

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ЛИВНЕВЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ЖЕЛЕЗА

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF SEDIMENTATION RAINWATER TREATMENT OF IRON

*В статье рассмотрена возможность использования седиментационных очистных сооружений для очистки ливневых сточных вод от взвешенных частиц железа в условиях стесненного осаждения. На основе результатов экспериментов, проведенных в лабораторных условиях, выполнена наладка седиментационных очистных сооружений ливневого стока, в результате чего увеличена эффективность очистки с 30 % до 90 %. Такая степень очистки позволяет рассматривать данный метод наравне с методами фильтрации и сорбции. Выявленный эффект стесненного осаждения, который наблюдается при концентрациях взвешенных веществ на входе в очистные сооружения выше 5 мг/л, опровергает известные формулы скорости осаждения частиц в среде. Экспериментально подтверждено, что для создания оптимальных условий седиментации при стеснённом осаждении необходимо увеличить расчетное время в два раза. Таким образом, результаты эксперимента по увеличению времени отстаивания позволяют сделать вывод о том, что возможно добиться высокой степени очистки от взвешенных частиц при регулировании скорости потока сточных вод в седиментационных очистных сооружениях.*

*The article considers the possibility of using the sedimentation of wastewater treatment facilities for treatment of rainwaters from suspended particles of iron in the constrained hindered settling. Based on the results of tests was carried out adjusting the sedimentation of storm water treatment facilities, in consequence of which increase the efficiency of sedimentation from 30% to 90%, conducted funnels the essence of which is to observe in laboratory conditions, the effect of precipitation depending on the parameters of liquid and sedimentation conditions. That allows considering this method for purity along with methods of filtration and adsorption. Identified the effect of restrained deposition observed at concentrations of suspended solids at the inlet of the treatment plant is above 5 mg/l, refutes the known formulas deposition velocity of particles in the environment. However, experimentally confirmed that the creation of optimal conditions for sedimentation-straitened deposition is necessary to increase the estimated time in half. Thus, the results of the experiment allow settling time increases say that it is possible to achieve a high degree of purification of suspended particles by adjusting the flow rate of sedimentation in wastewater treatment plants.*

*Ключевые слова: седиментация, стесненное осаждение, ливневые сточные воды, железо.  
Key words: sedimentation, hindered settling, rain waste water, iron.*

#### Введение

Методы фильтрации и сорбции являются наиболее распространенными вариантами очистки сточных вод от железа [1] – [3], так как они дают наилучший результат в удалении железа, если железо находится в нерастворимом состоянии или предварительно переведя его во взвешенное состояние [4], [5]. Но наряду с высокой эффективностью очистки эти методы наиболее ресурсоемкими, так как требуют постоянной замены или очистки фильтров либо сорбентов, которые в данном случае являются расходным материалом. Альтернативным методом, не требующим данных расходов, является метод седиментации, который чаще всего не принимается к рассмотрению при выборе метода очистки от железа из-за, обычно, невысокой степени очистки по сравнению с фильтрацией и сорбцией.

С помощью увеличения эффективности очистки седиментационных очистных сооружений можно сэкономить значительные суммы, требующиеся при эксплуатации очистных сооружений, работающих по принципу фильтрации или сорбции. Эти затраты сугубо индивидуальны для каждого случая и зависят от объема стоков, качества воды на входе и выходе из очист-

ных сооружений, уловленных загрязнителей, способа фильтрации или сорбции, типа фильтра или сорбента, влажности и класса опасности получаемого отхода, транспортного плеча к компании-переработчику данного отхода и стоимости его утилизации. Для приведенного случая эта сумма составила 31,5 млн руб./год. Такие эксплуатационные расходы являются одним из ключевых факторов поддержания работоспособности очистных сооружений. К сожалению, вопрос седиментационной очистки от железа не популярен у проектировщиков и разработчиков очистных сооружений. Сталкиваясь с сочетанием «очистка методом седиментации» и «железо», обычно рассматривают идеи очистки коагулированием посредством железа, в большинстве случаев, хлорного [6] – [8]. Поэтому одной из задач исследования является подтверждение возможности очистки сточных вод от железа методом седиментации путем увеличения степени очистки, проходящей в отстойнике. С этой целью при расчете эффективности очистки и установлении эффективного времени отстаивания важно учитывать основные принципы седиментации.

