

## 4.2. Отстаивание

# Отстаивание

расслоение жидкой дисперсной системы (суспензии, эмульсии, пены) на составляющие её фазы: дисперсионную среду и диспергированное вещество (дисперсную фазу), происходящее под действием силы тяжести.

В процессе отстаивания частицы дисперсной фазы оседают или всплывают.

На характер осаждения частиц взвешенных веществ влияют их удельный вес, размер и форма, а также наличие и режим движения очищаемой воды и ее вязкость. Природные и сточные воды всегда представляют собой полидисперсную систему, т. е. содержат частицы различных размеров, а также различных форм. Кроме того, весьма часто приходится иметь дело с осаждением агрегативно-неустойчивой взвеси, частицы которой в процессе осаждения меняют свою структуру и размеры.

Все это крайне затрудняет математическое выражение законов осаждения взвеси и получение точных методов расчета сооружений и прогнозирования хода процесса осаждения.

Рассмотрим некоторые теоретические предпосылки, которые положены в основу методик расчета сооружений.

Скорость осаждения (всплытия) частицы в стоячей воде при температуре  $10^{\circ}\text{C}$  называют, как известно, гидравлической крупностью частицы. Величина частицы любой формы может быть условно выражена через эквивалентный диаметр, который представляет собой диаметр шарообразной частицы, которая имеет ту же гидравлическую крупность, что и данная частица произвольной формы.

В стоячей воде частицу действуют следующие силы:  $F$  — сила тяжести частицы в воде;  $\Phi$  — сила сопротивления жидкости;  $J$  — сила инерции.

Следовательно, уравнение движения осаждающейся частицы в самом общем виде

$$F - \Phi = J$$

Сила тяжести частицы, погруженной в воду:

$$F = (\gamma - \gamma_0)W = (\rho - \rho_0)gW$$

где  $\gamma$  и  $\rho$  — удельный вес и плотность частицы;  $\gamma_0$  и  $\rho_0$  — удельный вес и плотность воды;  $W$  — объем частицы.

Сила сопротивления жидкости  $\Phi$  зависит от массы, размера и формы частицы, скорости ее выпадения и вязкости жидкости. В общем виде силу  $\Phi$  можно представить

$$\Phi = \varphi \rho_0 u^2 d^2$$

где  $\varphi$  — коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho_0 u d}{\mu}$$

$u$  — скорость осаждения (всплытия) частицы;  $d$  — эквивалентный диаметр частицы;  $\mu$  — вязкость жидкости.

Сила инерции равна массе частицы, умноженной на ускорение

$$J = (\rho - \rho_0)W \frac{du}{dt}$$

Подставив значения всех сил в основное уравнение движения частицы, получим

$$(\rho - \rho_0)gW - \varphi\rho_0u^2d^2 = (\rho - \rho_0)W \frac{du}{dt}$$

Скорость выпадения частицы весьма быстро приобретает постоянное значение, не изменяющееся во все время выпадения, поэтому ускорение  $\frac{du}{dt}$  будет равно нулю на большей части пути выпадения частицы. Тогда основное уравнение примет вид

$$(\rho - \rho_0)gW = \varphi\rho_0u^2d^2$$

Отсюда скорость выпадения  $u$

$$u = \sqrt{\frac{(\rho - \rho_0)gW}{\varphi\rho_0 d^2}}$$

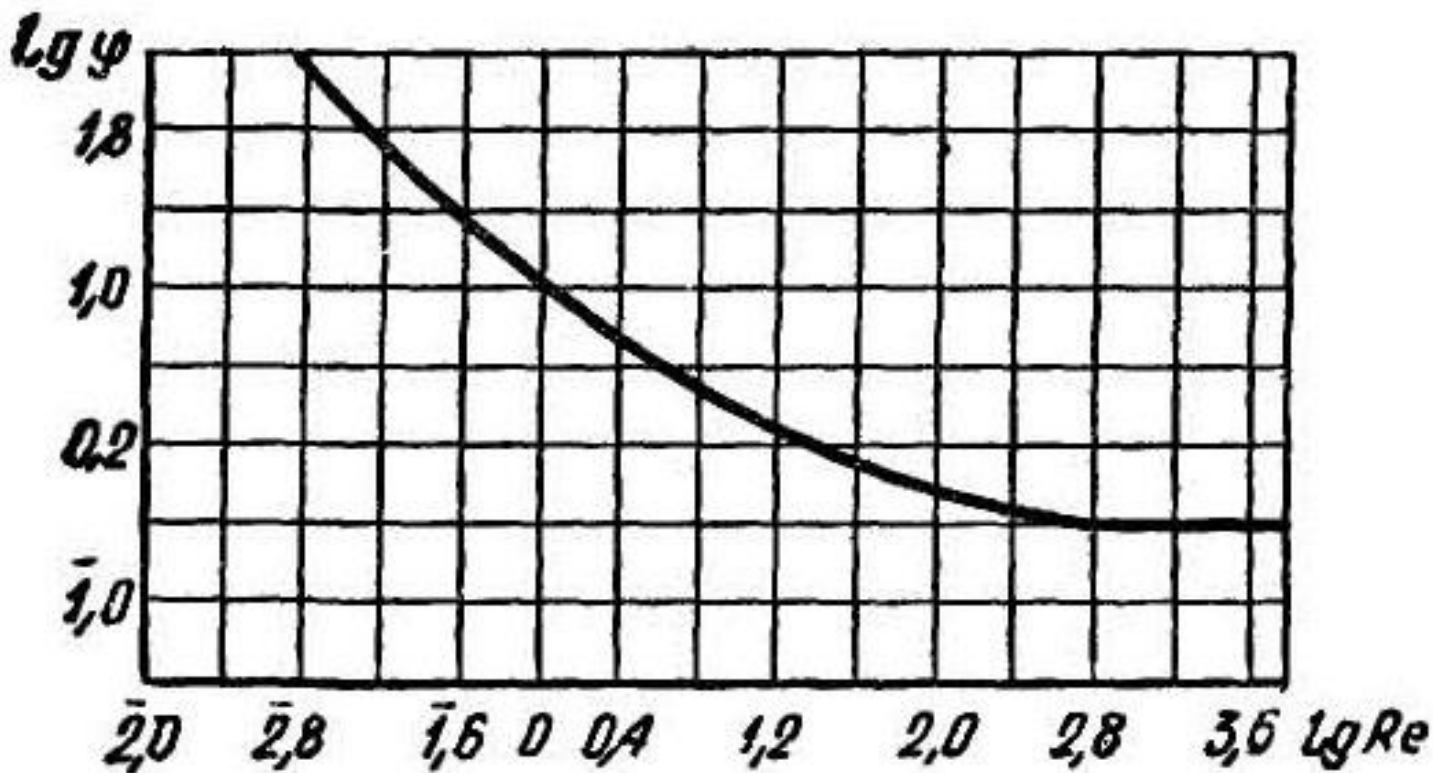
Для частицы произвольной формы, имеющей эквивалентный диаметр  $d$

$$W = \frac{\pi d^3}{6}$$

Отсюда скорость выпадения

$$u = \sqrt{\frac{\pi(\rho - \rho_0)}{6\varphi\rho_0}gd}$$

# Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса





Для частиц весьма малого размера имеет место линейный закон сопротивления (левый участок линии), т. е. сила сопротивления будет пропорциональна первой степени скорости выпадения частицы. Для этих условий Стоксом дано известное выражение силы сопротивления

$$F = 3\pi\mu u d$$

Сравнивая эту формулу с общим выражением силы сопротивления жидкости, получим выражение для коэффициента сопротивления при линейном законе

$$\varphi = \frac{3\pi\mu}{\rho_0 u d} = \frac{3\pi}{\text{Re}}$$

т. е. коэффициент  $\varphi$  может быть выражен в функции числа Рейнольдса. Подставив это выражение  $\varphi$  в полученную выше основную формулу для скорости выпадения, получим

$$u = \frac{g(\rho - \rho_0)}{18\mu} d^2$$

т. е. получим известную формулу Стокса.

