

## Исследование и расчет вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой

Соискатель **Е.И. Давыдов\***,  
д.т.н., профессор **Б.Ф. Лямаев**,

Военный инженерно-технический институт (филиал)

ФГБОУ ВПО «Военная академия тыла и транспорта им. генерала армии Хрулева А.В.»

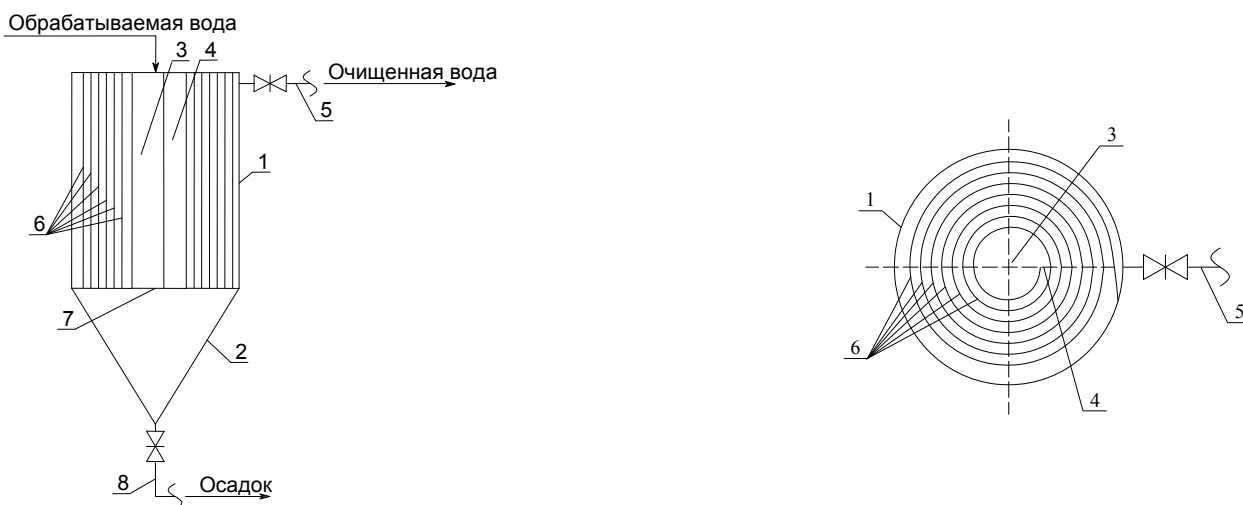
**Ключевые слова:** отстойник со спирально-навитой насадкой; математическая модель; методика расчета; эффект осветления; коэффициент скорости осаждения частиц

При очистке сточных вод отстаивание является одним из основных методов выделения из очищаемой воды взвешенных веществ, а к наиболее распространенному методу водоподготовки относится осветление, которое осуществляется путем отстаивания воды в отстойниках.

В практике водоподготовки природных и очистки сточных вод получили распространение вертикальные отстойники. Преимущество этих отстойников в простоте устройства и эксплуатации. Недостатком их является большая глубина, что значительно удорожает стоимость их строительства, и низкий эффект осветления. Обычно он не превышает 30%, в то время как в горизонтальных и радиальных отстойниках эффективность очистки достигает 50-60% [1,2]. В связи с этим особую значимость приобретают задачи интенсификации работы сооружений для отстаивания воды и сокращения занимаемых ими площадей. Поэтому научные исследования были направлены на разработку новой конструкции вертикального отстойника и методики его расчета.

Создана конструкция и устройство вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой, новизна которого подтверждена патентом [3].

