

*Дисциплина*

# Моделирование химическо-технологических процессов

*Тема №4*

## Методы исследования потоков и аппаратов

*Воробьев Евгений Сергеевич*

# Основные цели исследования

Начиная любое исследование объекта необходимо выяснить ту модель потока, которая в нем существует или хотя бы оценить наличие в объекте различных зон (РИВ, РИС) и самое главное наличие застойных зон, которые просто исключают часть объема аппарата из работы.

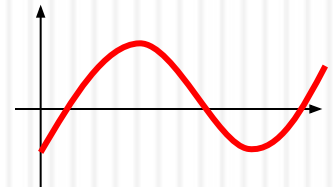
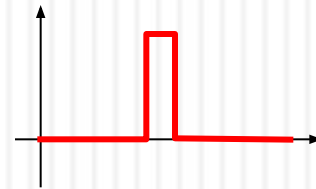
Пользуясь этими приемами можно исследовать не только поток, но и другие характеристики объекта, например, теплофизику, массопередачу и т.п. Надо только правильно подобрать исследуемый сигнал, который посылается в объект и модель, которая должна описать полученный после прохождения объекта сигнал.

# Исследование потоков

Основной задачей при проектировании технологических процессов и аппаратов является исследование потоков и выбор оптимального аппарата для решаемой задачи.

При исследовании потоков используются следующие сигналы:

- Ступенчатый ( $F(t)$ )
- Импульсный ( $C(t)$ )
- Синусоидальный



Эти импульсы в виде трассеров запускаются в поток и потом регистрируется отклик на них.

На основании полученных кривых строится модель потока и делается заключение о исследуемом аппарате. Чаще всего используется статистический подход в решении данной задачи, в предположении, что все объекты описываются

# Модели потоков

Существует достаточно много вариантов описания потоков в аппаратах. Их можно разделить на несколько групп:

- Идеальные модели;
- Приближенные к реальным модели;
- Комбинированные модели.

Модели в каждой из групп имеют право на использование в определенных условиях и на определенных этапах исследования.

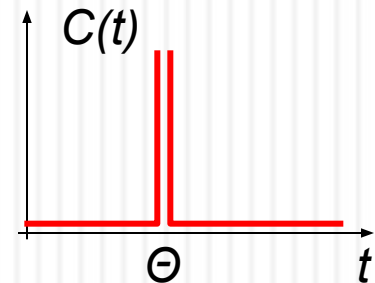
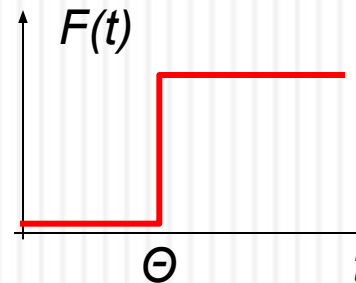
Первые модели позволяют строить идеальные аппараты для предварительного анализа эффективности выбранной схемы процесса. Вторые приближают модель к реальным условиям функционирования аппарата и позволяют найти возможные проблемы в его работе. Третьи дают достаточно хороший анализ работы реального аппарата для его модернизации.

# Идеальные модели потоков

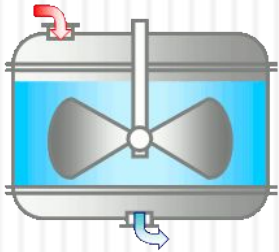
Идеальное вытеснение:



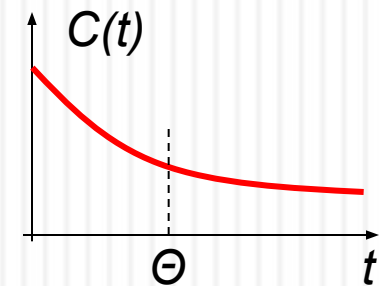
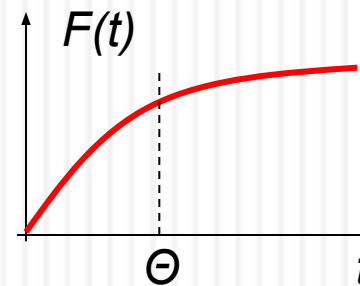
$$\frac{\partial C}{\partial T} = -w \frac{\partial C}{\partial x}$$



Идеальное смешение:



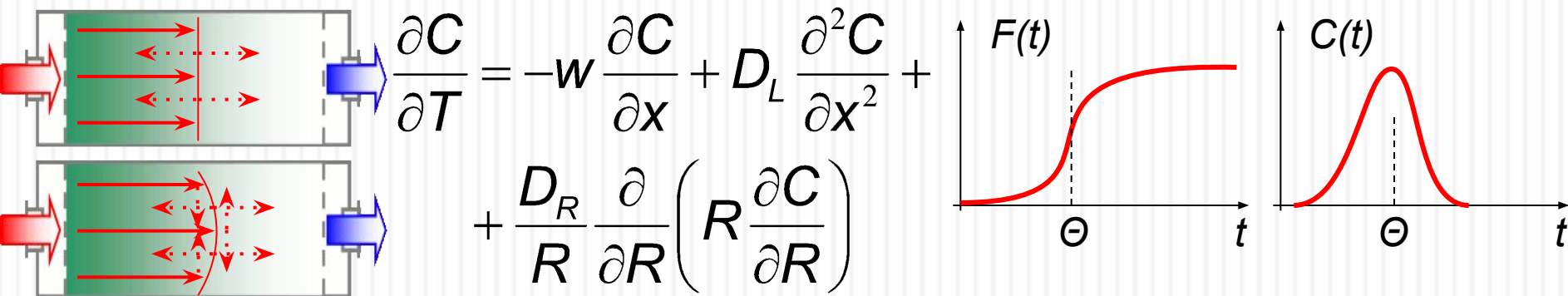
$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{V_c}{V} (C_{\text{ex}} - C)$$



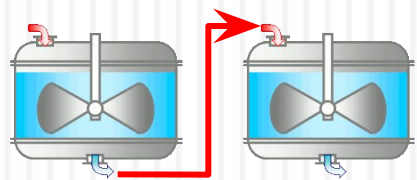
Это практически идеальные модели, которые не встречаются в реальных процессах и аппаратах. Для их исследования можно воспользоваться стандартными функциями (ступенчатая и импульсная) графиками, которых показаны выше.

# Приближенные к реальным модели потоков

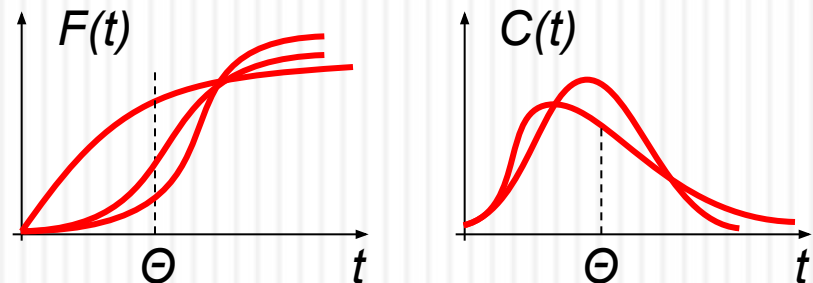
## Диффузия одно- и двухпараметрическая



## Ячеечная модель:



$$\frac{1}{m} \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{t} (C_{i-1} - C_i)$$