При увеличении диаметра частиц и скорости их осаждения (всплытия), т. е. с увеличением числа  $Re$  (при  $Re > 1$ ), линейный закон сопротивления нарушается. При дальнейшем увеличении числа  $Re$  кривая  $\varphi = f(Re)$  постепенно переходит в прямую, параллельную оси абсцисс, т. е. значение  $\varphi$  становится постоянным, не зависящим от  $Re$ . Таким образом, при больших значениях  $Re$  мы имеем дело с квадратичной областью сопротивления, когда сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости осаждения (всплытия). В этой области коэффициент сопротивления будет зависеть от формы осаждающихся частиц.

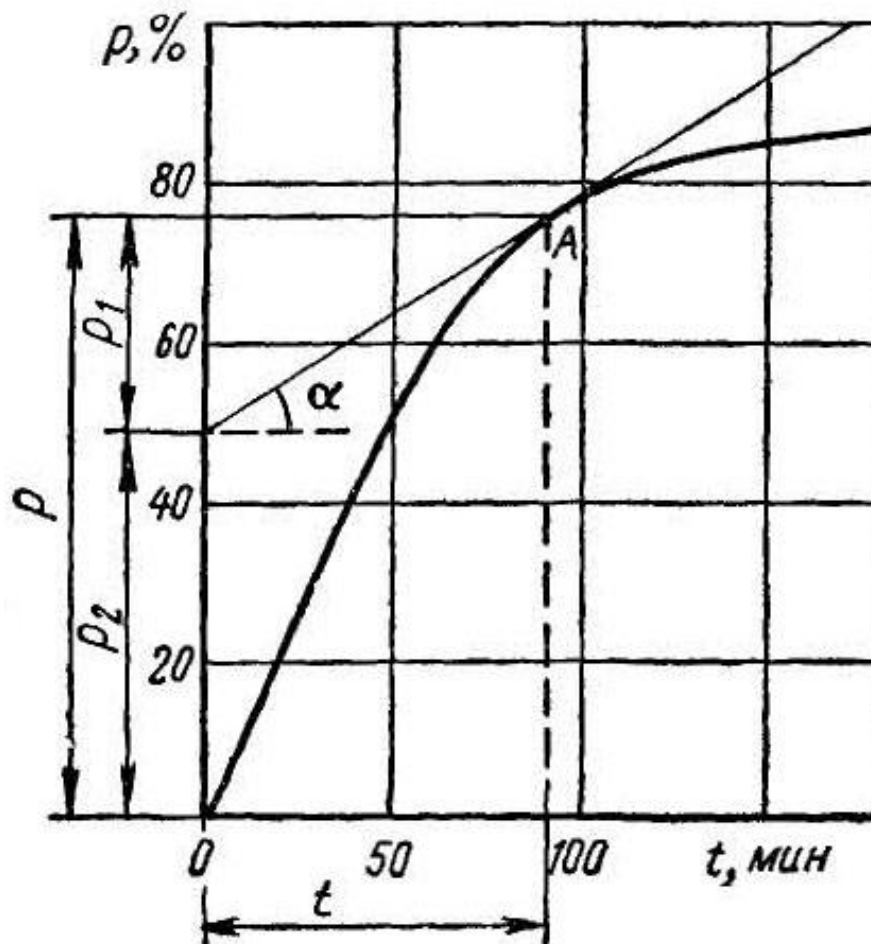
При уменьшении температуры воды ее вязкость  $\mu$  увеличивается, и поэтому скорость осаждения (всплытия)  $u$  будет меньше в холодной воде и большей в теплой.

Приведенные соображения по поводу скорости  $u$  могут быть практически использованы лишь для случаев монодисперсной системы, т. е. когда частицы взвешенных веществ имеют одинаковые (или изменяющиеся в весьма узком диапазоне) размеры.

Природные и сточные воды представляют собой полидисперсные лиофобно-лиофильные системы с большим диапазоном размеров частиц. Поэтому характеристики осаждения (всплытия) частиц для таких систем получают эмпирическим путем.

При этом в лаборатории количество  $p$  взвешенных веществ (в процентах от количества взвешенных веществ до отстаивания), осевших (всплывших) через различные промежутки времени (например, через каждый час), получают кривую осаждения (всплытия) взвеси.

# Кривая осадения (всплытия) взвеси



Обычно кривые осаднения (всплытия) взвеси для природных и сточных вод имеют выпуклую форму, что свидетельствует о замедлении процесса осаднения (всплытия) с течением времени, которое объясняется неоднородным составом взвешенных веществ.

При чем, чем более выгнута кривая, тем более неоднороден состав взвешенных веществ (для монодисперсной взвеси эта кривая обратилась бы в прямую линию).

Кривая осаднения (всплытия) взвеси позволяет определить, какой процент взвеси осаждается (всплывает) в течение любого заданного промежутка времени. Она дает возможность также найти процентное содержание различных фракций взвешенных веществ с разной гидравлической крупностью частиц.

Кривые осаждения (всплытия) взвеси, полученные на основе специально поставленных экспериментов, позволяют обоснованно подойти к расчету отстойников при их проектировании. С помощью указанных кривых определяют расчетные скорости осаждения (всплытия) взвеси, при которых обеспечивается заданный эффект очистки воды, а также необходимое время пребывания воды в сооружении.

Экспериментальные исследования, проводимые для построения таких кривых, относятся к технологическому анализу воды.

К сожалению, указанные исследования далеко не всегда можно осуществить.

Поэтому при проектировании сооружений по очистке воды методом отстаивания используют унифицированные по показателю, характеризующему степень агломерации частиц взвешенных веществ в процессе их осаждения, данные исследований различных категорий вод.

# Гидравлическая крупность частиц взвешенных веществ

$$U_0 = \frac{1000kh_1}{\alpha t \left( \frac{kh_1}{h} \right)^n} - \omega,$$

$k$  – коэффициент использования объема сооружения;  $h_1$  – глубина рабочей части сооружения, м;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры воды на ее вязкость;  $t$  – продолжительность отстаивания, с, соответствующая заданному эффекту очистки воды от взвешенных веществ и полученная в лабораторных условиях в слое воды  $h = 500$  мм;

$n$  – показатель, зависящий от агломерации взвешенных веществ в процессе их осаждения;  $\omega$  – вертикальная, составляющая скорости движения воды в сооружении



Под отстаиванием в строгом смысле слова понимается осаждение (всплытие) частиц взвешенных веществ в спокойном состоянии. Осуществление такого процесса («периодического отстаивания») в практике очистки воды крайне неудобно, так как требует периодического наполнения и опорожнения сооружений.

Поэтому применяют так называемое непрерывное отстаивание, при котором очищаемая вода непрерывно проходит с малыми скоростями через сооружения, в которых происходит осаждение (всплытие) частиц взвешенных веществ.

