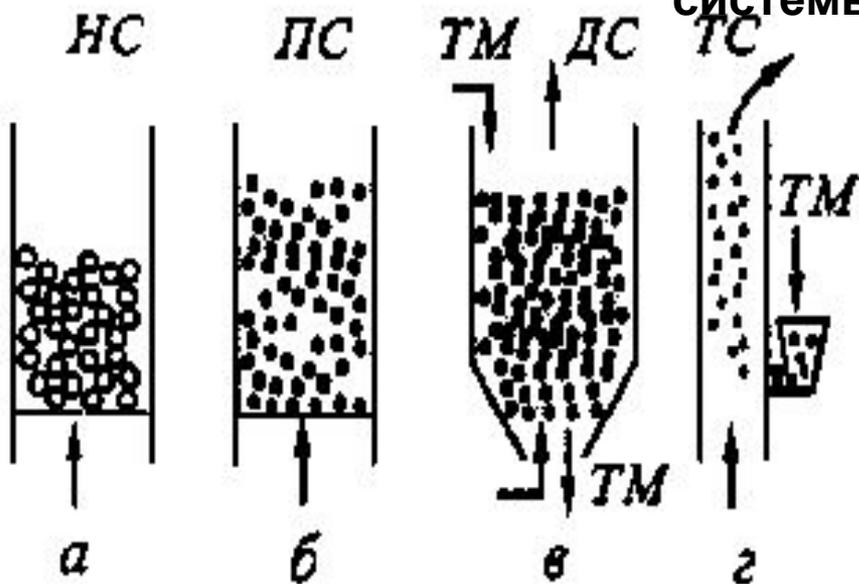


# Инженерная химия. Лекция 3.

Лектор: к.т.н. Таран Ю.  
А.

## Дисперсные

системы.

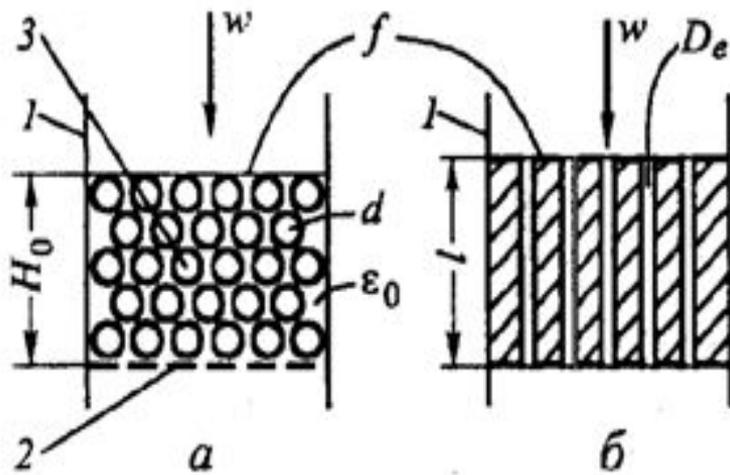


Дисперсные системы занимают объем  $V$ , состоящий из объемов твердых зерен (частиц)  $V_T$  и свободного объема просветов между ними  $V_{CB}$ :  $V = V_T + V_{CB}$ . Объемная доля просветов  $V_{CB}/V = \varepsilon$  называется порозностью. Очевидно, доля твердой фазы (ее объемная концентрация) составляет  $1 - \varepsilon$ . Условимся порозность и другие характеристики неподвижного слоя выделять индексом "0". В случае часто используемых частиц округлой формы  $\varepsilon_0$

обычно близка к 0,4. Массовая концентрация твердой фазы в НС (массовая плотность) составит:  $\rho_0 = \rho_T(1 - \varepsilon)$ .

Отклонение от сферичности характеризуется фактором формы  $\phi_s = \sqrt{S_{III}/S_{ч}} \leq 1$ , где  $S_{ч}$  и  $S_{III}$  — поверхности зерна и равновеликой ему сферы.