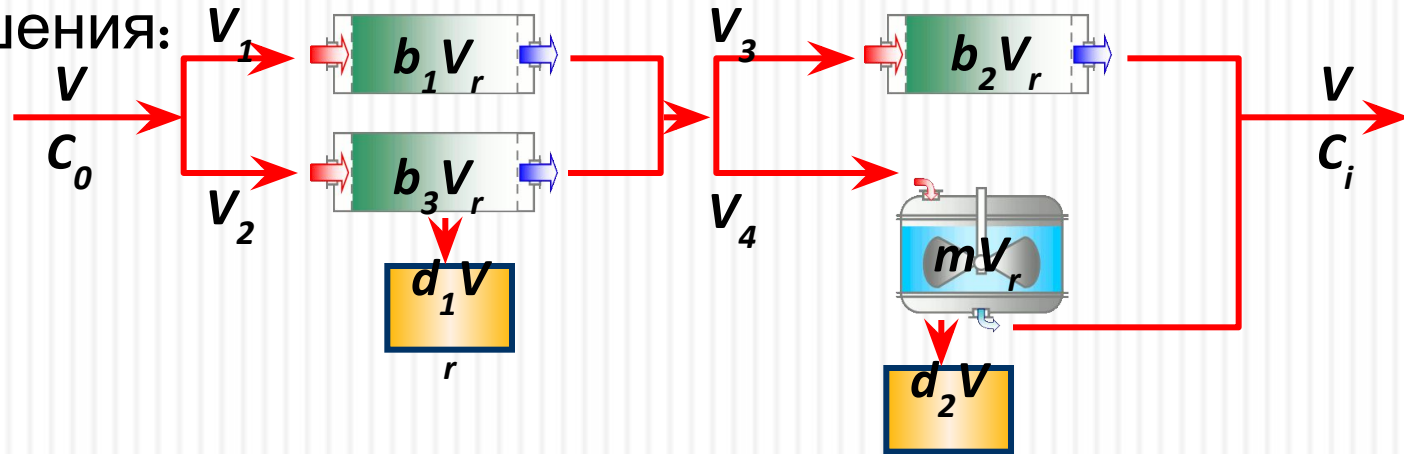


Эти модели вносят реальный вклад в модель РИВ и РИС соответственно и позволяют получать промежуточные состояния для описания процессов

# Комбинированные модели

## ПОТОКОВ

□ Модели смешения:



где:  $V_r$  – объем реактора,  $V, V_1-V_4$  – потоки,  $b_1-b_3$  – доли объёма реактора с моделью РИВ,  $m$  – доля объёма реактора модели РИС,  $d_1-d_2$  – доли объема застойных зон реактора.

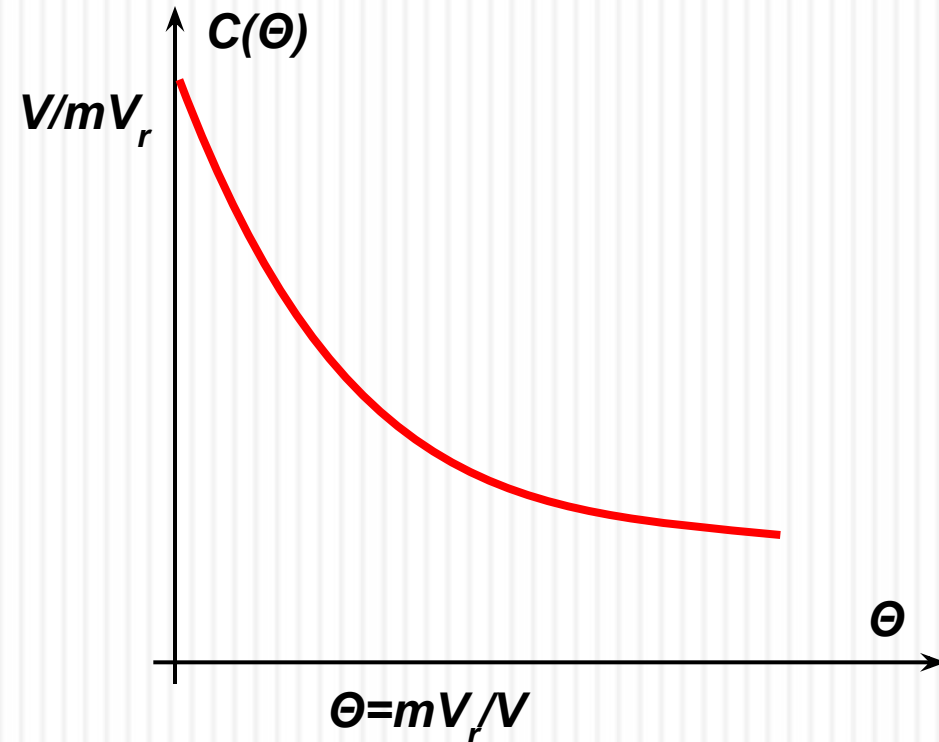
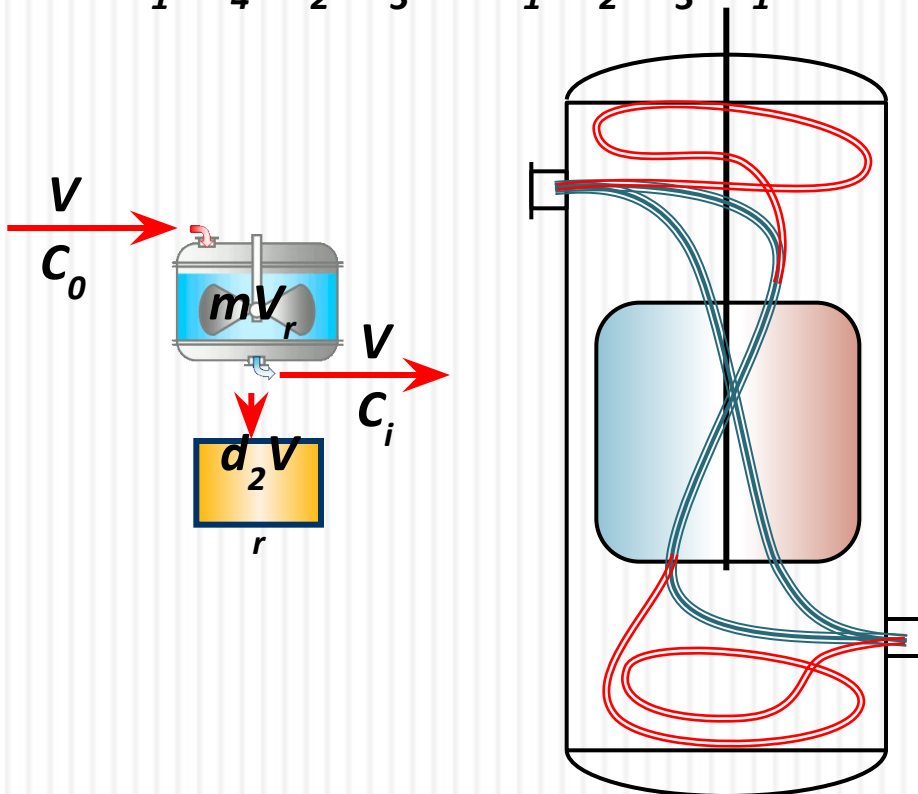
$$W(p) = \sum_{i=1}^2 \left[ \frac{\frac{V_i \cdot V_3}{V^2} e^{-\frac{V}{V_i} b_i (p+k) \tau_n}}{1 + \frac{m V \tau_n}{V_4} (p+k)} + \frac{V_i \cdot V_3}{V^2} e^{-\frac{V}{V_i} b_i (p+k) \tau_n - \frac{V}{V_3} b_3 (p+k) \tau_n} \right]$$

# Комбинированная модель смешения

Идеальная модель смешения с застойной зоной:

- Смешение при малых скоростях мешалки в цилиндрических и прямоугольных сосудах:

$V=V_1=V_4$ ;  $V_2=V_3=0$ ;  $b_1=b_2=b_3=d_1=0$ ; определяем  $m=?$  при условии  $d_2+m=1$



