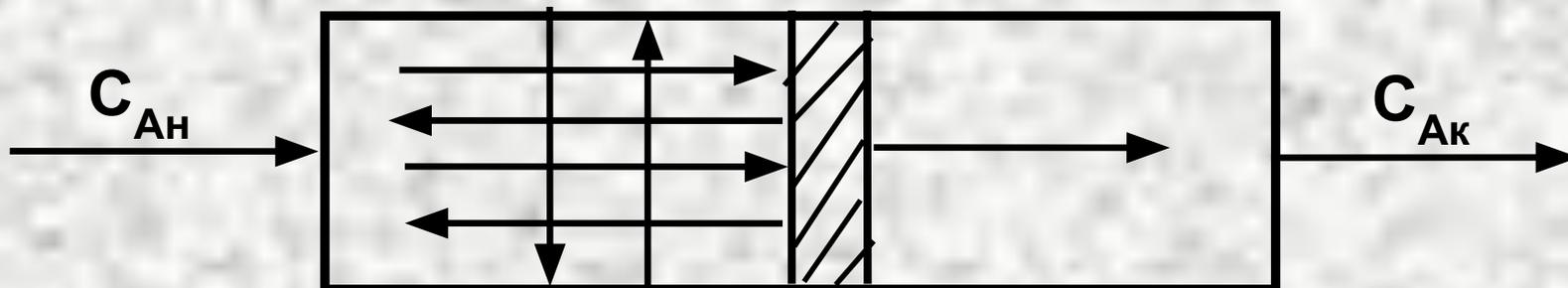
## Диффузионно-однопараметрическая модель (ДОПМ)

В реальном реакторе гидродинамика отличается от идеального, помимо поршневого движения основного потока по длине реактора возможно продольное и радиальное перемешивание.



Модель вытеснения, осложнённая продольным (обратным) перемешиванием.

## Диффузионно-двупараметрическая модель (ДДПМ)



Модель вытеснения, осложнённая продольным (обратным) и радиальным (поперечным) перемешиванием. Данная модель наиболее близка к реальному реактору.

## Сравнение РИВ и РИС

Решим задачу:

Протекает простая необратимая реакция:



Объёмная скорость  $V_0 = 20$  л/мин;

константа скорости  $k = 0,4$  мин<sup>-1</sup>;

степень превращения  $\alpha = 0,1 \div 0,9$ ;

определить объём **РИС-Н** и **РИВ**

для различных степеней превращения.

