


Использование эффекта сопутствующей флокуляции при очистке сточных вод от мелкодисперсных взвешенных частиц

Д.И. Перепелица¹  , А.П. Лепихин^{1,2} , С.А. Лепешкин² 

 perepelitsa_di@mail.ru

¹ ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

² ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Очистка отводимых сточных вод от мелкодисперсных взвешенных частиц является весьма актуальной как экологической, так и технологической проблемой. Из-за очень малых размеров взвешенные частицы характеризуются низкими скоростями осаждения и высокой проникающей способностью. При решении конкретной практической задачи в данном исследовании проанализирован синергетический эффект, обнаруженный при смешении сточных вод с высокой минерализацией, приводящий к повышению крупности взвешенных частиц и скорости их осаждения. На конкретном примере показана эффективность сопутствующей коагуляции взвешенных веществ, а также существенное снижение их концентрации в водоеме-отстойнике. **Методы.** Выполнен обзор современных отечественных и зарубежных исследований, связанных с влиянием минерализации воды на коагуляцию и интенсификацию осаждения взвешенных частиц. На примере многолетних исследований пруда-отстойника ОАО «Соликамский магниевый завод» проведен анализ влияния повышенной минерализации воды на осаждение взвешенных наносов. Выполнена экспериментальная оценка увеличения размеров частиц при увеличении солености воды. **Результаты.** Применение наблюдаемого эффекта позволяет обеспечить устойчивую очистку отводимых сточных вод от мелкодисперсных взвешенных частиц, не поддающихся удалению традиционными методами очистки.





КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мелкодисперсные взвешенные вещества, очистка от взвешенных веществ, соленость сточных вод.


Для цитирования: Перепелица Д.И., Лепихин А.П., Лепешкин С.А. Использование эффекта сопутствующей флокуляции при очистке сточных вод от мелкодисперсных взвешенных частиц // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 6. С. 126–141. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-6-7.

Дата поступления 08.02.2021.

© Перепелица Д.И., Лепихин А.П., Лепешкин С.А., 2021

Application of the concomitant flocculation effect in wastewater treatment in respect of fine suspended particles

Dmitriy I. Perepelitsa¹  , Anatoliy P. Lepikhin^{1,2} , Sergey A. Lepeshkin² 

 perepelitsa_di@mail.ru

¹ Russian Academy of Sciences Ural Branch Perm Federal Research Center, Perm, Russia

² Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, Perm, Russia

ABSTRACT

Significance. Purification of the disposed wastewaters from fine suspended particles is very significant both environmental and technological issue. Due to their very small dimensions, suspended particles are characterized by low rates of precipitation and high penetration ability. In solving of a concrete practical task this work analyzes synergic effect revealed in case of mixing wastewaters with high mineralization resulted in increasing of the suspended particles fineness and their precipitation velocity. A particular case illustrates effectiveness of the suspended matter concomitant coagulation, as well as substantial decrease of their concentration in a settling pool. **Methods.** We have carried out the review of national and foreign publications concerning the water mineralization impact on coagulation and intensification of the suspended particles precipitation. With the use of many-year researchers of the OAO “Solikamsk Magnesium Plant” as a study case, we have analyzed the water higher mineralization influence on the suspended sediments precipitation. We have experimentally assessed the particles size increase with increasing of water salinity. **Results.** Application of the observed effect enables to provide sustainable treatment of disposed wastewaters from fine suspended particles that cannot be removed by traditional treatment methods.

Keywords: fine suspended matters, treatment against suspended matter, wastewaters salinity.

For citation: Perepelitsa D.I., Lepikhin A.P., Lepeshkin S.A. Application of the concomitant flocculation effect in wastewater treatment in respect of fine suspended particles. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 6. P. 126–141. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-6-7.

Received February 08, 2021.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных загрязняющих веществ в сточных водах многих промышленных предприятий являются взвешенные вещества. В России к отведению сточных вод в водные объекты исторически предъявляются весьма жесткие требования. Несмотря на значительную дискуссионность, слабую обоснованность действующих нормативов содержания взвешенных веществ (С.Н. Черкинский [1], А.П. Лепихин, С.И. Головачева [2]), на

протяжении более 75 лет они остаются практически без изменений¹. Поэтому проблема очистки отводимых сточных вод от взвешенных веществ не теряет своей актуальности. В настоящее время наиболее распространенная технология очистки сточных вод основана на гравитационном осаждении взвешенных веществ с использованием различных типов отстойников. Применение данной технологии для осаждения крупных наносов хорошо отработано, а вот очистка сточных вод от мелких частиц сопряжена с определенной сложностью, т. к. дисперсионный состав взвешенных наносов, как правило, неоднороден и характеризуется весьма широким спектром [2–4]. Это требует разработки продуктивных схем очистки сточных вод от мелкодисперсных взвесей, которые являются также эффективным транспортом тяжелых металлов.