Данный отстойник представляет собой резервуар с днищем в виде усеченного конуса и спирально-навитой насадкой, вставленной в этот резервуар. На рис. 1 представлена схема вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой. Он состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1 и конусного днища 2. В центре отстойника размещена центральная труба 3, в нижней части которой установлена заглушка 7. В центральной трубе по всей высоте выполнено щелевое отверстие 4, к которому жестко прикреплена спирально-навитая насадка 6. Она начинается у центральной трубы и заканчивается у стенки цилиндрического корпуса. Спирально-навитая насадка образует канал, по которому движется очищаемая вода. Высота спирально-навитой насадки равна высоте цилиндрической части отстойника, а ширина канала, образованного стенками спирально-навитой насадки, одинакова по всей длине. В верхней части на цилиндрическом корпусе 1 установлен трубопровод 5 для отвода очищенной воды, а в нижней конусной части отстойника – трубопровод 8 для выпуска осадка.



**Рисунок 1. Схема вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой:**

**1 – вертикальный цилиндрический корпус; 2 – конусное днище; 3 – центральная труба; 4 – щелевое отверстие; 5 – трубопровод очищенной воды; 6 – спирально-навитая насадка; 7 – заглушка; 8 – трубопровод для удаления осадка**

Очищаемая вода подается по центральной трубе, проходит через щелевое отверстие и далее поступает в канал спирально-навитой насадки. Канал спирально-навитой насадки служит для увеличения пути движения очищаемой воды, а, следовательно, увеличения продолжительности пребывания (времени отстаивания) обрабатываемой жидкости в отстойнике. Насадка также служит для увеличения площади соприкосновения очищаемой жидкости с ее стенкой. Необходимо отметить, что в данном отстойнике, как и в других типах отстойников, основной движущей силой процесса осветления является сила тяжести, действующая на частицы взвеси, под действием которой происходит их осаждение. Взвесь, выпавшая на стенке насадки либо в канале, поступает в нижнюю часть отстойника, образуя осадок, который периодически удаляется из отстойника. Очищенная вода отводится из отстойника.

Известные к настоящему времени модели процессов отстаивания [4-11] не позволяют для широкого интервала изменения параметров этих процессов рассчитывать эффект осветления по известным конструктивным характеристикам отстойников или решать обратную задачу. Указанные модели базируются на теории подобия и дают возможность воспроизводить в натуральных отстойниках полученный в лаборатории эффект осветления.

Поэтому нами проведены теоретические исследования по разработке зависимостей, которые связывают конструктивные и технологические параметры отстойников. Предлагается математическая модель, позволяющая с единых методологических представлений описывать как процессы осаждения взвеси в цилиндре (покое), так и в сооружениях для очистки воды отстаиванием.

Рассмотрим процесс осаждения взвеси в некотором резервуаре (отстойнике), имеющем объем  $W$ , высоту  $H$  и площадь  $F$ . Резервуар заполнен жидкостью с концентрацией взвешенных веществ  $C$ .

Из коллоидной химии известна зависимость:

$$m = \frac{M}{H} U \tau . \quad (1)$$

В представленной зависимости (1) отношение  $\frac{M}{H}$  представляет собой удельную массу примесей, приходящихся на единицу высоты резервуара, а произведение  $U \tau$  – длину столба, из которого произошло осаждение примесей за время  $\tau$ .

Если теперь в зависимости (1) заменить массу примесей в резервуаре выражением:

$$M = W(C - C_{np}), \quad (2)$$

где  $C_{np}$  – концентрация неоседающих примесей (предельная концентрация примесей), то после подстановки (2) в выражение (1) получим основное уравнение седиментации:

$$m = UF(C - C_{np}) \tau . \quad (3)$$

Уравнение (1) и модификация (3) этого уравнения отражают процесс седиментации в монодисперсной системе. Полагаем, что оно применимо и для полидисперсной системы при условии, что промежуток времени, для которого подсчитывается масса выпавших примесей, бесконечно мал:

$$dm = UF(C - C_{np}) d\tau . \quad (4)$$

Для массы выпавших примесей за время  $d\tau$ , равной изменению массы примесей в объеме жидкости, является справедливым выражение, в котором объем воды в резервуаре считается постоянной величиной:

$$dm = -WdC . \quad (5)$$

Это справедливо в том случае, если пренебречь объемом образующегося осадка по сравнению с объемом обрабатываемой воды. По нашему мнению, такое допущение применимо для процессов очистки природных и для большинства сточных вод. Так, например, для городских сточных вод общий объем осадка не превышает 1% от общего объема обрабатываемых стоков.