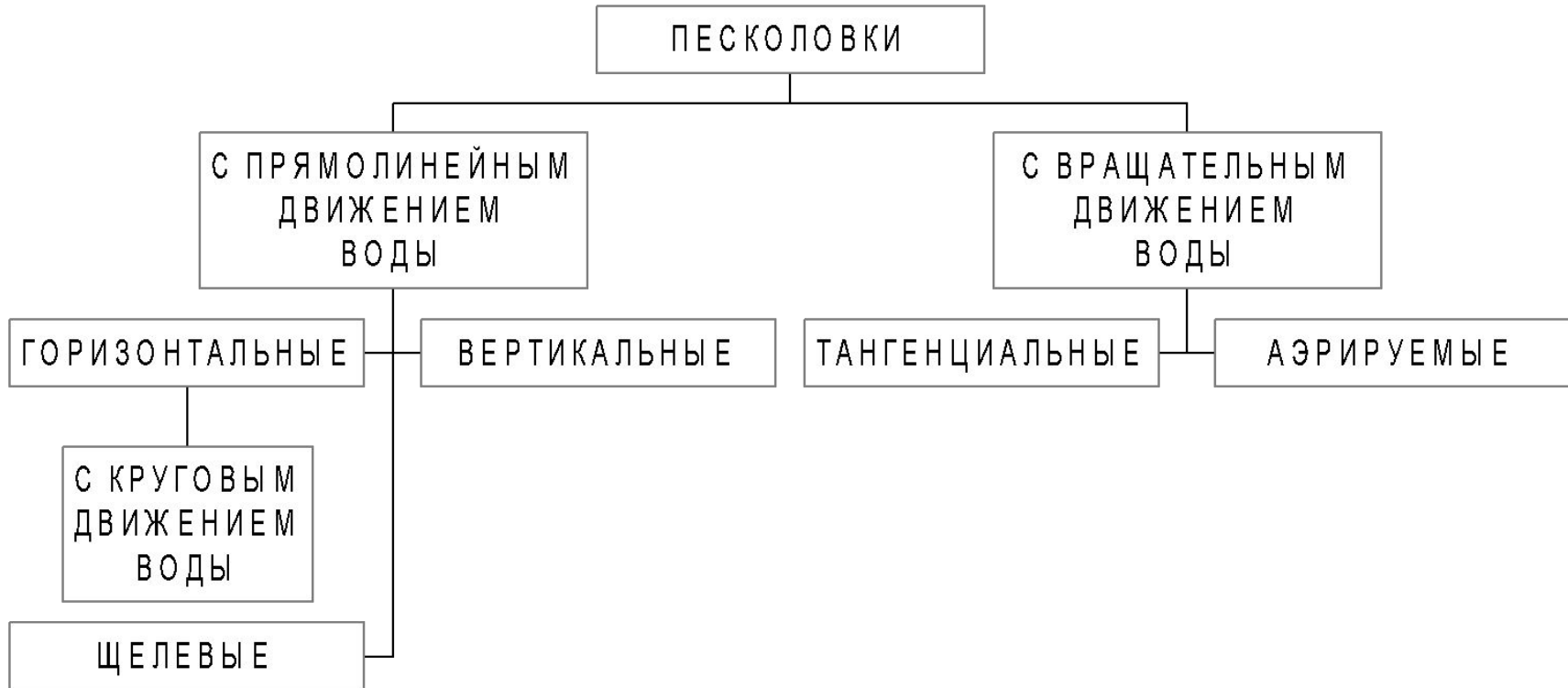
В практике очистки воды процесс отстаивания осуществляется в специальных сооружениях — песколовках и отстойниках.

## 4.2.1. Песколовки

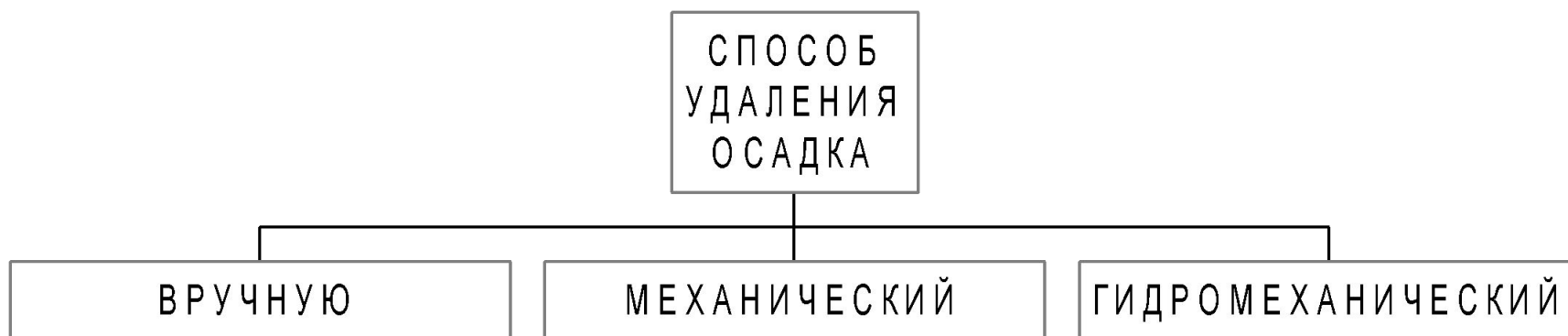
# Назначение

Удаление из воды песка и других тяжелых минеральных нерастворенных примесей за счет кратковременного отстаивания.

# Классификация песколовков



# Способы удаления осадка из песколовок



# Основы расчета песколовков

# Горизонтальные песколовки

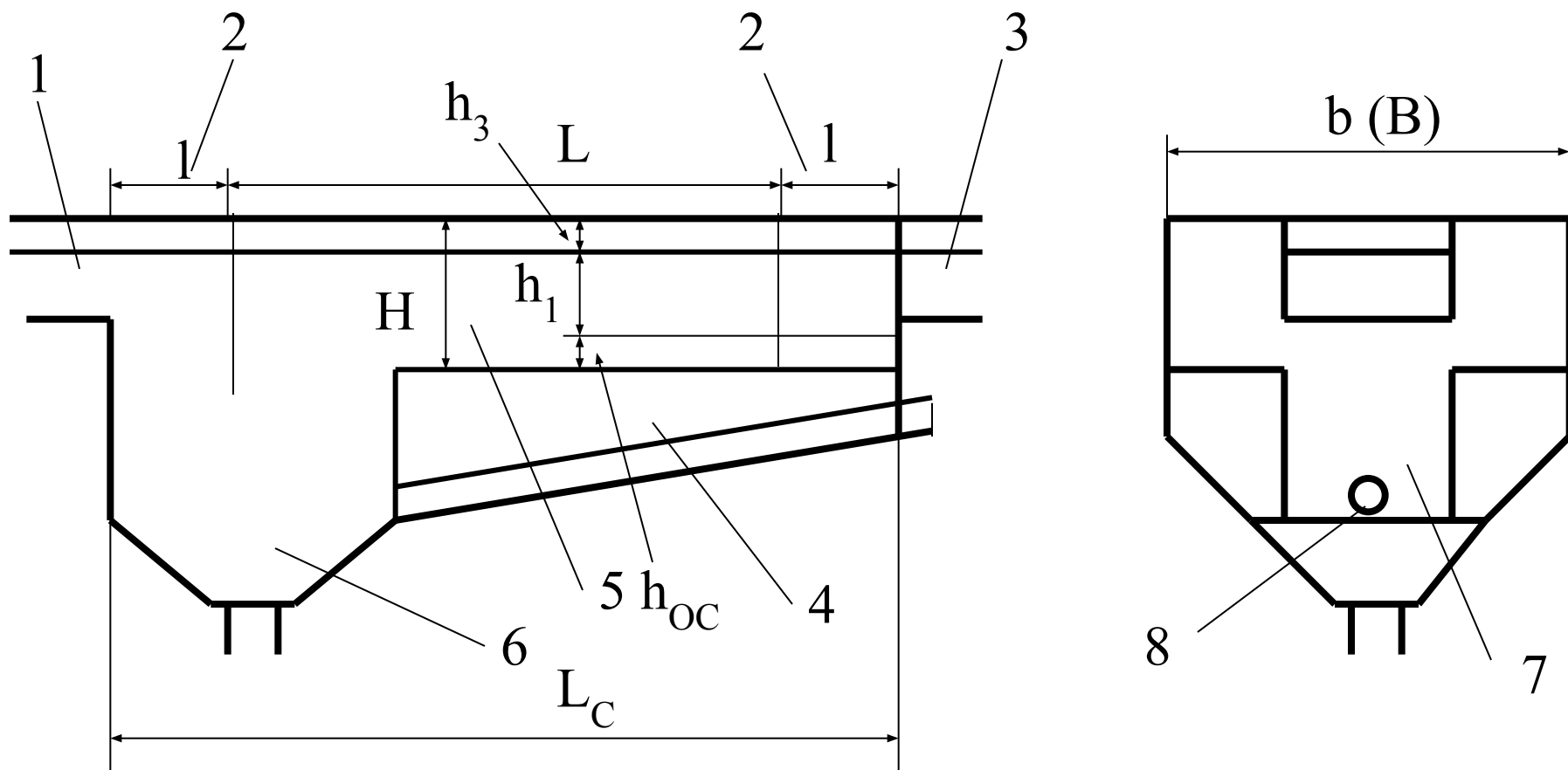


Схема сeкции горизонтальной песколовки  
(горизонтальной песколовки)



Площадь живого сечения отделения песколовки:

$$\omega = \frac{q}{vn}$$

$v = 0,1 \dots 0,3$  м/с;

$n \geq 2$ .

