

## Интенсификация работы смесительных устройств при контактной коагуляции природных вод поверхностных источников

*М.А. Сафронов, М.В. Бикунова, С.М. Салмин, Д.А. Янющкин*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

**Аннотация:** Получены зависимости, позволяющие оценить влияние различных факторов на процесс укрупнения хлопьев в крупнозернистой загрузке при контактной коагуляции. Определено значение градиента скорости перемешивания с учетом скорости фильтрования потока обрабатываемой воды через толщу крупнозернистой загрузки. Предложена схема интенсификации работы смесительных устройств при контактной коагуляции природных вод поверхностных источников, которая может быть использована на водопроводных очистных сооружениях для снижения доз коагулянта.

**Ключевые слова:** контактная коагуляция, природная вода, смесительные устройства, градиент скорости перемешивания, скорость фильтрования.

Процесс контактной коагуляции широко используется при реагентной обработке поверхностной природной воды на водоочистных станциях, имеющих в своем составе осветлители реакторы, а также осветлители контактного типа [1,2]. Отличительной чертой контактной коагуляции является то, что скоагулированные хлопья задерживаются в загрузочном материале, фильтрация через который происходит при низких значениях числа Рейнольдса. Процесс контактной коагуляции, осуществляемый в смесительных устройствах водоочистных станций, может быть реализован несколькими способами.

Технология контактной коагуляции в слое кварцевого песка, загруженного в вертикальный смеситель, предложенная Е.Д. Бабенковым, позволяет производить эффективную реагентную обработку, способствующую повышению качества последующего процесса осветления воды. Заметным недостатком данной технологии является ограничение по объему пропускаемой жидкости в единицу времени. Данное ограничение вызвано предупреждением вероятности засорения отводящего трубопровода смесителя частицами песка, выносимыми из контактной загрузки потоком очищаемой воды.

Другим направлением применения контактной коагуляции является технология «Actiflo», основанная на введении частиц микропеска и раствора коагулянта в смеситель очистной установки и последующим осветлением обработанной воды в тонкослойном отстойнике [3-5]. Частицы микропеска утяжеляют образующиеся коагуляционные структуры и ускоряют процесс их осаждения. Образующийся в отстойнике осадок с микропеском перекачивается рециркуляционным насосом в гидроциклон, где происходит отделение частиц микропеска от осадка. Очищенный микропесок возвращается в смеситель, а водопроводный осадок направляется на обезвоживание. Технология «Actiflo» позволяет сократить площадь очистных сооружений в 5-10 раз, так как весь процесс обработки и очистки воды занимает 20-30 мин. Недостатком данной технологии является необходимость применения повышенных доз коагулянта, негативное влияние микропеска на работу рециркуляционного насоса, высокий процент уноса микрочастиц в гидроциклоне и необходимость поддержания постоянного расхода обрабатываемой воды [6-8].

Для достижения максимального эффекта реагентной обработки в смесительных устройствах при контактной коагуляции целесообразно использование материала, обладающего невысоким сопротивлением (диаметр частиц более 0,1 см) и соответственно позволяющего фильтровать очищаемую воду при значениях числа Рейнольдса, характерных для турбулентного режима [9-11]. При движении смеси очищаемой воды с коагулянтом в турбулентном режиме через загрузочный крупнозернистый материал наблюдаются следующие процессы [12]:

- гидравлическое сопротивление загрузки стабилизируется (и имеет постоянное значение) после непродолжительного периода роста;

- максимальная насыщенность порового пространства фильтрационного материала наблюдается в период стабилизации сопротивления;
- равенство концентраций хлопьев на входе и выходе из фильтрующего материала в период максимальной насыщенности;
- значительное увеличение размеров хлопьев на входе и выходе из фильтрующего материала в период максимальной насыщенности;
- образование адсорбционного слоя вследствие движения и прилипания хлопьев к загрузочному материалу.

Соотношение между концентрациями и размерами хлопьев на входе и выходе из загрузочного материала может быть представлено в виде:

$$\frac{c_{\text{ВХ}}}{c_{\text{ВЫХ}}} = k_y \left( \frac{D_{\text{ВЫХ}}}{D_{\text{ВХ}}} \right)^3 \quad (1)$$

где  $c_{\text{ВХ}}$ ,  $c_{\text{ВЫХ}}$  и  $D_{\text{ВХ}}$ ,  $D_{\text{ВЫХ}}$  – соответственно концентрации,  $\text{г/м}^3$ , и диаметры, м, микрохлопьев в воде на входе и выходе из слоя крупнозернистой загрузки;  $k_y$  – коэффициент, равный отношению плотностей микрохлопьев на выходе и входе в слой крупнозернистой загрузки. Коэффициент  $k_y$  является функцией от времени соприкосновения фильтрующей загрузки с уплотненными микрохлопьями.