Из решения системы дифференциальных уравнений (4) и (5) при начальных условиях  $\tau=0$ ;  $C=C_0$  предоставляется возможность получить зависимость времени отстаивания от средней концентрации взвеси в резервуаре:

$$\tau = \frac{H}{U} \ln \frac{C_0 - C_{np}}{C - C_{np}} . \quad (6)$$

Анализ результатов экспериментов, выполненных другими исследователями [12], позволили выявить зависимость гидравлической крупности  $U$  от начальной концентрации примесей  $C_o$ . Учитывая, что величина  $U$  численно отличается от тех значений, которые определяются по традиционным методикам, в дальнейшем её будем называть коэффициентом скорости осаждения  $U_c$ .

Значения этого коэффициента изменяются в зависимости от времени отстаивания, но практически остаётся постоянным на интервале от 0 до времени, соответствующего эффекту осветления  $\mathcal{E}$ , равным 50%. Эффект осветления определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{C_o - C}{C_o}. \quad (7)$$

Величина  $C_{np}$  для городских сточных вод составляет 10-15 мг/л.

Результаты исследований кинетики осаждения принято представлять в виде зависимости эффекта осветления  $\mathcal{E}$  от времени отстаивания  $\tau$  согласно СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения». С учётом этого выражение (6) может быть преобразовано к виду:

$$\mathcal{E} = \left(1 - e^{-\frac{U\tau}{H}}\right) \cdot \left(1 - \frac{C_{np}}{C_o}\right), \quad (8)$$

где  $C_o$  – начальная концентрация примесей в очищаемой воде.

На основании вышеизложенных исследований разработана математическая модель, которая описывает процесс осаждения взвеси в отстойнике со спирально-навитой насадкой. Рассмотрим канал спирально-навитой насадки отстойника (рис. 2).

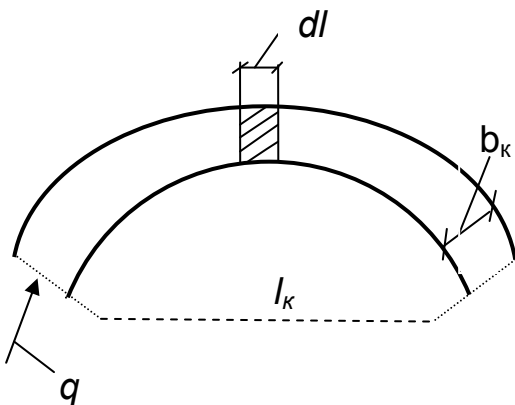


Рисунок 2. Канал спирально-навитой насадки отстойника

где  $q$  – расход обрабатываемой воды.

Зависимости (9) и (10) дают возможность получить дифференциальное уравнение, описывающее процесс осаждения взвеси в данном отстойнике:

$$-qdC = Ub_k(C - C_{np})dl. \quad (11)$$

Решение уравнения (11) при граничных условиях  $l = 0, C = C_{np}$  позволяет получить зависимость для определения концентрации взвеси на выходе из отстойника (в очищенной воде):

$$C = C_{np} + (C_o - C_{np}) \cdot e^{-\frac{U \cdot b_k \cdot l_k}{q}}. \quad (12)$$

На произвольно выбранном участке по длине канала  $l_k$  выделим элементарный участок  $dl$ . Запишем уравнение для изменения массового расхода взвеси, в элементарном участке:

$$dG = Ub_k(C - C_{np})dl, \quad (9)$$

где  $G$  – массовый расход взвеси;  $U$  – коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность частиц);  $b_k$  – ширина канала спирально-навитой насадки отстойника;  $C$  – концентрация взвеси в элементарном объёме;  $C_{np}$  – предельная концентрация взвеси (концентрация не оседающих примесей).