Длина песколовки:

$$L = k \frac{h_1}{u_0} v$$

$$k = \frac{u_0}{\sqrt{u_0^2 - \omega_1^2}}$$

$$\omega_1 = 0,05v$$

При расчете следует принимать

- Расчетный диаметр частиц песка – 0,2...0,25 мм;
- Время пребывания сточных вод в песколовке – не менее 30 с.

# Горизонтальные песколовки с круговым движением ВОДЫ

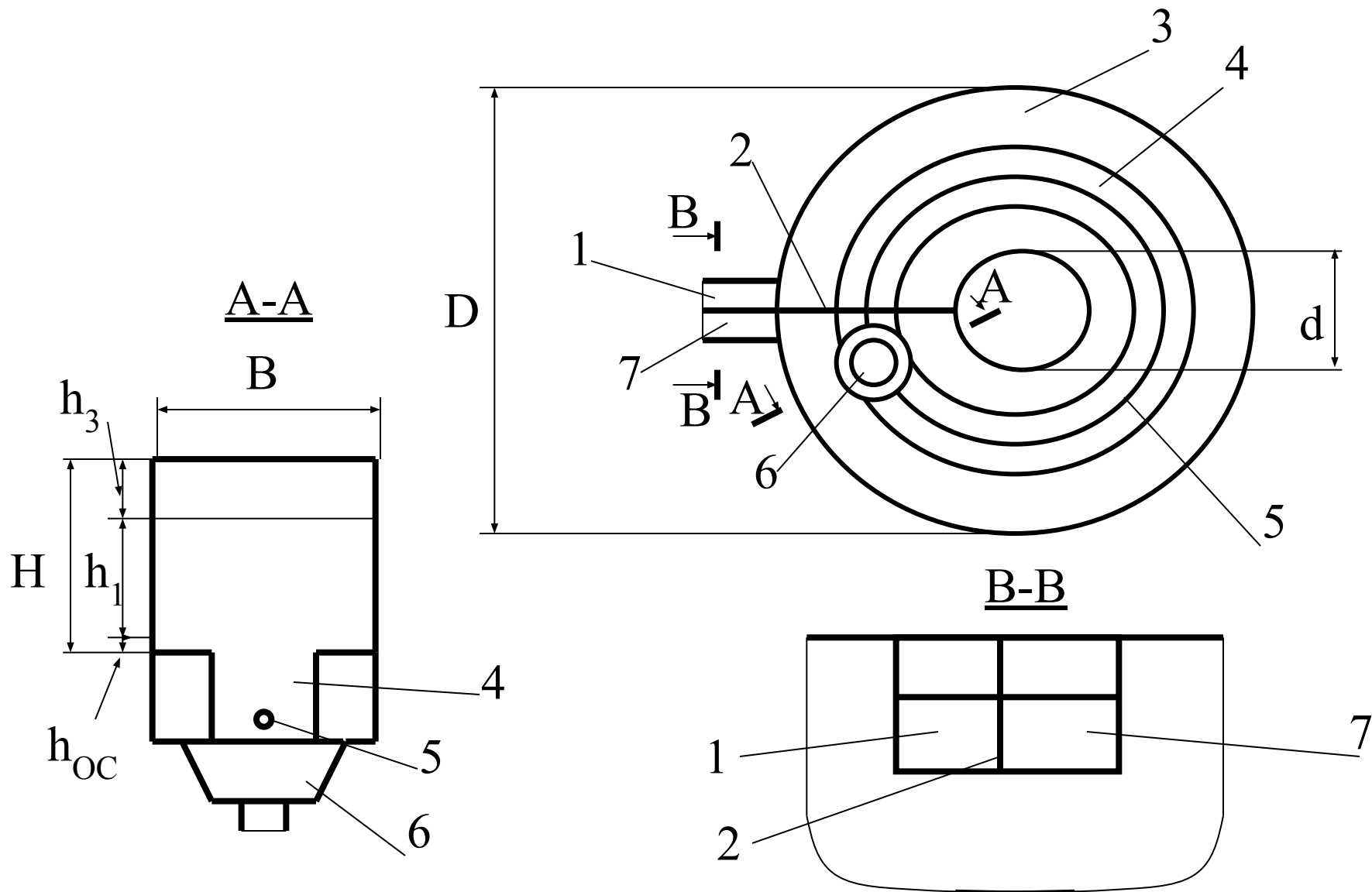


Схема горизонтальной песколовки с круговым движением воды

Рассчитываются аналогично обычным  
горизонтальным песколовкам с учетом круглой  
формы в плане.

Аэрируемые песколовки

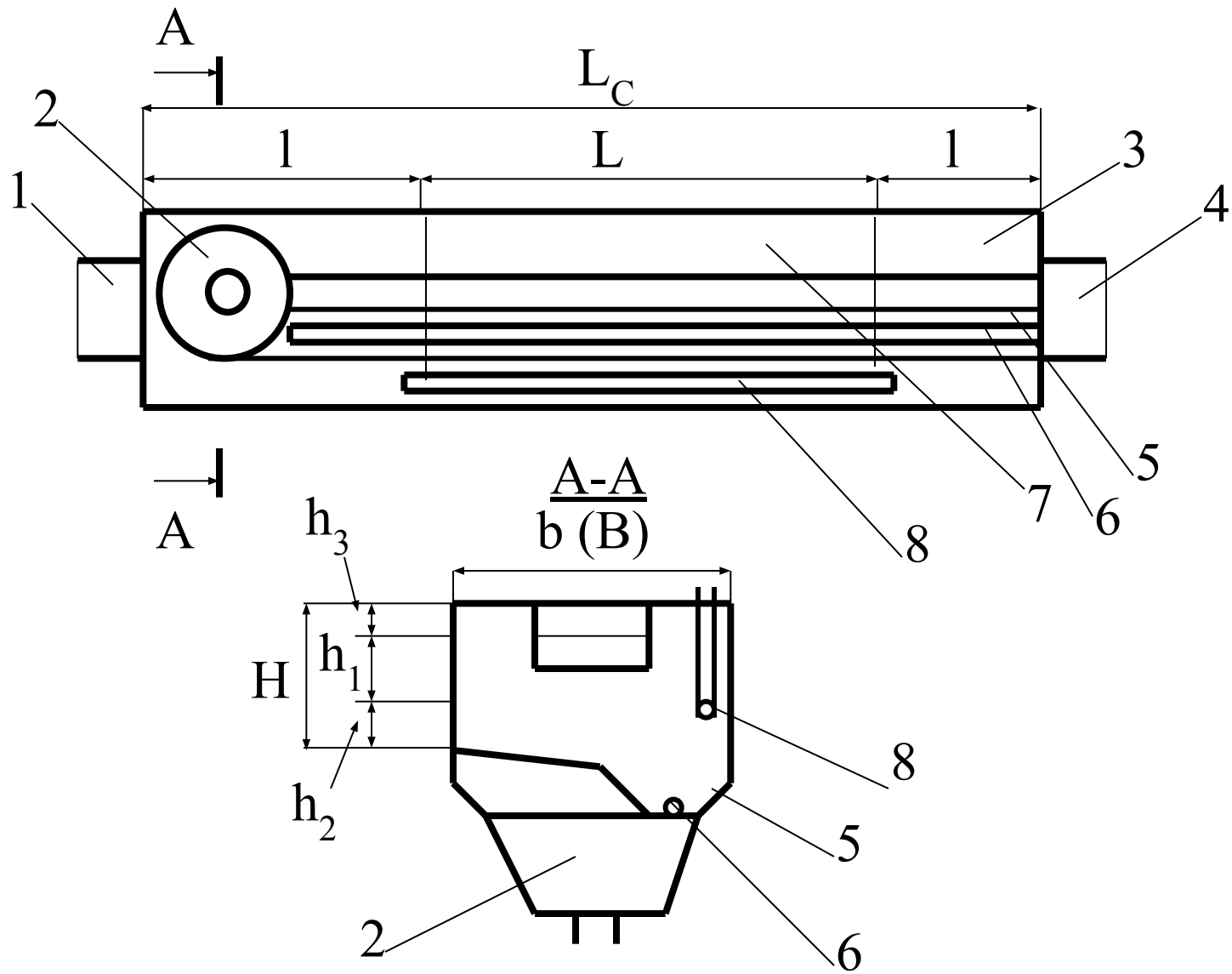


Схема аэрируемой песколовки



Расчет производится аналогично горизонтальным песколовкам. При этом следует принимать:

- Коэффициент  $k$

$$k = \frac{26,4\alpha u_0}{\lg(1 - 20\alpha u_0)}$$

- Среднюю скорость движения воды  $v = 0,8 \dots 1,2$  м/с;
- Расчетный диаметр частиц песка  $0,15 \dots 0,20$  мм;
- $\alpha = V/h_1 = 1,0 \dots 1,5$ ;
- Интенсивность аэрации -  $3 \dots 5$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч);
- Поперечный уклон дна в сторону пескового лотка —  $0,3 \dots 0,4$ .