Известна эмпирическая формула для определения величины  $D_{\text{ВЫХ}}$ , м, предложенная Е.Д. Бабенковым:

$$D_{\text{ВЫХ}} = \frac{D_{\text{ВХ}} \cdot N^{0,17} \cdot (K \cdot N)^{0,17}}{W_T^{0,33} \cdot G^{0,17}} \quad (2)$$

где  $N$  – число частиц коагулянта в образовавшихся в результате гидролиза хлопьях, шт;  $K$  – коэффициент, характеризующий процесс движения хлопьев в толще загрузки;  $W_T$  – содержание (объемное) взвеси в хлопьях  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $G$  – градиент скорости перемешивания,  $\text{с}^{-1}$ .

Преобразуем формулу (1), заменив отношение диаметров микрохлопьев в правой части на приближенное значение, вычисленное с учетом формулы (2):

$$\frac{c_{\text{ВХ}}}{c_{\text{ВЫХ}}} = \frac{k_y}{W_T} \sqrt{\frac{K \cdot c_{\text{ВХ}} \cdot N}{G}} \quad (3)$$

Зависимость, величины  $W_T$  от градиента скорости, предложенная Е.Д. Бабенковым имеет вид:

$$W_T = A \cdot G^x \quad (4)$$

$A$  – постоянная;  $x$  – степенной показатель, значение которого для практических расчетов может быть принято равным 0,5.

Из (3) и (4) следует:

$$\frac{c_{\text{ВХ}}}{c_{\text{ВЫХ}}} = \frac{k_y}{A} \cdot \frac{\sqrt{K \cdot c_{\text{ВХ}} \cdot N}}{G} \quad (5)$$

Из (5) следует, что степень укрупнения хлопьев, образующихся в процессе коагуляционной обработки, прямо пропорциональна концентрации хлопьев на входе в слой крупнозернистой загрузки в степени  $\frac{1}{2}$ , и обратно пропорциональна градиенту скорости перемешивания в степени 1. Следует отметить, что степень укрупнения микрохлопьев может быть использована в качестве оценочного показателя эффективности процесса коагуляции. Зависимость же  $\frac{c_{\text{ВХ}}}{c_{\text{ВЫХ}}}$  от  $W_T$  является неоднозначной и определяется физическими свойствами осадка, образующегося в толще загрузки в процессе контактной коагуляции. Для определения градиента скорости потока смеси коагулянта и очищаемой воды, проходящего через толщу фильтрующей загрузки, может быть использована формула:

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot i \cdot H}{t \cdot \nu}} \quad (6)$$

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения м/с<sup>2</sup>;  $i$  – гидравлический уклон;  $H$  – высота слоя зернистой загрузки, м;  $t$  – время

прохождения воды через толщу загрузки,  $c$ ;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Экспериментальные исследования, проведенные в работах [10,11] позволяют установить зависимость между градиентом скорости перемешивания и скоростью фильтрования при различных вариантах контактной загрузки (рисунок 1).

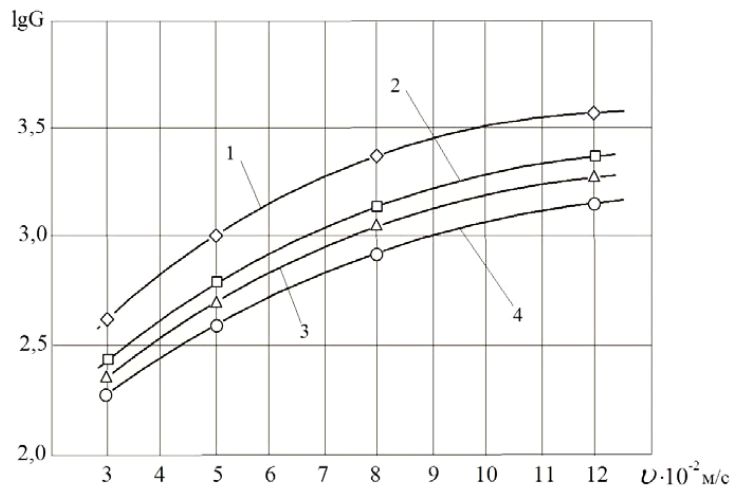


Рис. 1. – Графики изменения градиента перемешивания от величины скорости фильтрования при крупности зерен загрузочного материала:

1 – 10 мм; 2 – 30 мм; 3 – 40 мм; 4 – 50 мм

С учетом того, что высота слоя зернистой загрузки может быть найдена как  $H_3 = \frac{t \cdot v_\phi}{P}$ , подставим выражение для градиента скорости перемешивания в формулу (5):

$$\frac{c_{\text{вх}}}{c_{\text{вых}}} = \frac{k_y}{A} \cdot \frac{\sqrt{K \cdot c_{\text{вх}} \cdot N \cdot P \cdot \nu}}{\rho \cdot v_\phi \cdot i} \quad (7)$$

где  $v_\phi$  – скорость фильтрования через загрузку;  $P$  – пористость загрузки.

Проанализировав формулу (7) можем сделать вывод, что при постоянной величине слоя загрузки крупность хлопьев будет снижаться при повышении значений  $v_\phi$  и  $i$ . Также отметим, что эффективность контактной коагуляции в смесительных устройствах в значительной степени зависит от

степени уплотнения хлопьев, характеризующейся коэффициентом  $k_y$ , значение которого может быть увеличено при соблюдении оптимального значения времени соприкосновения потока воды с фильтрующей загрузкой, которое следует определять экспериментальным способом.

Для описания зависимости между эффективностью коагуляционной обработки воды на смесительных устройствах и прочностью образуемых хлопьев может быть использована формула Е.Д. Бабенкова, имеющая общий характер с формулой (4):

$$E = B \cdot G^y \quad (8)$$

$B$  – коэффициент, значение которого зависит от диаметра микрохлопьев в воде на выходе из слоя крупнозернистой загрузки;  $y$  – степенной показатель, значение которого для практических расчетов может быть принято равным 0,56.

Таким образом при росте градиента скорости перешивания воды с коагулянтом будет наблюдаться увеличение значений  $E$  и  $W_t$ , в свою очередь степень укрупнения хлопьев, характеризующаяся отношением  $\frac{c_{вх}}{c_{вых}}$  будет снижаться. С учетом проведенного анализа, для интенсификации работы смесительных устройств при контактной коагуляции предлагается использование схемы, предусматривающей рециркуляцию воды, обработанной коагулянтом, в начало смесителя (рисунок 2). Использование данной схемы позволит увеличить степень укрупнения  $\frac{c_{вх}}{c_{вых}}$ , за счет увеличения  $c_{вх}$ .

Рециркуляционный поток с помощью насоса направляется на контактную коагуляцию, после чего возвращается в начало смесителя. Обработку воды коагулянтом предлагается проводить по способу концентрированного коагулирования, то есть в часть обрабатываемой воды, в данном случае поток, идущий на рециркуляцию. Концентрированный ввод

---

коагулянта, в сравнении с традиционным способом позволяет экономить реагент при сохранении высокого эффекта очистки, а также проводить обработку в более широких диапазонах температуры и водородного показателя воды. Значения общего ( $Q_{\text{общ}}$ ) и рециркуляционного ( $Q_{\text{рец}}$ ) расходов при использовании данной схемы следует определять экспериментально, для каждого конкретного случая.

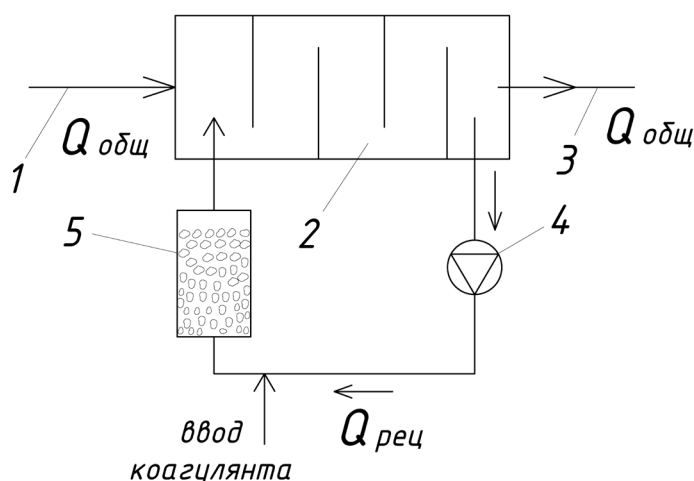


Рис. 2. – Схема интенсификации работы смесителя при контактной коагуляции: 1 – трубопровод исходной воды; 2 – перегородчатый смеситель; 3 – трубопровод отвода воды после коагуляционной обработки; 4 – насос; 5 – контактная камера с крупнозернистой загрузкой

Предлагаемая схема обработки воды позволит сохранить высокую степень укрупнения хлопьев при сохранении значений градиента скорости перемешивания, позволяющих получать прочные хлопья с достаточным содержанием твердой фазы.

