

# Особенности седиментационных методов очистки сточных вод

## Имамзалин Т. Р.

Имамзалин Тимур Робертович / Imamzalin Timur Robertovich – студент,  
кафедра экологии и промышленной безопасности, факультет энергомашиностроения,  
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, г. Москва

**Аннотация:** рассмотрены основные зависимости для описания процесса седиментации дисперсной фазы. Проводится сравнение математического описания седиментации в центробежном и гравитационном полях.

**Ключевые слова:** седиментация, дисперсная фаза, отстаивание, гидроциклонирование.

В зависимости от типа сточных вод для удаления из них загрязнений могут применяться механические, химические, физико-химические или биологические методы очистки. Определяющим фактором при выборе того или иного метода является состав загрязнений сточных вод. Однако практически в любых очистных сооружениях в качестве предварительной ступени используются аппараты механической очистки. Основной задачей предварительной ступени является удаление крупного мусора и грубодисперсных загрязнений для снижения нагрузки на основную ступень.

Для выделения таких загрязнений в практике очистки сточных вод, а также в других технологических процессах различных отраслей промышленности применяются самые разнообразные типы оборудования, отличающиеся как по конструктивному оформлению, так и по принципу действия (рис. 1) [1].

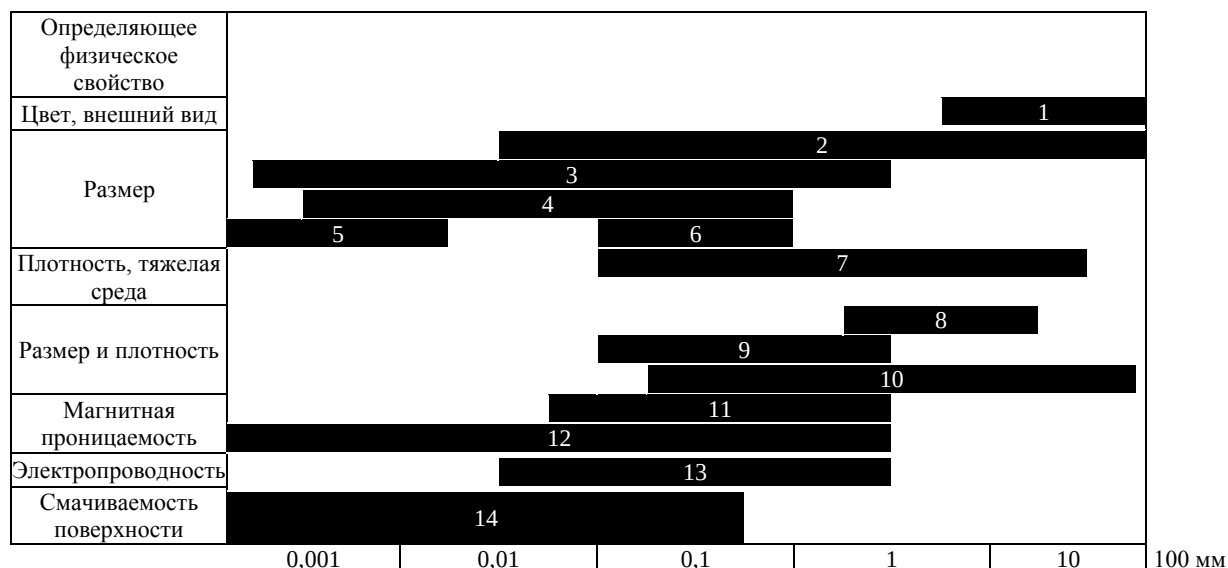


Рис. 1. Области применения методов выделения и классификации твердой фазы.

1 – сортировка; 2 – просеивание; 3 – гидроциклоны; 4 – гидросепараторы-классификаторы; 5 – центрифуги;  
6 – грохоты; 7 – циклоны, конуса, барабаны; 8 – отсадочные машины; 9 – мокрые концентрационные столы;  
10 – сухие концентрационные столы (руды, уголь); 11 – магнитные сепараторы, сухие;  
12 – магнитные сепараторы, мокрые; 13 – электростатические сепараторы; 14 – пенные флотаторы.