Традиционные подходы, основанные на увеличении периода отстоя, как правило, весьма экстенсивны, поэтому для достижения требуемого эффекта необходимо применять различные флотореагенты или включать в производственную цепочку дополнительные технологические процессы – фильтрование на центрифугах или иных устройствах и т. д. Так, в работе [5] для снижения потребления свежей воды и уменьшения поступления загрязняющих веществ в водные объекты предложена концепция «сточные воды одного производства являются сырьем для другого».

При всех своих преимуществах гидравлические отстойники, как инструменты очистки отводимых стоков от взвешенных наносов, имеют принципиальные ограничения, связанные с низкой скоростью осаждения частиц малых размеров. Если оперировать осредненными по поперечному сечению значениями концентрации наносов – S , скорости течения – V , глубины – H , то, исходя из элементарных балансовых оценок, имеем следующее соотношение для оценки изменения концентрации наносов:

$$V \frac{\partial s}{\partial x} = - \frac{\omega}{V \cdot H} S, \quad (1)$$

где ω – скорость осаждения наносов (гидравлическая крупность).

$$\text{Решая (1), имеем } S(x) = S_0 \cdot \exp\left(-\frac{\omega \cdot x}{V \cdot H}\right), \quad (2)$$

где S_0 – концентрация наносов в начальном створе.

¹ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (ред. от 12.10.2018).

Таким образом, для обеспечения требуемой глубины очистки протяженность отстойника при заданных значениях его глубины и скорости течения должна быть:

$$L/H \geq \text{Ln} \left(\frac{S_0}{S_{\text{нор}}} \right) \cdot \frac{V}{\omega}, \quad (3)$$

где $S_{\text{нор}}$ – нормативное содержание взвешенных веществ на сбросе в водный объект.

Так как скорость течения V также определяется параметрами отстойника $V = \frac{q_{\text{сб}}}{H \cdot B}$, то основным параметром, определяющим эффективность работы отстойников, является гидравлическая крупность подлежащих очистке частиц.

Соотношения (1) – (3) описывают процесс функционирования отстойника в простейшей постановке. Современные вычислительные технологии позволяют эффективно проводить такие расчеты, не прибегая к процедуре осреднения по поперечным сечениям, учитывая при этом динамику донных отложений. Обзор этих методов представлен в [4, 6]. Однако даже при использовании современных технологий вычислительной гидродинамики остается открытым вопрос корректности оценки скорости осаждения наносов. Проблема в том, что данная скорость осаждения частиц зависит не только от их размера, но и от минерализации воды, ее химического состава, а также от химического состава наносов.

В стандартной постановке рассматривается два режима осаждения частиц, обусловленных принципиальным различием ламинарного и турбулентного течения. Как известно, критерием различия этих двух режимов является число Рейнольдса $Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu}$. При $Re \gg Re_{\text{кр}}$ (где $Re_{\text{кр}} \sim 1200$ – критическое значение), осаждение частиц проходит в режиме квадратичного турбулентного сопротивления. Когда действующая на частицу сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости, для определения скорости осаждения может использоваться схема Ньютона:

$$\omega(d) \sim 1,35 \cdot \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho) \cdot d}{\rho}}. \quad (4)$$

При $Re \ll Re_{\text{кр}}$ осаждение происходит в ламинарном режиме, который описывается соотношением Стокса:

$$\omega_{\text{с}}(d) := \frac{d^2 \cdot \Delta \rho \cdot g}{18 \cdot \nu}. \quad (5)$$

Наибольшую сложность представляет описание гидравлической крупности в переходной зоне, когда $Re \sim Re_{кр}$.

В настоящее время предложен [4, 7–9] ряд соотношений для описания гидравлической крупности частиц с очень широким диапазоном их размеров. Некоторые из них представлены ниже:

Zhang Y. et al. [7]:

$$\omega z(d) := \left[\sqrt{\left[13,95 \left(\frac{v}{d} \right)^2 + 1,09 \left[\frac{(\rho s - \rho)}{\rho} \cdot d \cdot g \right]} \right]} - 13,95 \cdot \frac{v}{d}; \quad (6)$$

$$\text{где } \Delta \rho := \frac{(\rho s - \rho)}{\rho}.$$

Van Rijn L. [8]

$$\omega R(d) := 10 \cdot \frac{v}{d} \cdot \left[\left[\sqrt{1 + 0,01 \left(\Delta \rho \cdot \frac{g \cdot d^3}{v^2} \right)} \right] - 1 \right]; \quad (7)$$

Cheng. [4]:

$$\omega ch(d) := \frac{v}{d} \cdot \left[\left[25 + \left[d \cdot \left(\Delta \rho \cdot \frac{g}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \right]^{0,5} - 5 \right]^{\frac{3}{2}}; \quad (8)$$