### Основная часть

Рассмотрим движение шарообразной частицы в неподвижной среде (рис. 1). При движении частицы в жидкости возникают сопротивления, для преодоления которых, а также обеспечения равномерного движения должна быть затрачена определенная энергия. Величина возникающего сопротивления зависит от режима движения, формы обтекаемого тела и характера среды, в которой это тело движется.

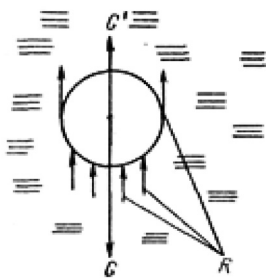


Рис. 1. Действие сил на твердую частицу, движущуюся в неподвижной среде

Если шарообразная частица весом  $G$  будет падать под действием собственного веса, то скорость ее первоначально возрастет, однако с ростом скорости начнет увеличиваться и сопротивление движению частицы со стороны среды. Одновременно произойдет уменьшение ее ускорения и через короткий промежуток времени наступит динамическое равновесие – сила тяжести станет равна силе сопротивления среды, и частица начнет двигаться с постоянной скоростью – *скоростью осаднения*. Баланс сил в этом случае составит

$$G - G' - R = 0, \quad (1)$$

где  $G$  – сила тяжести, равная весу частицы;  $G'$  – выталкивающая сила Архимеда, равная весу жидкости в объеме тела;  $R$  – сила сопротивления среды,

$$R = \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\omega_{ос}^2}{2}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр частицы;  $\omega_{ос}$  – скорость осаднения;  $\xi$  – коэффициент сопротивления среды (безразмерный).

Формула (2) справедлива, если осаждение не стесненное (свободное), когда соседние частицы не оказывают влияния на движение друг друга. Свободное осаждение наблюдается в разбавленных суспензиях и газовых взвешах (объемная концентрация твердой фазы менее 5 %) при отсутствии взаимного влияния частиц дисперсной фазы. Если концентрация частиц большая (стесненное осаждение), то осаждаясь, частицы соприкасаются друг с другом и сопротивление осаждению становится больше, чем для одиночной частицы. Вследствие этого скорость осаждения частиц уменьшается. При стесненном осаждении в рассчитанную скорость вводят поправки, зависящие от концентрации суспензии.

Наиболее изученными в области стесненного осаждения являются коллоиды. Несмотря на это формула стесненного осаждения весьма индивидуальна и для каждого случая проверяется на практике в лабораторных условиях. Поэтому принято при ориентировочных расчётах действительную скорость осаждения принимать равной половине теоретической одиночной шарообразной частицы. Таким образом, если концентрация загрязняющих веществ на входе довольно большая, то рассчитав теоретическую скорость осаждения частиц, необходимо учесть фактор стесненного осаждения и увеличить время отстаивания вдвое, чтобы получить расчетный результат работы отстойника на практике.

Данный подход был использован для реконструкции и наладки ливневых очистных сооружений предприятия, находящегося в Ленинградской области. По данным лабораторных анализов, концентрация железа в сточных водах составила 14 – 25 мг/л, что соответствует ранее приведенным условиям стесненного осаждения. Такая высокая концентрация вызвана тем, что почвы на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области богаты железом [9] – [11], которое из-за негерметичности трубопроводов, вызванной подвижностью грунта, изношенностью водопроводных сетей и высоким уровнем грунтовых вод, попадает в сточные воды, в том числе ливневой канализации. На данном участке концентрация общего железа в грунтовых водах достигает 36 – 25 мг/л, при норме сброса в водный объект хозяйственно-бытового назначения 0,3 мг/л [12]. Высокая изначальная концентрация в стоках диктует степень очистки, равную 99 – 98 %, что при общепринятых методах очистки ливневых стоков является недостижимым.