Тангенциальные песколовки

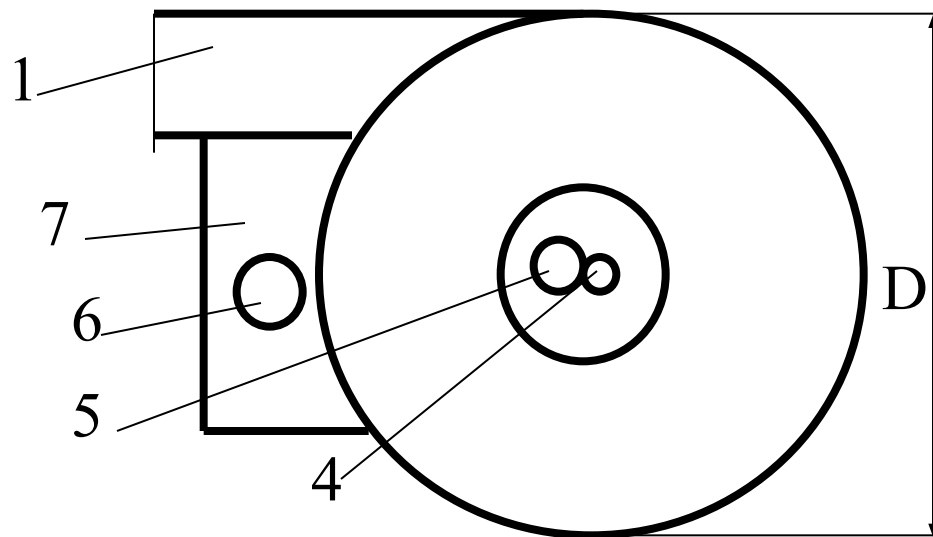
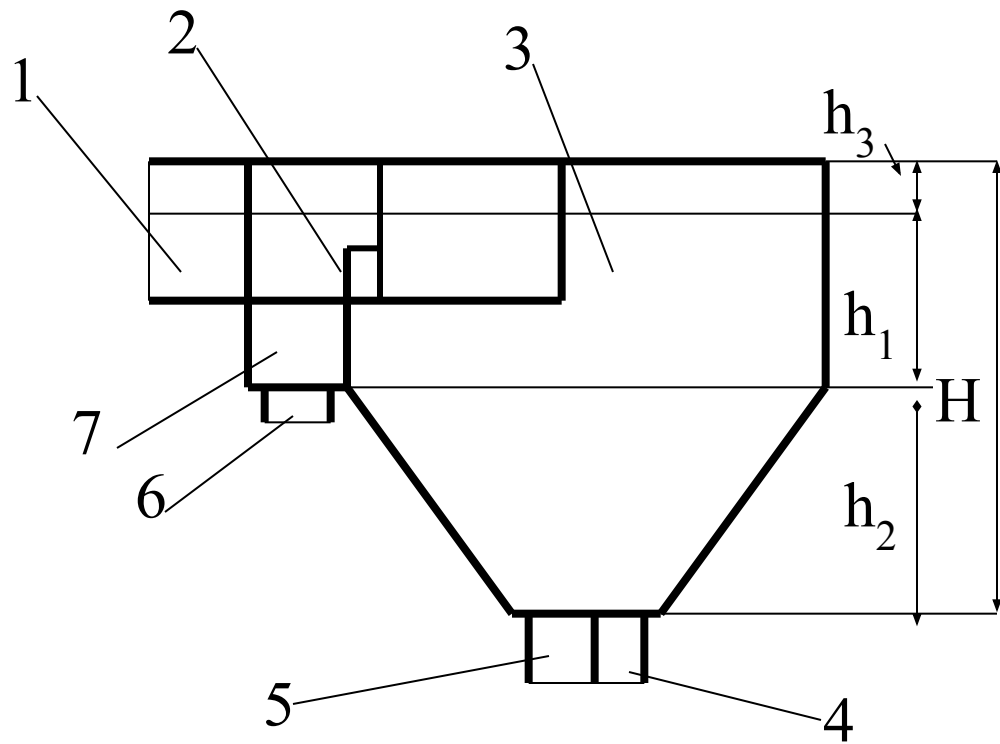


Схема  
 тангенциальной  
 песколовки

Площадь песколовки:

$$F = \frac{q}{nq_0}$$

$$F = \frac{q}{u_0}$$

$$h_1 = \frac{D}{2}$$

$q_0 = 110 \dots 130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч});$

$u_0 - \text{м/ч};$

Расчетный диаметр частиц песка – 0,20...0,25 мм.

# Вертикальные песколовки

При расчете следует принимать

- Гидравлическую нагрузку  $q_0 = 100 \dots 130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;
- Глубину рабочей части

$$h_1 = vt$$

- Скорость движения воды:  
 $v = 0,05 \text{ м/с}$  – при максимальном расходе воды;  
 $v = 0,02 \text{ м/с}$  – при минимальном расходе воды;
- Продолжительность пребывания воды в песколовке  $t = 1,0 \dots 3,5 \text{ мин.}$

# Щелевые песколовки

При расчете следует принимать

- Ширину щелей – 0,10...0,15 м;
- Длину щелей –  $\frac{3}{4}$  диаметра трубы (ширины лотка);
- Угол наклона стенок бункера – 50...60°.



Во всех типах песколовок объем и размеры осадочной части определяются исходя из продолжительности хранения ней осадка до выгрузки из песколовки, которая не должна превышать двух суток.

# Основы расчета системы гидромеханического удаления осадка

Скорость восходящего потока промывной воды в песковом лотке:

$$v' = 10 \frac{d_{\text{ЭКВ}}^{1,31}}{\mu^{0,54}} (0,7e + 0,17)$$

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{100}{\sum \frac{P_i}{d_k}} \approx 0,05 \text{ см}$$

$$e = \frac{h - h_0}{h_0}$$

Общий расход воды на смыв песка:

$$q_{\text{л}} = v' b l$$

Напор воды в смывном трубопроводе:

$$H_0 = 5,6h_0 + 5,4 \frac{v_{\text{тр}}^3}{2g}$$

Диаметр выходного отверстия sprысков:

$$d_{\text{спр}} = \sqrt{\frac{4q_l}{\pi n' \mu' \sqrt{2gH_0}}}$$

$$\mu' = 0,82.$$

## 4.2.2. Отстойники

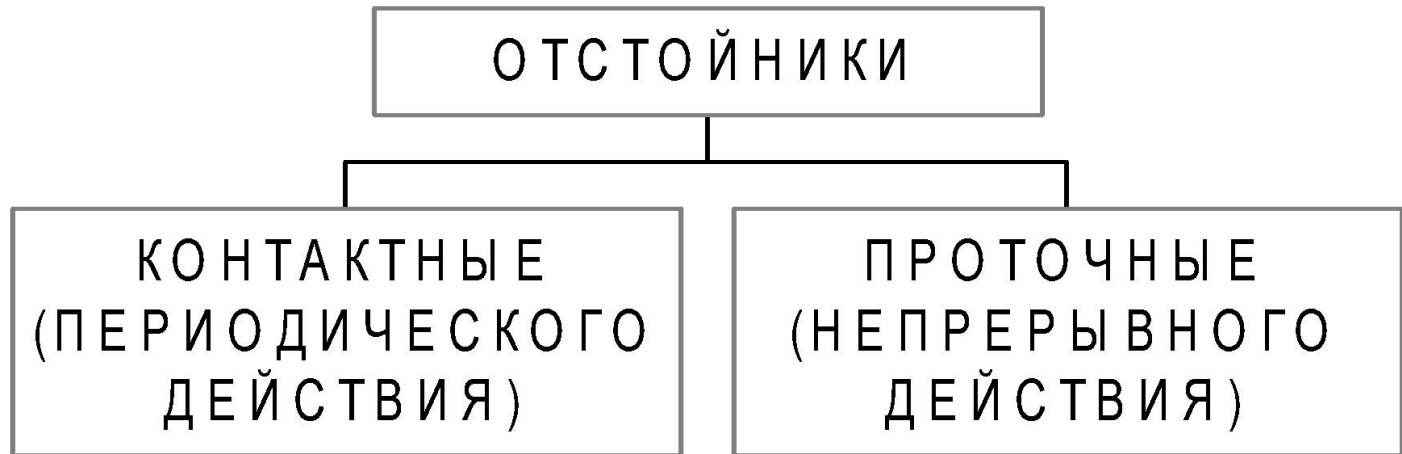
# Назначение

Удаление из воды нерастворенных примесей с удельным весом, отличным от удельного веса воды, за счет отстаивания.

