

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 628.161.3

Евгений Александрович Карпычев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-09, e-mail: karpuchev3108@bk.ru

Расчетная зависимость определения фактической дозы микропеска и влияние ее значения на эффективность процесса коагуляции в осветлителях Actiflo

Авторское резюме

Состояние вопроса. Проведение режимно-наладочных испытаний систем предварительной очистки воды является первым и наиболее ответственным этапом при запуске в опытно-промышленную эксплуатацию водоподготовительной установки на ТЭС. Для большинства традиционных аппаратов предварительной очистки воды имеется достаточный опыт наладки и эксплуатации, известны основные этапы и особенности проводимых работ, издано достаточное количество методической литературы, а для современных и перспективных образцов – нет. К числу таких аппаратов можно отнести осветлители Actiflo. Главной особенностью технологии Actiflo является микропесок, вводимый в поток обрабатываемой воды и образующий «центры» коагуляции и используемый для утяжеления образующегося шлама. Решению приоритетной задачи адаптации перспективной технологии Actiflo в системах водоподготовки ТЭС будет способствовать разработка методики оценки влияния фактической дозы микропеска на процесс осветления воды.

Материалы и методы. В лабораторных исследованиях применен метод пробной коагуляции, позволяющий с использованием общепринятых методов количественного анализа показателей качества природной воды оценить эффективность процесса коагуляции. В последующих промышленных испытаниях наряду с количественным анализом воды проведена оценка фактического значения дозы микропеска с использованием измерений долей отдельных фракций в объеме образующейся пескошламовой пульпы.

Результаты. Получены результаты лабораторных и промышленных исследований процесса «холодной» коагуляции воды р. Камы в осветлителях Actiflo. Определена зависимость эффективности осветления воды от дозы коагулянта и дозы микропеска. В целях контроля и поддержания режима работы осветлителя разработана и предложена методика оценки фактических значений дозы микропеска.

Выводы. Полученные результаты исследований применимы для маломутных цветных поверхностных водоисточников. Результаты режимно-наладочных испытаний осветлителей Actiflo могут быть использованы в качестве практических примеров при коагуляции воды в схожих по конструкции аппаратах, например осветлителях ВТИ-М. Предложенный метод оценки фактической дозы микропеска

ка можно использовать как технологический параметр при разработке режимных карт по эксплуатации осветлителей Actiflo.

Ключевые слова: осветлители Actiflo, режимно-наладочные испытания, коагуляция холодной воды, эффективность осветления воды, фактическая доза микропеска.

Evgenii Alexandrovich Karpuchev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-09, e-mail: karpuchev3108@bk.ru

Calculated dependence of determination of actual dose of microsand and influence of its value on efficiency of coagulation process in Actiflo clarifier

Abstract

Background. Operational test of the preliminary water cleaning systems is the first and most critical stage when putting into pilot operation a water treatment plant at a thermal power plant (TPP). We have sufficient experience of equipment setting up and operating when most traditional devices of preliminary water purification are used. Also, the main stages and features of the work carried out are known, and a sufficient amount of methodological literature has been published, compared to employment of modern and promising devices. These devices include Actiflo clarifiers. The main feature of the Actiflo technology is introduction of microsand into the stream of treated water. It forms the so-called “centers” of coagulation and is used to make wastewater sludge heavier. The development of a methodology to assess the impact of the actual dose of microsand on the water clarification process will contribute to the solution of the priority task of adapting the promising Actiflo technology for water treatment systems of TPPs.

Materials and methods. In laboratory studies, the method of pilot coagulation has been used. It allows us to assess the efficiency of coagulation process using generally accepted methods of quantitative analysis of indicators of natural water quality. In subsequent industrial tests, along with the quantitative analysis of water, the actual value of the microsand dose has been assessed using measurements of the proportions of separate fractions in the formed sand-sludge pulp.

Results. The results of laboratory and industrial studies of “cold” coagulation process of the Kama River water using Actiflo clarifiers have been obtained. The dependence of efficiency effect of water clarification on the dose of coagulant and the dose of microsand has been determined. To check and maintain the operating mode of the clarifier, a method to assess the actual values of the microsand dose has been developed and proposed.