### Литература

1. Драгинский В.А., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В. Коагуляция в технологии очистки природных и сточных вод. Москва, 2005. 576 с.
2. Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Никитин А.М. Повышение эффективности работы водопроводных станций // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. №2. С. 21-25.

3. Cuthbertson A., Dong P., King S., Davies P. Hindered settling velocity of cohesive/non-cohesive sediment mixtures // Coastal Engineering. 2008. vol. 55. № 12. pp. 1197-1208.

4. Young J.C., Edwards F.G. Factors affecting ballasted flocculation reactions // Water Environment Research. 2003. vol. 75. № 3. pp. 263-272.

5. Yu W., Gregory J., Campos L.C. Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles // Water Research. 2015. vol. 68. № 1. pp. 119-126.

6. Zhu W., Seth R., Lalman J. Evaluation of a micro carrier weighted coagulation flocculation process for the treatment of combined sewer over flow // Environmental Technology. 2007. vol. 28. № 7. pp. 761-770.

7. Шемякин Ю.В., Подковыров В.П., Стрихар Ю.В., Арутюнова И.Ю., Ягунков С.Ю. Технология высокоскоростного осветления воды с использованием микропеска // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 10. С. 12-19.

8. Виноградов В.Н., Смирнов Б.А., Жадан А.В., Аван В.К. Повышение эффективности осветлителей для коагуляционной обработки воды // Теплоэнергетика. 2010. № 8. С. 14-16.

9. Гришин Б.М., Бикунова М.В., Ласьков Н.Н., Камбург В.Г., Малютин Т.В. Гидравлические характеристики крупнозернистой загрузки контактных камер коагуляции // Региональная архитектура и строительство. 2016. № 3 (28). С. 125-130.

10. Гришин Б.М., Шейн А.И., Салмин С.М. Экспериментальные исследования очистки воды с применением контактной коагуляции на крупнозернистой загрузке // Водоочистка. 2015. № 4. С. 26-33.

11. Гришин Б.М., Салмин С.М., Антонова Е.А., Полякова М.Ю. Исследования гидравлического сопротивления крупнозернистой загрузки на



лабораторной установке // Уральский научный вестник. 2017. Т. 10. № 2. С. 59-62.

12. Грабовский А.П., Прогульный В.И. Математическая модель коагуляции и регенерации крупнозернистых слоёв малой толщины // Химия и технология воды. 1990. Т. 12. № 6. С. 494-497.

### References

1. Draginskiy V.A., Alekseyeva L.P., Getmantsev S.V. Koagulyatsiya v tekhnologii ochistki prirodnykh i stochnykh vod [Coagulation in natural and wastewater treatment technology]. Moskva, 2005. 576 p.

2. Skolubovich Yu.L., Voytov E.L., Nikitin A.M. Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika. 2011. №2. pp. 21-25.

3. Cuthbertson A., Dong P., King S., Davies P. Coastal Engineering. 2008. vol. 55. № 12. pp. 1197-1208.

4. Young J.C., Edwards F.G. Water Environment Research. 2003. vol. 75. № 3. pp. 263-272.

5. Yu W., Gregory J., Campos L.C. Water Research. 2015. vol. 68. № 1. pp. 119-126.

6. Zhu W., Seth R., Lalman J. Environmental Technology. 2007. vol. 28. № 7. pp. 761-770.

7. Shemyakin Yu.V., Podkovyrov V.P., Strikhar Yu.V., Arutyunova I.Yu., Yagunkov S.Yu. Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika. 2011. № 10. pp. 12-19.

8. Vinogradov V.N., Smirnov B.A., Zhadan A.V., Avan V.K. Teploenergetika. 2010. № 8. pp. 14-16.

9. Grishin B.M., Bikunova M.V., Laskov N.N., Kamburg V.G., Malyutina T.V. Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo. 2016. № 3 (28). pp. 125-130.

10. Grishin B.M., Shein A.I., Salmin S.M. Vodoochistka. 2015. № 4. pp. 26-33.



11. Grishin B.M., Salmin S.M., Antonova E.A., Polyakova M.Yu. Uralskiy nauchnyy vestnik. 2017. vol. 10. № 2. pp. 59-62.

12. Grabovskiy A.P., Progulnyy V.I. Khimiya i tekhnologiya vody. 1990. vol. 12. № 6. pp. 494-497.

**Дата поступления: 27.01.2025**

**Дата публикации: 10.03.2025**