Одновременно с уравнением (9) для изменения массового расхода взвеси, поступающей с обрабатываемой водой, является справедливым выражение:

$$dG = -qdC, \quad (10)$$

Если выразить скорость движения  $V$  очищаемой воды в канале спирально-навитой насадки формулой:

$$V = \frac{q}{b_k \cdot H_k}, \quad (13)$$

где  $H_k$  – высота канала спирально-навитой насадки, то получим:

$$C = C_{np} + (C_o - C_{np}) e^{-\frac{U \cdot l_k}{H_k \cdot V}}. \quad (14)$$

Как было отмечено, результаты исследований кинетики осаждения принято представлять в виде зависимости эффекта осветления  $\mathcal{E}$  от изменения концентрации. Эффект осветления определяется по формуле (7).

С учетом этого формулы (12) и (14) преобразуем к виду:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{np} \left( 1 - e^{-\frac{U \cdot l_k \cdot b_k}{q}} \right) \quad (15)$$

$$\text{или } \mathcal{E} = \mathcal{E}_{np} \left( 1 - e^{-\frac{U \cdot l_k}{H \cdot V}} \right), \quad (16)$$

где  $\mathcal{E}_{np}$  – предельный эффект осветления – определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{np} = \frac{C_o - C_{np}}{C_o}. \quad (17)$$

При выводе соотношений (12), (14), (15) и (16) никаких ограничений на условие осаждения взвеси не накладываются.

Таким образом, полученная зависимость (16) используется для расчета отстойника со спирально-навитой насадкой, в которой:

$\mathcal{E}$  – требуемый эффект осветления, доли единиц;

$U$  – коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность) взвешенных веществ, м/с, задерживаемых в отстойнике;

$l_k$  – длина канала спирально-навитой насадки, м;

$H$  – высота цилиндрической части отстойника со спирально-навитой насадкой, м;

$V$  – скорость движения очищаемой воды в канале спирально-навитой насадки отстойника, принимаем согласно СНиП 2.04.03-85 как для горизонтального отстойника  $(5-10) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ ;

$\mathcal{E}_{np}$  – предельный эффект осветления, доли единиц.

В зависимости (16) коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность) взвешенных веществ  $U$ , мм/с, определяется по формуле:

$$U = \frac{1000 \cdot H}{t_{set} \left( \frac{H}{h_1} \right)^{n_2}}, \quad (18)$$

где  $H$  – высота цилиндрической части отстойника, в которую вставлена спирально-навитая насадка, м, принимаемая на основе возможных глубин типовых вертикальных отстойников  $H = 2, 7-3, 8$  м;

$t_{set}$  – продолжительность отстаивания, сек., соответствующая заданному эффекту осветления и полученная в лабораторном цилиндре в слое  $h_1$ , определяется по таблице 30 СНиП 2.04.03-85;

$h_1$  – глубина воды при отстаивании в покое (высота слоя воды в лабораторном цилиндре), принимаемая равной 0,5 м;

$n_2$  – показатель степени, зависящий от способности взвешенных веществ к агломерации, принимаемый по черт. 2 СНиП 2.04.03-85.

Далее из формулы (16) определяется длина канала  $l_k, м$ , спирально-навитой насадки, которая должна обеспечивать требуемый эффект осветления очищаемой воды в отстойнике:

$$l_k = - \frac{\ln \left( 1 - \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{np}} \right) \cdot H \cdot V}{U}. \quad (19)$$

Необходимая площадь живого сечения  $F, м^2$ , цилиндрической части определяется по выражению:

$$F = \frac{\pi(D_{om}^2 - d_{ц.м.}^2)}{4}, \quad (20)$$

где  $D_{om}$  – диаметр отстойника со спирально-навитой насадкой, м;

$d_{ц.м.}$  – диаметр центральной трубы, м, к которой прикреплена спирально-навитая насадка.

Следует заметить, что площадь живого сечения  $F, м^2$ , цилиндрической части отстойника со спирально-навитой насадкой есть произведение длины канала на ширину канала насадки:

$$F = b_k \cdot l_k, \quad (21)$$

где  $b_k$  – ширина канала спирально-навитой насадки отстойника, принимается конструктивно.