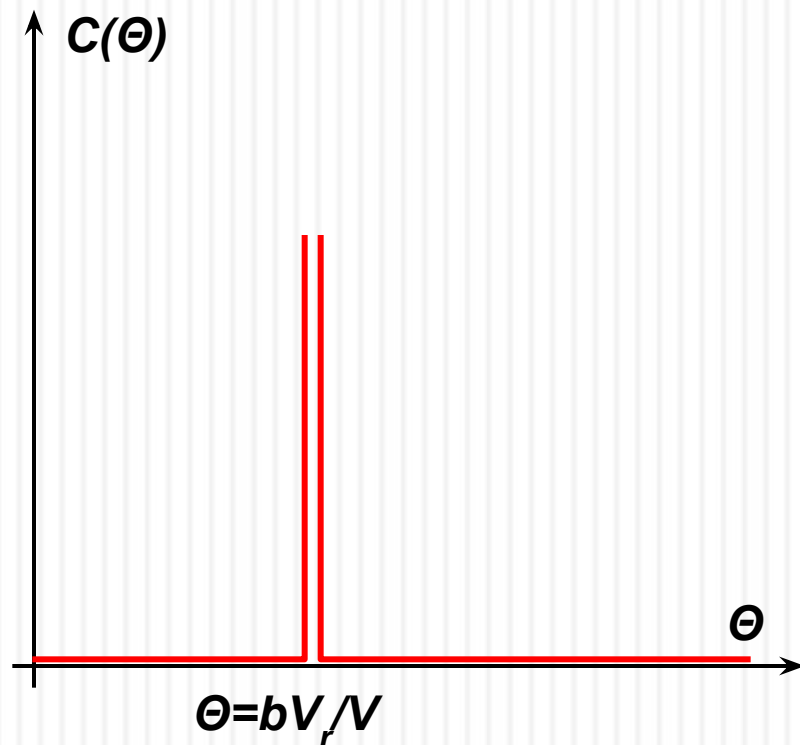
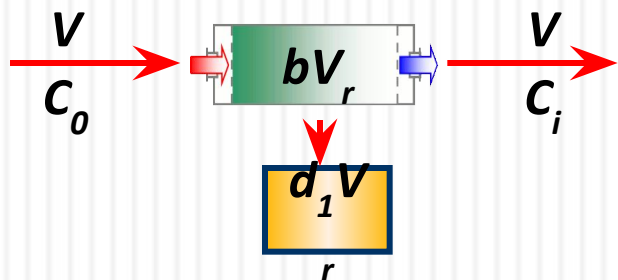


# Комбинированная модель смешения

Идеальная модель вытеснения с застойной зоной:

Стационарный слой, экстракционные колонны :

$V=V_1=V_3$ ;  $V_2=V_4=0$ ;  $m=b_2=b_3=d_2=0$ ; определяем  $b=?$  при условии  $d_1+b=1$

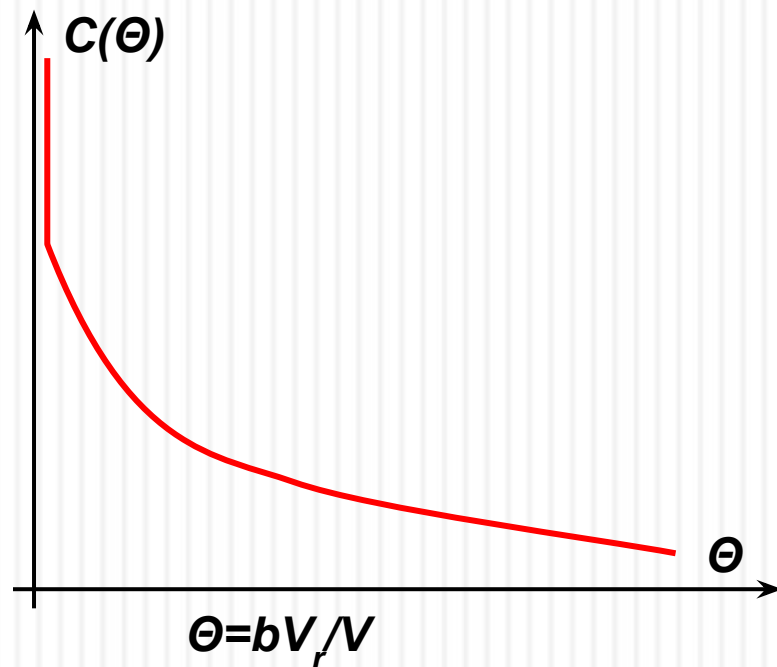
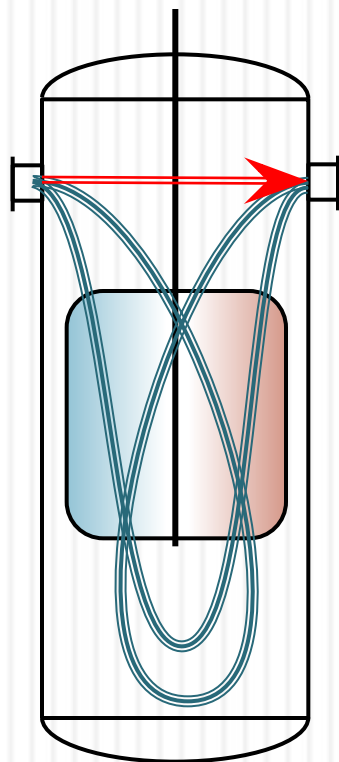
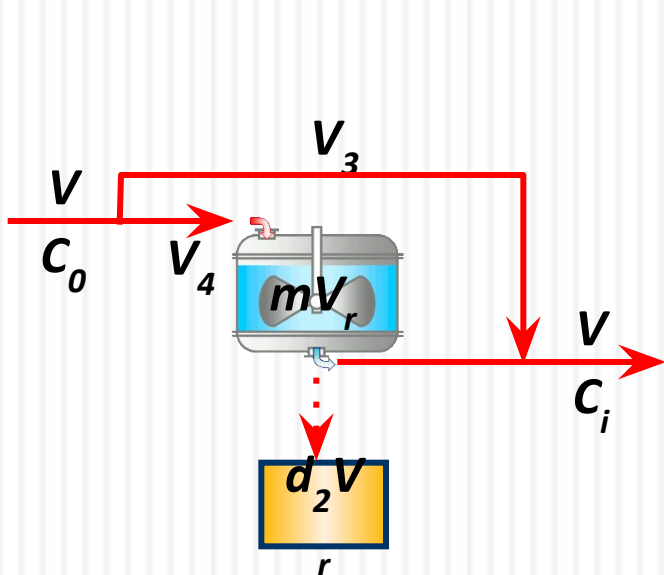


# Комбинированная модель смешения

Идеальное смешение с проскальзыванием:

- Смешение в аппарате при больших скоростях поступления исходного сырья и(или) близко расположенных входе и выходе:

$V_1=V$ ;  $V_2=0$ ;  $b_1=b_2=b_3=d_1=d_2=0$ ; определяем  $V_3$ ,  $V_4=?$  при условии  $m=1$