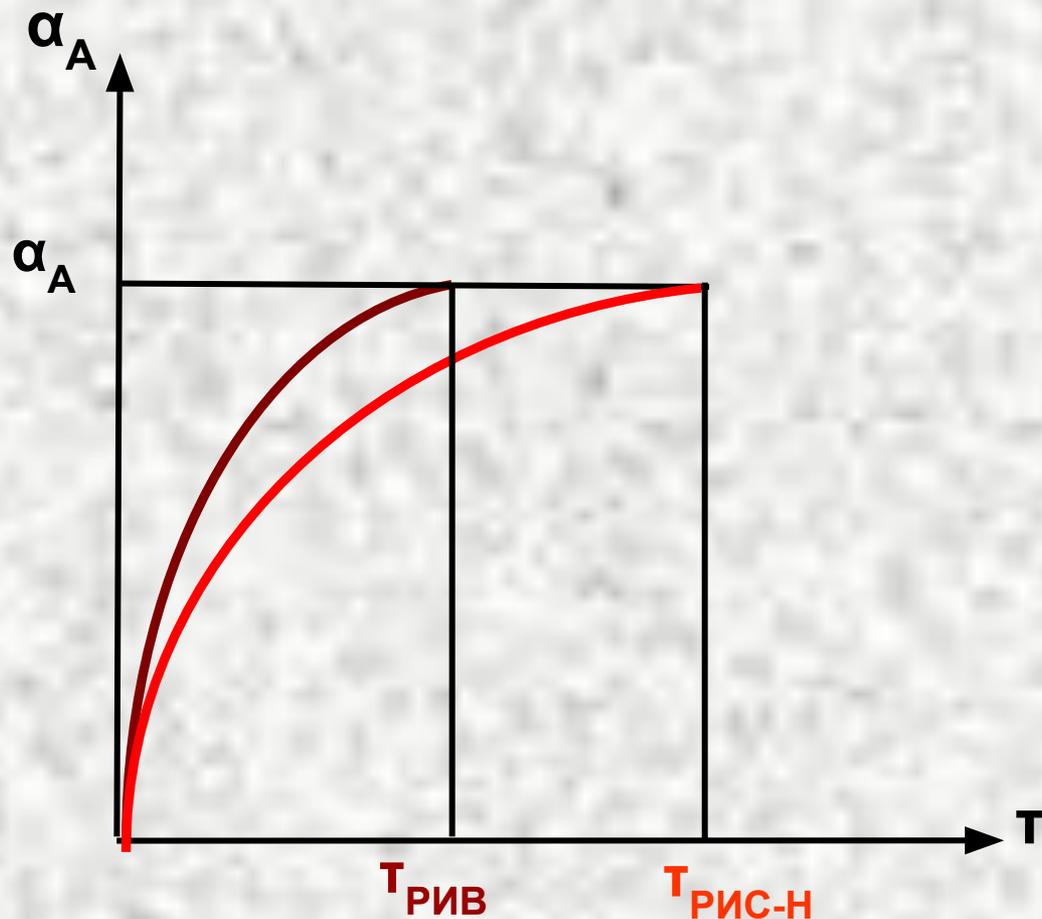
$$\tau = \frac{V_P}{V_0} \frac{\hat{i}áú,ì}{\hat{i}áú,íáÿ} \frac{đåàêòîđà}{ñêîđîñòü} \Rightarrow V_P = \tau \cdot V_0$$

## Сравнение объёмов реакторов РИС-Н и РИВ

$\alpha_A$	<i>РИС-Н</i>		<i>РИВ</i>		$\frac{V_{РИС-Н}}{V_{РИВ}}$
	<i>t</i> , МИН	$V_{РИС-Н}$ , Л	<i>t</i> , МИН	$V_{РИВ}$ , Л	
0,1	0,3	5,9	0,3	5,6	1,05
0,3	1,1	22,6	0,9	18,8	1,20
0,5	2,6	52,6	1,8	36,5	1,44
0,7	6,1	122,8	3,2	63,4	1,94
0,9	23,7	473,7	6,1	121,2	3,91