Ferguson R.I. et al. [9]:

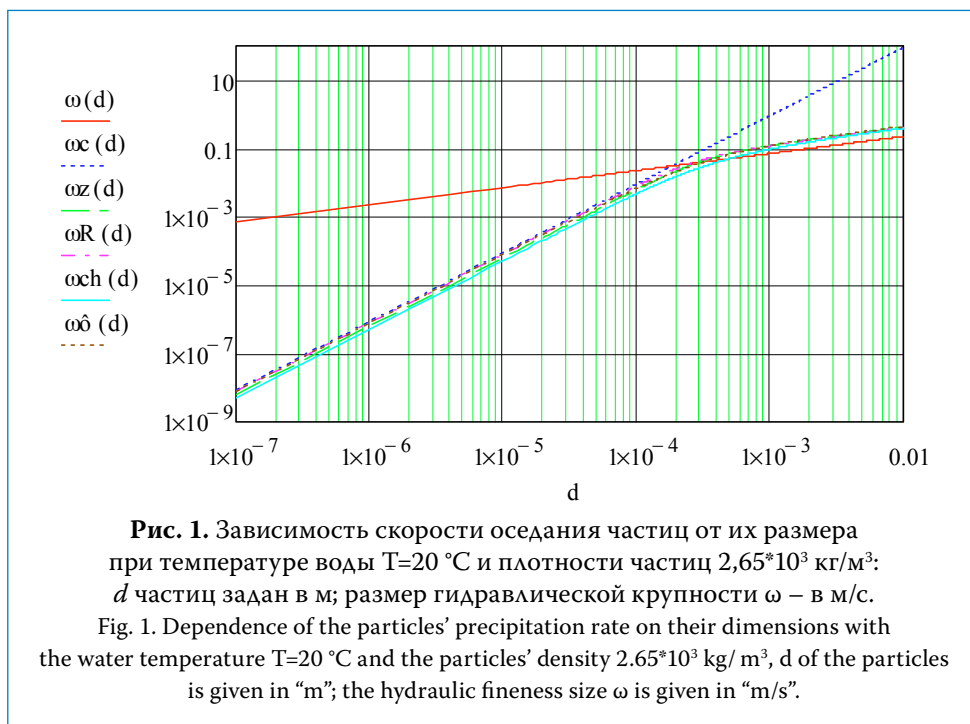
$$\omega \hat{o}(d) := \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot d^2}{[C1 \cdot v + (0,75 C2 \cdot \Delta \rho \cdot g \cdot d^3)^{0,5}]}. \quad (9)$$

При этом $C1 = 20$, $C2 = 1,1$.

Рассчитанные по данным соотношениям значения гидравлической крупности представлены на рис. 1.

Очевидно, что все расчетные зависимости дают весьма близкие результаты за исключением формулы Стокса, ориентированной только на ламинарный режим осаждения, и соотношения (4), ориентированного только на турбулентный режим.

Соотношения (3–9) лежат в основе традиционных расчетов прудов-отстойников для очистки сточных вод от взвешенных наносов. Однако практическая реализация данной, казалось бы, совершенно прозрачной технологии на конкретных объектах может давать сложно объяснимые результаты. Рассмотрим эти особенности на примере пруда-отстойника ОАО «Соликамский магниевый завод» (далее ОАО «СМЗ»).



МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расположенное в г. Соликамске ОАО «СМЗ» является одним из крупнейших производителей магнезия и редкоземельных металлов. Расход отводимых сточных вод составляет $\sim 0,3\text{ м}^3/\text{с}$. Основным источником взвешенных веществ в отводимых сточных водах предприятия являются остатки известняковых пород после гашения кислот в ходе технологических процессов (кислые воды проходят через заполненный известняковым щебнем бассейн). По данным ОАО «СМЗ» медианный размер взвешенных частиц в сточных водах составляет 1 микрометр (рис. 2).

Содержание взвешенных веществ в отводимых сточных водах составляет $\sim 200\text{ мг/л}$. Отведение сточных вод с таким высоким содержанием взвешенных веществ (частиц) в р. Каму (Камское водохранилище) недопустимо. Требуемый норматив содержания взвешенных веществ – $8,25\text{ мг/л}$. Применение методов снижения их содержания аппаратными способами непосредственно на производственной площадке, к сожалению, не дало положительного результата. Поэтому остро встал вопрос об изменении системы отведения сточных вод предприятия в Камское водохранилище и строительстве дополнительных очистных сооружений.