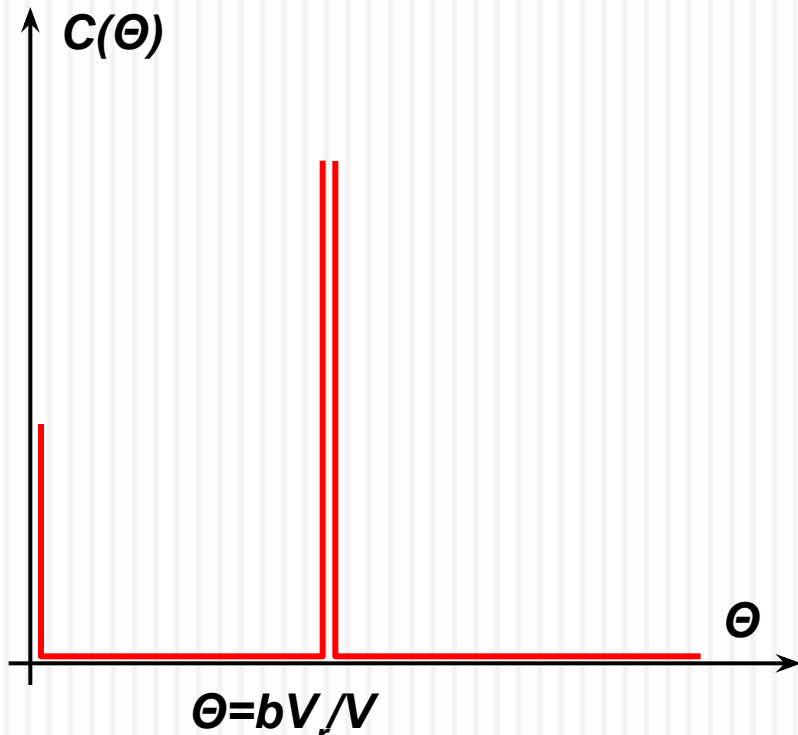
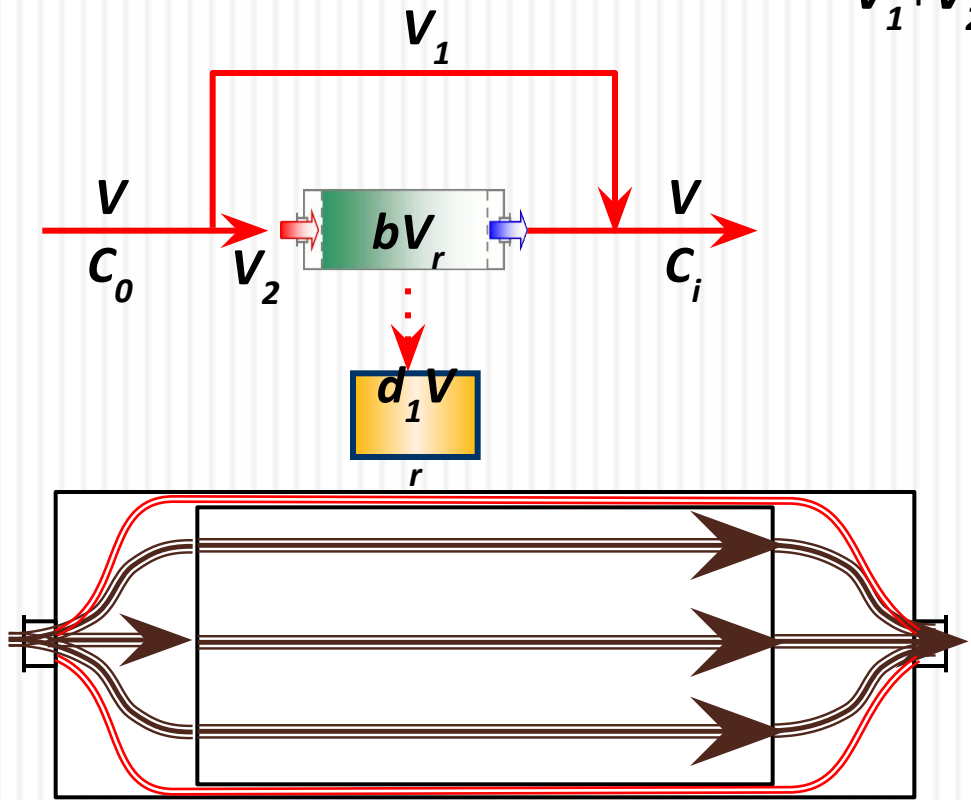


# Комбинированная модель смешения

Идеальное вытеснение с проскальзыванием:

Насадочные аппараты, экстракционные колонны:

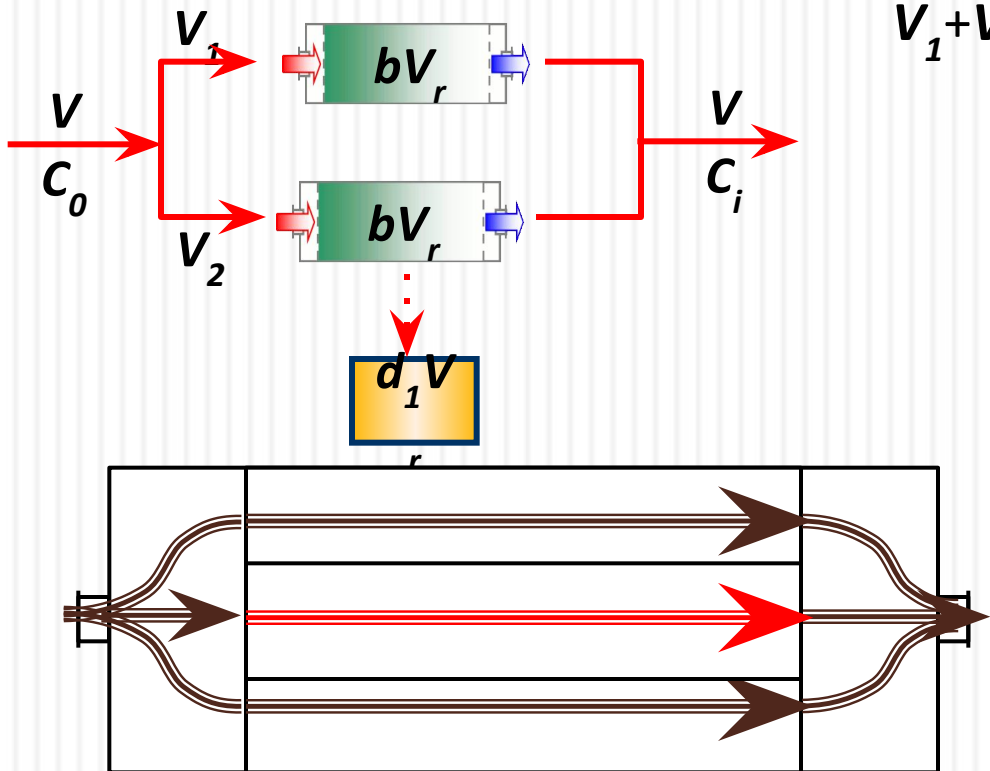
$V_3 = V; V_2 = 0; b_2 = b_3 = d_1 = d_2 = m = 0$ ; определяем  $V_1, V_2 = ?$  при условии  $b = 1$ ,  
 $V_1 + V_2 = V$



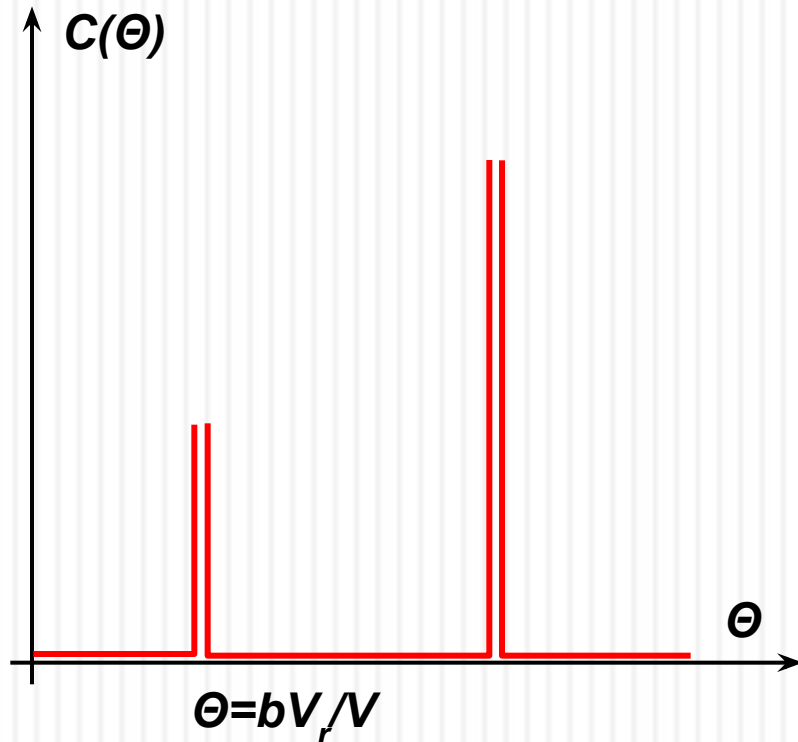
# Комбинированная модель смешения

- Параллельные зоны идеального вытеснения:
  - Псевдооживленные слои, насадочные аппараты, экстракционные колонны:

$V_3 = V; V_2 = 0; b_3 = d_1 = d_2 = m = 0$ ; определяем  $b_1, b_2 = ?$  при условии  $b_1 + b_2 + d_1 = 1$ ,



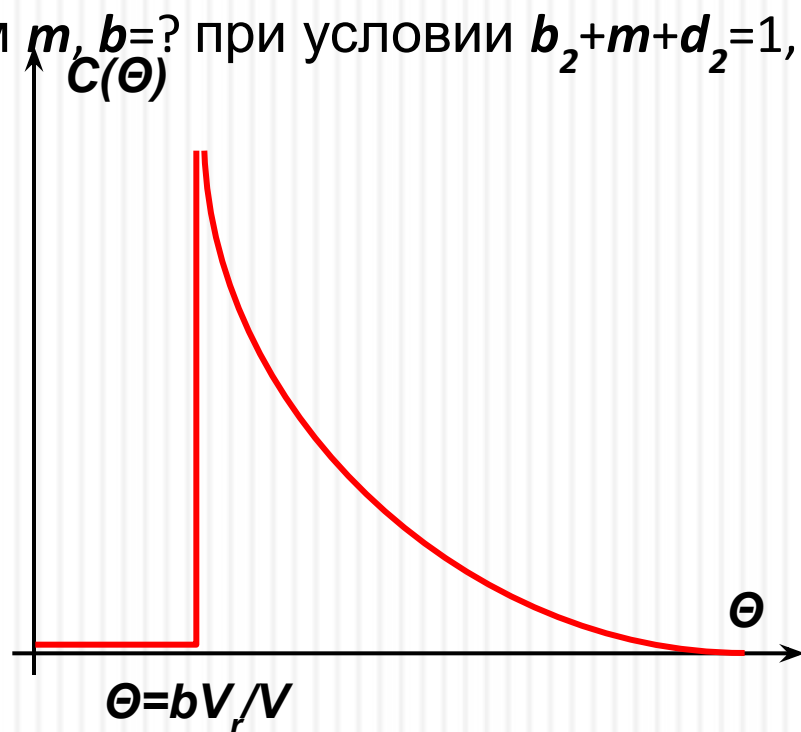
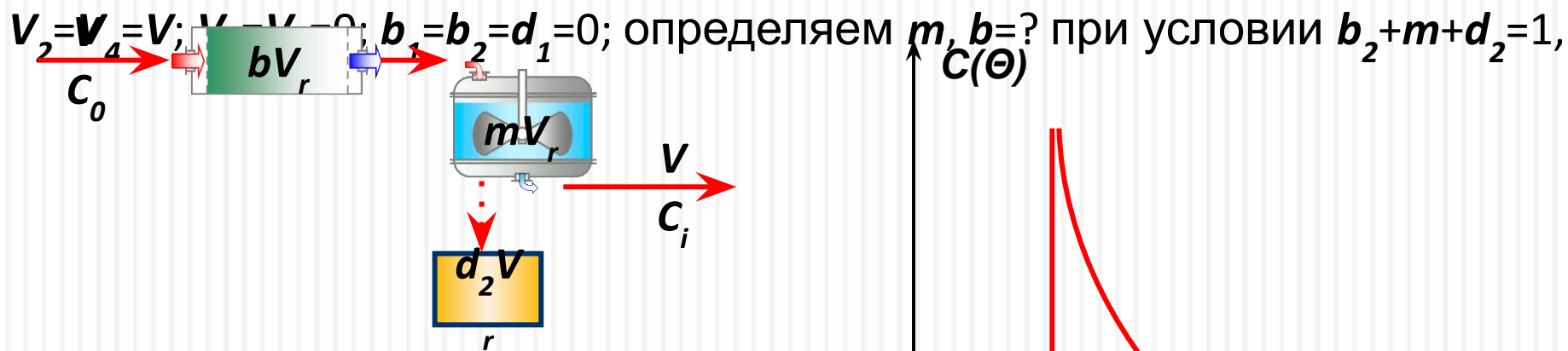
$V_1 + V_2 = V$



# Комбинированная модель смешения

Последовательно соединенные зоны идеального смешения и вытеснения:

- Аппараты с мешалками при вводе жидкости через крышку, стационарные слои, потока в трубах, насадочные аппараты, экстракционные колонны:



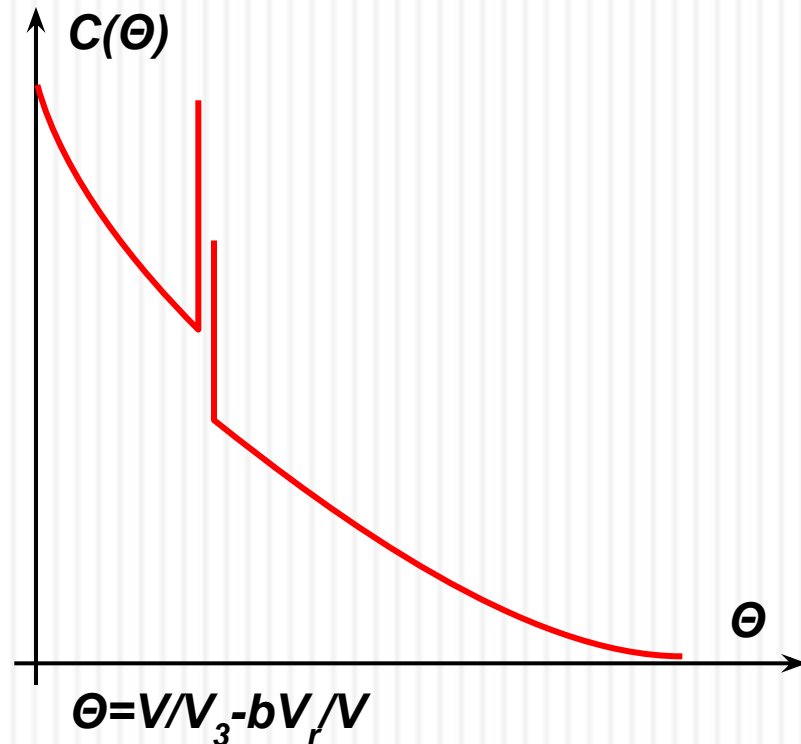
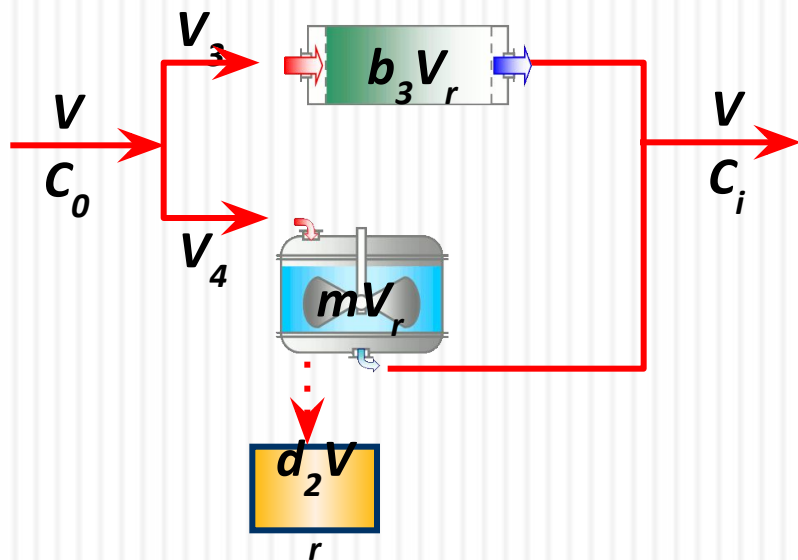
# Комбинированная модель смешения и вытеснения

Параллельные зон идеального смешения и вытеснения:

- Аппараты с мешалками при подаче сырья у дна и выходе через крышку, стационарные слои, псевдооживленные слои:

$V_3 + m = V$ ;  $V_1 = V$ ;  $b_1 = b_2 = d_1 = 0$ ; определяем  $m$ ,  $b_3 = ?$  при условии  $b_3 + m + d_2 = 1$ ,

$$V_3 + V_4 = V$$

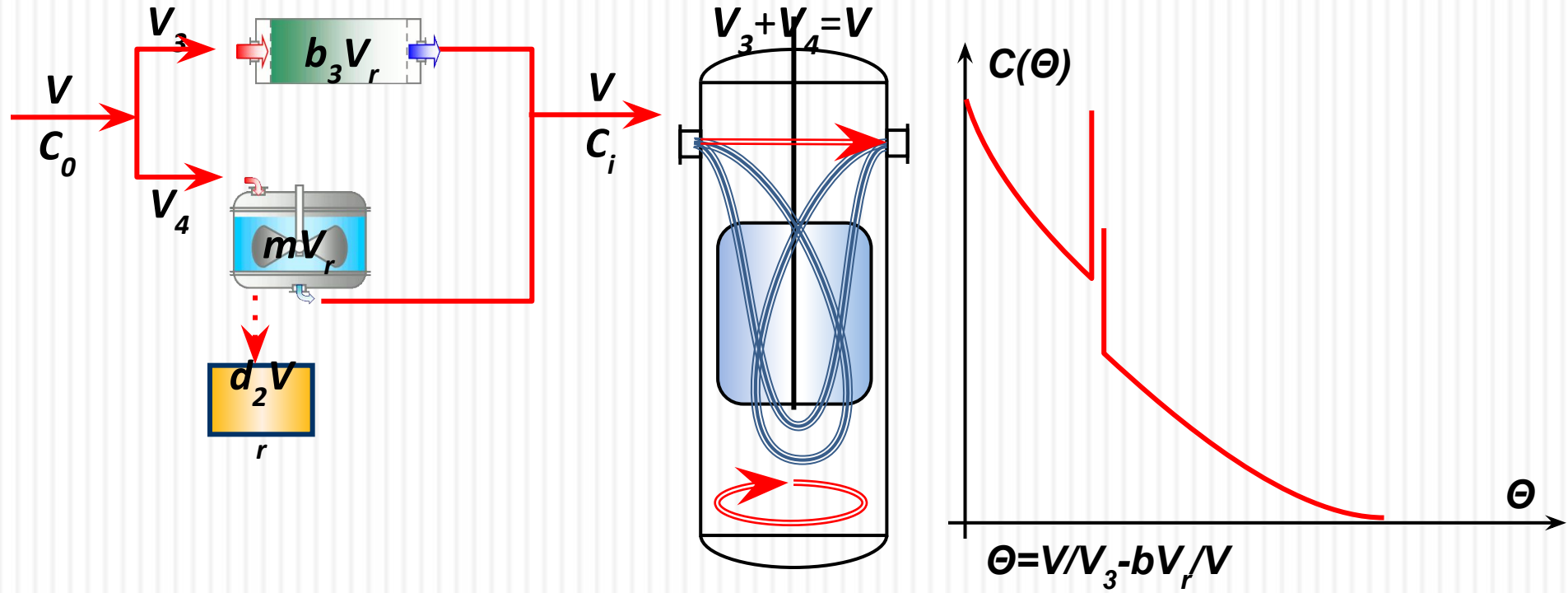


# Комбинированная модель смешения

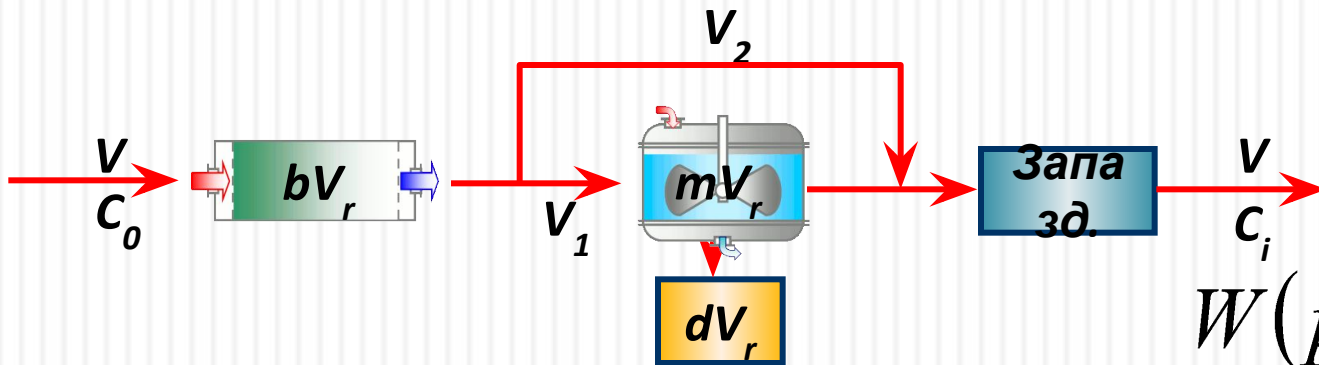
Идеального смешения с проскальзыванием и застойной зоной:

- Аппараты с мешалками при вводе и выводе жидкости через крышку и расположении мешалки далеко от дна:

$V_1=V; V_2=0; b_1=b_2=b_3=d_2=0$ ; определяем  $m, V_3, V_4=?$  при условии  $m+d_2=1$ ,



# Комбинированная модель с байпасом

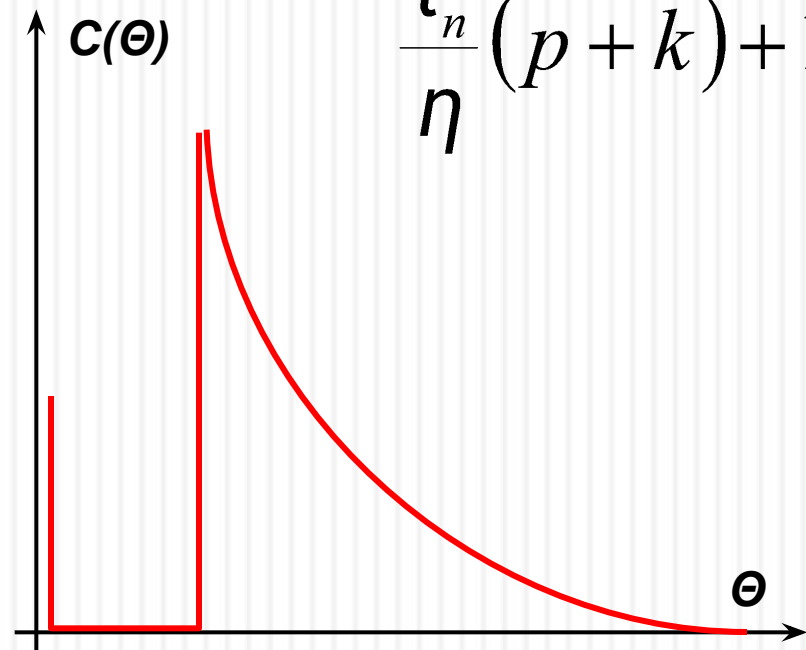


$$W(p) = \frac{e^{-p\varepsilon - k(\varepsilon - \tau_L)}}{\frac{\tau_n}{\eta}(p + k) + 1}$$

Подбираются различные сочетания зон:

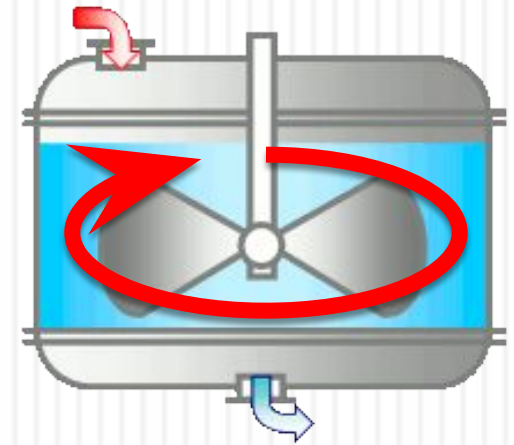
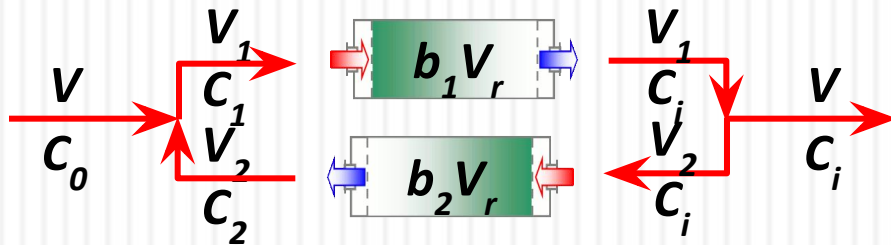
$m, b, d$  - ?

