

Повышение эффективности процессов коагуляции за счет применения регулируемого механического перемешивания



Для интенсификации хлопьеобразования чаще всего применяются камеры хлопьеобразования с организацией перемешивания за счет гидравлических эффектов, обусловленных конструктивным исполнением камер. При эксплуатации таких камер наблюдается общий существенный недостаток способа – гидродинамическая нестабильность, значительное снижение эффективности перемешивания и плохое хлопьеобразование при снижении температуры и расхода обрабатываемой воды. Высокая доля мельчайших хлопьев на выходе из камеры ведет к невозможности их седиментации в отстойнике, повышению «грязевой нагрузки» на фильтровальные сооружения, росту вероятности превышения ПДК по общему алюминию за счет «проскока» через фильтры мельчайших частичек гидроксида алюминия.

Конструкции камер хлопьеобразования с механическими или пневматическими устройствами для перемешивания не получили широкого распространения в силу их относительной сложности и энергоёмкости при эксплуатации.

В статье рассматривается процесс хлопьеобразования при механическом перемешивании коагулированной речной воды с помощью мешалки новой формы, которая создает низкие сдвиговые напряжения на окончании лопастей, и тем самым способствует сохранению агрегатов и бережному перемешиванию. Установлено, что выбор оптимальной частоты вращения перемешивающего устройства в зависимости от температуры воды позволяет создавать гидродинамический режим, обеспечивающий формирование хлопьев максимальных размеров при пониженных дозах коагулянта.

А. Н. Григорьева¹,
КАНД. ТЕХН. НАУК,
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР
ГК «Элма-Астерион»

И. А. Мехнецов²,
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР
ООО «Экострой-Проект»

¹ E-mail: an@td-elma.ru

² E-mail: ilya.mekhnetsov@mail.ru

Процесс хлопьеобразования при коагуляции загрязнений в объеме дисперсной среды может быть условно разбит на ряд стадий: смешение коагулянта с водой и его гидролиз, начало коагуляции – агрегация частичек гидроксида и загрязнений в мельчайшие хлопья и их дальнейшее укрупнение в легко осаждаемые хлопья.

Смешение коагулянта с водой, а также протекание химических реакций гидролиза с образованием гидроксида (например, алюминия) происходит в смесителях. Дальнейшие процессы – фиксация коллоидных частиц загрязнений на частичках гидроксида и удаление из воды образовавшихся агрегатов – могут происходить в объеме седиментационного сооружения (отстойника). Эффективность седиментации тем выше, чем больше характерный диаметр частицы, получаемой в результате коагуляции.

В работе [1] изучена коагуляция коллоидных систем и теоретически обосновано, что помимо дозы коагулянта, качественного состава и температуры воды, одним из ключевых факторов является упорядоченность движения коллоидных частиц, определяющая вероятность их столкновения и агрегирования. По этой причине с конца 30-х годов XX века стали проектироваться и строиться специальные устройства – камеры хлопьеобразования. Создание в таких камерах слабой турбулентности потока, как правило, достигается за счет гидравлических эффектов, обусловленных их конструкцией.

Например, в водоворотных камерах вода, истекающая со скоростью 2–3 м/с из специальных устройств – сопел-насадок, установленных на трубопровод, подающий воду в цилиндрическую камеру, создает водоворотное движение перпендикулярно вертикальной оси камеры по всей её высоте. В вихревых камерах хлопьеобразования при поступлении воды со скоростью 0,7–1,2 м/с в нижнюю узкую часть камеры, выполненную в виде перевернутого конуса, и последующего её отвода со скоростью 4–5 мм/с через верхний перелив формируются вихри во всем объеме камеры.

Увеличение числа столкновений мелких агрегатов достигается и в осветлителях со взвешенным слоем осадка, в которых поддержа-

ние осаждающихся под действием сил гравитации частичек во взвешенном состоянии осуществляется за счет гидродинамических сил восходящего потока воды, формирующегося при её истечении с высокой скоростью из сопел специальной конструкции [2].

Опыт эксплуатации подобных камер показал, что общим недостатком указанных способов является отсутствие возможности управления процессом, а также нелинейное падение эффективности хлопьеобразования при снижении температуры и расхода обрабатываемой воды через камеру. Как следствие, мелкие хлопья плохо осаждаются в отстойнике, а наиболее крупные хлопья выпадают в осадок непосредственно в камере, вызывая дальнейшее ухудшение её гидродинамического режима. Накопление осадка в камере приводит к необходимости его периодического удаления, как правило, методом размыва.

