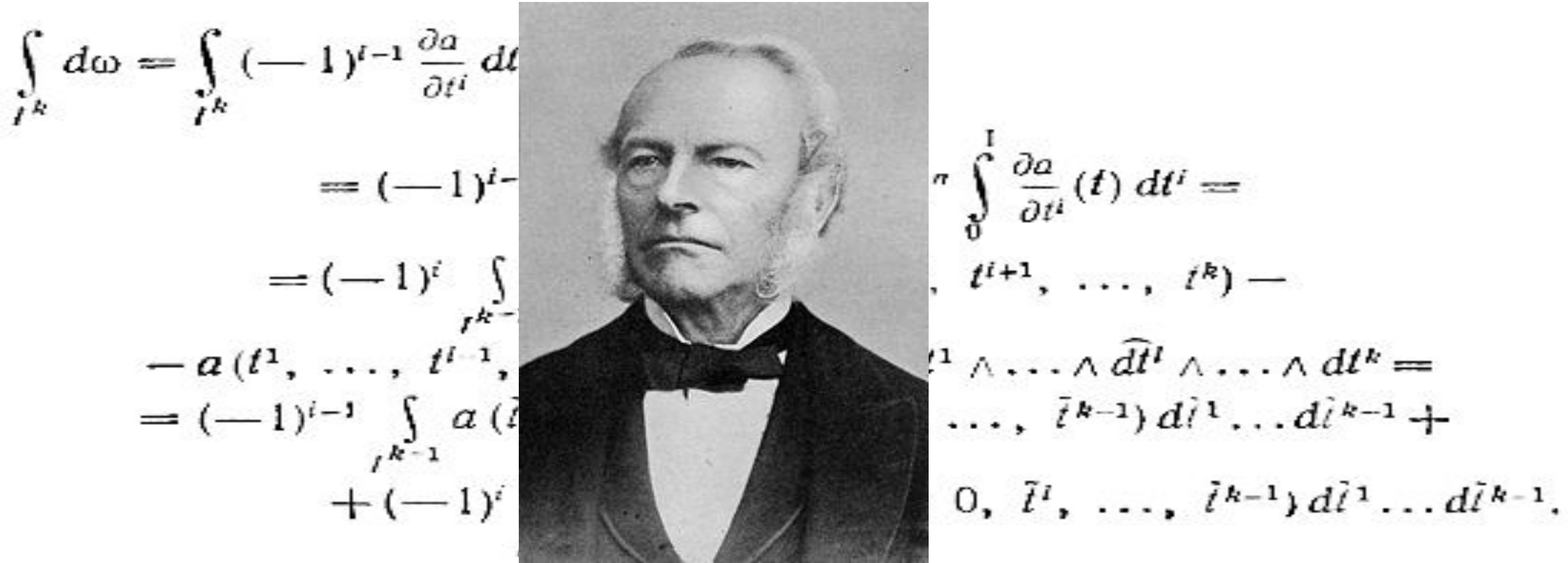
Лекция 5.
Закономерности процесса седиментации взвешенных веществ. Осаждение в неподвижной и движущейся воде. Закон Стокса.



Основные закономерности процесса

Если представить частицу шаром, то ее движение в жидкости описывается законом Стокса, полученным из дифференциальных уравнений гидродинамики

$$\mathbf{F_C = 3\,\pi\mu V d,}$$

где F_C - сила гидродинамического сопротивления жидкости при перемещении частицы;

μ - коэффициент динамической вязкости воды;

V - скорость движения частицы (при осаждении $V = U_0$);

d - диаметр частицы.

В общем виде зависимость описывается уравнением Рэлея

$$\mathbf{F_C = S\,\rho V^2 d^2},$$

где S - коэффициент гидравлического сопротивления частицы;

ρ - плотность жидкости.