- Аппараты с мешалками,
- потоки в трубах,
- псевдооживленные слои,
- абсорбционные колонны





# Комбинированные модели с циркуляцией



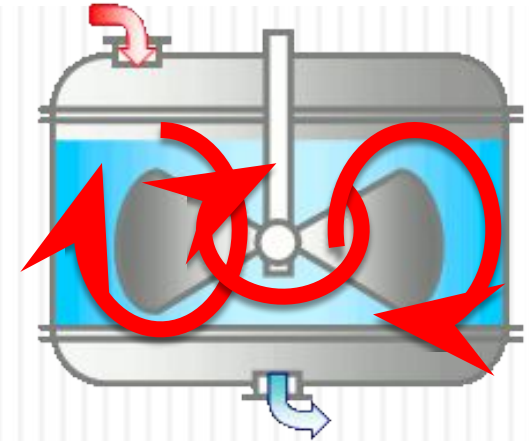
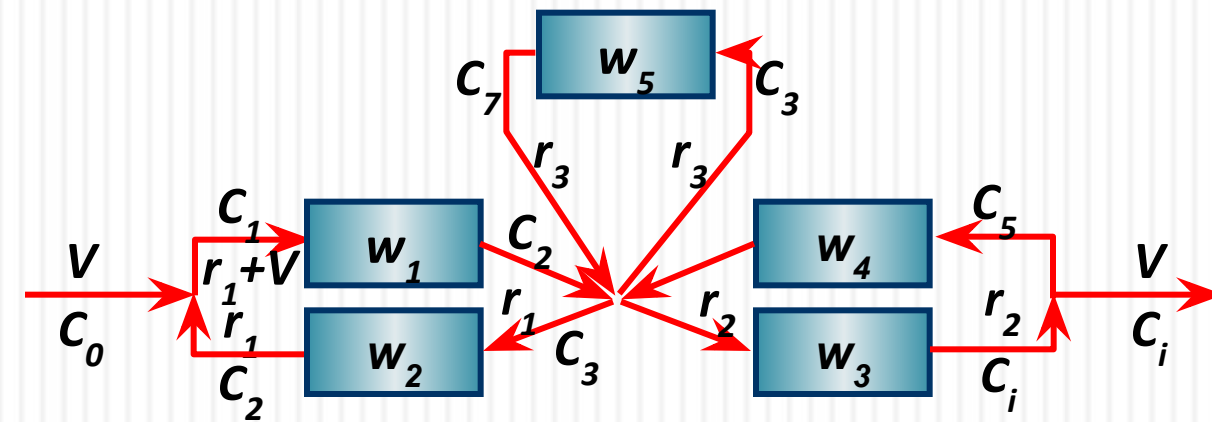
где:  $V_r$  – объем реактора,  $V, V_1, V_2$  – потоки,  $b_1, b_2$  – доли объёма реактора с моделью РИВ,  $C_0 - C_2, C_i$  – концентрации в соответствующих потоках,  $N$  – число рециклов.

Циркуляция через два параллельных потока идеального вытеснения:

$$N, (V_1 \text{ или } V_2), (b_1 \text{ или } b_2) - ?$$

- Аппараты с мешалками и внутренней циркуляцией

# Комбинированные модели с циркуляцией



где:  $V_r$  – объем реактора,  $V$  – поток,  $r_1 - r_3$  – объемные скорости циркуляции,  $C_0 - C_7$ ,  $C_i$  – концентрации в соответствующих потоках,  $w_1 - w_5$  – передаточные функции,  $N$  – число рециклов.

Циркуляция с тремя различными замкнутыми циклами:

$$N, r/V - ?$$

- Аппараты с мешалками при высоких скоростях внутренней циркуляции
- Идеальное смешение и некоторое время пребывания в каждом контуре, одинаковые передаточные функции

# Пример решения данной задачи

## Запускаем в исследуемый поток маркер:

- Для импульсного воздействия вводим единовременно заданный объем индикатора;
- Для ступенчатого потока переключаем поток с одного вещества на другое;
- Синусоидальные сигналы обычно используются в исследовании электрических, магнитных и тепловых параметров системы.

# Сбор экспериментальных данных

Задаем шаг по времени (5 с) и начинаем регистрировать выход индикатора:

Замеры ведем пока весь индикатор не выйдет из потока (концентрация 0)

Для ступенчатого сигнала окончание

Время, с	Выход, гр/л
0	0
5	3
10	5
15	5
20	4
25	2
30	1
35	0

# Обработка данных

Определяем полный выход индикатора:  
 $\sum C\Delta t = (3 + \dots + 1) * 5 = 100$   
В этой операции мы избавились от массовых единиц в концентрации

Время, с	Выход, г/л	$C/\sum C\Delta t, 1/с$
0	0	0
5	3	0,03
10	5	0,05
15	5	0,05
20	4	0,04
25	2	0,02
30	1	0,01
35	0	0

# Обработка данных

Определяем среднее время пребывания:

$$T = \frac{\sum T C}{\sum C} = \frac{(5 \cdot 3 + \dots + 30 \cdot 1)}{(3 + \dots + 1)} = 15$$

И переходим к безразмерному времени. Теперь можно рассчитать безразмерную концентрацию