# Классификации отстойников



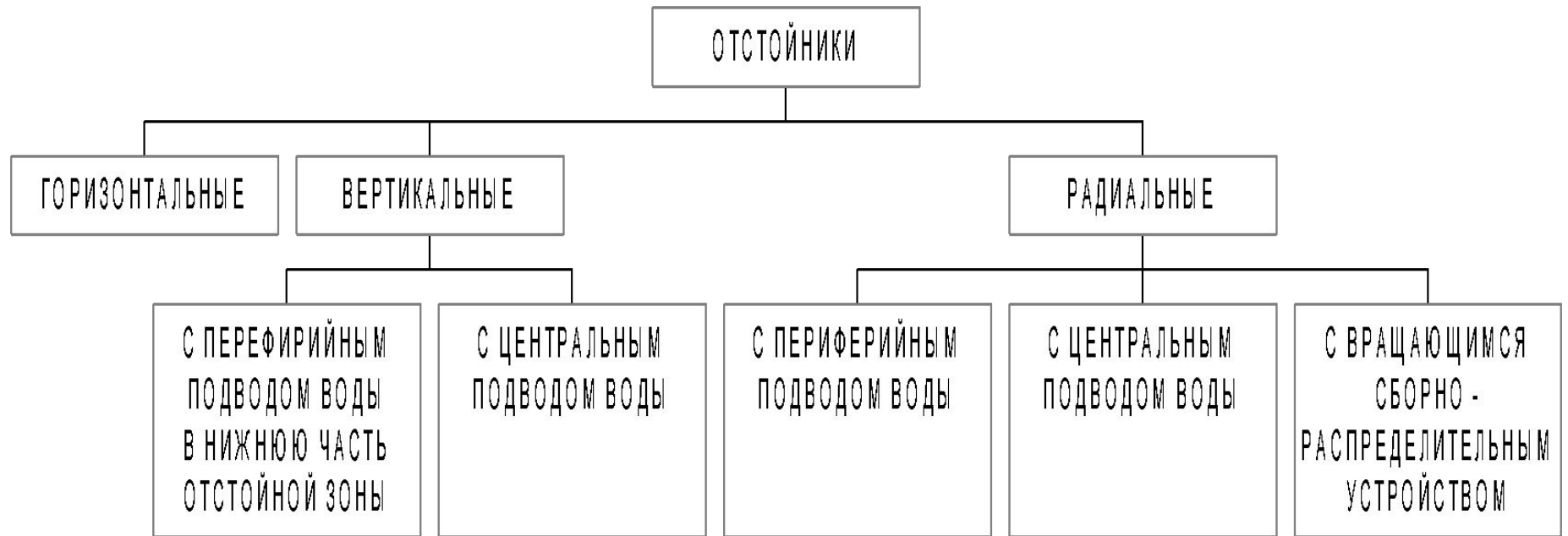
# По гидродинамическому режиму работы



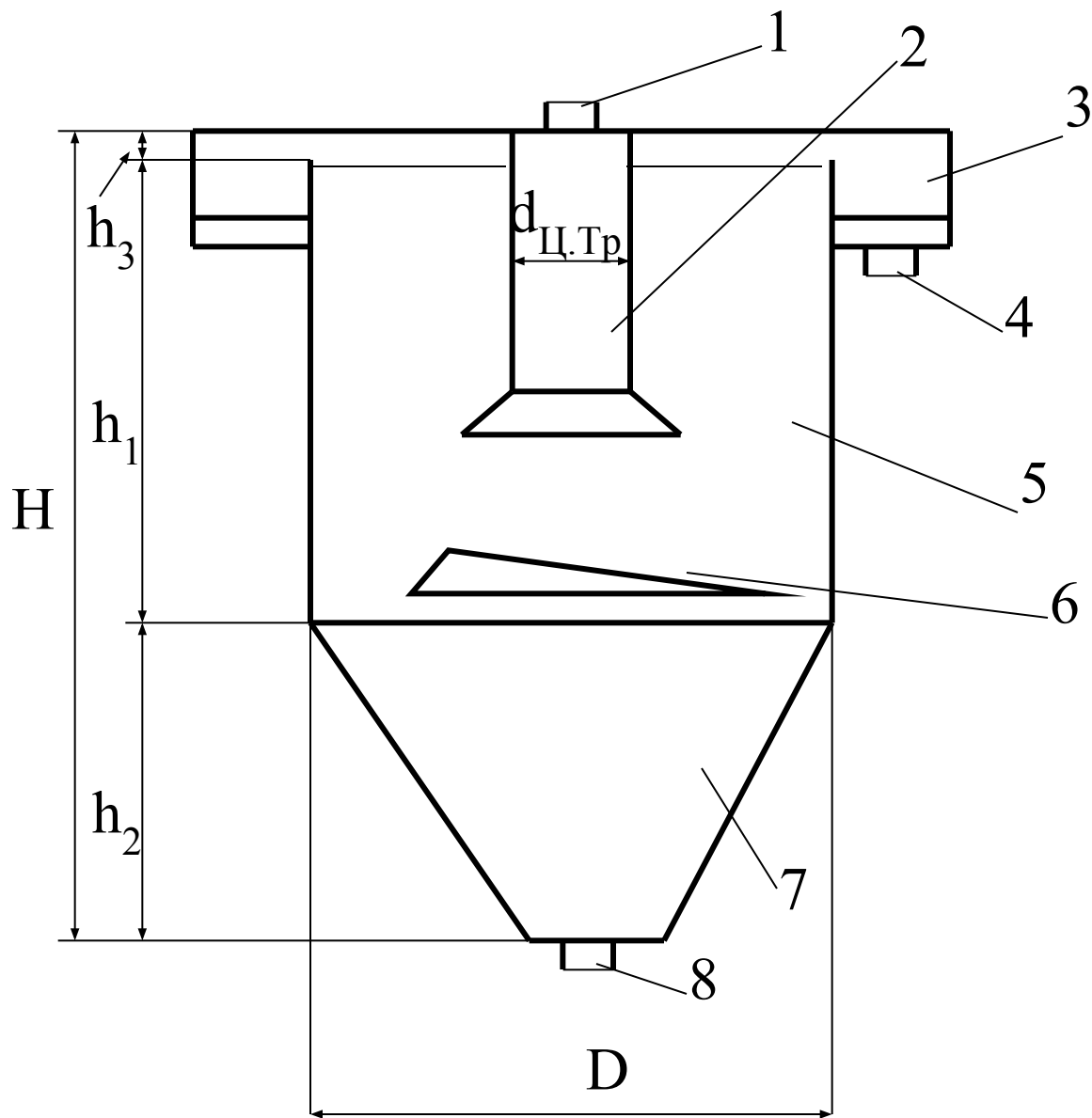
## Область применения

Отстойники контактного типа применяют при малых расходах сточных вод и при периодическом их поступлении. Во всех остальных случаях рекомендуется использовать отстойники проточного типа.