Conclusions. The research results are applicable for low-turbidity colored surface water sources. The results of operating tests of Actiflo clarifiers can be used as practical examples for coagulating water in devices similar in design, for example, VTI-M clarifiers. The proposed method to assess the actual dose of microsand can be used as a technological parameter during the development of the parameter tables when Actiflo clarifiers are used.

Key words: Actiflo clarifiers, operational test, cold water coagulation, water clarification efficiency, actual dose of microsand

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.3.005-012

Введение. Технология осветления воды Actiflo на сегодняшний момент представляет наибольший интерес не в силу своей новизны, а в силу хороших технологических показателей работы и высокой маневренности. Эти осветлители могут быть использованы на объектах, где отсутствует возможность установить объемные буферные баки для компенсации изменения потребления воды, а помещения реконструируемой водоподготовительной установки (ВПУ) не позволяют устанавливать громоздкое оборудование для предварительной очистки воды.

Они выгодно отличаются от осветлителей ВТИ габаритами, но требуют адаптации к качеству обрабатываемой воды и условиям эксплуатации на отечественных водоподготовительных установках [1].

Технология осветления воды Actiflo все чаще применяется на энергообъектах в целях интенсификации процесса шламообразования в объеме коагулированной воды, увеличения маневренности водоподготовительного оборудования, обеспечения требуемых показателей качества коагули-

рованной воды и экономии реагентов. Особенности технологии являются:

- дозирование микропеска, утяжеляющего частицы шлама;
- эффективное перемешивание реагентов с обрабатываемой водой при использовании электрифицированных мешалок;
- использование сепарационных устройств (гидравлических циклонов) для очистки и повторного использования микропеска.

Опыт работы новых перспективных установок предварительной очистки воды, а также пути совершенствования их работы рассмотрены в ряде научных источников, например [1–4]. Однако внимание к этим технологиям уделено лишь в отношении их технологической эффективности, без опоры на конкретные условия применения и эксплуатации.

В целях обобщения имеющегося опыта эксплуатации подобных установок проанализированы практические результаты пуско-наладочных работ на воде р. Камы установки предварительной очистки воды с осветлителями Actiflo максимальной производительностью 750 м³/ч.

Показатели качества исходной воды существенно изменяются в течение года (табл. 1), наблюдаются высокие значения щелочности, жесткости и цветности воды, а также повышено содержание железоорганических соединений.

Таблица 1. Диапазоны изменения показателей качества воды р. Камы

Щ _о , мг-экв/л	Мутность, NTU	Ж _о , мг-экв/л	Ок, мгО ₂ /л	[Fe] ^{общ} , мг/л	Цветность, Град. Pt-Co	pH ₂₅
от 0,5 до 2,5	от 2,5 до 5,5	от 1,2 до 6,5	от 6,5 до 13,0	от 0,3 до 1,2	от 50 до 125	от 7,0 до 7,6