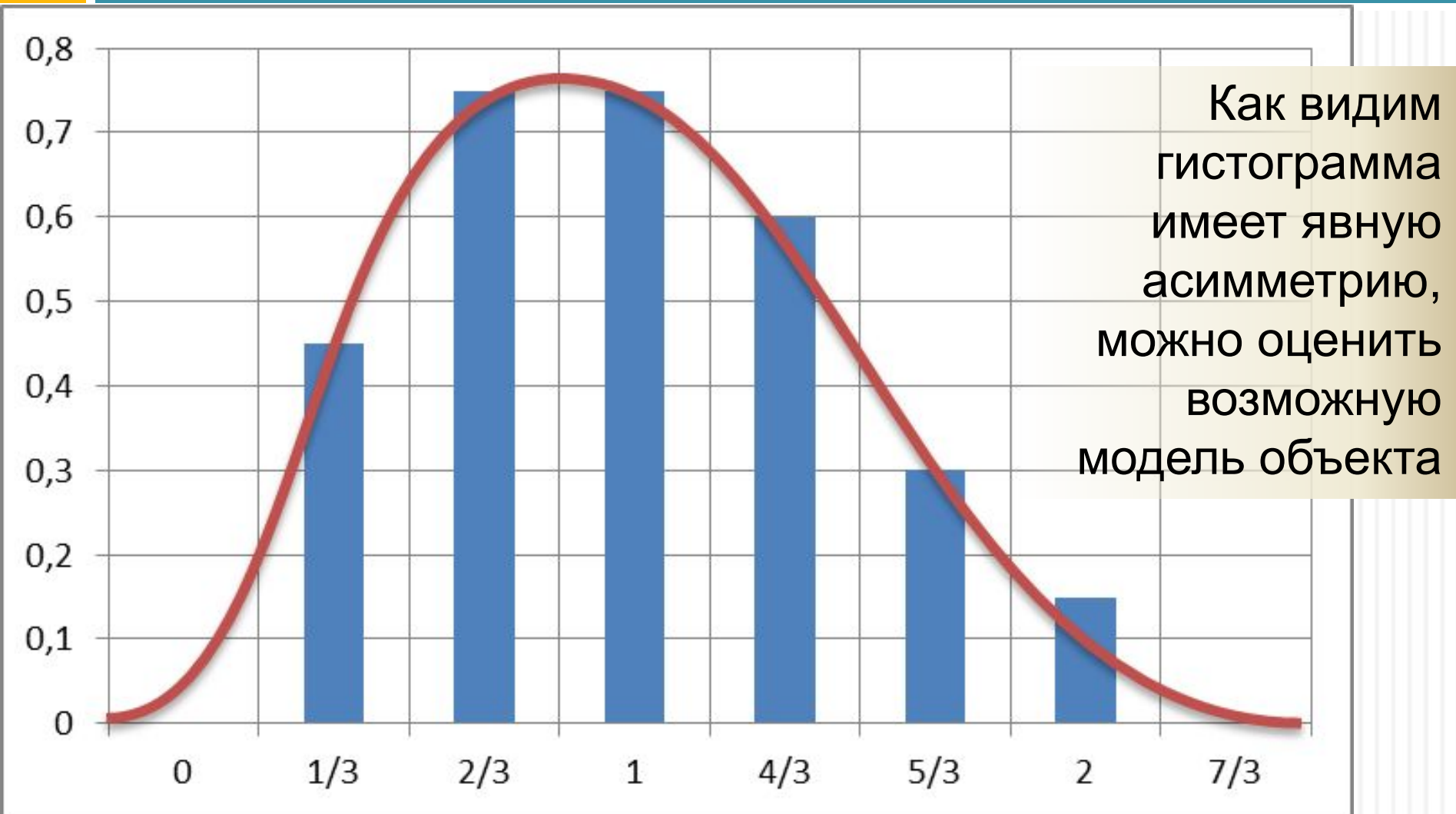
Время	Выход С	$C/\sum C \Delta t$	$\Theta, c$
0	0	0	0
5	3	0,03	1/3
10	5	0,05	2/3
15	5	0,05	1
20	4	0,04	4/3
25	2	0,02	5/3
30	1	0,01	2
35	0	0	7/3

# Обработка данных

Время	Выход С	$C/\sum C\Delta t$	$\Theta$	С, бр
0	0	0	0	0
5	3	0,03	1 / 3	0,45
10	5	0,05	2 / 3	0,75
15	5	0,05	1	0,75
20	4	0,04	4 / 3	0,60
25	2	0,02	5 / 3	0,30
30	1	0,01	2	0,15
35	0	0	7 / 3	0

Строим  
гистограмму и  
проводим её  
анализ

# Гистограмма сигнала





# Расчет критерия Пекле для диффузионной модели

Коэффициент продольного перемешивания  $D_L$ , характеризующим диффузионную модель, представляется в виде безразмерного диффузионного критерия Пекле:

$$Pe = \frac{\omega L}{D_L}$$

S-кривая описывается с помощью вероятностных характеристик:

$a_k$  – начальные моменты  $k$ -го порядка ( $k=1,2,3,4$ );

$$a_k = \frac{\sum_{i=1}^n C \theta^k}{\sum_{i=1}^n C} \quad k = \overline{1,4}$$

$\sigma^2$  – дисперсия;

$$\sigma^2 = a_2 - a_1^2$$

A – показатель асимметрии;

$$A = \frac{a_3 - 3a_1 a_2 + 2a_1^3}{(a_2 - a_1^2)^{3/2}}$$

$\mathfrak{E}$  – эксцесса;

$$\mathfrak{E} = \frac{a_4 - 4a_1 a_3 + 6a_2 a_1^2 - 3a_1^4}{(a_2 - a_1^2)^2}$$

Последние две характеристики ( $m$  и  $C_m$ ) находятся непосредственно из кривой распределения, где  $C_m$  – максимальное значение по ординате на гистограмме,  $m$  – значение для  $C_m$  по оси абсцисс

Теперь вычисляются все варианты  $Pe$  по следующим формулам:

$$a_1 = 1 + \frac{1}{Pe} \quad a_2 = 1 + \frac{4}{Pe} + \frac{4}{Pe^2} \quad a_3 = 1 + \frac{9}{Pe} + \frac{30}{Pe^2} + \frac{30}{Pe^3}$$

$$a_4 = 1 + \frac{16}{Pe} + \frac{108}{Pe^2} + \frac{336}{Pe^3} + \frac{336}{Pe^4} \quad \sigma^2 = \frac{2}{Pe} + \frac{3}{Pe^2}$$

$$A = \frac{12 \cdot Pe + 20}{(3 + 2 \cdot Pe)^{1/2}} \quad \Xi = \frac{210 + 120 \cdot Pe}{(3 + 2 \cdot Pe)^2} \quad m = \frac{Pe}{2 + Pe}$$

$$C_m = \sqrt{\frac{2 + Pe}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2 + Pe}\right) - \frac{Pe}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1 + Pe}{\sqrt{2 + Pe}}\right)$$

Из 9 найденных значений отбрасываются сильно отличающиеся и из остальных находят среднее значение и вычисляем коэффициент диффузии

$$D_L = \frac{\omega L}{Pe}$$

# Расчет числа ячеек для ячейечной модели

Пользуясь результатами исследования потока находим связи между статистическими характеристиками и числом ячеек в модели по следующим формулам:

$$a_{1n} = 1; \quad a_{2n} = \frac{n+1}{n}; \quad a_{3n} = \frac{(n+1)(n+2)}{n^2}; \quad a_{4n} = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)}{n^3}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \quad A = \frac{2}{\sqrt{n}} \quad \Xi = \frac{6}{n} \quad m = \frac{n-1}{n}$$

Окончательное значение  $n$  определяется как среднее арифметическое:

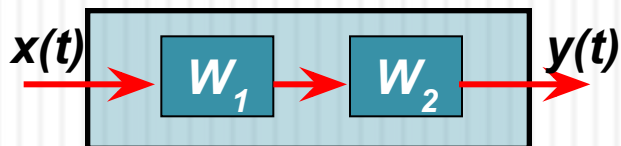
$$n = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{k}$$

где:  $k$  – число вероятностных характеристик, имеющие близкие значения  $n$ .

# Синтез моделей из звеньев

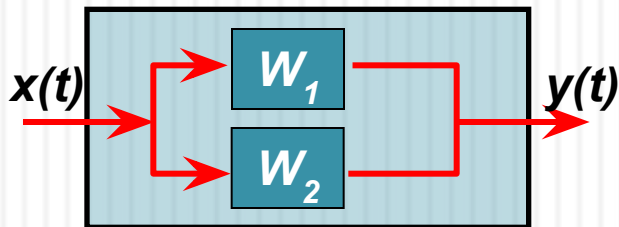
Существуют следующие соединения:

□ Последовательное соединение звеньев;



$$W_c = \prod_{i=1}^n W_i$$

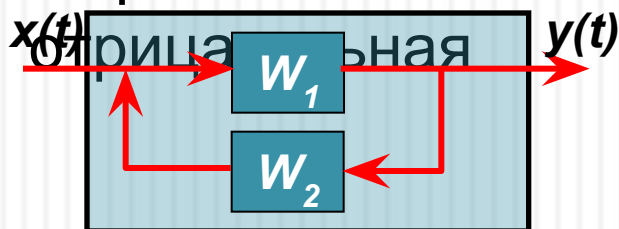
□ Параллельное соединение звеньев;



$$W_c = \sum_{i=1}^n W_i$$

□ Обратная связь

положительная



$$W_c = \frac{W_1}{1 - W_1 W_2}$$

$$W_c = \frac{W_1}{1 + W_1 W_2}$$