Таким образом, совершенствование конструкции камер хлопьеобразования, обеспечивающих максимальную крупность хлопьев и скорость их образования независимо от расхода и температуры воды, представляет актуальную задачу.

К наиболее перспективным способам следует отнести механическое перемешивание. При разработке конструктивных решений стоят задачи: определить наиболее подходящую форму мешалки и создать расчетную модель для вычисления основных параметров процесса, таких как:

- 1) предельная частота вращения мешалки, достаточной для поднятия осадка со дна, но не превышающей допустимую частоту, при которой хлопья будут разрушаться из-за чрезмерных сдвиговых напряжений на окончании лопастей. Причем необходимая степень турбулентности должна определяться по критерию крупности хлопья с учетом температуры воды;
- 2) порог коагуляции при минимальной температуре и постоянной удельной энергии, подводимой в камеру (минимальная концентрация реагента и точка ввода коагулянта);
- 3) предельное минимальное время перемешивания на пороге коагуляции при минимальной температуре и оптимальной энергии.

Целью проведенного исследования является определение параметров перемешивающего устройства (диаметра рабочего колеса и частоты вращения) для достижения максимального эффекта хлопьеобразования в зависимости от температуры воды при постоянном её качестве, дозе коагулянта, времени перемешивания. В качестве критерия эффективности хлопьеобразования принят размер образующихся хлопьев.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В результате применения коагулянтов наряду с осветлением воды от взвешенных веществ одновременно осуществляется ее обезцвечивание, а также удаление ионных примесей (фосфатов, меди, цинка и многих других) [1]. Стадии коагуляции хорошо отражаются изменением мутности воды после добавления коагулянта (см. рис. 1). Стадии следуют не строго друг за другом, а накладываются, что осложняет процесс очистки воды [3].

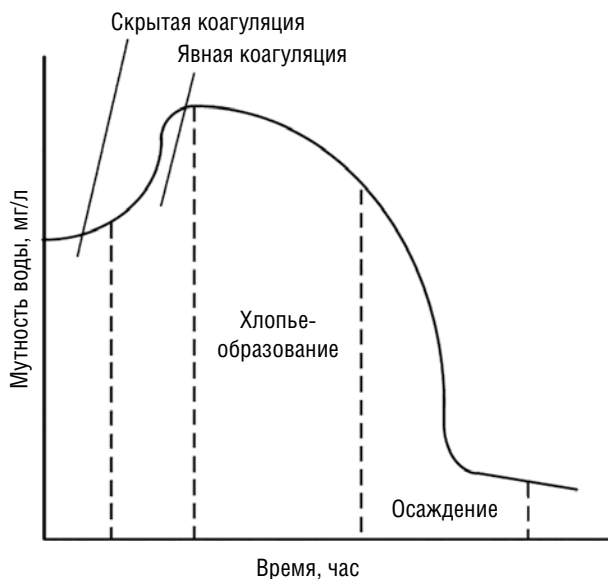


Рис. 1. Кривая изменения мутности воды в процессе коагуляции [3]

Интенсивность хлопьеобразования в процессе коагуляции зависит от многих факторов, в том числе и от перемешивания. Установлено, что при интервале температур 3–18 °С время хлопьеобразование составляет 2–7 % времени,

необходимого для достижения того же эффекта без перемешивания, при этом образуемые хлопья получаются более прочными [2].

Перемешивание в камерах хлопьеобразования не должно быть слишком интенсивным, чтобы избежать разрушения образовавшихся агрегатов [2]. Интенсивность перемешивания характеризуется скоростью движения лопастей мешалки, т.е. диаметром лопастей и частотой вращения. Для расчета предельно допустимой частоты вращения можно применить методику, подробно описанную в [4]. Расчет основан на определении турбулентных касательных напряжений по Рейнольдсу, создаваемых мешалкой во время ее работы, которые не должны превышать напряжения сдвига, достаточные для разрушения образуемых агрегатов. Однако ситуация осложняется тем, что в настоящий момент реологические свойства хлопьев достаточно плохо изучены.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Напряжения турбулентного трения τ_T (Па), создаваемые на окончании лопастей мешалки, рассчитываются согласно полуэмпирической модели турбулентности Прандтля как [5]:

$$\tau_T = \rho L^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \frac{du}{dy}, \quad (1)$$

где ρ – плотность перемешиваемой среды, кг/м³; L – путь смещения, м; du/dy – градиент скорости в осевом направлении перемешивания, 1/с.