Чем выше степень превращения, тем больше разница в объёмах реакторов РИС-Н и РИВ

## Сравнение РИВ и РИС

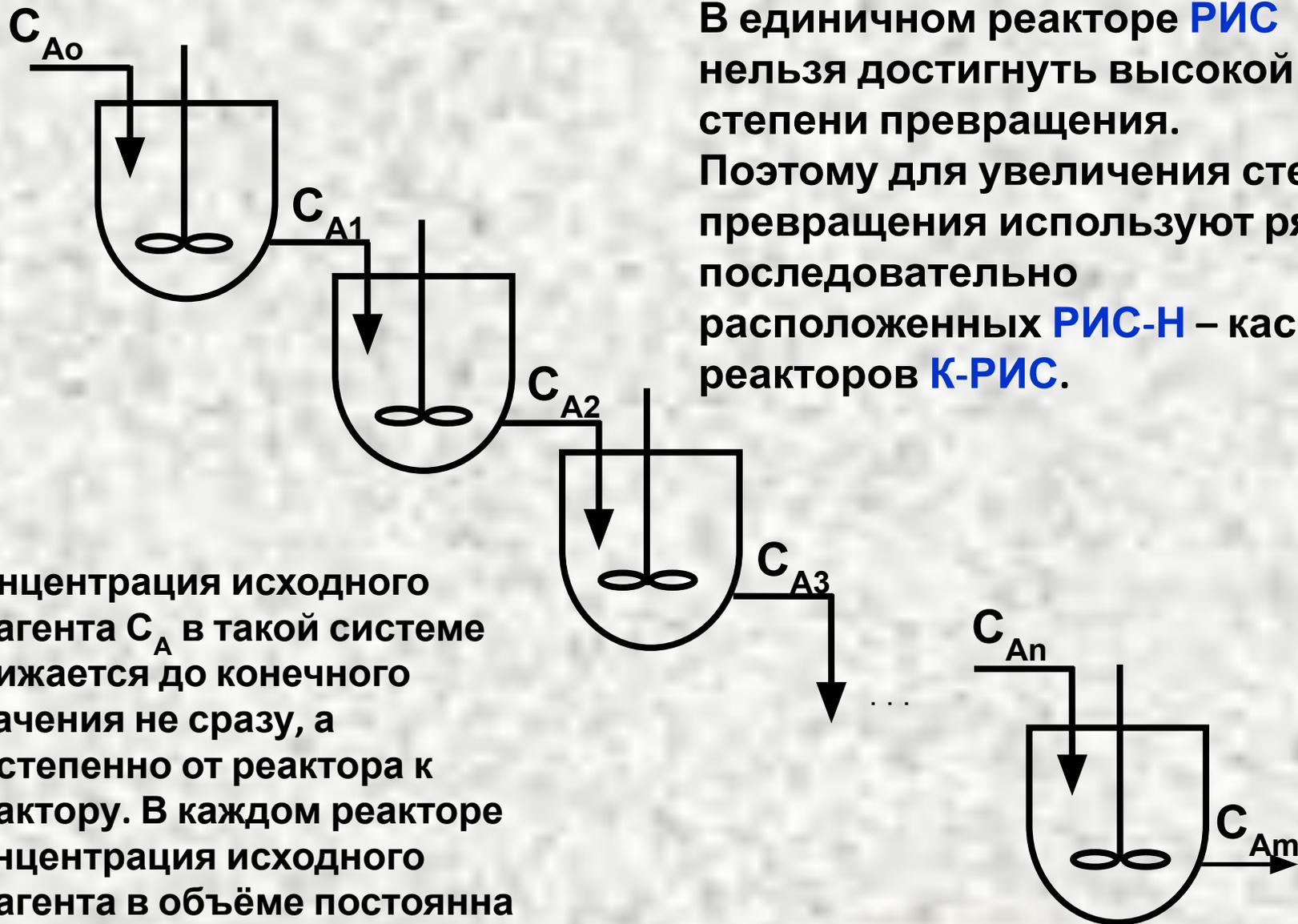


- Тип реактора не имеет значения для определения времени пребывания в зоне реакции  $\tau$ , так как для достижения определённой степени превращения время пребывания не будет одинаково. Тип реактора будет различен.