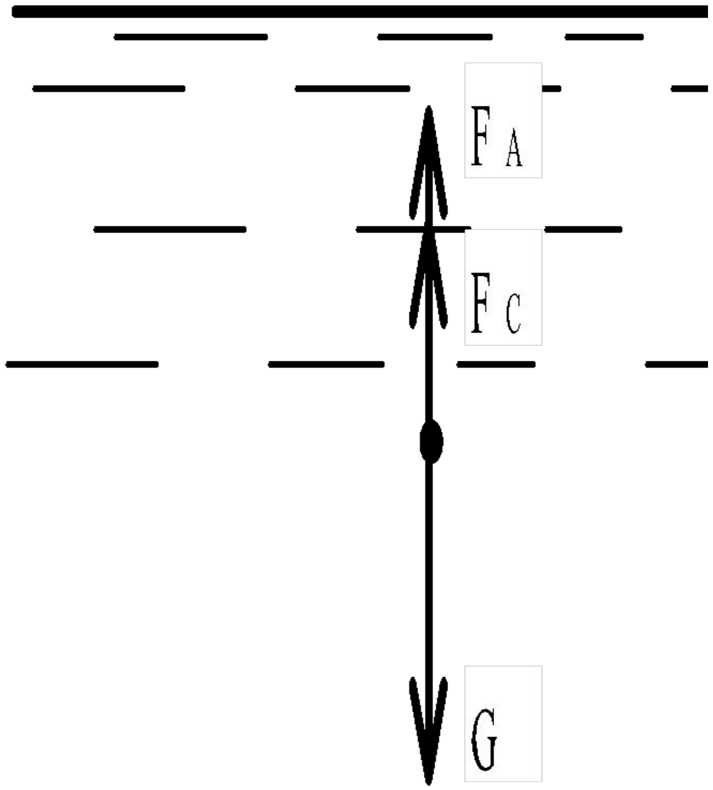
Область действия законов Стокса или Рэлея определяется критическим числом Рейнольдса $Re_{КР}=1$. При седиментации число Рейнольдса определяется по формуле

$$\mathbf{R_e = \rho V d/\ \mu}.$$

В переходном от ламинарного (закон Стокса) к турбулентному (закон Рэлея) режиме

$$\mathbf{F_c = f(V^n),\ \text{где}\ n = 1 \div 2.}$$

Диаграмма сил, действующих на осаждающуюся частицу



Вес шаровой частицы в воде с учетом выталкивающей силы

$$G' = G - F_A = (m_1 - m)g = W(\rho_1 - \rho)g = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_1 - \rho)g,$$

где m_1, ρ_1 - масса и плотность частицы;

m - масса воды в объеме частицы;

W - объем частицы;

g - ускорение свободного падения.

Приравнивая F_C и G', получим:

$$3\,\pi\mu V d = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_1-\rho)g.$$

Подставляя $V=U_0$, и выразив его через остальные величины, получим формулу Стокса

$$U_0 = \frac{gd^2(\rho_1-\rho)}{18\mu}$$

Размерности величин (в системе СГС): U_0 - см/с, g - см/с^2, d - см, ρ - г/см^3, μ -пуазы (г/см·с).

С помощью формулы Стокса можно рассчитать эквивалентный диаметр частиц взвеси (диаметр шаровой частицы с гидравлической крупностью, равной U_0 данной частицы сложной формы), определив из опыта U_0,μ,ρ_1,ρ,

$$d_{ЭКВ} = \sqrt{18\mu U_0 / g(\rho_1 - \rho)}$$

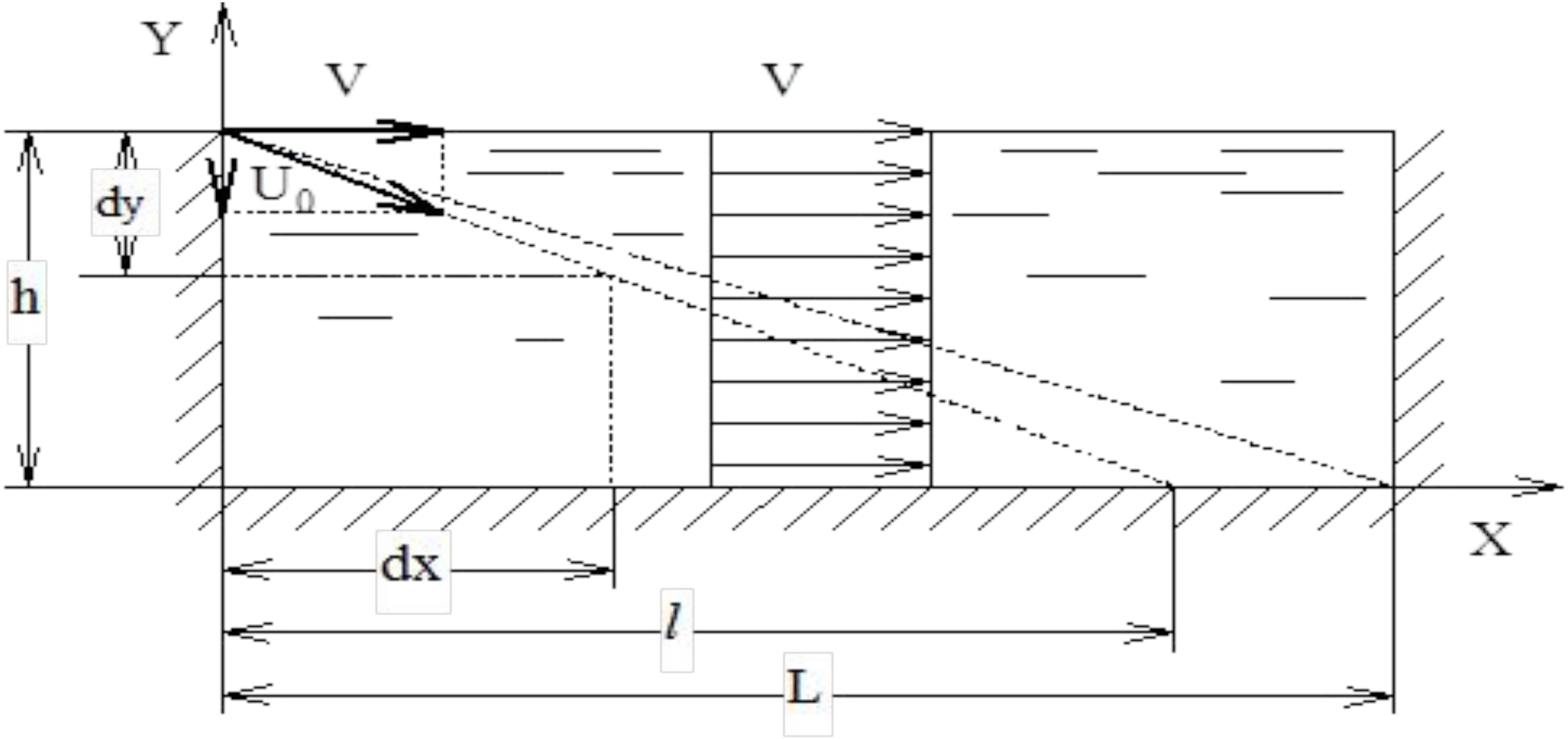
При турбулентном режиме осаждения ($Re_{КР}>1$) формула Стокса преобразуется в вид:

$$U_0 = \sqrt{\frac{\pi d}{6}\left(\frac{\rho_1 - \rho}{\rho}\right)\frac{d}{S}}$$

Ограничения закона Стокса

- Частицы осаждаются независимо друг от друга. Это условие накладывает особенность на концентрацию суспензии – она не должна быть более 1.5-2%.
- Частицы должны быть сферической формы. Поэтому в этом анализе определяем не реальный размер частиц, а так называемый «эффективный радиус».
- Плотность твердой фазы всех частиц одинакова и равна средневзвешенной.
- Закон Стокса применим для определенного диапазона диаметров частиц: >0.0001 мм и<0.25 мм.
- Используется понятие «динамического трения» -это трение внутри жидкой фазы, а не на границе твердая частица-жидкость. Поэтому используется вязкость раствора пирофосфата с поправкой на температуру, при которой происходило определение.

Отстаивание в движущейся воде



Свободное осаждение частицы в движущейся воде

Опускаясь на дно под действием силы тяжести со скоростью U_0, частица проходит путь dy за время

$$dt=-dy/U_0.$$

Одновременно с потоком воды, движущимся со скоростью V, частица пройдет путь dx за то же время

$$dt=dx/V.$$

Приравнивая правые части полученных выражений, получаем дифуравнение

$$-dy/U_0 = dx/V$$

или

$$-Vdy = U_0dx.$$

Возьмем интеграл от обеих частей уравнения

$$-\int Vdy = \int U_0dx.$$

Считая, что скорость V равномерно распределена по сечению отстойника (см. эпюру на рис.3.7), а гидравлическая крупность частицы в процессе осаждения неизменна, т.е. величины V и U_0 константы, получим

$$-V\int dy = U_0\int dx$$

$$-V(y+C) = U_0x,$$

где C - постоянная интегрирования, которую определим из граничных условий. При x=0 y=h (h - глубина отстойника). Тогда

$-V(h+C) = U_0O$, h+C = 0; C=-h

Подставляя С в решение дифуравнения, получим

$$-V(y-h) = U_0x$$

$$U_0x-V(h-y) = 0$$

Уравнение траектории частицы в движущейся воде. Это уравнение прямой, отсекающей на осях координат отрезки

$$x=0;\ y=h$$

$$y=0;\ x=hV/U_0=l,$$

где l - путь, пройденный частицей по длине отстойника.

Считая, что в отстойнике задерживаются только те частицы, траектория которых пересекается с дном, можем определить длину отстойника, задерживающего частицы с гидравлической крупностью не менее Uo_{min},

$$L=hV/Uo_{min}$$

Можно также определить минимальную гидравлическую крупность частиц, которые будут задерживаться в отстойнике данной длины

$$Uo_{min}=hV/L$$

Реальные факторы учитываются <u>коэффициентом объемного использования отстойников</u> α (для различных типов отстойников α=1,3-2,0), при вводе которого формула для определения длины отстойника приобретает вид

$$L=\alpha hV/U_0$$

Спасибо за внимание! ☺️