В гидродинамических расчетах удобно пользоваться расчетной скоростью, определяемой из уравнения расхода:  $w = V/f$  где  $f$  — поперечное сечение пустого (без твердого материала) аппарата. Истинная скорость  $w_{и}$  будет выше, поскольку часть сечения аппарата перекрыта твердыми частицами, так что для прохода газа (жидкости) остается живое сечение  $f_{CB} < f$ ; таким образом,  $w_{и} > w$ . Реальная интенсивность технологического процесса определяется, конечно же, величиной  $w_{и}$ , но скорость  $w$  удобнее в практических расчетах.



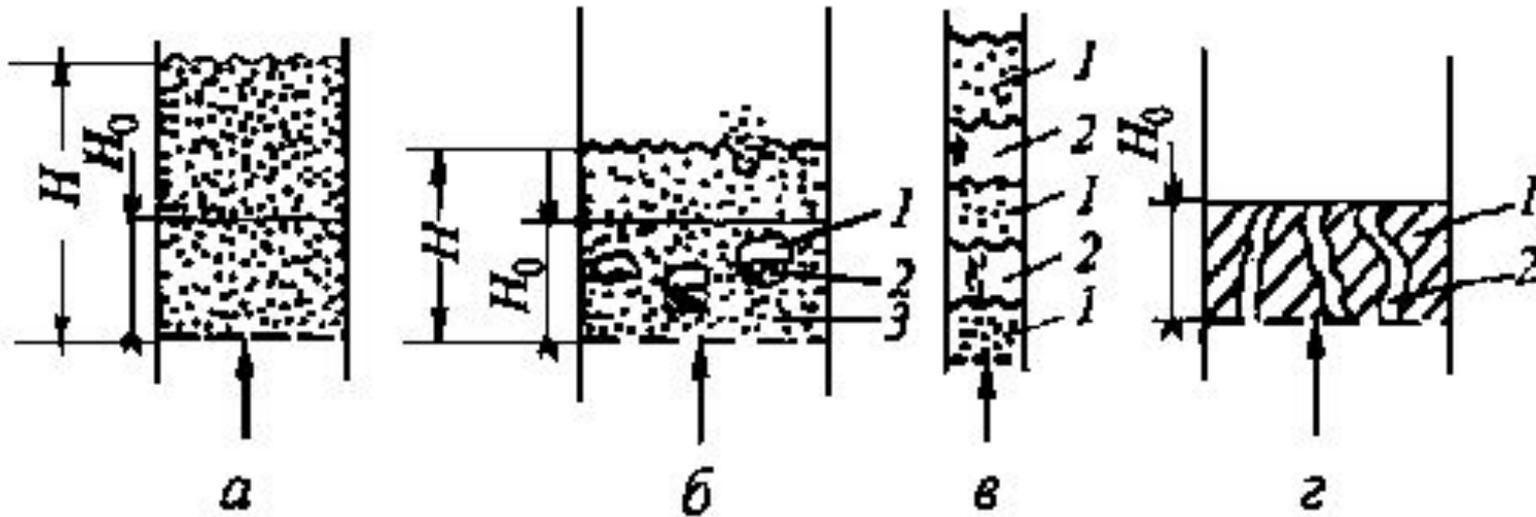
а — идеальный слой, б — фиктивный слой; 1 — корпус аппарата, 2 — газораспределительная решетка, 3 — неподвижный зернистый слой.

На модель фиктивного слоя должны быть наложены ограничения, чтобы его гидравлическое сопротивление в самом деле было равно искомому для идеального слоя. Эти ограничения с основой уравнения Дарси —  $\Delta p = \lambda_r \frac{l}{D_e} \frac{w_{и}^2}{2} \rho$

Элементы этого уравнения для фиктивного и идеального слоев должны совпадать:

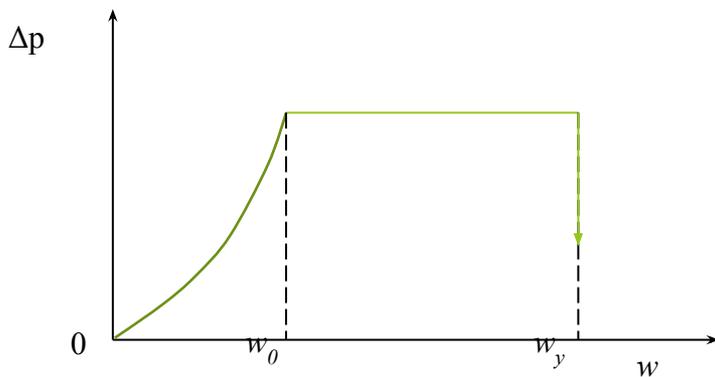
- 1) длины путей газа в фиктивном и идеальном слоях должны быть одинаковыми;
- 2) свободные объемы  $V_{св}$  в фиктивном и идеальном слоях должны быть одинаковыми, тогда при одинаковых расчетных скоростях  $w$  будут равными и истинные скорости  $w_{и}$ ;
- 3) диаметры каналов в фиктивном слое должны соответствовать эквивалентным диаметрам  $D_e$  в идеальном; это важно и в аспекте совпадения чисел  $Re_{и} \equiv w_{и} D_e \rho / \mu$ , а значит и коэффициентов гидравлического сопротивления  $\lambda_r$  в фиктивном и идеальном слоях;
- 4) должны быть одинаковы поверхность трения потока о стенки каналов  $F_{ф}$  в фиктивном слое и поверхность твердых частиц  $F_{ид}$  в идеальном.

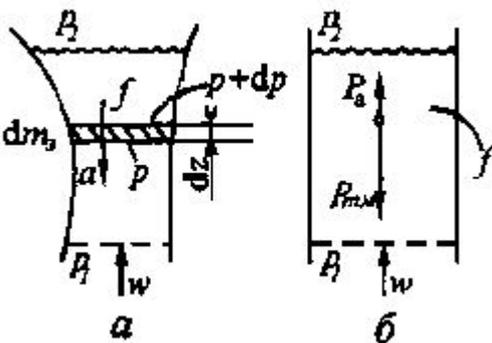
При соблюдении этих условий расчет сопротивления идеального слоя можно вести по формулам для фиктивного слоя.



Разновидности псевдооживенных систем:

а — однородный слой; б — неоднородный слой (кипящий слой): 1 — газовый пузырь, 2 — шлейф пузыря, 3 — плотная ("непрерывная") фаза слоя; в — поршневой слой: 1 — поршень твердого материала, 2 — газовая пробка; г — слой с каналообразованием: 1 — малоподвижный твердый материал, 2 — канал (свищ).





К определению гидравлического сопротивления псевдооживленного слоя: а — общий случай, б — псевдооживление в поле сил тяжести.

Рассмотрим первоначально общий случай псевдооживления твердого материала в поле внешних массовых сил, характеризуемых ускорением  $a$ .

Выделим в ПС элементарный участок  $dz$ , в пределах которого эффективная (с учетом сил выталкивания) масса ТМ равна  $dm_3$ . Пусть нормальное к  $a$  сечение слоя  $f=var$ , закон его изменения по высоте слоя известен. Баланс сил, удерживающих массу  $dm_3$  в состоянии равновесия (псевдооживления), запишется (соответственно ОБС для контура, совпадающего с элементарным объемом  $f dz$ ):

$$pf - (p + dp)f - (dm_3)a = 0, \text{ откуда в самом общем виде}$$

$$\Delta p_{\text{пс}} \equiv p_1 - p_2 = \int_{(m_3)} \frac{a}{f} dm_3$$

$$p_1 f - p_2 f + P_a - P_{\text{ТМ}} = 0$$

$$\Delta p_{\text{пс}} = p_1 - p_2 = \frac{P_{\text{ТМ}} - P_a}{f} = \frac{(P_{\text{ТМ}})_э}{f}$$

где  $(P_{\text{ТМ}})_э = P_{\text{ТМ}} - P_a$  — эффективный вес твердых частиц в слое, т.е. их вес за вычетом выталкивающей (архимедовой) силы.