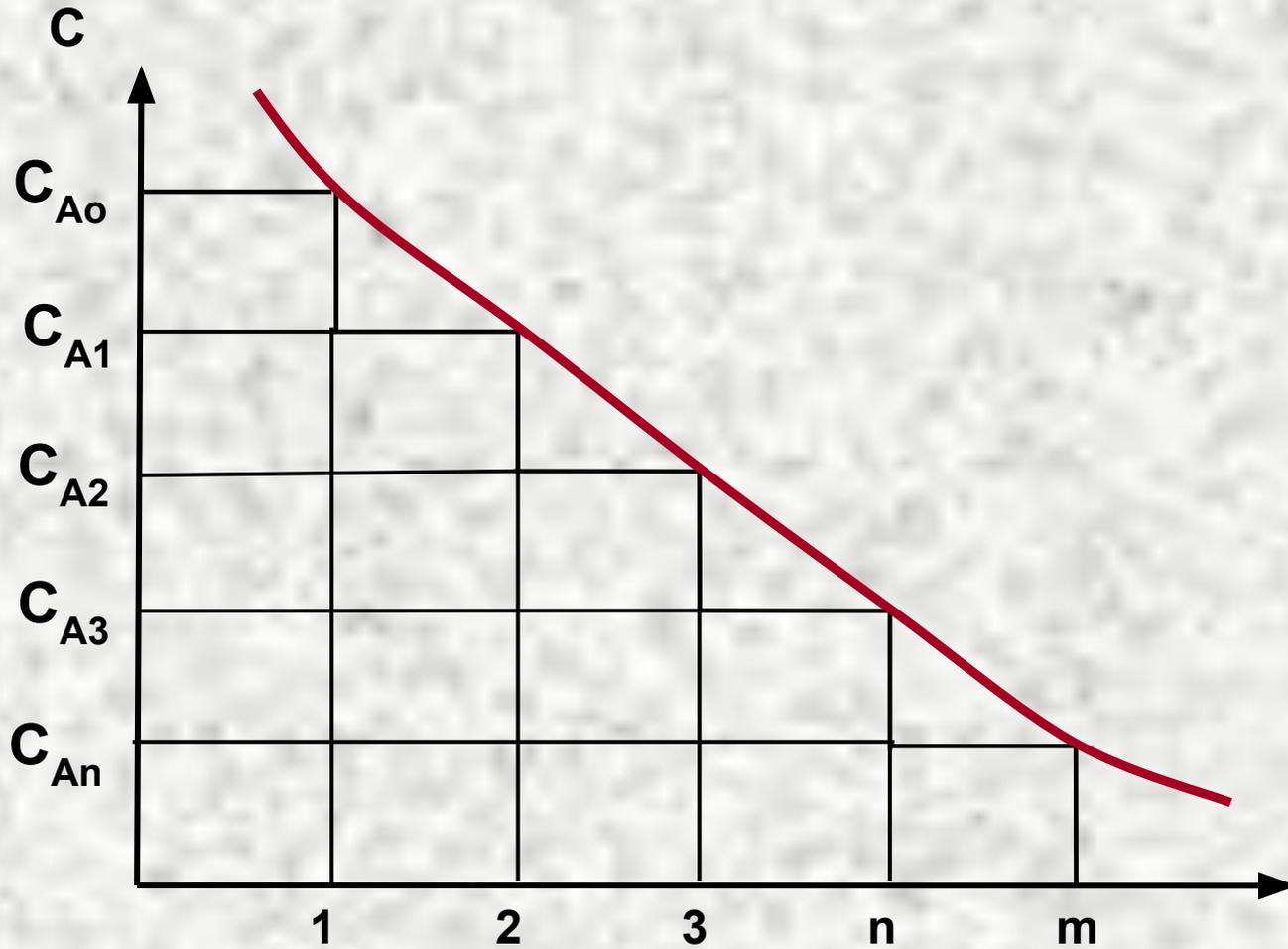
## Каскад реакторов идеального смешения К-РИС

В единичном реакторе РИС нельзя достигнуть высокой степени превращения. Поэтому для увеличения степени превращения используют ряд последовательно расположенных РИС-Н – каскад реакторов К-РИС.

Концентрация исходного реагента  $C_A$  в такой системе снижается до конечного значения не сразу, а постепенно от реактора к реактору. В каждом реакторе концентрация исходного реагента в объёме постоянна и равна концентрации его на выходе из реактора.