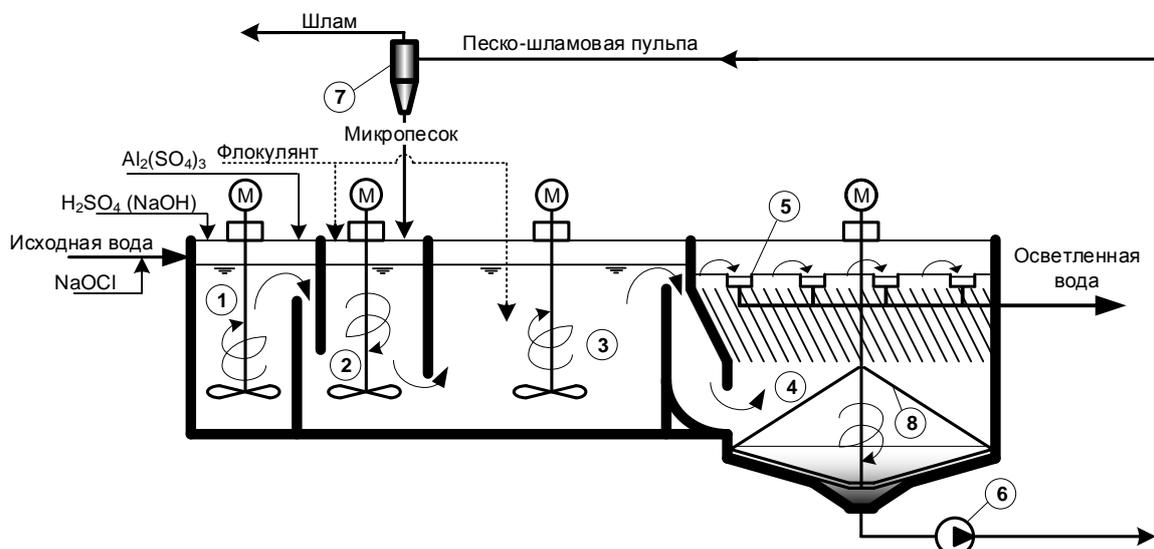


Рис. 1. Технологическая схема осветлителя Actiflo

Коагуляция в осветлителях Actiflo осуществляется путем последовательной обработки воды окислителем – гипохлоритом натрия (NaOCl), выравниванием показателя pH исходной воды посредством подкисления или подщелачивания, добавлением растворов коагулянта Al₂(SO₄)₃ и флокулянта (Praestol 2530 TR).

Технологическая схема осветлителя Actiflo приведена на рис. 1.

Исходная вода, подверженная окислительной обработке гипохлоритом натрия, поступает во входную камеру 1, в которой в зависимости от ее исходного состава, заданной дозы коагулянта и измеренного значения pH₂₅ дозируется корректирующий раствор (кислота или щелочь). Вместе с раствором кислоты или щелочи подается раствор коагулянта. Во входной камере поддерживается перемешивание высокочастотной пропеллерной мешалкой, создающей восходящий поток. Длительность пребывания воды во входной камере при максимальной нагрузке составляет около 2,2 минут. Далее вода поступает в камеру коагуляции 2, где также установлена высокочастотная пропеллерная мешалка, но уже с нисходящим направлением потока, в которую осуществляется дозирование микропеска, а также может осуществляться подача флокулянта. Длительность пребывания воды в этой камере составляет около 2,2 минут.

После камеры коагуляции вода поступает в камеру созревания 3, оборудованную мешалкой с регулируемой частотой оборотов двигателя. В этой камере организовано восходящее направление движения потока воды. В камеру может осуществляться подача раствора флокулянта. Длительность пребывания воды в камере созревания составляет около 7,7 минут. Поток коагулированной воды и частиц микропеска с налипшим шламом попадают в камеру отстаивания 4, где по дну движется скруббер 8, собирающий осевшие частицы шлама и микропеска в центр камеры. Длительность пребывания воды в камере около 10,2 минут при скорости подъемного движения воды около 25 м/ч. Коагулированная вода поднимается на уровень водосборных желобов 5 и по ним подается на следующую ступень обработки. Пульпа из камеры отстаивания отводится шламовым насосом 6. Разделение песко-шламовой пульпы осуществляется в гидроциклоне 7 при непосредственной работе шламового насоса. Часть микропеска при разделении неизбежно удаляется со шламом, поэтому его потери восполняются путем периодической дозировки «свежего» микропеска.

Осветлители работают при существенно переменном качестве исходной воды и без ее подогрева. В зимний период года температура обрабатываемой воды может достигать 1,5–3,0 °С.

Оптимальное значение рабочей дозы микропеска при эксплуатации осветлителей Actiflo составляет 5 г/дм³. Удельные потери микропеска при эксплуатации осветлителей должны находиться в пределах 3 г на 1 м³ обработанной воды и своевременно восполняться дозированием «свежих» порций.

В процессе работы осветлителя микропесок равномерно распределяется в объеме воды при помощи циркуляционных насосов и гидроциклонов. Объемная доза микропеска в осветлителе остается постоянной при стабильном уровне воды. С увеличением расхода исходной воды на осветлитель длительность контакта микропеска с обрабатываемой водой уменьшается, следовательно уменьшается и фактическая доза микропеска, поэтому для объективной оценки эффективности процесса коагуляции необходимо осуществлять ее контроль.