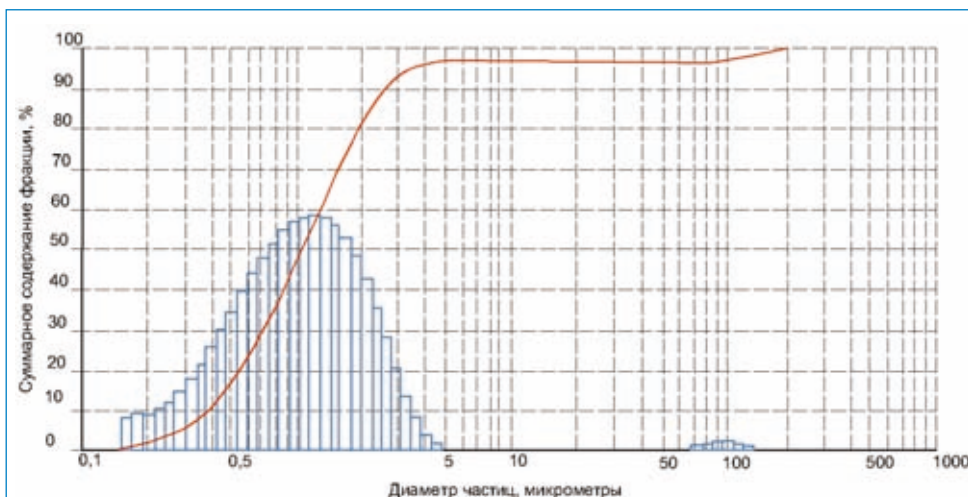


Рис. 2. Фракционный состав взвешенных веществ в отводимых сточных водах ОАО «СМЗ».

Fig. 2. The suspended substances fraction composition in disposed waste waters of OAO "SMZ".

Авторами данной статьи выполнен комплекс научно-исследовательских работ, в ходе которых установлено, что осажденные взвешенные вещества относятся к 5 классу опасности отходов, соответственно, их размещение не сопряжено с дополнительными работами по обезвреживанию. Поэтому для очистки сточных вод было предложено использовать в качестве отстойника отработанный затопленный карьер нерудных строительных материалов. Схема данного объекта представлена на рис. 3.

Пруд-отстойник расположен за пределами водоохранной зоны Камского водохранилища. Подвод сточных вод был выполнен по открытому каналу, отведение осветленных вод осуществляется также по открытому каналу.

Результаты расчета осаждения взвешенных веществ в пруде-отстойнике на основе традиционных подходов с использованием вышеизложенных методов показали, что существуют значительные риски устойчивости функционирования данного объекта, особенно при ветро-волновых нагрузках. При характерном размере взвешенных частиц отводимых стоков $d \sim 10^{-6} \text{ м} = 10^{-3} \text{ мм} = 1 \text{ мкм}$ (рис. 1), скорость осаждения должна составлять $\omega \sim 8 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$. Соответственно, время осаждения взвешенных частиц данных размеров даже на глубину $\sim 1 \text{ м}$ составит $1,25 \cdot 10^6 \text{ с}$ или 14,46 сут. Период осаждения взвешенных частиц на глубину отстойника (до 10 м) увеличится до $\sim 145 \text{ сут}$. Проведенные более детальные оценки на основе гидродинамиче-



Рис. 3. Общая схема системы отведения сточных вод ОАО «СМЗ» с прудом-отстойником.

Fig. 3. General schematic map of the waste water disposal system of OAO "SMZ" with a settling pool.

ских моделей в 2D-постановке [6] показали, что существуют значительные риски устойчивости функционирования данного очистного сооружения по причине очень малой скорости осаждения взвешенных частиц. Для снижения этого риска был предусмотрен тонкослойный водослив с отбором воды из верхнего, наиболее осветленного слоя, также обсуждался вопрос ограничения функционирования при наиболее неблагоприятных метеорологических условиях и перехода в этот период в режим пруда-накопителя.

Однако уже первый год эксплуатации данного очистного сооружения продемонстрировал совершенно иные результаты. Производственный мониторинг показал, что взвешенные наносы полностью и устойчиво осаждаются в зоне, ограниченной первыми десятками метров от водовыпуска. Так как переносимые сточными водами взвешенные вещества аккумулируются исключительно в этой зоне, в последующие пять лет в районе водовыпуска сформировалась своеобразная дельта из осажденных взвешенных веществ (рис. 4).



Рис. 4. Общий вид области осаждения взвешенных наносов в зоне воздействия водовыпуска ОАО «СМЗ» на пруд-отстойник, август 2020 г.

Fig. 4. General view of the suspended sediments precipitation area within the zone of impact of ОАО "SMZ" water outlet upon the settling pool, August 2020.