**РИС**



**Чем больше реакторов в каскаде, тем ближе к РИВ**

**Рабочая концентрация в каскаде поддерживается выше, чем в единичном реакторе смешения.**

**Если число реакторов будет 8-10, тогда каскад реакторов будет работать как **РИВ**.**

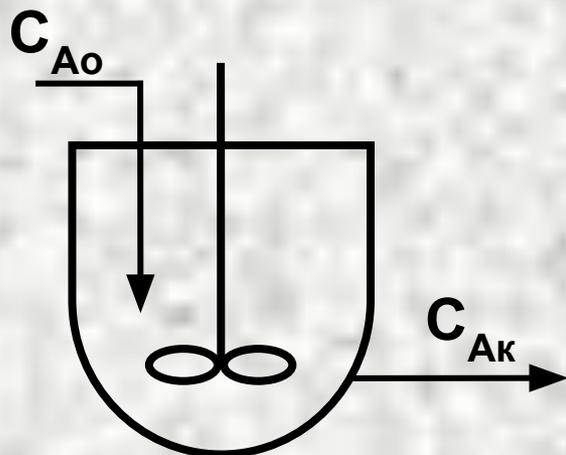
**Расчёт каскада реакторов сводится к определению числа реакторов в каскаде, необходимых для достижения заданной степени превращения  $\alpha_A$ .**

**Общий объём реактора в каскаде будет зависеть**

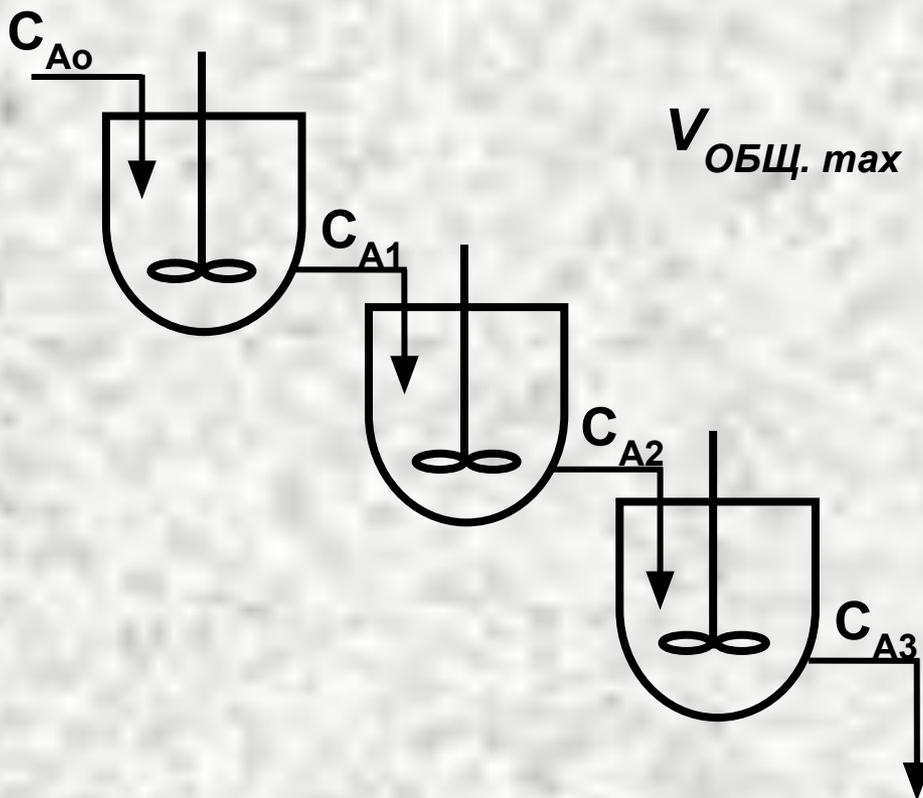
$$V_P = f(m, \alpha_A).$$

**С увеличением числа реакторов общий объём каскада реакторов, необходимых для достижения заданной  $\alpha_A$ , уменьшается. Особенно значительно это уменьшение при высоких степенях превращения.**