Методы исследования. Пусконаладочные работы осветлителя Actiflo проводились в зимнее время года с учетом особенностей качества исходной воды, опираясь на данные [5, 6]. Перед началом промышленных испытаний выполнялись лабораторные исследования с использованием флокулятора. Лабораторные испытания проводились в следующих условиях:

- пробы исходной воды содержались в холодильном аппарате;

- пробы воды забирались непосредственно из трубопровода с учетом транспортного запаздывания;

- номинальная производительность осветлителя составляла 600 м³/ч (соблюдались условия длительности пребывания пробы на отдельных стадиях ввода реагентов, а также обеспечивалась соответствующая интенсивность перемешивания пробы воды).

Задачи лабораторных исследований:

- подобрать оптимальное значение рН₂₅ и дозы реагентов для коррекционной обработки;

- подобрать эффективные дозы коагулянта, позволяющие обеспечить требуемые значения показателей качества коагулированной воды;

- подобрать наиболее эффективную дозу микропеска с использованием опыта применения добавок-утяжелителей [6];

- обеспечить требуемое качество коагулированной воды (мутность – не более 2,0 NTU, цветность – не более 10 °Pt-Co).

Критериями эффективности очистки воды в отдельных лабораторных опытах являлись наименьшие значения цветности и мутности в коагулированной воде.

Показатели исходной воды во время лабораторных исследований соответствовали следующим значениям: $T = 3$ °С, $\text{Щ}_0 = 1,8$ мг-экв/л, $\text{Мутн} = 3,9$ NTU, $\text{pH}_{25} = 7,3$, $\text{Цв} = 46$ °Pt-Co.

Промышленные испытания проходили в проектных условиях (доза коагулянта – 0,7 мг-экв/л, доза флокулянта – 0,7 мг/л, доза микропеска – 5,5 г/л) при нагрузке на осветлитель 600 м³/ч. Последующей стадией обработки воды после осветлителя являлась механическая фильтрация на скорых фильтрах, загруженных кварцевым песком. К качеству осветленной воды предъявлялись определенные проектом требования (табл. 2).

Таблица 2. Требования к качеству осветленной воды

Мутность, NTU	Ок, мгО ₂ /л	[Fe] ^{общ} , мг/л	Цветность, Град. Pt-Co	pH ₂₅
не более 2,0	не более 5,0	не более 0,1	не более 10	от 6,5 до 7,5

Особое внимание в ходе исследования было уделено поддержанию фактической дозы микропеска. В процессе наладки работы осветлителя в целях уточнения границ технологической эффективности процесса коагуляции был разработан и опробован метод контроля фактической дозы микропеска в осветлителях Actiflo. В процессе определения фактической дозы микропеска осуществлялось измерение высоты слоя микропеска в объеме пескошламовой пульпы, состоящей из песка, воды и шлама, в емкости определенной вместимости за определенное время. Достоверность измерения фактической дозы микропеска определялась объемом тарированной емкости и длительностью отбора пробы. Чем больше время отбора пробы и объем тарированной емкости, тем точнее результат измерений.

Фактическая доза микропеска рассчитывалась по формуле

$$D_{мп} = \frac{H_{песка}}{H_{смеси}} \rho_{мп} \frac{Q_{гидроц}}{Q_{осв}}, \quad (1)$$

где $H_{песка}$ – высота слоя микропеска, отстоявшегося в тарированной емкости в течение 10 минут, см; $H_{смеси}$ – высота слоя смеси микропеска и воды в тарированной емкости, см; $\rho_{мп}$ – плотность микропеска, г/дм³; $Q_{гидроц}$ – производительность гидро-

циклона, м³/ч; $Q_{осв}$ – фактическая производительность осветлителя, м³/ч.

Результаты исследования. По результатам лабораторных опытов построены зависимости, представленные на рис. 2–3.

В результате проведения лабораторных опытов были сделаны следующие выводы:

- наиболее эффективное значение дозы коагулянта в условиях использования микропеска составляет 0,3 мг-экв/л; с увеличением дозы коагулянта сорбционная емкость образующегося шлама становится избыточной и шлам уже не так эффективно объединяется микропеском;

- оптимальный диапазон значений pH₂₅ коагулированной воды составляет 6,9–7,1;

- при дозах микропеска 1–4 г/л качество коагулированной воды соответствует предъявляемым требованиям; увеличение дозы микропеска до 6 г/л приводит к тому, что существенная часть микропеска не участвует в процессе сорбции шлама и показатели качества коагулированной воды по мутности ухудшаются.