Как следует из рис. 4, зона распространения взвешенных веществ в пруду-отстойнике, даже после пяти лет его активной эксплуатации, занимает не более 7 % от общей площади пруда. При этом за период эксплуатации отстойника накоплено ~128 тыс. м³ отложений, которые без использования данного сооружения поступили бы в р. Каму (Камское водохранилище). Полученные результаты противоречат изложенным выше традиционным представлениям о динамике взвешенных веществ и скорости осаждения частиц заданного размера.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерной особенностью воды в данном пруду-отстойнике является ее повышенная минерализация в результате фильтрационных разгрузок расположенного рядом шламохранилища ПАО «Уралкалий». В настоящее время средняя минерализация воды в рассматриваемом водном объекте составляет ~ 16 г/л. При этом, как было показано в работах [4, 10, 12, 13], соленость влияет на скорость оседания мелкодисперсных взвешенных частиц, что является важным параметром при оценке зоны распространения мелкодисперсных взвешенных наносов в водных объектах с повышенной минерализацией [10–17]. Взвешенные частицы слипаются в соленой воде быстрее, чем в пресной [16–18].

В настоящее время исследованию данного эффекта за рубежом уделяется значительное внимание. Это связано, в первую очередь, с актуализацией задачи оценки поведения взвешенных наносов в эстуариях [10–14]. При этом отмечается, что механизмы увеличения скорости осаждения наносов при их поступлении в эстуарии весьма многофакторны и зависят не только от концентрации наносов, минерализации воды, но и от состава наносов. Имеется достаточно большое количество работ, где утверждается, что эффект уменьшения толщины двойного электрического слоя при увеличении солености приводит к агрегированию взвешенных частиц и значительному увеличению скорости их осаждения [12] и др. Эффект влияния солености воды на скорость оседания взвешенных наносов, как на важный фактор транспортировки мелкодисперсных взвешенных наносов в реках и устьях рек, рассматривается в работах [10–13].

Согласно исследованиям [15–19], соленость и наличие частиц глины приводят к резкому увеличению интенсивности процессов образования кластеров из взвешенных частиц, увеличению крупности частиц. Этот эффект связан с тем, что частицы глины имеют отрицательный заряд. В пресной воде электрокинетический потенциал, связанный с частицами, как правило, достаточно большой, в результате частицы отталкиваются друг от друга. В соленой воде этот потенциал уменьшается ниже критического значения, связанный с частицами электрический слой разрушается. В работах [4, 14] представлено графическое соотношение скорости оседания хлопьев и солености (рис. 5). При малой солености скорость оседания быстро увеличивается с ростом минерализации воды. Далее, при достижении определенного порогового значения солености, рост кластеров прекращается, хлопья становятся очень неустойчивыми.

В целом, как показано в [10], масштаб флотационных эффектов определяется размером частиц: чем меньше частицы, тем более значительно проявление данного эффекта. При этом коэффициент флокуляции, определяемый как $F\omega = \omega^*sf/\omega^*sd$, (где ω^*sf и ω^*sd , соответственно, скорости оседания хлопьев и отдельных диспергированных частиц), согласно [10], аппроксимируется зависимостью:

$$F\omega = \left(\frac{dr}{d_{50}} \right)^{n_d}, \quad (10)$$

где $n_d = 1,8$, а d_r – контрольный диаметр, примерно 0,0215 мм.

Графически данная зависимость представлена на рис. 6.

В работах [15, 16, 19] утверждается, что в формировании эффекта увеличения скорости осаждения частиц в зависимости от минерализации воды определяющую роль может играть минеральный состав наносов. Так, если

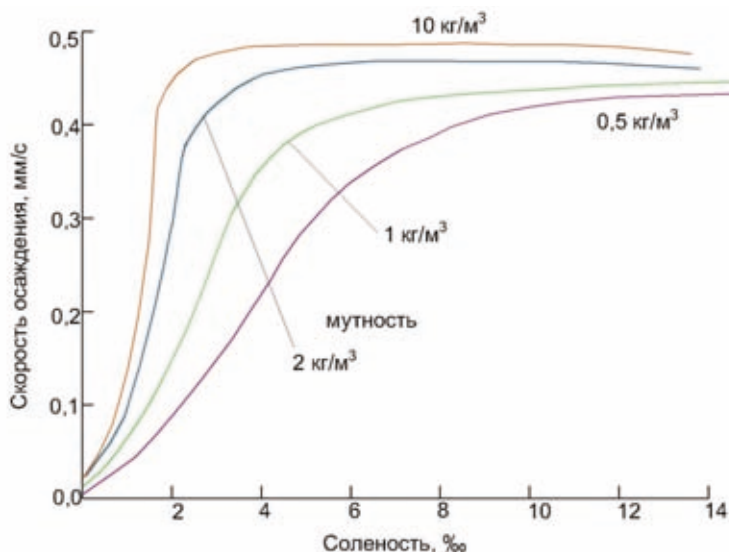


Рис. 5. Изменение скорости осаждения частиц в зависимости от минерализации воды [14].

Fig. 5. Changing of the particles' precipitation rate dependent of the water mineralization [14].