$$\alpha_A = 0,8$$

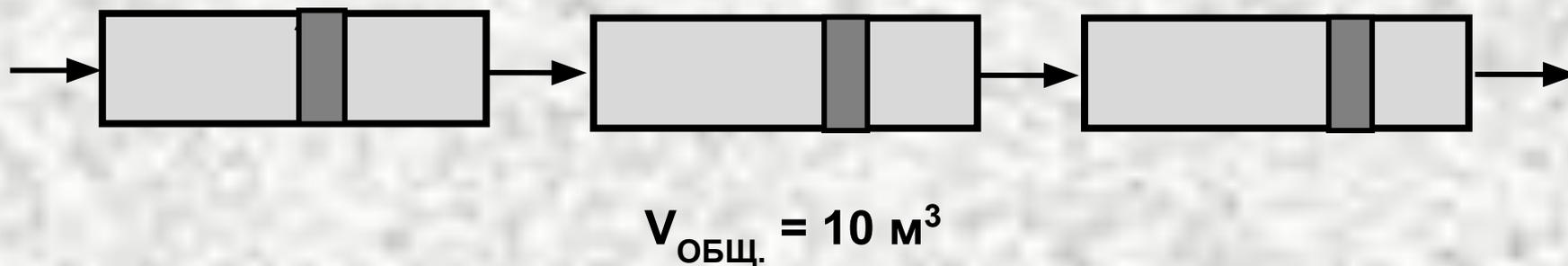


$$V = 10 \text{ m}^3$$

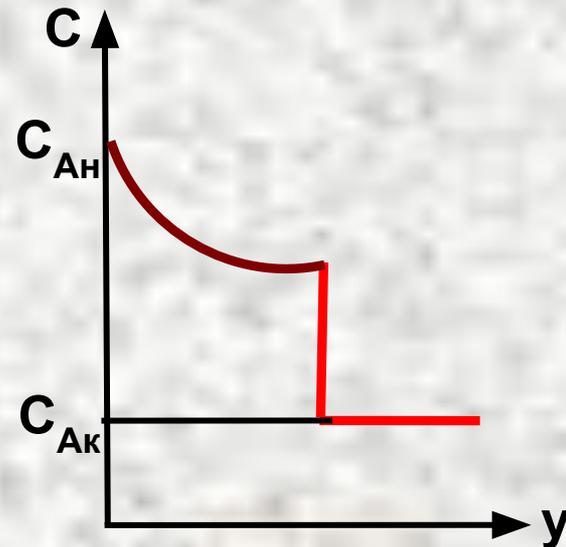
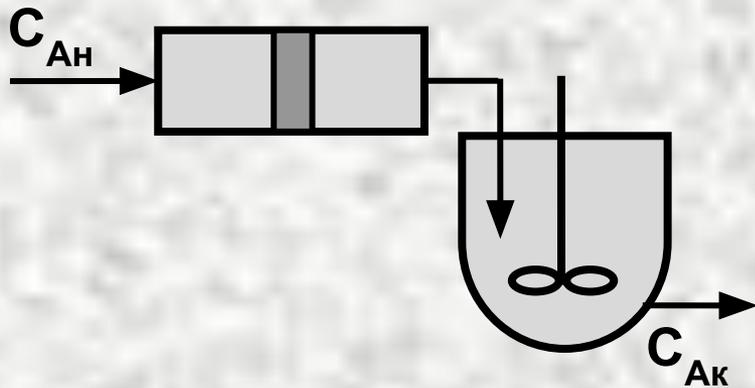
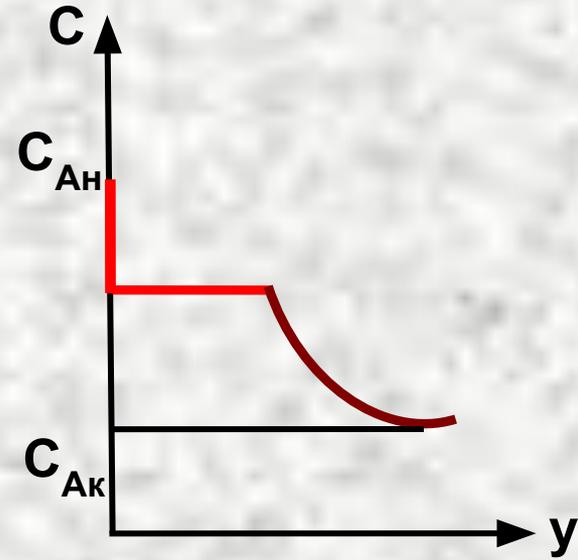
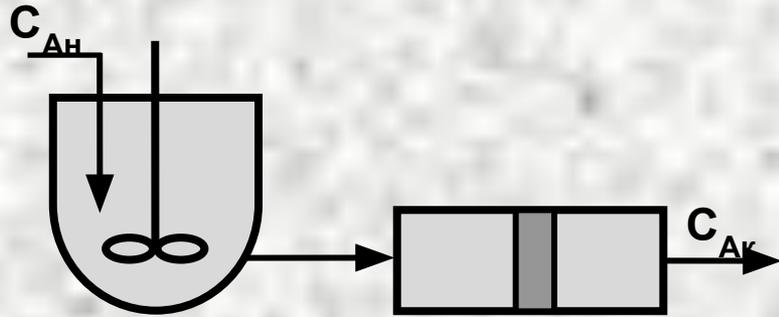