По результатам промышленных испытаний получены зависимости, представленные на рис. 4–6.

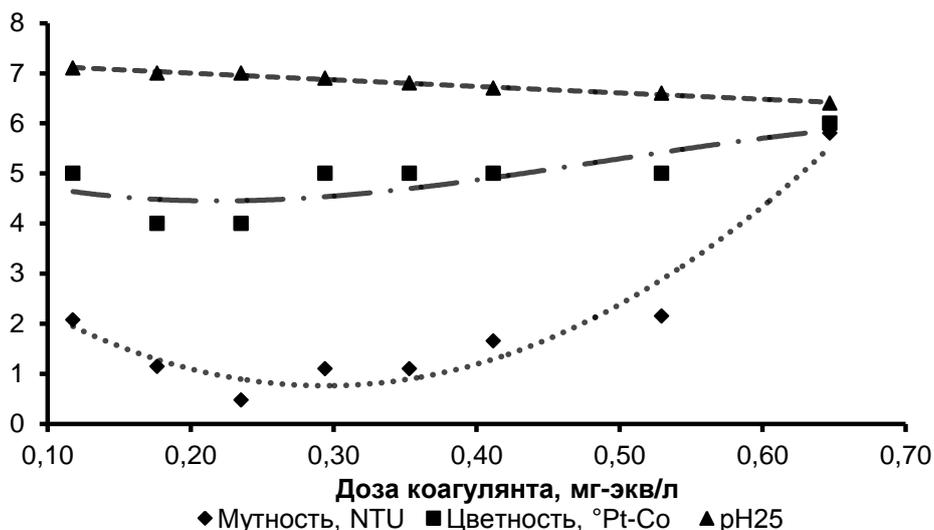


Рис. 2. Влияние дозы коагулянта на мутность, цветность и pH₂₅ коагулированной воды ($D_{фл} = 0,3$ мг/л, $D_{м.п} = 3$ г/л)

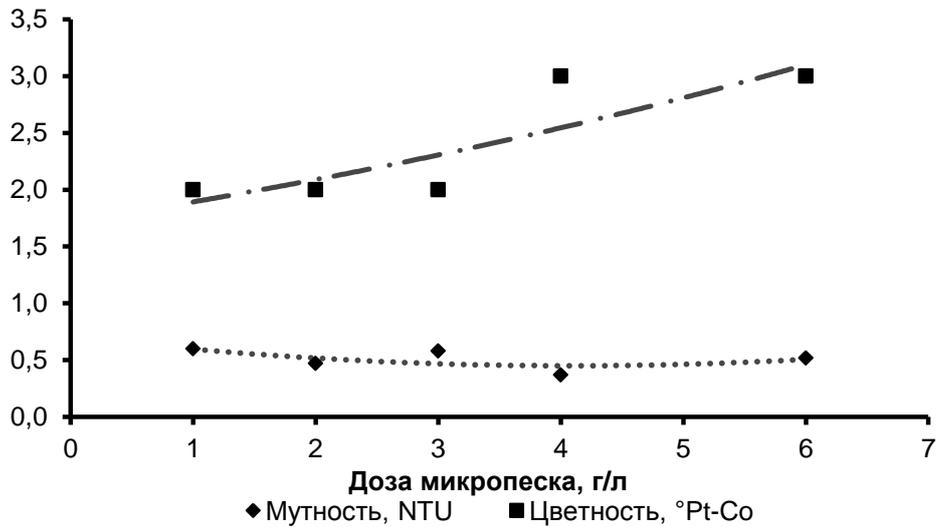


Рис. 3. Влияние дозы микропеска на мутность и цветность коагулированной воды ($D_{\text{фл}} = 0,3$ мг/л, $D_{\text{коаг}} = 0,3$ мг-экв/л)