В засушливую погоду на очистные сооружения подается только грунтовая вода. Это вызвано негерметичностью труб и их глубоким залеганием (ниже уровня грунтовых вод). Очистные сооружения представляют собой отстойник, разделенный на две части, каждая из которых является независимой сама по себе (общий объем 3100 м<sup>3</sup>). Ливневый (паводковый) расход составляет 12 м<sup>3</sup>/мин, при стандартном водотоке среднегодовой расход – 5 – 9 м<sup>3</sup>/мин. Согласно расчётам проектировщиков ранее описанного очистного оборудования, средний режим отстаивания, равный 4 ч, должен давать результат очистки в 40 %, что, фактически, не выполнялось, так как не был учтен эффект стесненного осаждения. Для вывода очистных сооружений в рабочий режим с эффективностью отстаивания, равной 92–96 %, было проведено исследование регулирования скорости потока подачи сточных вод, что обеспечило увеличение среднего времени отстаивания с 4 ч до 12 ч.

В теории осаждения взвешенных частиц существует пропорциональная закономерность, показывающая, что эффективность отстаивания снижается со временем [13], [14]. Тест с воронками, позволяющий установить, что увеличение времени седиментации дает возможность добиться осаждения большего количества загрязнителя, на практике позволяет определить эффективное время осаждения частиц. Воронки наполняются жидкостью, предварительно перемешанной в общем объеме до однородного состояния, в равном объеме из одного источника. Через каждые 2 ч (половина расчетного времени) с одной из воронок (по очереди, чтобы в каждой из них рабочий объем сохранялся одинаковым) отбиралась проба для определения эффективности отстаивания. Пробы, взятые через 2, 4, 6, 8 и 24 ч, показали, что эффективность очистки существенно увеличивается (до 8 ч отстаивания), после чего изменяется незначительно. Следовательно, эффективное время отстаивания принимается за 8 ч, и скорость подачи стока должна быть уменьшена вдвое по сравнению с расчетной.

В связи с тем, что производительность насосов канализационной станции не регулируется, было принято решение использовать одну секцию отстойника как усреднитель-накопитель, в конце которой предлагалось поставить погружной насос, подающий сток во вторую секцию отстойника (рис. 2).

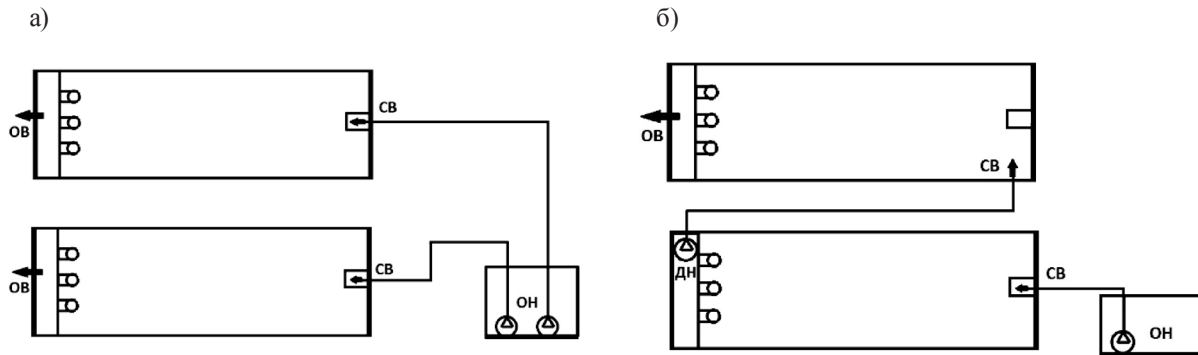


Рис. 2. Принципиальная схема очистных сооружений: а – до модернизации; б – после модернизации (СВ – сточная вода; ОВ – осветленная вода; ОН – основной насос; ДН – дополнительный насос)

Результаты внедрения нового режима работы отстойника, приведенные в таблице, проверялись мониторингом качества воды, проводимым раз в три-четыре дня на протяжении месяца при помощи экспресс-метода анализа железа с использованием фотоколориметра.