Для практических расчетов данную формулу удобно преобразовать, выразив: вес твердого материала  $P_{\text{ТМ}} = \rho_{\text{Т}} V_{\text{Т}} g = \rho_{\text{Т}} g f H (1 - \varepsilon)$ , архимедову силу (она равна весу ожижающего агента в объеме всех частиц в ПС)  $P_{\text{а}} = \rho g f H (1 - \varepsilon)$ . Подставив эти значения, получим после сокращения на  $f$

$$\Delta p_{\text{ПС}} = (\rho_{\text{Т}} - \rho) g (1 - \varepsilon) H.$$

Подчеркнем, что при псевдоожигении в аппаратах постоянного поперечного сечения величины  $\varepsilon$  и  $H$  увеличиваются с ростом скорости, но произведение  $(1 - \varepsilon) H$  остается неизменным — соответственно  $\Delta p_{\text{ПС}} = \text{const}$ .

Выражение справедливо для всего диапазона псевдоожигенного состояния, в том числе и для точки, когда  $w = w_0$ . Но для этой точки, принадлежащей одновременно к псевдоожигенному и неподвижному слоям,  $\varepsilon = \varepsilon_0$  и  $H = H_0$ . Тогда:

$$\Delta p_{\text{ПС}} = (\rho_{\text{Т}} - \rho) g (1 - \varepsilon_0) H_0. \quad (\text{а})$$

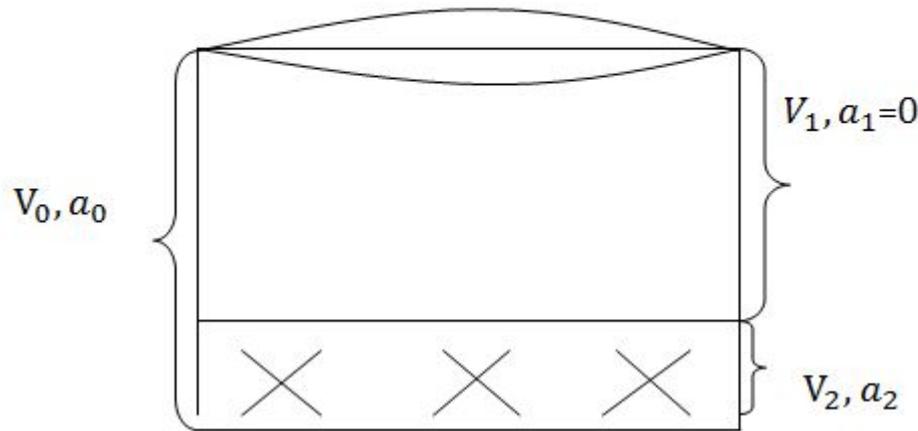
Для дальнейших преобразований последнее выражение удобно представить, в виде сопротивления, приходящегося на единицу первоначальной высоты слоя:

$$\Delta p_{\text{ПС}} / H_0 = (\rho_{\text{Т}} - \rho) g (1 - \varepsilon_0). \quad (\text{б})$$

В практических инженерных расчетах гидравлического сопротивления ПС выражения (а, б) удобнее, нежели исходное выражение, так как обычно известны значения порозности и высоты неподвижного слоя.

## Отстаивание в поле сил тяжести.

Гравитационный отстойник непрерывного действия: Где  $a$ - относительная массовая концентрация,  $V$ - производительности,  $S$ -площадь поперечного сечения.



Материальные балансы по жидкой и твердой фазам имеют вид:

$$V_0 = V_1 + V_2$$

$$V_0 a_0 = V_2 a_2$$

$$V_1 = V_0 \left(1 - \frac{a_0}{a_2}\right)$$

$$S = \frac{V_1}{w_c} = \frac{V_0 \left(1 - \frac{a_0}{a_2}\right)}{w_c}$$

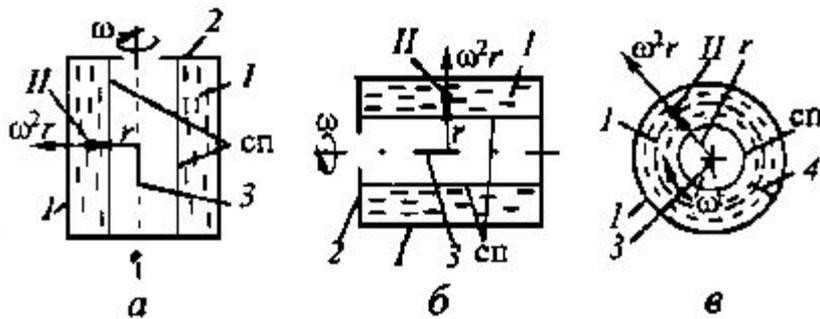
Скорость осаждения равна скорости витания при стесненном осаждении. Берем выражение для расчета рабочей скорости  $w_p$  в псевдооживленном слое при однородном псевдооживлении:

$$Re = \frac{w_p d}{\nu} = \frac{Ar \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \varepsilon^{4,75}}}; w_p \approx w_c$$

$$Ar = \frac{g d^3}{\nu^2} \frac{\rho_T - \rho}{\rho} \text{ - критерий Архимеда}$$

$$a = \frac{(1-\varepsilon)\rho_T}{\varepsilon} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\rho_T}{\rho_T + a} \text{ - связь порозности и плотности с концентрацией.}$$

## Отстаивание в поле центробежных



а — вертикальная центрифуга, б — горизонтальная центрифуга, в — поперечное сечение центрифуги;

1 — корпус центрифуги, 2 — кольцевая крышка, 3 — ось вала центрифуги, 4 — радиальное ребро;

I — суспензия, II — характерная твердая частица в текущем положении (сп- свободная поверхность жидкости).

Фактор разделения - отношение центробежного ускорения и ускорения свободного падения.

$F_p = \frac{\omega^2}{g} R < 3000$  - центрифуги, а выше — сверхцентрифуги. Очень высокие значения фактора разделения позволяют в ходе анализа центробежного осаждения практически без какой-либо ошибки пренебрегать влиянием силы тяжести на движение твердой частицы и учитывать влияние только центробежной силы.

$v = \frac{V}{\tau_c} = \frac{\pi(R_2^2 - R_1^2)H}{2\tau_c} = \frac{\pi(R_2^2)H}{2\tau_c}$  - производительность центрифуги (при половинном заполнении). Для нестесненного витания скорость можно определить по формуле:  $Re_B = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}$ .

Критерий Архимеда для центробежного ускорения имеет вид:

$$Ar = \frac{\omega^2 r d^3}{v^2} \frac{\rho_T - \rho}{\rho}; \quad \omega_B = \frac{dr}{dt} = \frac{Ar_d^v}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}$$

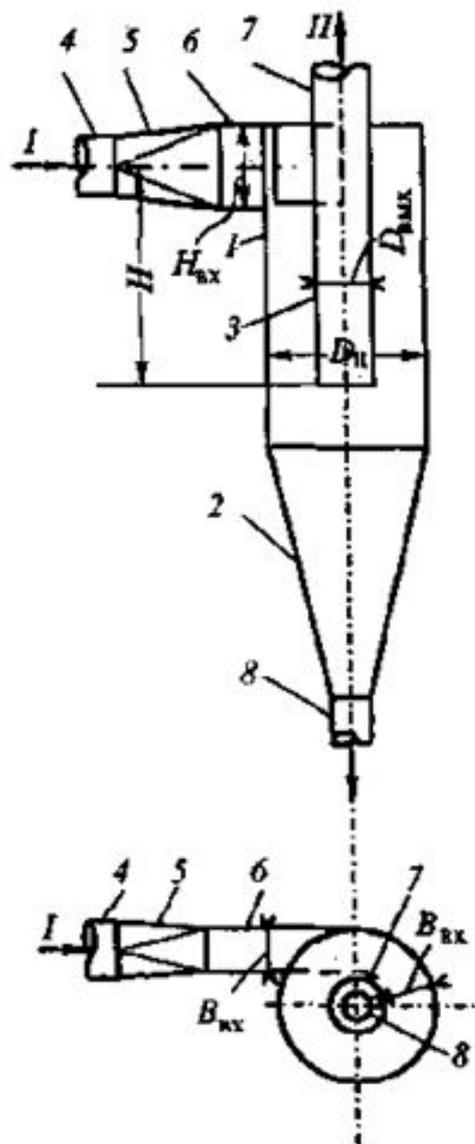
Тогда разделением переменных можно определить время отстаивания в поле центробежных сил:

$$\int_0^\tau dt = \frac{18v}{\omega^2 d^2} \frac{\rho}{\rho_T - \rho} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} + \frac{0,16\sqrt{\rho}}{[\omega^2 d (\rho_T - \rho)]^{1/2}} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{\sqrt{r}}$$

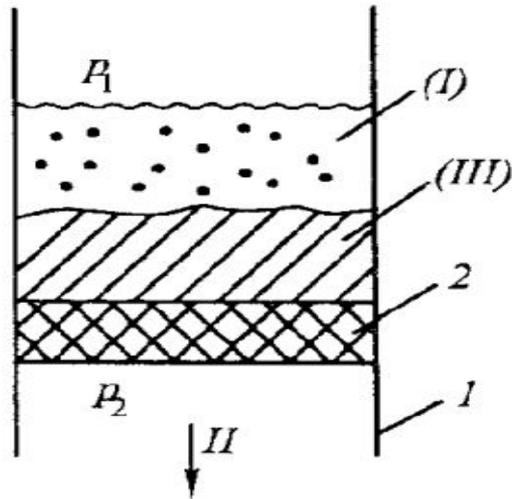
$$\tau = \frac{18v}{\omega^2 d^2} \frac{\rho}{\rho_T - \rho} \ln \frac{R_2}{R_1} + 1,22 \sqrt{\frac{R_1}{\omega^2 d} \frac{\rho}{\rho_T - \rho}} \left(1 - \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}\right) = \tau^L + \tau^T$$

## Обеспыливание воздуха

*Циклоны:* Принципиальная схема действия циклона приведена на рис. Исходный запыленный газ (поток I) подводится к циклону по цилиндрической трубе 4. С помощью переходного участка 5 канал изменяет форму на прямоугольную, и далее исходный газ поступает в циклон через прямоугольный патрубок 6 — с достаточно высокой скоростью и тангенциально. Высокая скорость (обычно на уровне 10—20 м/с) предотвращает выпадение твердых частиц из газового потока в подводящих к циклону каналах. Тангенциальная подача газа в циклон обеспечивает закручивание потока вокруг центральной цилиндрической трубы 3. Под действием возникающей при этом центробежной силы, твердые частицы отбрасываются к стенкам циклона, а очищенный газ (поток II) уходит из циклона через патрубок 7. Твердые частицы, осевшие на боковых стенках циклона, под действием уже силы тяжести (собственного веса) по полотому конусу 2 перемещаются к отводному патрубку 8 и выводятся из циклона.



## Фильтрац



1 — корпус фильтра, 2 — фильтрующая перегородка;  
I — суспензия, II — фильтрат, III — осадок

Схема фильтрования ясна из рис. Фильтрование происходит под действием разности давлений  $\Delta p = p_1 - p_2$ . В общем случае к этой разности надо еще добавить гидростатическое давление жидкостного столба высотой  $h$  над перегородкой:

$$\Delta p = p_1 - p_2 + \rho g h$$

$p_1 > p_2$  - перепад давления в аппарате - движущая сила процесса фильтрации. Для расчета можно использовать ламинарный член формулы Эргана.

$$\Delta p = 150 \frac{(1 - \varepsilon_0)^2 w_p \mu}{\varepsilon_0^3 d^2} H$$

$$w_\phi = \frac{dV}{S d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu r_\phi} = \frac{\Delta p}{\mu (r_n + r_0 h)} = \frac{\Delta p}{\mu (r_n + r_0 \frac{V a}{S})}$$

$r_n, r_0$  - сопротивление перегородки и удельное на 1 м слоя сопротивление осадка. Это основное уравнение фильтрации,  $S$  - площадь фильтра,  $V$  - объем фильтра.