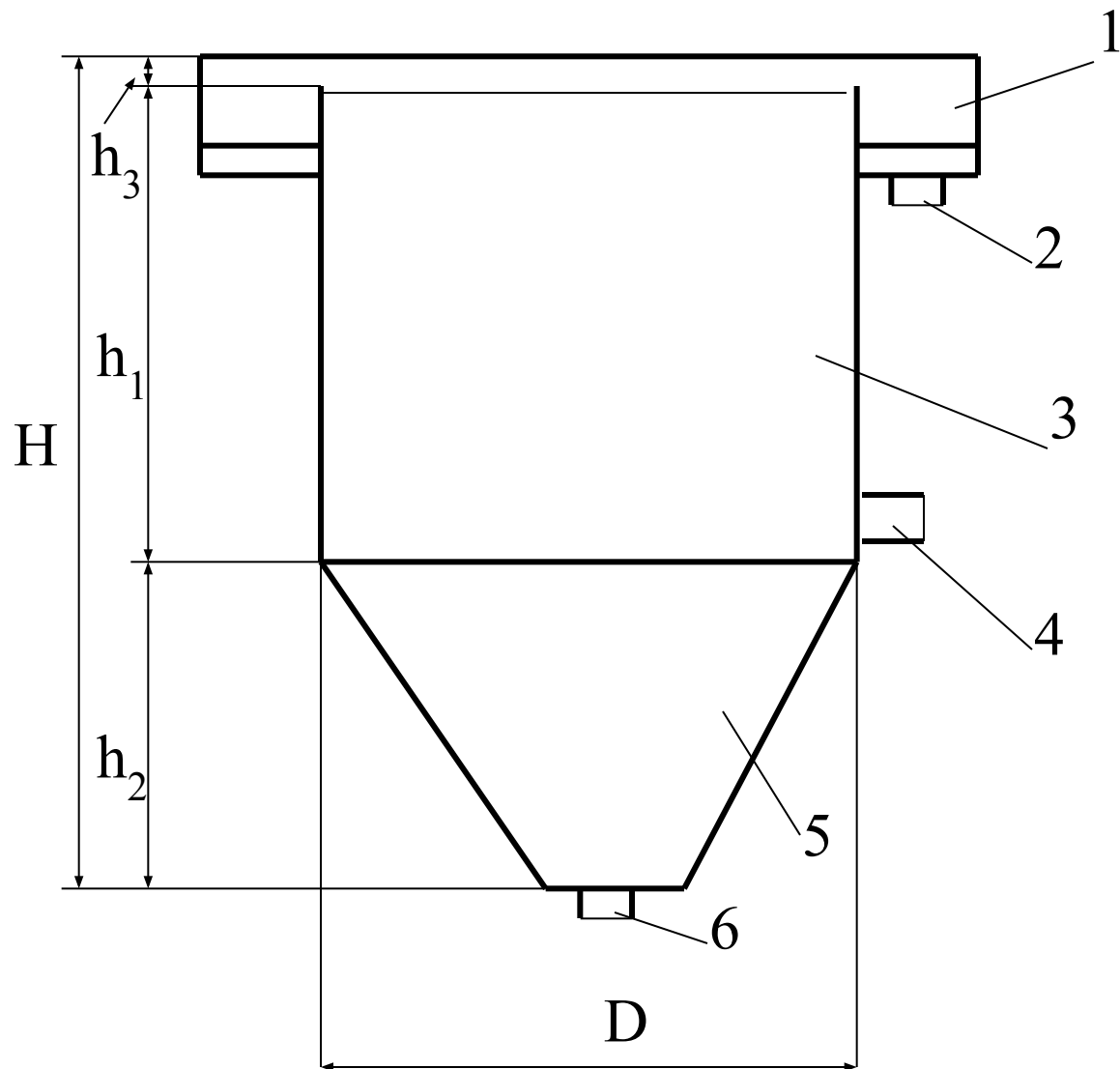
# По направлению движения воды



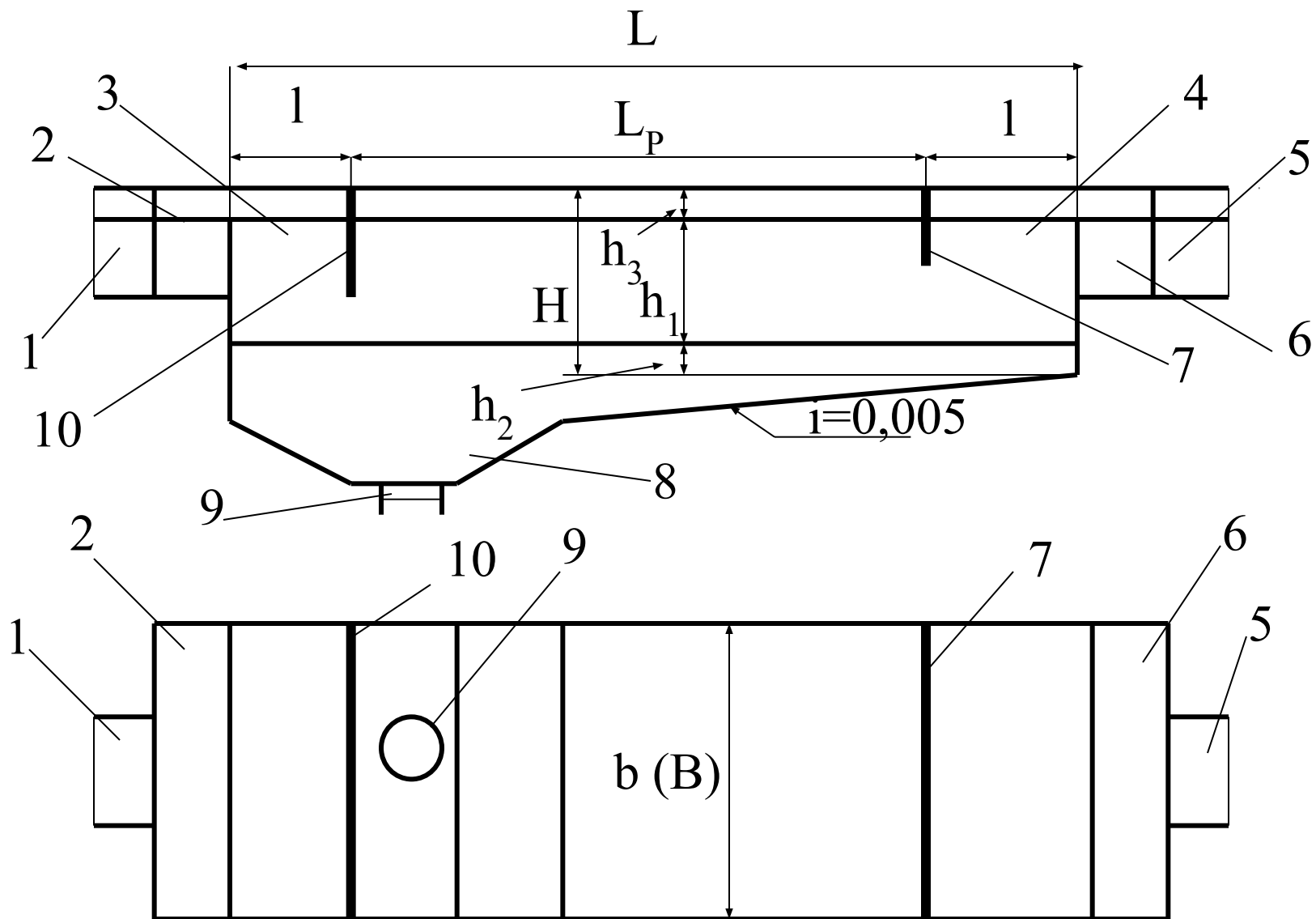
# Схема вертикального отстойника с центральным подводом сточной воды