$$V_{\text{ОБЩ. max}} = 6 \text{ m}^3$$

**РИБ** нет каскада реакторов, т.к. нет смешения, концентрация не снижается (!!!)



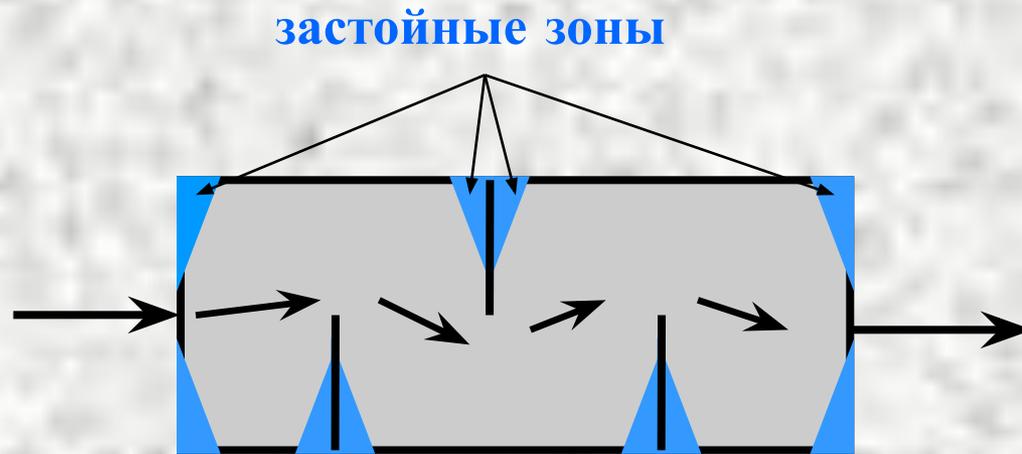
Для повышения селективности существует разное соединение реакторов.



# **Химические реакторы с неидеальной структурой потоков**

**Организовать режим идеального смешения или идеального вытеснения очень трудно. Реально в промышленных реакторах всегда имеют место отклонения от идеальных режимов, возникают многочисленные неидеальные течения, которые вызываются рядом причин:**