осаждение частиц каолина значительно возрастает при увеличении солености воды, то на скорость осаждения частиц кремнезема минерализация воды не влияет. В работе [20] на основе комплекса полевых исследований и лабораторных экспериментов показано, что на величины гидравлической крупности взвешенных частицы р. Роны очень слабо влияет соленость воды. Аналогичные результаты представлены на основе экспериментальных данных для наносов в устье р. Сены [20]. В устьевых участках данных рек влияние солености на скорость осаждения взвешенных наносов играет второстепенное значение по сравнению с составом наносов и концентрацией органического вещества.

Выполненная в ходе данного исследования оценка размеров взвешенных частиц и частиц донных отложений показала, что наблюдается существенное увеличение их размеров в пруду-отстойнике. При этом взвешенные наносы имеют сложную фрактальную структуру. Крупность 80 % взвешенных частиц составляет 0,25–0,1 мм, крупность 60–80 % донных отложений 0,1–0,01 мм, т. е. при попадании частиц на дно отстойника их кластерность существенно снижается. Микрофотография взвешенных частиц в исходных стоках и в пруду-отстойнике представлена на рис. 7.

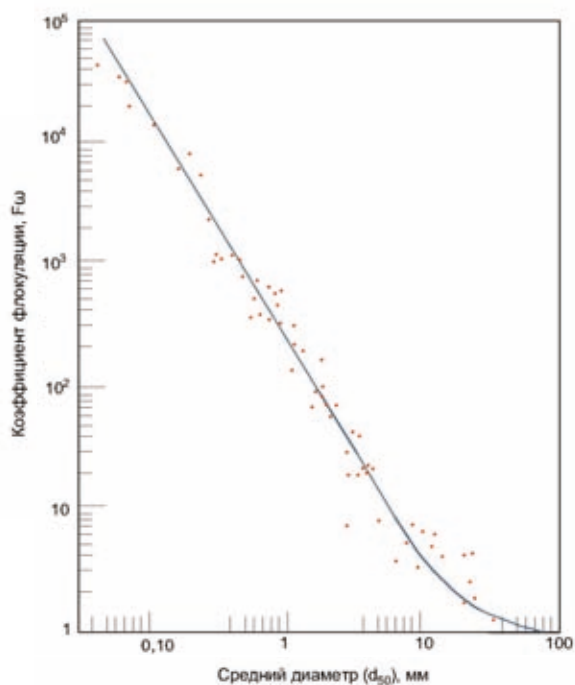


Рис. 6. Зависимость коэффициента флокуляции $F\omega$ как функция частицы d_{50} по [10].

Fig. 6. Dependence of flocculation index $F\omega$ as a function of particle d_{50} according to [10].

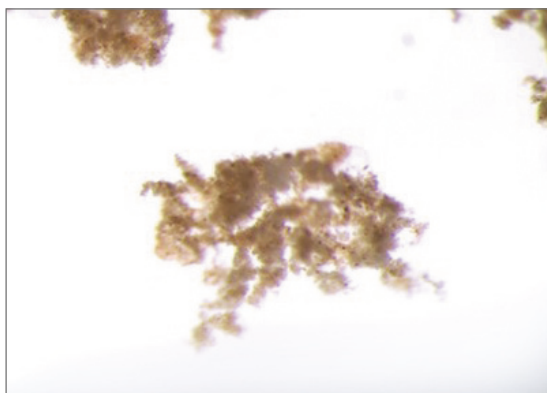


Рис. 7. Макросъемка взвешенных веществ в воде пруда-отстойника (размер реального квадрата 2 мм).

Fig. 7. Close-up view of suspended matter in the settling pool water (the size of the real square is 2 mm).

Под влиянием повышенной минерализации воды происходит значительное укрупнение частиц, их агрегирование, и, соответственно, увеличение скорости осаждения и их гидравлической крупности. В рассматриваемом случае повышенная минерализация воды, обусловленная поступлением в пруд-отстойник избыточных рассолов сточных вод предприятий калийной промышленности, разрабатывавших одно из крупнейших в мире месторождений калийных и магниевых руд, сыграла роль естественного, весьма эффективного флокулянта, обеспечившего связывание очень мелких частиц взвешенных веществ в отводимых стоках. Данный пример демонстрирует важность и эффективность планирования и реализации комплексных водоохраных мероприятий на единой территориальной основе с учетом интересов всех водопользователей промышленной агломерации. Такая схема широко используется за рубежом, в частности в КНР [4], и дает значительный как экономический, так и экологический эффект, позволяя применять отходы одного промышленного производства в качестве сырья и необходимого полезного компонента для другого производства.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенной работы на примере очистки отводимых сточных вод ОАО «СМЗ» от мелкодисперсных взвешенных частиц продемонстрирована эффективность и целесообразность единого комплексного территориального планирования и проведения водоохраных мероприятий. Повышенная минерализация отводимых избыточных рассолов предприятий калийной промышленности оказалась эффективным флокулянтом, позволившим решить проблемы очистки сточных вод от мелкодисперсных взвешенных веществ, снизив тем самым негативное экологическое воздействие на р. Каму (Камское водохранилище).