Градиент скорости в осевом направлении можно определить по формуле [4]:

$$\frac{du}{dy} = \omega_0 \frac{(R - rm)^2}{R^2 - rm^2} [1,6\psi_1(rm^5 - 1) + 1,5\psi_2(rm^4 - 1) + 1,5\psi_2(rm^4 - 1) + (rm^2 - 1) + 2(\psi_1 + \psi_2 + 1)\ln R], \quad (2)$$

где ω_0 – угловая скорость вращения мешалки, 1/с; $R = D/d_m$ – главный геометрический критерий подобия – соотношение диаметра аппарата к диаметру рабочего колеса мешалки; r_0 – радиус мешалки, м; $r_m = 0,75$ – средняя величина безразмерного радиуса разделения первой и второй зоны смещения в аппарате; ψ_1, ψ_2 – параметры распределения окружной скорости, зависящие от геометрии перемешивающего устройства.

Длина пути перемешивания согласно теории Кармана определяется как [2]:

$$l = k \cdot x \cdot y, \quad (3)$$

где $k = 0,4$ – универсальная константа турбулентности; $y = \pi d_m / z$ – расстояние по окружности между лопастями мешалки (z – число лопастей).

По результатам теоретического анализа можно сделать вывод, что геометрическая форма мешалки имеет непосредственное влияние на напряжения сдвига. Чем она более обтекаемая и приближена к линиям тока, тем бережнее будет перемешивание. Увеличение количества лопастей положительно сказывается на сокращении пути перемешивания, а соответственно – и на сокращении напряжений турбулентного трения на внешнем диаметре мешалки. Исходя из теоретических предпосылок, для исследования была выбрана коническая мешалка, подробное описание конструкции которой представлено в [6].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по оценке предельно допустимых напряжений турбулентного трения, способствующих образованию максимальных хлопьев, проводились в лабораторном аппарате с применением природной воды реки Волхов с цветностью 210 град ХКШ. Внеш-

ний вид лабораторного стенда представлен на рис. 2. Мерный стакан объемом 600 мл размещался в прямоугольной емкости, заполненной водопроводной водой для исключения эффекта преломления при визуальном наблюдении процесса образования хлопьев.

Параметры проведения экспериментов:

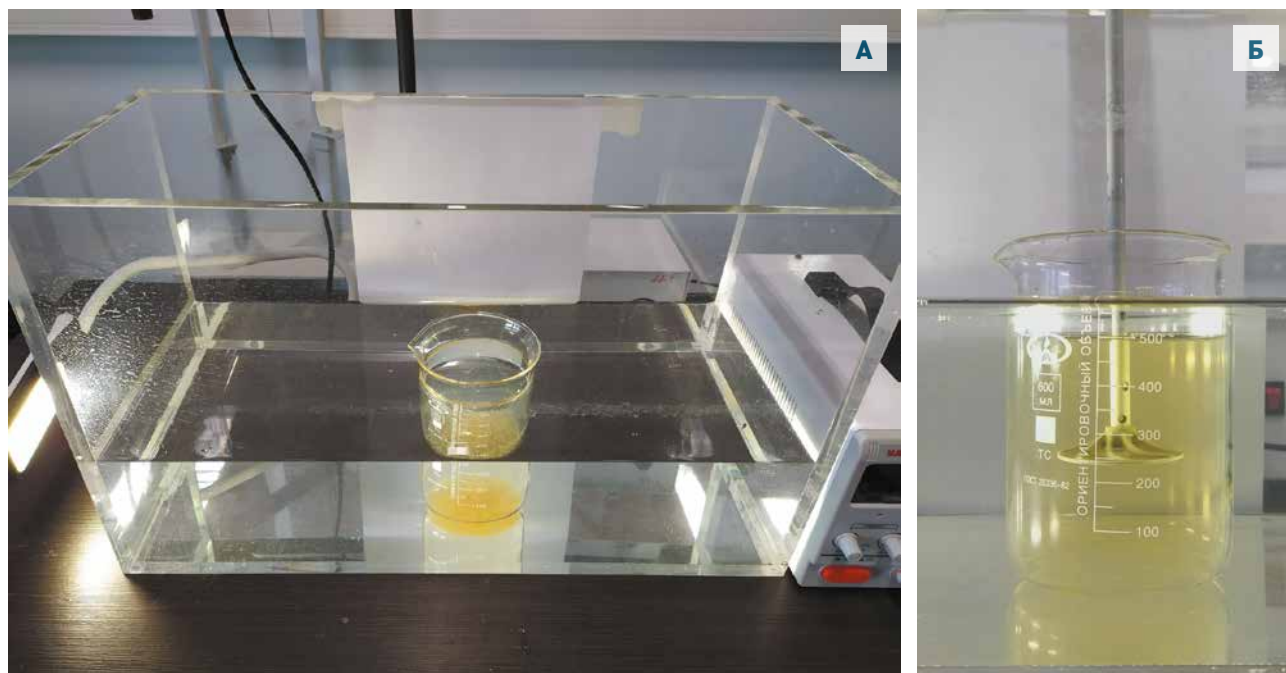
- частота вращения конической мешалки от 30 до 90 об/мин (с шагом в 10 об/мин);
- диаметр мешалки – 50 мм;
- объем природной воды в стакане – 500 мл;
- концентрация рабочего раствора коагулянта – 15 мг/л (определена посредством пробного коагулирования).