**Замеры концентрации железа на входе и выходе с очистных сооружений в течение первого месяца эксперимента**

День замера, от начала эксперимента	Концентрация мг/л		Эффективность очистки, %
	На входе	На выходе	
1	9,61	0,82	91,47
4	6,24	0,54	91,35
8	4,92	0,36	92,68
11	8,43	0,78	90,75
15	15,35	1,12	92,70
18	13,88	0,98	92,94
22	14,16	1,08	92,37
25	6,89	0,28	95,94
29	9,27	0,54	94,17
Усредненные значения за период эксперимента			
–	9,86	0,72	92,71

В течение первого месяца эксперимента было очищено 25000 м<sup>3</sup> воды. Учитывая среднюю концентрацию железа на входе и выходе из очистных сооружений, было выявлено 228 кг этого загрязнителя. Сточные воды на входе и выходе из очистных сооружений показаны на рис. 3.



Рис. 3. Фотографии очистных сооружений, наглядно показывающие качество входной и выходной воды: а – слева конец первой емкости – место забора сточной воды, справа выход из очистных сооружений; б – исходная вода; в – очищенная вода

### Выводы

1. В условиях стесненного осаждения важно учитывать, что общепринятые формулы определения скорости осаждения частиц не действуют, и при расчете фактического времени осаждения расчетные параметры должны быть удвоены.

2. Рабочие параметры седиментации должны быть предварительно рассчитаны с учетом всех поправок (например, стесненного осаждения) и апробированы в лабораторных условиях. Наиболее распространенным тестом определения оптимального времени отстаивания является тест с воронками, суть которого заключается в наблюдении в лабораторных условиях эффекта осаждения в зависимости от заданных параметров жидкости и условий отстаивания.

3. Седиментационные очистные сооружения позволяют добиться высокого качества очистки сточных вод от взвешенных частиц железа в условиях стесненного осаждения при соблюдении рабочего режима.

### Список литературы

1. *Лебедев И. А.* Очистка железосодержащих вод фильтрованием через волокнистые материалы / И. А. Лебедев, Л. Ф. Комарова, Е. В. Кондратюк // Ползуновский вестник. Общая и прикладная химия. Экология. — 2004. — № 4. — С. 171–176.

2. *Павлов Д. В.* Универсальная система очистки промышленных сточных вод / Д. В. Павлов, В. А. Колесников // Водоочистка. — 2013. — № 1 — С. 12–16.

3. *Кочеткова К. В.* Физико-химические аспекты загрязнения и очистки поверхностных вод от тяжелых металлов и нефтепродуктов природными сорбентами / К. В. Кочеткова, Р. Р. Фаизов, И. Т. Гусева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2014. — № 4 (3). — С. 523–525.

4. *Дурибе В. Ч.* Удаление ионов железа из водных растворов окислительным методом / В. Ч. Дурибе, А. С. Крыжановский, Т. В. Бухаркина, В. В. Скудин // Успехи в химии и химической технологии. — 2011. — № 5 (121). — С. 58–63.

5. *Гайдукова А. М.* Способы интенсификации окислительно-восстановительных реакций в процессах удаления ионов железа (II) из водных растворов / А. М. Гайдукова, В. А. Бродский, В. А. Колесников, Г. И. Канделаки // Гальванотехника и обработка поверхности. — 2013. — № 4. — С. 47–53.

6. *Колесников В. А.* Разработка технологических решений для очистки сточных вод от загрязнений органической природы / В. А. Колесников, В. А. Бродский, В. И. Ильин // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности. — 2013. — Т. 29. — С. 169.

7. *Мусина У. Ш.* Исследование степени осаждения взвесей с использованием нового неорганического коагулянта / У. Ш. Мусина // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. — 2014. — № 165. — С. 72–83.

8. *Гризодуб Н. Н.* Сравнительная оценка и оптимизация методик выбора реагентов для очистки вод / Н. Н. Гризодуб, Е. В. Гурова // Наукоедение: интернет-журнал. — 2012. — № 4 (13). — С. 1–5.

9. *Зонн С. В.* Железо в почвах / С. В. Зонн. — М.: Наука, 1982. — 208 с.