Проведенные исследования показали, что если размеры взвешенных частиц в отводимых производственных сточных водах ОАО «СМЗ» составляют ~ 1 мкм, то в пруду-отстойнике под воздействием эффекта коагуляции, связанного с повышенной минерализацией воды, наблюдаются быстро протекающие процессы коагуляции, вследствие которых размеры частиц увеличиваются до 0,1–0,25 мм и скорость их осаждения возрастает более чем на три порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черкинский С.Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы. М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1947. 171 с.
2. Лепихин А.П., Головачева С.И. К проблеме регламентации отведения взвешенных веществ в естественные водотоки // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 4–13. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-1-1.

3. Лепихин А.П., Веницианов Е.В. Физико-химические основы моделирования и трансформации тяжелых металлов в природных водах. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2002. 235 с.
4. Wu Weiming. Computational River Dynamics Taylor & Francis e-Library, 2007. 494 p.
5. Aiqing Kang, Jiahong Li, Xiaohui Lei, Mao Ye Optimal Allocation of Water Resources Considering Water Quality and the Absorbing Pollution Capacity of Water // Water Resources. Vol. 47, p. 336–347 (2020). DOI: 10.1134/s0097807820020074.
6. Лепихин А.П., Тиунов А.А. Современные гидродинамические модели русловых процессов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 4. С. 114–143. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-4-6.
7. Zhang Y., M.M. Meerschaert and A.I. Packman (2012). Linking fluvial bed sediment transport across scales. Geophys. Res. Lett., 39, L20404, DOI:10.1029/2012GL053476.
8. Van Rijn L. (1984). Sediment transport. Part I: Bed load transport, J. Hydraul. Eng., 110, 1431–145.
9. Ferguson R.I., M.A. Church. Simple Universal Equation for Grain Settling Velocity // Journal of Sedimentary Research November, 2004. 74(6):933–937.
10. Migniot. A study of the physical properties of different very fine sediments and their behavior under hydrodynamic action, La Houille Blanche, 1968. No 7. P. 591–620
11. Dobereiner C, McManus J (1983) Turbidity maximum migration and harbour siltation in the Tay estuary. Can J Fish Aquat Sci 40:117–129.
12. Eisma D. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. Neth J Sea Res, 1986, 20:183–199.
13. Burban P-Y, Lick W, Lick J (1989) The flocculation of fine-grained sediments in estuarine waters. J Geophys Res: Oceans 94:8323–8330.
14. Chien N. and Wan Z.H. Mechanics of Sediment Movement, Science Press, 1983, Beijing, China (in Chinese).
15. Eisma D., Bernard P, Cadée GC, Ittekkot V., Kalf J., Laane R., Martin JM, Mook WG, van Put A, Schuhmacher T. (1991). Suspended-matter particle size in some west-European estuaries; Part II: a review on floc formation and break-up. Neth J Sea Res 28:215–220.
16. Aisha Mhashhash, Bettina Bockelmann-Evans, Shunqi Pan Effect of hydrodynamics factors on sediment flocculation processes in estuaries // Journal of Soils and Sediments. Vol. 18. P. 3094–3103(2018).
17. Luís Ivens Portela, Susana Ramos, António Trigo Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin // National Laboratory of Civil Engineering, LNEC, Dept. of Civil Engineering and Architecture, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa.
18. Cheviet C., Violeau D., Guesmia M. (2002) Numerical simulation of cohesive sediment transport in the Loire estuary with a three-dimensional model including new parameterisations. Proc Mar Sci 5:529–543.
19. Thill A., Moustier S., Garnier J. M., Estournel C., Naudin J. J., Bottero J.Y. Evolution of Particle Size and Concentration in the Rhone River Mixing Zone // Influence of Salt Flocculation, Continental Shelf Research. 2001.Vol. 21. Iss. 18–19:2127-2140.

20. Verney R., Lafite R., Brun-Cottan J. C. Flocculation Potential of Estuarine Particles // The Importance of Environmental Factors and of the Spatial and Seasonal Variability of Suspended Particulate Matter, *Estuaries and Coasts*, Vol. 32 (Issue 4):678-693, 2009.