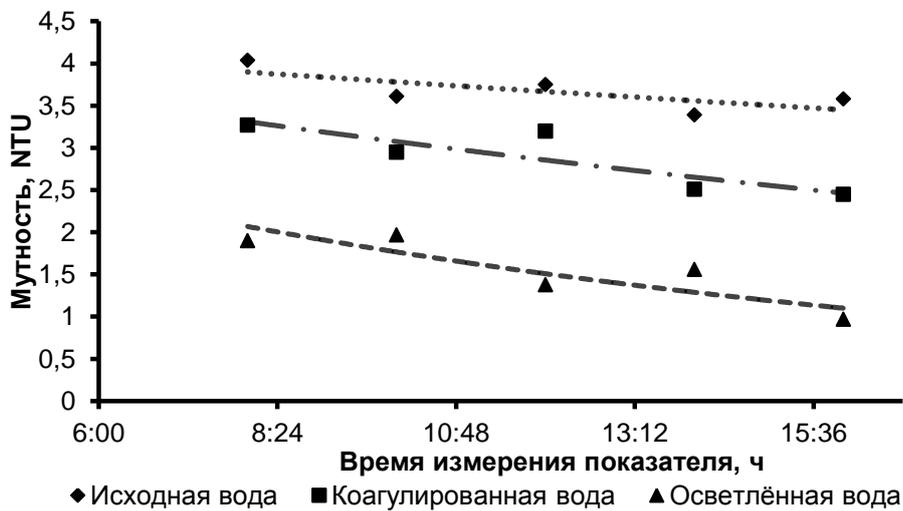


Рис. 4. Изменение мутности воды по стадиям ее обработки в период промышленных испытаний

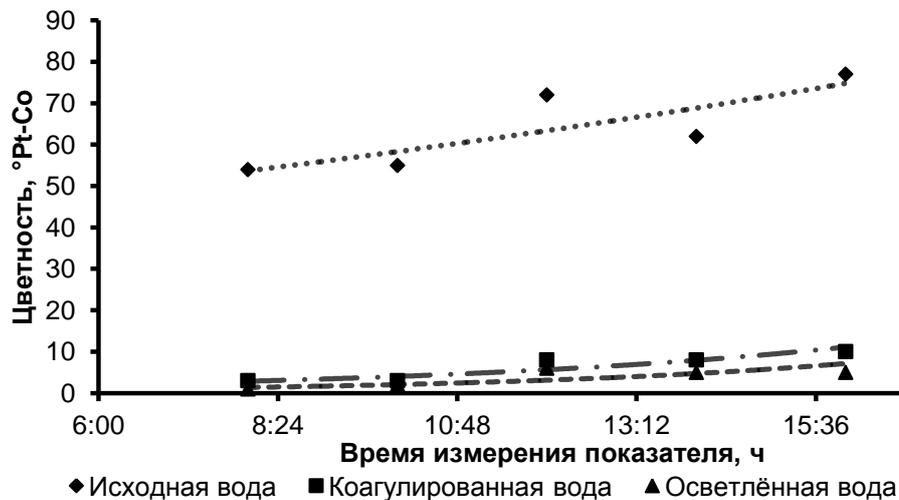


Рис. 5. Изменение цветности воды по стадиям ее обработки в период промышленных испытаний

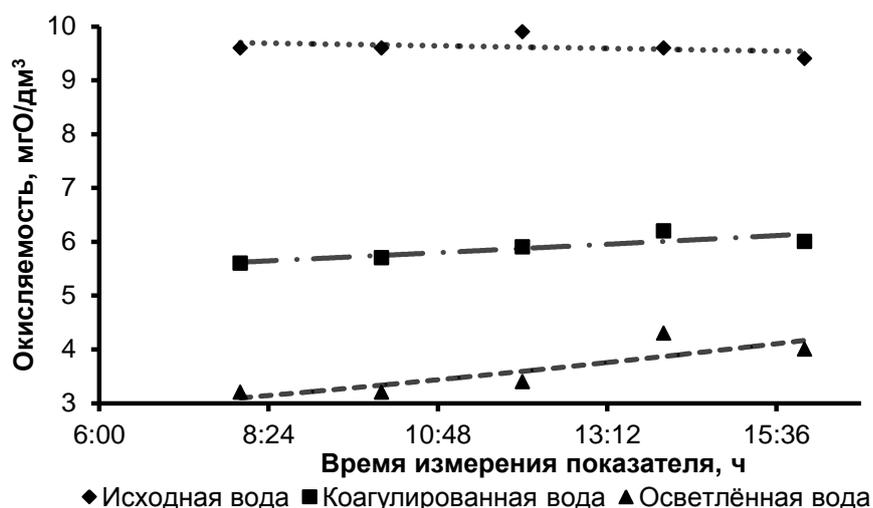


Рис. 6. Изменение окисляемости воды по стадиям ее обработки в период промышленных испытаний