10. *Бабак Н. А.* Геоэкологические аспекты очистки сточных вод и почв от ионов тяжелых металлов / Н. А. Бабак, О. А. Капустина, Л. В. Митрофанова // Естественные и сельскохозяйственные науки. — 2014. — С. 108.

11. *Королева Ю. В.* Новые данные о биоконцентрировании тяжелых металлов на территории Балтийского региона / Ю. В. Королева, И. А. Пухлова // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. — 2012. — № 1. — С. 99–106.

12. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. — М.: Минздрав России, 2003. — 111 с

13. *Бабенко А. П.* Гидравлическая крупность – основная характеристика при расчете отстойников Hydraulic size, as the main characteristic in calculating sump / А. П. Бабенко, И. В. Стрелец // Construction of Unique Buildings and Structures Internet Journal. — 2013. — № 6. — С. 11.

14. Кочетов О. С. Расчет элементов очистных сооружений / О. С. Кочетов // Глобализация науки: проблемы и перспективы. — 2014. — № 10. — С. 23.
15. Бурдин В. Н. Физические основы технологии промывки золотосодержащих / В. Н. Бурдин, Н. В. Бурдин // Современные наукоемкие технологии. — 2009. — № 8. — С. 16–22.
16. Пономарёв В. Г. Основы моделирования сооружений механической очистки сточных вод / В. Г. Пономарёв // Вода и экология: проблемы и решения. — 2004. — № 3 (20). — С. 47–55.
17. Семенова И. В. Условия осаждения железа из воды / И. В. Семенова, А. В. Хорошилов // Энергосбережение и водоподготовка. — 2006. — № 5. — С. 7–10.

УДК 502.1/2:656

**А. Е. Пластинин,**  
канд. техн. наук, доц.

## ОЦЕНКА РАЗМЕРА ВРЕДА, ПРИЧИНЕННОГО ПОЧВЕ, ПРИ РАЗЛИВАХ НЕФТИ С СУДОВ

### ASSESSMENT OF THE EXTENT OF HARM TO THE SOIL AT OIL SPILLS FROM VESSELS

*Выполнена количественная оценка размера вреда от компонентов судна различного класса опасности. Предложен способ косвенного определения размера вреда при сносе судна на берег по его типовым характеристикам. Получены расчетные зависимости для оценки размера вреда береговой черте при разливах нефти на объектах водного транспорта и определен порядок их применения. Разработаны регрессионные уравнения зависимости размера вреда от компонентов судна различного класса опасности с характеристиками районов их расположения. Создана методика определения размера вреда от компонентов судна различного класса опасности и выполнена ее алгоритмизация. Полученные результаты исследований могут быть полезны при создании документов, разрабатываемых в рамках Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (планов локализации и ликвидации разливов нефти, деклараций промышленной безопасности) при эксплуатации и проектировании объектов транспортного комплекса, а также проведении тренажерной подготовки персонала.*

*The quantitative assessment of the extent of harm from components of the vessel of various class of danger is executed. The way of indirect determination of the extent of harm at demolition of the vessel on the coast according to its standard characteristics is offered. Settlement dependences for an assessment of the extent of harm to coastal line at oil spills on objects of a water transport are received and the order of their application is developed. The regression equations of communication of the extent of harm from components of the vessel of various class of danger with characteristics of regions of their arrangement are developed. The technique of determination of the extent of harm from components of the vessel of various class of danger is created and its algorithmization is executed. The results of the researches can be useful at creation of the documents developed within the framework of the Uniform state system of the prevention and liquidation of emergencies (plans of localization and liquidation of oil spillages, declarations of industrial safety) during exploitation and designing of objects of the transport complex, and also during personnel training.*

*Ключевые слова: вред, почва, разлив нефти, способ оценки, компоненты судна, отходы, класс опасности, уравнения связи.*

*Key words: harm, soil, oil spills, assessment way, vessel components, waste, danger class, communication equations.*



ОДНОЙ из важнейших задач, решаемых в рамках функциональных и территориальных подсистем Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), является определение размера вреда и, соответственно, уровня