Подставив зависимость (21) в (20), можно определить диаметр отстойника со спирально-навитой насадкой  $D_{om}, м$ :

$$D_{om} = \sqrt{\frac{4 \cdot l_k \cdot b_k}{\pi} + d_{ц.м.}^2}. \quad (22)$$

Диаметр центральной трубы  $d_{ц.м.}, м$ , определяется по формуле:

$$d_{ц.м.} = \sqrt{\frac{q_{set}}{2,82 \cdot v_{ц.м.}}}, \quad (23)$$

где  $q_{set}$  – расчетный максимальный часовой расход сточных вод,  $м^3/ч$ ;

$v_{ц.м.}$  – скорость движения воды в центральной трубе, принимаем 30 мм/с, согласно СНиП 2.04.03-85.

Количество витков спирально-навитой насадки  $n$  определяется по формуле:

$$n = \frac{D_{om} - d_{ц.м.}}{2 \cdot b_k}. \quad (24)$$

Высота конусной части отстойника  $H_k, м$ , при угле наклона ее стен к горизонту  $50^\circ$  определяется по формуле:

$$H_k = \frac{D_{om}}{2} \cdot \operatorname{tg} 50^\circ. \quad (25)$$

Объем цилиндрической части  $W_{цил}, м^3$ , отстойника определяется по формуле:

$$W_{цил} = \frac{\pi \cdot D_{om}^2}{4} H_{цил}. \quad (26)$$

Объем конусной части  $W_k, м^3$ , отстойника определяется по формуле:

$$W_k = \frac{\pi \cdot D_{om}^2}{12} H_k. \quad (27)$$

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Спирально-навитая насадка существенно влияет на увеличение эффекта осветления по сравнению с обычным вертикальным отстойником. При проектировании отстойников на одинаковый эффект очистки конструктивные размеры отстойника со спирально навитой насадкой значительно меньше, что снижает капитальные затраты на строительство.
2. Получены математические зависимости, которые позволяют определять конструктивные параметры отстойника на заданную эффективность осветления очищаемой воды.
3. Разработана математическая модель, описывающая технологический процесс отстаивания в вертикальном отстойнике со спирально-навитой насадкой. Предложена методика инженерного расчета данного сооружения.

### Литература

1. Федоров Н. Ф., Шифрин С. М. Канализация. М. : Высшая школа, 1968. 592 с.
2. Яковлев С. В., Калицун В. И. Механическая очистка сточных вод. М.: Стройиздат, 1972. 200 с.
3. Болдырев В. В., Давыдов Е. И. Отстойный резервуар / Патент RU №2182508, МПК В01D21/02.
4. Иткин А. Л. К вопросу технологического моделирования процесса осветления сточных вод // В кн.: Исследования по очистке сточных вод. Сборник трудов № 66 Московского инженерно-строительного института им В.В. Куйбышева. М. : 1970. С. 92-99.
5. Ватин Н. И., Чечевичкин В. Н., Чечевичкин А. В., Шилова Е. С. Очистка сточных вод узлов мойки бетоносмесительного и бетонотранспортного оборудования // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 16-23.
6. Чечевичкин А. В., Чечевичкин В. Н., Ватин Н. И. Особенности очистки воды из р. Вуокса в летний период // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2. С. 23-26.
7. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
8. Таварткиладзе И. М., Кравчук А. М., Нечипор О. М. Математическая модель расчета вертикальных отстойников с перегородкой // ВСТ: Водоснабжение и санитарная техника. 2006. №1, ч.2. С. 39-42.
9. Кореньков А. Д. Динамическая модель процессов осаждения – уплотнения осадка в отстойниках // Экология и промышленность России. 2010. №10. С. 36-39.
10. Bemessungsregeln für Nachklärbecken/Köster Stephan // WWT: Wasserwirt. Wassertechn.: Das Praxismagazin für Entscheidungen im Wassermanagement. 2005. № 1-2. С. 22-24. (нем.)
11. Wang Ren, Yu Qing-jiang, Che Ji-fang // China Water and Wastewater. 2004. 20, № 9. С. 96-97. (англ.)
12. Иванов В. Г., Семёнов В. П., Симонов Ю. М. Применение тонкослойных отстойников целлюлозно-бумажной промышленности. М. : Лесная промышленность, 1983. 176 с.