В результате проведения промышленных испытаний осветлителей были сделаны следующие выводы:

– получить при низкотемпературном нагреве коагулированную воду с нормативными параметрами осветленной воды не удалось, но при помощи технологических изменений дозировки реагентов можно существенно улучшить показатели качества обработанной воды;

– во время эксплуатации установлен незначительный вынос микропеска в водосборные лотки осветлителя, что в основном обусловлено высокой скоростью подъемного движения воды (около 20 м/ч) в камере отстаивания, а также избыточной гидрофобностью микропеска в холодной воде (около 2–3 °С);

– при отсутствии нагрева исходной воды процессы гидролиза коагулянта сильно замедлены и, как следствие, начало процессов коагуляции и флокуляции смещено в сторону выхода коагулированной воды, т.е. в зону отстаивания;

– при дозе микропеска 5,5 г/л и более не весь его объем участвует в процессах адсорбции коллоидных примесей и частиц шлама.

В процессе эксплуатации осветлителей выполнены отборы проб пескошламовой пульпы со стороны гидроциклона: возвращаемых в осветлитель; направляемых на дальнейшую утилизацию в илоуплотнитель, а также проб, отобранных с верхнего слоя механического фильтра до вывода его на взрыхляющую промывку. Результаты исследования проб пульпы представлены в табл. 3.

При работе осветлителя микропесок с гидроциклонов возвращается укрупненный, т.е. больше основной рабочей фракции, а кварцевая пыль уходит с продувкой в илоуплотнитель. В илоуплотнитель попадает в основном рабочая фракция песка, однако больше всего по отношению к другим точкам контроля попадает кварцевой пыли. В механические фильтры зачастую выносятся микропесок рабочей фракции ($0,09 \leq \Delta \leq 0,2$) мм в количестве 8,22 %, что может быть объяснено несовершенством режима эксплуатации, гидравлическим (высокие скорости перемешивания при большой производительности) и флотационным выносами, нерационально подобранными дозами реагентов, присадками ПАВ и, как следствие, повышенной гидрофобностью микропеска.

Таблица 3. Результаты определения фракционного состава микропеска

Размер ячеек сита Δ , мкм	«Свежий» микропесок	Микропесок, возвращаемый в осветлитель	Микропесок, направляемый в илоуплотнитель	Микропесок с верхнего слоя механического фильтра
	Доля, %			
$\Delta \geq 0,2$	0,95	2,56	3,56	91,07
$0,09 \leq \Delta \leq 0,2$	80,83	85,41	72,36	8,22
$0,05 \leq \Delta \leq 0,09$	18,14	11,95	23,44	0,63
$\Delta \leq 0,05$	0,08	0,08	0,64	0,08

Выводы. В лабораторных опытах при визуальном контроле процесса коагуляции наилучший эффект укрупнения частиц (образования наиболее крупных частиц на этапе ввода флокулянта) наблюдался при дозе микропеска не более 4 г/л, что меньше проектного значения 5,5 г/л. Увеличение дозы коагулянта более 0,3 мг-экв/л способствует ухудшению показателей качества коагулированной воды. Это можно объяснить избыточным количеством центров образования твердой фазы, препятствующих слипанию частиц в более крупные формы, что проявляется наличием замутнения воды.

В процессе опытно-промышленной эксплуатации осветлителя установлено, что его выход на устойчивый режим работы, обусловленный постоянством качества коагулированной воды, возможен в течение 4–5 часов, что по сравнению с современными вертикальными осветлителями со взвешенным слоем такой же производительности выглядит весьма достойно.