Для определения влияния температуры воды на размер образуемых хлопьев опыты проводились при различных условиях: 6 °С, 12 °С и 20 °С

Ход проведения экспериментов:

- коническая мешалка, установленная в стакане, запускалась на выбранной частоте вращения;
- при помощи мерного шприца в стакан добавлялся фиксированный объем коагулянта для получения рабочей концентрации в стакане 15 мг/л;

Рис. 2. Фотографии лабораторного стенда: А – общий вид стенда; Б – мешалка, установленная в стакане



- выдерживалось время хлопьеобразования 3 мин., после чего мешалка отключалась (рис. 3);

- после проведения эксперимента размер хлопьев определялся методом обработки фотографий, сделанных при помощи микроскопа, оснащенного видеоаккумуляром.

В качестве обобщенного среднего значения размера образованных хлопьев рассчитывался диаметр по Заутеру [7] (средний объемно-поверхностный диаметр частиц), см. табл. 1.

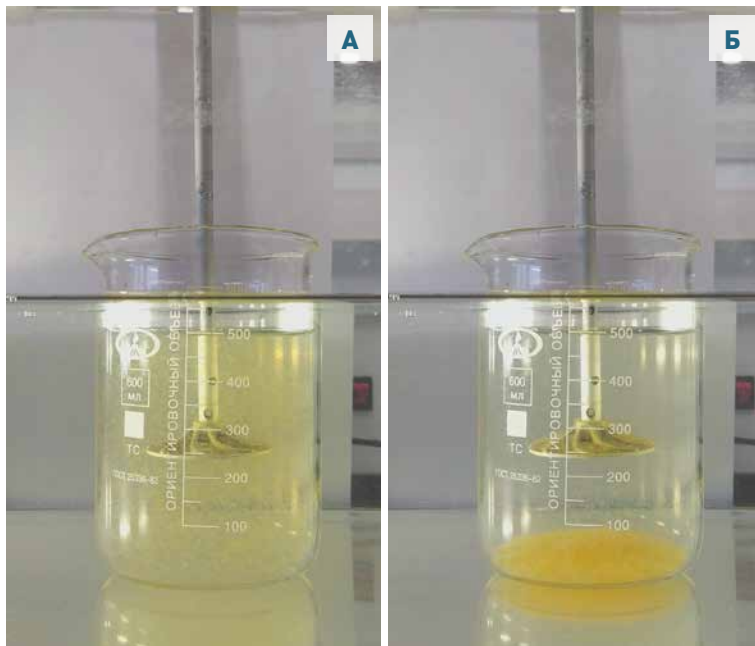



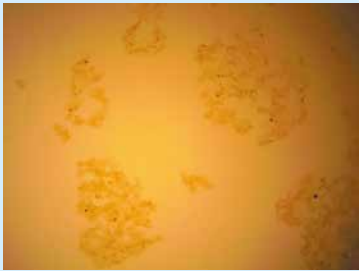
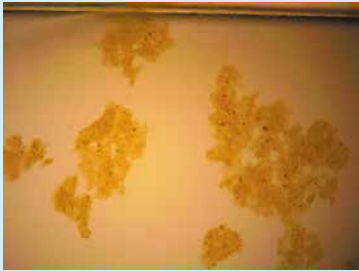

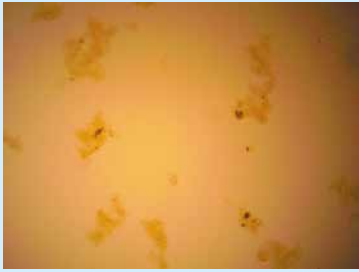
Рис. 3. Процесс коагуляции в емкости с конической мешалкой: А – образованные хлопья после выключения мешалки; Б – осевшие хлопья по истечении 2 мин. после выключений мешалки

Таблица 1.