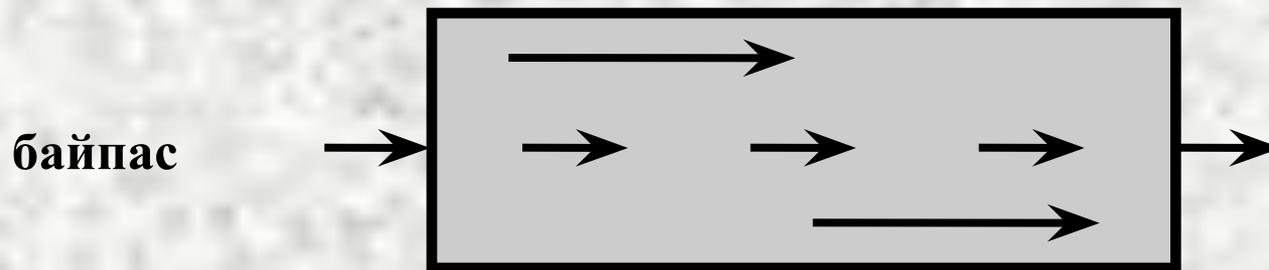
- **1 причина** – образование застойных («мёртвых») зон. В застойных зонах скорость химической реакции практически равна нулю. Она существенно отличается от основного потока реагентов.



В «мёртвой» зоне часть потока не обменивается массой и энергией с основным потоком. Вещество не вымывается из реактора и претерпевает дальнейшие нежелательные превращения. Например, образуются смолы на стенках реактора.

- **2 причина** – наличие внутренней коробки байпаса, когда часть реакционного потока не принимает участия в химической реакции.

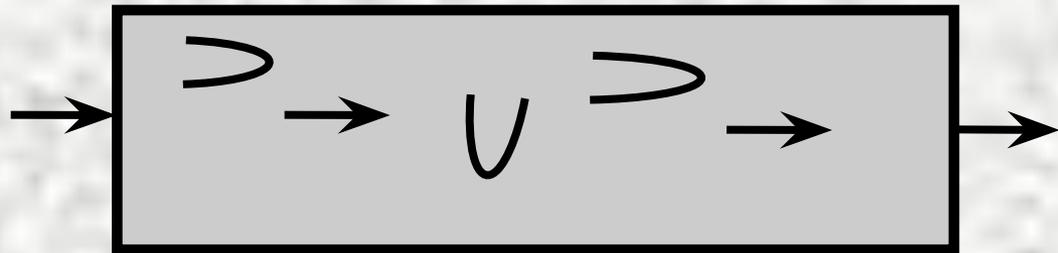
Байпас – часть потока движется с более высокой скоростью через реактор от входа к выходу, почти не участвуя в реакции.

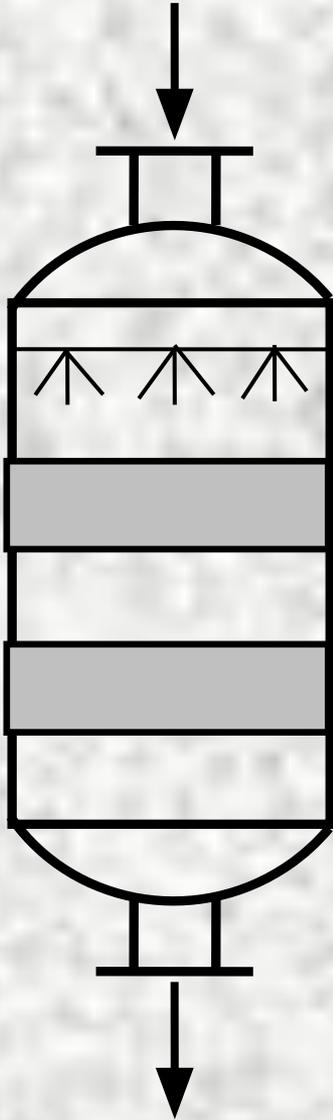


Неоднородность в размещении насадок, перекося при монтаже тарелок, недостатки конструкции и др.

**3 причина** – образование зон циркуляции жидкостей, в которых реакционная смесь задерживается намного дольше, чем в основном потоке. Основная масса потока проходит через аппарат быстрее среднего времени пребывания.

циркуляционные  
зоны





- **Нужно устанавливать распределительное устройство, которое должно распределять жидкость по объёму реактора.**
- **Сильно влияет отношение высоты реактора к его диаметру. Если  $H/D > 3$ , то всегда будут образовываться застойные зоны.**



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**