В качестве предложения по совершенствованию технологии Actiflo можно предложить перенос точки ввода флокулянта только в зону созревания, минуя зону коагуляции. В зоне коагуляции скорость вращения пропеллерной мешалки в 2 раза выше, чем в зоне созревания. Ввод флокулянта на стадии коагуляции способствует разрушению полимерных структур и уменьшению положительного эффекта от использования флокулянта.

Чем больше доза микропеска в рабочем объеме осветлителя, тем больше относительные потери микропеска в контуре рециркуляции шлама, связанные с эффектом сепарации шлама в гидроциклоне. По технологии Actiflo, заявленные потери микропеска не должны превышать 3 %. В ходе промышленного опыта по изменению фактического значения дозы микропеска относительные потери микропеска не превышали установленное технологией значение. В некоторых случаях потери микропеска можно избежать путем отказа от его использования. Например, на Череповецкой ГРЭС в цикле водоподготовки не используется микропесок, а результаты качества коагулированной воды находятся на удовлетворительном уровне, однако это достижимо при условии предварительного подогрева воды.

Предложенную методику можно использовать на осветлителях Actiflo для оценки фактических значений дозы микропеска.

Список литературы

1. **Сравнение** способов очистки воды на ТЭС / А.В. Жадан, Б.А. Смирнов, О.В. Смирнов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 1–8.
2. **Повышение** эффективности осветлителей для коагуляционной обработки воды / В.Н. Виноградов, Б.А. Смирнов, А.В. Жадан, В.К. Аван // Теплоэнергетика. – 2010. – № 8. – С. 14–16.
3. **Ларин Б.М., Опарин М.Ю., Карпычев Е.А.** Исследование и выбор условий коагуляции воды на ТЭЦ-ПВС ОАО «Северсталь» // Теплоэнергетика. – 2010. – № 7. – С. 7–10.
4. **Гейд К., Совинье Ф., Бюиссон Э.** Технологическая схема «Actiflo® – УФ- и МФ-мембраны»: эффективное решение для очистки поверхностных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 7. – С. 44–56.
5. **Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В.** Коагуляция в технологии очистки природных вод. – М., 2005. – 576 с.
6. **Феофанов Ю.А., Хиршиева И.В.** Особенности коагулирования маломутных цветных вод с применением добавок-утяжелителей // Вода и экология: проблемы и решения. – 2014. – № 4(60). – С. 3–9.

References

1. Zhadan, A.V., Smirnov, B.A., Smirnov, O.V., Vinogradov, V.N., Avan, V.K., Karpychev, E.A. *Sravnenie sposobov ochistki vody na TES [Comparison of water purification methods at TPPs]. Vestnik IGEU, 2011, issue 1, pp. 1–8.*
2. Vinogradov, V.N., Smirnov, B.A., Zhadan, A.V., Avan, V.K. *Povyshenie effektivnosti osvetliteley dlya koagulyatsionnoy obrabotki vody [Increasing the efficiency of clarifiers for coagulation treatment of water]. Teploenergetika, 2010, no. 8, pp. 14–16.*
3. Larin, B.M., Oparin, M.Yu., Karpychev, E.A. *Issledovanie i vybor usloviy koagulyatsii vody na TETS-PVS OAO «Severstal'» [Research and selection of conditions for water coagulation at CHPP-PVS JSC «Severstal'». Teploenergetika, 2010, no. 7, pp. 7–10.*
4. Geyd, K., Sovin'e, F., Byuisson, E. *Tekhnologicheskaya skhema «Actiflo® – UF- i MF-membrany»: effektivnoe reshenie dlya ochistki poverkhnostnykh vod [Technological scheme «Actiflo® – UV and MF membranes»: an effective solution for surface water purification]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika, 2015, no. 7, pp. 44–56.*
5. Draginskiy, V.L., Alekseeva, L.P., Getmantsev, S.V. *Koagulyatsiya v tekhnologii ochistki prirodnykh vod [Coagulation in natural water purification technology]. Moscow, 2005. 576 p.*
6. Feofanov, Yu.A., Khirshieva, I.V. *Osobennosti koagulirovaniya malomutnykh tsvetnykh vod s primeneniem dobavok-utyazheliteley [Features of coagulation of low-turbid colored waters with the use of weighting additives]. Voda i ekologiya: problemy i resheniya, 2014, no. 4(60), pp. 3–9.*