Заметим, что:

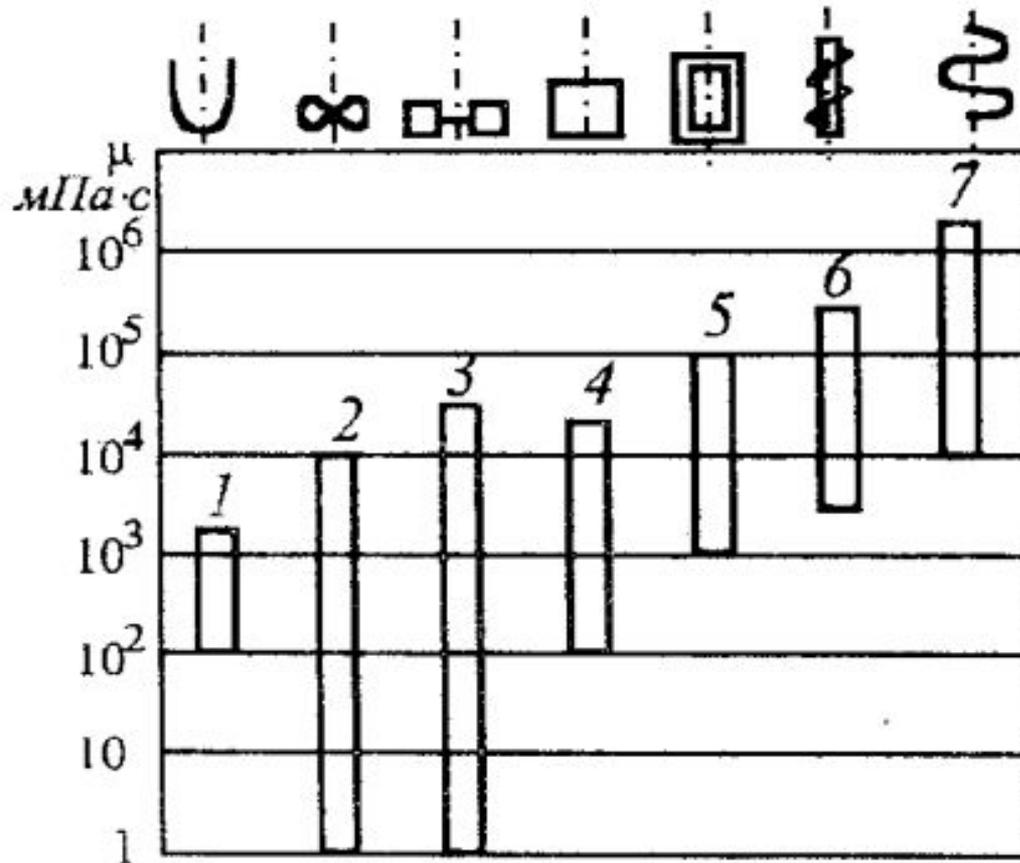
$$h = \frac{V a}{S} - \text{высота слоя осадка, } a - \text{объемная концентрация твердой фазы в осадке.}$$

Расход фильтрата [м<sup>3</sup>/с]

$$\mu r_n S \int_0^V dV + \mu r_0 a \int_0^V V dV = \Delta P S \int_0^\tau d\tau$$

$$V^2 + \frac{2 r_n S}{r_0 a} V - \frac{2 \Delta P S^2 \tau}{\mu r_0 a} = 0; V = -\frac{r_n S}{r_0 a} + \sqrt{\left(\frac{r_n S}{r_0 a}\right)^2 + \frac{2 \Delta P S^2 \tau}{\mu r_0 a}}$$

## Перемешивание механическими устройствами



1 — 7 — типы мешалок: 1 — якорная, 2 — пропеллерная, 3 — турбинная с плоскими лопатками, 4 — лопастная, 5 — рамная, 6 — шнековая, 7 — ленточная.