Размер хлопьев, полученных в процессе коагуляции при работе конической мешалки на различной частоте вращения при температуре воды 20 °С

Частота вращения мешалки, об/мин	Создаваемые напряжения турбулентного сдвига, рассчитанные по формуле (1) с учетом (2) и (3), Па	Фото хлопьев	Диаметр Заутера образованных хлопьев, мм
30	1,45		0,66
40	3,43		0,77

Продолжение таблицы 1

Частота вращения мешалки, об/мин	Создаваемые напряжения турбулентного сдвига, рассчитанные по формуле (1) с учетом (2) и (3), Па	Фото хлопьев	Диаметр Заутера образованных хлопьев, мм
50	6,69		0,99
60	11,57		1,14
70	18,37		1,27
80	27,42		1
90	39,04		0,93

Полученные результаты экспериментальной работы подтверждают данные о том, что увеличение турбулизации потока способствует образованию более крупных хлопьев, однако существует пороговая частота вращения мешалки, превосходя которую размеры хлопьев начинают уменьшаться из-за слишком высоких сдвиговых напряжений (рис. 4). Чем выше температура воды – тем крупнее образующиеся частицы, и ниже потребность в механической энергии для их образования (при увеличении температуры вязкость воды повышается, броуновское движение молекул интенсифицируется). Соотношение сил инерции и сил вязкого трения выражается гидродинамическим критерием Рейнольдса. Примечательно, что наиболее крупные хлопья при различной температуре образовались при приблизительно равном числе Рейнольдса (отличие не превышает 15 %) для различных экспериментов (табл. 2). Однако использовать данный критерий для масштабирования промышленных аппаратов в настоящее время не представляется возможным, так как требуется наработка более полной статистики. Гораздо больший интерес для практического применения представляют значения полученных предельных напряжений турбулентного трения, необходимых для образования наиболее крупных частиц.

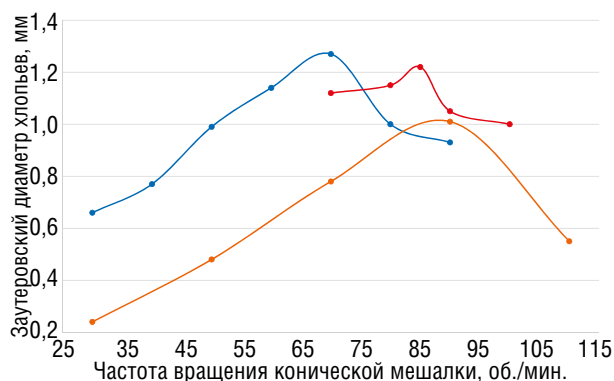


Рис. 4. График зависимости размера образуемых хлопьев от частоты вращения конической мешалки в процессе коагуляции при различной температуре воды:
 — вода 20 °C; — вода <6 °C; — вода 12 °C

Таблица 2. Основные параметры экспериментов в точках с максимальными размерами хлопьев при различной температуре воды

Температура воды	Частота вращения мешалки, об/мин	Создаваемые напряжения турбулентного сдвига, Па	Диаметр Зауэра образованных хлопьев, мм	Число Рейнольдса Re_c
6	90	39,04	1,01	2546
12	85	32,88	1,22	2865
20	70	18,37	1,27	2899

Алгоритм подбора перемешивающих устройств

Исходя из данных табл. 2, можно заключить, что на станциях водоподготовки при заборе воды из природного источника в различные времена года необходима регулировка частоты вращения мешалок, что на практике легко реализуется посредством установки частотного преобразователя. Для подбора перемешивающего устройства требуется рассчитать максимальную частоту вращения мешалки, которую следует использовать в зимнее время года, когда коагуляция из-за низкой температуры усложняется. Наибольшая частота вращения требует установки более мощного двигателя, поэтому расчет следует вести исходя из того, что мешалка должна создавать напряжения до 39 Па. Исходя из практического опыта, рекомендуется сделать запас 20 % к полученному значению (принять при расчете $\tau_t = 47$ Па). Таким образом, можно сформировать следующий алгоритм подбора перемешивающих устройств для камер хлопьеобразования:

1. Определить диаметр мешалки исходя из соотношения $R = D/d_m = 2-4$.
2. Рассчитать частоту вращения исходя из формул (1), (2), (3) со значением напряжения турбулентного трения $\tau_t = 47$ Па.
3. Определить мощность, расходуемую на перемешивание, по формуле, описанной, например, в [8].

4. Осуществить подбор соответствующего мотор-редуктора с учетом рассчитанных значений в п. 2 и п. 3.

В табл. 3 представлен сравнительный расчет трех типов перемешивающих устройств для камеры хлопьеобразования объемом 20 м³ (D = 3000 мм, H = 3000 мм) при очистке воды с температурой 20 °С и ниже 6 °С.

Таблица 3. ПРИМЕР РАСЧЕТА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ, РАССЧИТАННЫХ ДЛЯ КАМЕРЫ ХЛОПЬЕОБРАЗОВАНИЯ

Температура воды, °С < 6			
Тип мешалки	Диаметр, мм	Расчетная частота вращения, об/мин	Мощность, расходуемая на перемешивание, Вт
Трехлопастная	1000	37	124,29
Турбинная	1000	28	457,33
Коническая	1000	38,5	79,26

Исходя из анализа данных, представленных в табл. 3, можно сделать вывод о том, что гидродинамическая обстановка в аппарате с конической мешалкой способствует образованию самых крупных хлопьев, что объясняется ее конструктивными особенностями: лопасти мешалки скруглены, на внешнем диаметре мешалки создаются касательные напряжения ниже, чем вблизи турбинной или трехлопастной мешалки. В итоге предельно допустимая частота перемешивания для конической мешалки выше, нежели для других типов мешалок. Стоит отметить тот факт, что расчетная мощность, расходуемая на перемешивание, при использовании конической мешалки минимальна, вследствие чего предприятия, использующие конические мешалки могут достичь весомый экономический эффект при внедрении данного оборудования.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОАГУЛЯЦИЕЙ

Принимая во внимание широкие возможности по изменению гидродинамического режима в камере хлопьеобразования за счет

изменения частоты вращения привода мешалки перспективным техническим решением является создание автоматизированной системы управления коагуляцией. Такая система предусматривает оценку эффективности процесса по данным онлайн контроля качества воды непосредственно на выходе из камеры и на выходе отстойника.

Оценка степени эффективности хлопьеобразования может быть проведена на основе измерения концентрации взвешенных веществ или определения прозрачности/мутности. Чем лучше идет хлопьеобразование, тем меньше мелких частиц, тем ниже светорассеяние, тем выше прозрачность среды.

Эффективность коагуляции в целом можно определить по степени осветления и обесцвечивания воды после отстойника. Для этого необходимо контролировать органолептические показатели (мутность и цветность), а также содержание органических веществ (общий и растворенный органический углерод) после осаждения полученных хлопьев в отстойнике.

Измерительно-вычислительный комплекс ЭкоСкан, состоящий из спектрофотометров soli::lyser и i::scan, подключенных к промышленному компьютеру con::cube, способен в режиме реального времени определять текущие значения показателей качества и формировать управляющие сигналы для коррекции работы мешалки с учетом меняющегося количества и качества воды на входе в камеру хлопьеобразования. Эта же информация может быть использована для коррекции доз коагулянта и флокулянта.

На рис. 5 представлена схема автоматической системы управления коагуляцией для горизонтального отстойника. Помимо указанных анализаторов и точек контроля на схеме представлен анализатор взвешенных веществ, позволяющий контролировать предельный уровень осадка, при достижении которого необходимо производить его сброс из отстойника.

Внедрение автоматической системы управления коагуляцией позволяет:

1. Повысить стабильность хлопьеобразования и эффективность седиментации в отстойнике не зависимо от расхода и температуры воды.