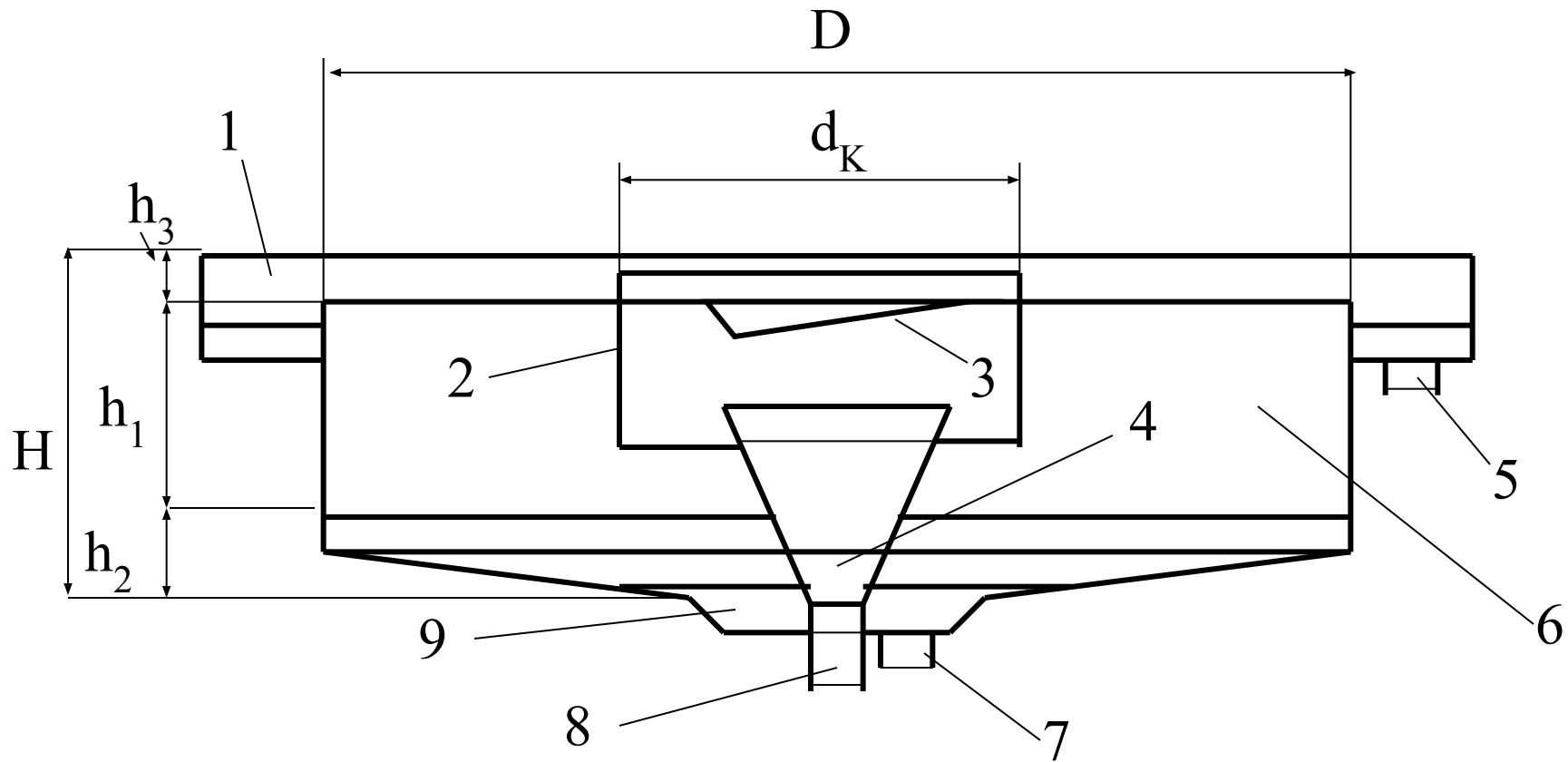
# Вертикальный отстойник с нижним подводом сточной воды



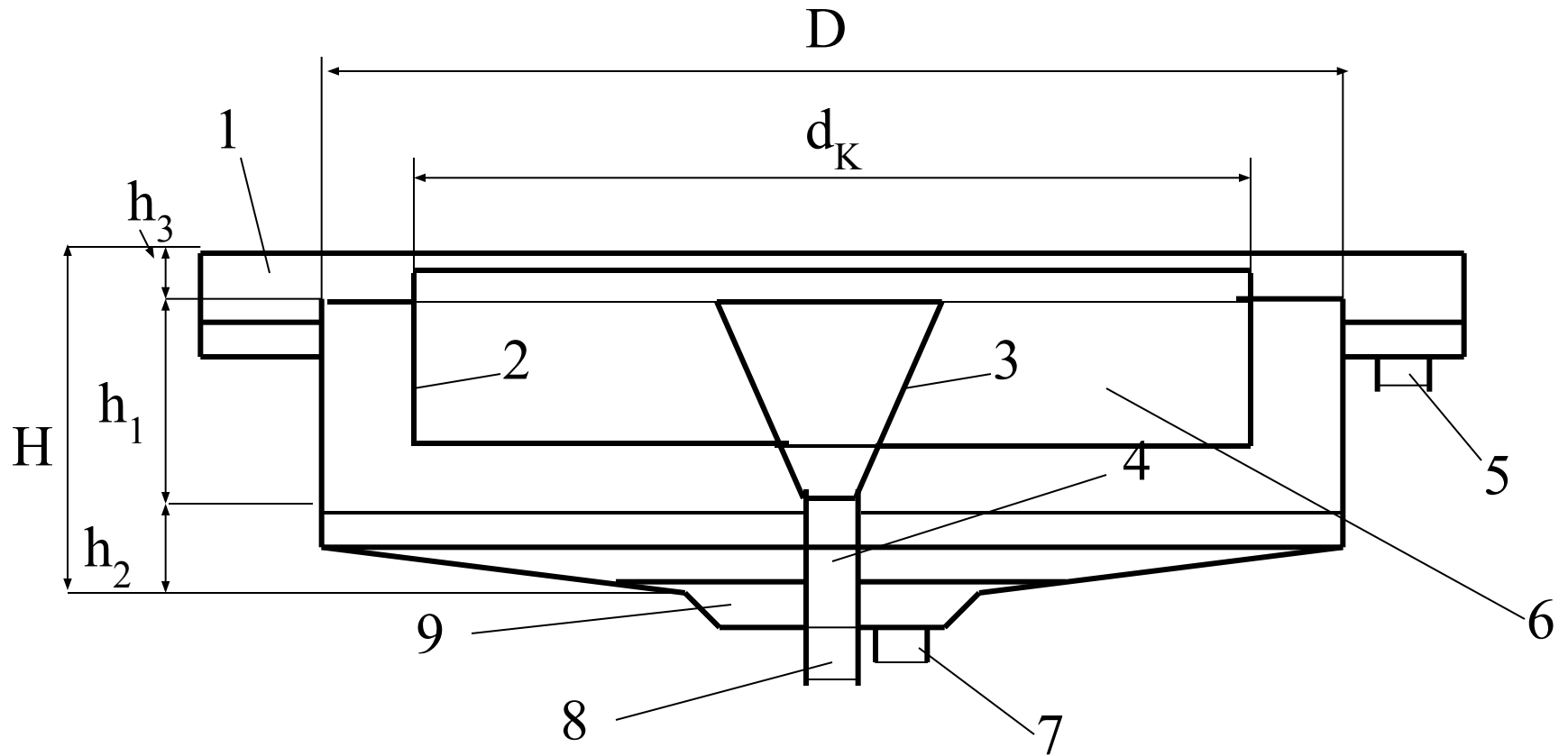
# Схема секции горизонтального отстойника (горизонтального отстойника)



# Схема радиального отстойника с центральным подводом сточной воды



# Схема радиального отстойника с периферийным подводом сточной воды





## По назначению

- отстойники общего назначения;
- отстойники специального назначения.

# По расположению в технологической схеме



## Область применения

Первичные отстойники применяют на стадии предварительной очистки с целью снижения концентрации взвешенных веществ в воде, вторичные, третичные и т.д. – после сооружений биохимической, физико-химической или химической очистки для отделения от воды активного ила или отработавших реагентов.

# Основы расчета отстойников

Вертикальные отстойники

# Радиус рабочей части отстойника

$$R = \sqrt{\frac{q}{n\pi k u_0}}$$

**Горизонтальные отстойники**

Ширина отстойника (отделения отстойника)

$$B = \frac{q}{nh_1v}$$

Длина рабочей части отстойника

$$L_p = \frac{vh_1}{ku_0}$$



# Радиальные отстойники

# Радиус рабочей части отстойника

$$R = \sqrt{\frac{q}{n\pi k u_0}}$$