REFERENCES

1. Cherkinskiy S.N. Sanitary conditions of the wastewater discharge to water bodies. M.: Izd-vo MKKh RSFSR, 1947. 171 p. (in Russ.).
2. Lepikhin A.P., Golovacheva S.I. On the issue of regulating of the suspended substances disposal to natural watercourses. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2015. No 1. C. 4–13. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-1-1 (in Russ.).
3. Lepikhin A.P., Venitsianov E.V. Physical/chemical foundations of simulating and transforming of heavy metals in natural waters. Ekaterinburg: RosNIIVKh, 2002. 235 p. (in Russ.).
4. Wu Weiming. *Computational River Dynamics* Taylor & Francis e-Library, 2007. 494 p.
5. Aiqing Kang, Jiahong Li, Xiaohui Lei, Mao Ye Optimal Allocation of Water Resources Considering Water Quality and the Absorbing Pollution Capacity of Water. *Water Resources*. Vol. 47, p. 336–347(2020). DOI: 10.1134/s0097807820020074.
6. Lepikhin A.P., Tiunov A.A. Contemporary hydro/dynamical model of channel processes. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2019. No. 4. C. 114–143. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-4-6 (in Russ.).
7. Zhang Y., M.M. Meerschaert and A.I. Packman (2012). Linking fluvial bed sediment transport across scales. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20404, DOI:10.1029/2012GL053476.
8. Van Rijn L. (1984). Sediment transport. Part I: Bed load transport, *J. Hydraul. Eng.*, 110, 1431–145.
9. Ferguson R.I., M.A. Church. Simple Universal Equation for Grain Settling Velocity. *Journal of Sedimentary Research*. November 2004. 74(6):933–937.
10. Migniot. A study of the physical properties of different very fine sediments and their behavior under hydrodynamic action, *La Houille Blanche*, 1968. No 7. P. 591–620.
11. Dobereiner C, McManus J (1983) Turbidity maximum migration and harbour siltation in the Tay estuary. *Can J Fish Aquat Sci* 40:117–129.
12. Eisma D. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Neth J Sea Res*, 1986, 20:183–199.
13. Burban P-Y, Lick W, Lick J (1989) The flocculation of fine-grained sediments in estuarine waters. *J Geophys Res: Oceans* 94:8323–8330.
14. Chien N. and Wan Z.H. *Mechanics of Sediment Movement*, Science Press, 1983, Beijing, China (in Chinese).
15. Eisma D, Bernard P, Cadée GC, Ittekkot V, Kalf J, Laane R, Martin JM, Mook WG, van Put A, Schuhmacher T (1991) Suspended-matter particle size in some west-European estuaries; Part II: a review on floc formation and break-up. *Neth J Sea Res* 28:215–220.
16. Aisha Mhashhash, Bettina Bockelmann-Evans, Shunqi Pan Effect of hydrodynamics factors on sediment flocculation processes in estuaries. *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 18, p. 3094–3103(2018).
17. Luís Ivens Portela, Susana Ramos, António Trigo Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin. National Laboratory of Civil Engineering, LNEC,

Dept. of Civil Engineering and Architecture, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa.

18. Cheviet C, Violeau D, Guesmia M (2002) Numerical simulation of cohesive sediment transport in the Loire estuary with a three-dimensional model including new parameterisations. *Proc Mar Sci* 5:529–543.
19. Thill A., Moustier S., Garnier J. M., Estournel C., Naudin J. J., Bottero J.Y. Evolution of Particle Size and Concentration in the Rhone River Mixing Zone. Influence of Salt Flocculation, *Continental Shelf Research*. 2001.Vol. 21. Iss. 18–19:2127–2140.
20. Verney R., Lafite R., Brun-Cottan J. C. Flocculation Potential of Estuarine Particles//The Importance of Environmental Factors and of the Spatial and Seasonal Variability of Suspended Particulate Matter, *Estuaries and Coasts*, Vol. 32 (Issue 4):678-693, 2009.

Сведения об авторах:

Перепелица Дмитрий Ильич, инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID:0000-0003-2499-7899; e-mail: perepelitsa_di@mail.ru

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор, директор, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А. ORCID: 0000-0001-9874-3424; e-mail: lepin49@mail.ru

Лепешкин Сергей Александрович, научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113. ORCID: 0000-0002-2308-4396; e-mail: lepehkin_sa@mail.ru

About the authors:

Dmitriy I. Perepelista, Engineer, Laboratory of Inland Hydrology Problems, Russian Academy of Sciences Ural Branch Institute of Mining – a branch of Russian Academy of Sciences Ural Branch Perm Federal Research Center, ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007 Russia; ORCID: 0000-0003-2499-7899; e-mail: perepelitsa_di@mail.ru

Anatoliy P. Lepikhin, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Director, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolaya Ostrovskogo, 113, Perm, 614002, Russia; Russian Academy of Sciences Ural Branch Institute of Mining – a branch of Russian Academy of Sciences Ural Branch Perm Federal Research Center, ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007 Russia; ORCID: 0000-0001-9874-3424; e-mail: lepin49@mail.ru

Sergey A. Lepeshkin, Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolaya Ostrovskogo, 113, Perm, 614002, Russia; ORCID: 0000-0002-2308-4396; e-mail: lepehkin_sa@mail.ru