*\*Евгений Иванович Давыдов, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(921)9226284; эл.почта: davydov.1967@mail.ru*

# Research and calculation of the vertical sediment tank with spiral-wound nozzle

**E.I. Davydov;  
B.F. Lyamaev,**

*Military Engineering and Technical Institute, Saint-Petersburg, Russia,  
+7(921)9226284; e-mail: davydov.1967@mail.ru*

## Key words

sediment tank with spiral-wound nozzle; mathematical model; design procedure; effect of clarification; factor of speed of particle sedimentation

## Abstract

One of the important environmental problems in human settlements is the contamination of water bodies and terrain by pollutants arriving with sewage. The main reasons for this are the physical deterioration of treatment facilities and insufficient funding. Thus, it becomes impossible to maintain wastewater treatment facilities in operative condition and provide treatment of discharged wastewater to the standard quality. Therefore the task of intensifying the operation of facilities and plants for the water settling as well as reducing the areas occupied by this water acquires the particular importance.

The present work deals with the construction of a new vertical settling tank with spiral-wound nozzle. The design of this settling tank has a patent.

Compared to a conventional vertical settling tank, in the proposed settling tank with spiral-wound nozzle there are more favorable hydrodynamic conditions. At the same settling time these conditions allow improving of the lightening effect by increased staying of treated water in the spiral-wound nozzle.

The application of this vertical settling tank in the water and sewage treatment helps to reduce the facilities volume and improve the cleaning effect. Based on the theory of suspended particles sedimentation for this settling tank a mathematical model and calculation method were developed.

## References

1. Fedorov N. F., Shifrin S. M. *Kanalizatsiya* [Sewerage]. Moscow : Vysshaya shkola, 1968. 592 p. (rus)
2. Yakovlev S. V., Kalitsun V. I. *Mekhanicheskaya ochistka stochnykh vod* [Mechanical purification of sewage]. Moscow : Stroyizdat, 1972. 200 p. (rus)
3. Boldyrev V. V., Davydov E. I. *Otstoynyy rezervuar* [Sedimentation tank] / Patent RU No. 2182508, MPK B01D21/02. (rus)
4. Itkin A. L. *Issledovaniya po ochistke stochnykh vod. Sbornik trudov* [Research of sewage cleaning : collected articles] Moskovskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta im V.V. Kuybysheva. Moscow : 1970. No. 66. Pp. 92-99. (rus)
5. Vatin N. I., Chechevichkin V. N., Chechevichkin A. V., Shilova E. S. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 2(20). Pp. 16-23. (rus)
6. Chechevichkin A. V., Chechevichkin V. N., Vatin N. I. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 2. Pp. 23-26. (rus)
7. Girgidov A. D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika)* [Fluid mechanics (hydraulics)]. Saint-Petersburg, Izd-vo Politekh. un-ta, 2007. 545 p. (rus)
8. Tavartkiladze I. M., Kravchuk A. M., Nechipor O. M. *VST: Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2006. No. 1, part 2. Pp. 39-42. (rus)
9. Korenkov A. D. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2010. No. 10. Pp. 36-39. (rus)
10. Bemessungsregeln für Nachklärbecken/Köster Stephan. *WWT: Wasserwirt. Wassertechn.: Das Praxismagazin für Entscheidungen im Wassermanagement*. 2005. No. 1-2. p. 22-24. (ger)
11. Wang Ren, Yu Qing-jiang, Che Ji-fang. *China Water and Wastewater*. 2004. 20, No. 9. Pp. 96-97.
12. Ivanov V. G., Semenov V. P., Simonov Yu. M. *Primenenie tonkosloynnykh otstoynikov v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Use of thin-layer sediment tank in pulp-and-paper industry]. Moscow : Lesnaya promyshlennost, 1983. 176 p. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 10-15**