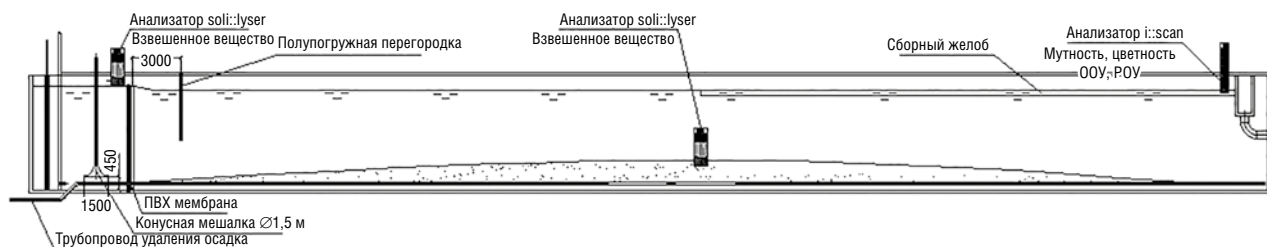


Рис. 5. Технологическая схема автоматической системы управления коагуляцией

2. Повысить глубину обесцвечивания и осветления на основе контроля мутности, цветности, общего и растворенного органического углерода за счет коррекции дозы коагулянта.

3. Существенно снизить расхода коагулянта и флокулянта (вплоть до отказа от последнего).

4. Существенно сократить число промывок СФ.

5. Исключить «зашламление» камер.

6. Контролировать предельный уровень осадка в целях поддержания расчетной высоты осаждения в отстойнике.

не только получать регулируемый гидродинамический режим, но и обеспечить отсутствия осадка на дне камер хлопьеобразования, что обеспечивает существенное сокращение эксплуатационных затрат (весь образовавшийся шлам подлежит осажению в отстойниках, где предусматривается штатная система его удаления).

Изучение влияния времени перемешивания, дозы коагулянта, рН воды на размеры хлопьев, образовавшихся в процессе коагуляции, является предметом дальнейших исследований, в процессе которых методика расчета перемешивающих устройств будет дополнена. ●

Выводы

Исследована зависимость размера хлопьев, образующихся в процессе коагуляции, от интенсивности перемешивания при различной температуре природной питьевой воды. На основании результатов экспериментов установлена величина предельно допустимых сдвиговых напряжений, которые могут быть приложены к хлопьям без их разрушения. Полученные данные послужили основой для создания упрощенной методики подбора конических мешалок для камер хлопьеобразования.

Предложен расчет максимальной частоты вращения мешалок, которая на практике должна быть уточнена посредством технологического апробирования в условиях конкретных очистных сооружений. Регулирование частоты вращения может осуществляться автоматически по схеме двухконтурного регулирования при установке датчиков мутности на выходе камер хлопьеобразования и на выходе из отстойника. Предложенная компоновка позволяет

ЛИТЕРАТУРА

1. Химия воды: физико-химические процессы обработки природных и сточных вод: [учебное пособие для вузов по специальности «Водоснабжение и канализация»] / Л. А. Кульский, В. Ф. Накорчевская. – Киев: Вища шк., 1983. – 239 с.
2. Технология очистки природных вод: [Учеб. пособие для вузов по спец. «Рацион. использ. вод ресурсов и обезвреживание пром. стоков» и «Водоснабжение и канализация» / Л. А. Кульский, П. П. Строкач. – Киев: Вища школа, 1981. – 327 с.
3. Водоснабжение: учебное пособие для инженеров-проектировщиков и студентов специальности «Водоснабжение и водоотведение» / Н. И. Куликов, А. Я. Найманов, Н. Г. Насонкина [и др.]. – Новосибирск: ООО «Центр содействия развитию научных исследований», 2016. – 704 с. – ISBN 978-5-906707-38-3.
4. Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш. К выбору типа и частоты вращения мешалки для эффективного перемешивания флокулянтов в воде // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 2 (82). С. 27–36
5. Перемешивающее устройство: пат. Рос. Федерация: МПК В01F 7/18/ Абиев Р. Ш., Григорьева А. Н.; заявитель и патентообладатель АО Астерион – № 2 683 078; заявл. 06.06.2018; опубл. 26.03.2019, Бюл. № 9. – 15 с
6. Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М. Перемешивание в жидких средах // Л.: Химия, 1984.
7. J. Sauter. Die Größenbestimmung der in Gemischnebeln von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen, Berlin: VDI-Verl., 1926
8. Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш. Сравнительный технико-экономический анализ пневматического и механического перемешивания биологической загрузки в устройствах для очистки сточных вод // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2020. № 10. С. 20–28.