В системах очистки сточных вод для снижения концентрации грубо- и среднелдисперсных загрязнений наибольшее распространение получили методы отстаивания. Основными силами, действующими на частицу при седиментации в гравитационном поле, являются сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления среды (рис. 2).

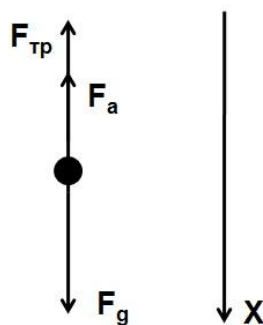


Рис. 2. Основные силы, действующие на частицу в гравитационном поле

Способность к седиментации выражается через константу седиментации, которая определяется скоростью седиментации [2]:

$$S_{ced} = 2r^2(\rho - \rho_0)/9\eta \quad (1)$$

Очевидно, что необходимым условием оседания или всплытия является наличие разности плотностей частицы и среды. Однако при наличии статистического множества частиц оседание приводит к уменьшению их частичной концентрации в верхних слоях и увеличению в нижних, то есть к возникновению градиента концентраций. Градиент концентрации вызывает диффузионный поток, направленный снизу вверх.

Если сравнить седиментацию при наличии диффузии и без нее, то обращает на себя внимание различие факторов, обеспечивающих устойчивость дисперсных систем к осаждению – седиментационную устойчивость. Различают кинетическую седиментационную устойчивость (КСУ) и термодинамическую седиментационную устойчивость (ТСУ). Для ТСУ характерно термодинамическое равновесие, которого может и не быть при КСУ. ТСУ обуславливается статическими законами диффузии и непосредственно связана с седиментационно-диффузионным равновесием. Мерой КСУ является величина обратная константе седиментации [2]:

$$КСУ = 1/S_{ced} = 9\eta / 2r^2(\rho - \rho_0) \quad (2)$$

Мерой ТСУ является гипсометрическая высота, которую удобно определять как [2]:

$$h_e = \frac{kT}{V(\rho - \rho_0)g} \quad (3)$$

Таким образом, ТСУ не зависят от вязкости среды, а повышение температуры способствует устойчивости. КСУ с повышением температуры обычно снижается из-за уменьшения вязкости.

Для описания движения дисперсной фазы в гравитационном поле с учетом диффузионного потока можно воспользоваться известным уравнением конвективной диффузии [3]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v_x \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4)$$

Обычно для упрощения расчетов коэффициент диффузии  $D$  и скорость седиментации  $v$  принимают постоянными. Скорость определяют по формулам Стокса, Аллена или Ньютона-Риттингера в зависимости от режима осаждения (табл. 1) [4].

Таблица 1. Определение скорости осаждения в гравитационном поле.

|                                | Режим осаждения                        |                                                                                |                                              |
|--------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                | Ламинарный                             | Переходный                                                                     | Турбулентный                                 |
| Авторы                         | Стокс                                  | Аллен                                                                          | Ньютон и Риттингер                           |
| Предел измерения Re            | $1,0 \cdot 10^{-3} \dots 1,58$         | $1,58 \dots 4,23 \cdot 10^2$                                                   | $4,23 \cdot 10^2 \dots 1,24 \cdot 10^5$      |
| Определение скорости осаждения | $v = \frac{d^2 \Delta \rho g}{18 \mu}$ | $v = 0,249 \frac{d^{1,2} \Delta \rho^{0,73} g^{0,46}}{\mu^{0,47} \rho^{0,27}}$ | $v = 5,48 \sqrt{\frac{d \Delta \rho}{\rho}}$ |

Не смотря на большую распространённость в практике очистки сточных вод, отстаивание имеет ряд существенных недостатков, одним из которых является его низкая эффективность для выделения систем средне- и тонкодисперсной фазы (табл. 2) [2]:

Таблица 2. Скорость оседания кварца в воде

| Радиус частицы, мкм | Скорость седиментации, см/с | Время оседания на 1см |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 100                 | $3,6 \cdot 10^0$            | 1 с                   |
| 10                  | $3,6 \cdot 10^{-2}$         | 28 с                  |
| 1                   | $3,6 \cdot 10^{-4}$         | 46,5 мин              |
| 0,1                 | $3,6 \cdot 10^{-6}$         | 77,5 ч                |
| 0,01                | $3,6 \cdot 10^{-8}$         | 323 дня               |
| 0,001               | $3,6 \cdot 10^{-10}$        | 89 лет                |

Для интенсификации выделения таких примесей могут быть использованы центробежные методы очистки: центрифугирование и гидроциклонирование. В очистке сточных вод наибольшее распространение получило гидроциклонирование. С точки зрения математического описания этого процесса он является схожим с процессом осаждения. Их основным различием является природа действующих на частицу сил. Так, вместо силы тяжести (рис. 2), при гидроциклонировании на частицу будет воздействовать сила центробежного осаждения:

$$F_{\text{ц}} = \frac{\pi d^3}{6} \rho \omega^2 R \gg F_g; \quad (5)$$

Для описания движения дисперсной фазы в центробежном поле можно воспользоваться уравнением (4). Коэффициент диффузии  $D$  чаще всего принимают постоянным, а скорость для ламинарного, турбулентного и переходного режимов соответственно определяют по формулам:

$$v_{\text{ц}} = \frac{d^2 \Delta \rho}{18 \mu} \omega^2 R = v Fr'; \quad v_{\text{ц}} = 1,75 \sqrt{\frac{d \Delta \rho}{\rho}} \omega^2 R = v \sqrt{Fr'}; \quad v_{\text{ц}} = 0,1355 \frac{d^{1,2} \Delta \rho^{0,78} (\omega^2 R)^{0,73}}{\rho^{0,26} \mu^{0,46}} \quad (6),$$

Где  $Fr' = \omega^2 R / g$  – фактор разделения (аналог числа Фруда).

В силу того, что в случае центробежного осаждения скорость является функцией координаты, решение уравнения диффузии становится на порядок сложнее.

Как правило, для одинаковых частиц сила центробежного осаждения на порядок больше силы тяжести (5), поэтому частица, осаждающаяся по турбулентному закону в центрифуге, в гравитационном поле будет оседать в ламинарном режиме. Кризис ламинарного осаждения наступает при  $Re \approx 1,6$ , а переход к турбулентному осаждению осуществляется при  $Re \approx 420$  (табл.1). Для этих значений соответственно имеем при гравитационном осаждении:

$$d_l' = 3,1 \cdot \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\rho \Delta \rho \omega^2 R}}; \quad d_t' = 39,0 \cdot \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\rho \Delta \rho \omega^2 R}} \quad (7)$$

При центробежном осаждении:

$$d_l = 3,1 \cdot \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\rho \Delta \rho g}}; \quad d_t = 39,0 \cdot \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\rho \Delta \rho g}} \quad (8)$$

Из этих соотношений видно, что предельные диаметры в центробежном поле в  $\sqrt[3]{Fr'}$  раз меньше чем в гравитационном.

Таким образом, соотношения, описывающие закономерности осаждения в центробежном поле, сходны с соответствующими соотношениями гравитационного осаждения. Различие заключается лишь в том, что в первом случае в формулы входит центробежное ускорение, а во втором – ускорение силы тяжести, и для частиц одинакового диаметра переход из ламинарного режима в переходный, а из переходного в турбулентный в поле центробежных сил наступает на порядок раньше, чем в поле гравитационных.

### Литература

1. Терновский И. Г., Кутепов А. М. Гидроциклонирование. М.: Наука, 1994. 350 с.
2. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1988. 464 с.
3. Протодьяконов И. О., Люблинская И. Е., Рыжков А. Е. Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость – твердое тело. Л.: Химия, 1987. 336 с.

4. *Малиновская Т. А. и др.* Разделение суспензий в химической промышленности. М.: Химия, 1983. 264 с.