

Теоретические исследования влияния интенсивности перемешивания на процессы коагуляционной обработки воды

М.А. Сафронов, Д.А. Арюков

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация: Проанализированы факторы, оказывающие влияние на процесс хлопьеобразования при аэрации. Получены теоретические зависимости, показывающие, что требуемая доза коагулянта, введенного в смеситель при одновременной аэрации воды, пропорциональна концентрации гетерофазных примесей и обратно пропорциональна среднему размеру частиц загрязнений, газонасыщению полученной водовоздушной смеси и градиенту скорости перемешивания.

Ключевые слова: природная вода, коагулянт, смеситель, аэрация, требуемая доза коагулянта, градиент скорости.

Процесс коагуляционной обработки воды является важнейшей составляющей очистки природных вод из поверхностного источника. При этом первоочередной задачей является определение требуемой дозы коагулянта с учетом различных факторов.

Эффективность коагуляционной обработки может быть увеличена за счет применения различных реагентных и безреагентных способов. К ним можно отнести изменение режимов ввода реагентов (прерывистое, концентрированное, фракционированное), аэрацию воды, а также использование различных смесевых коагулянтов [1-3].

Интенсивность перемешивания воды с растворами коагулянтов является одним из определяющих факторов технологии реагентной обработки, влияющим на все основные параметры данного процесса. Условия перемешивания оказывают прямое влияние на процесс формирования хлопьев, их свойства, скорость распределения коагулянта в обрабатываемой воде и, конечно, на требуемую для эффективной очистки дозу реагента [4].

Процесс интенсивного перемешивания растворов коагулянтов с обрабатываемой водой осуществляется в смесителях, в которых происходит формирование так называемых микрохлопьев, в дальнейшем увеличивающих

свой размер в камерах хлопьеобразования до размеров, требуемых для выпадения в осадок [4]. Структурные изменения микрохлопьев в хлопья существенным образом зависят от режима перемешивания, используемого в технологических процессах.

Эффективность работы смесителей при их эксплуатации может быть оценена величиной градиента скорости G , с^{-1} , величина которого определяется по формуле:

$$G = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot Q_{\text{см}} \cdot \mu}{W_{\text{см}}}}$$

где Δp – потери давления, возникающие при работе смесителя, Па;

t – время перемешивания, с;

$Q_{\text{см}}$ – расход воды, проходящий через смеситель, $\text{м}^3/\text{с}$;

μ – динамический коэффициент вязкости обрабатываемой воды, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

$W_{\text{см}}$ – объем смесителя, м^3 .

Оптимальное значение градиента скорости для гидравлических смесителей варьируется в пределах от 120 до 300 с^{-1} [5]. При таких значениях градиента, интенсивность перемешивания можно считать незначительной. Результатом перемешивания воды с коагулянтном в таких условиях является неравномерное его распределение и образование рыхлых неплотных микрохлопьев. В рамках данной статьи попытаемся установить зависимость между значением градиента скорости смесителя и параметрами образующихся в процессе коагуляционной обработки хлопьев.

Предположим, что прочность структуры микрохлопьев зависит от величины силы сцепления контактирующих частиц продуктов гидролиза коагулянта:

$$E = \frac{F \cdot r \cdot \theta \cdot \omega \cdot n}{\omega'} \quad (1)$$

где E – прочность коагуляционной структуры, Па;

F' – сила элементарного контакта между продуктами гидролиза коагулянта, Н;

θ – степень покрытия поверхности частиц примесей продуктами гидролиза коагулянта, находящаяся в пределах $0 \dots 1$;

ω – площадь поверхности частицы примесей, м^2 ;

n – число контактов микрохлопьев на единицу площади;

ω' – посадочная площадь частицы продукта гидролиза коагулянта, м^2 .

Для определения числа контактов, n , воспользуемся зависимостями, приведенными в [6-7]. В первом приближении данную величину можно принять равной $1,6 \cdot \frac{\sqrt[3]{\rho_M^2}}{d_{\text{ПГК}}^2}$.

где ρ_M – плотность микрохлопьев, образующихся в смесителе;

$d_{\text{ПГК}}$ – диаметр частиц загрязнений, покрытых оболочкой продуктов гидролиза коагулянта, м.

Согласно [7]:

$$n = \frac{1}{(N \cdot d_{\text{ПГК}})^2}$$

где N – количество частиц загрязнений в сформированных микрохлопьях, зависящее от градиента скорости и силы контакта между частицами загрязнений F , Н [8].

С учетом того, что величина ρ_M может быть определена как $\frac{\pi(3N-2)}{6N^3}$, получим:

$$\exp\left(-0,58N^4\eta\pi\frac{Gd_{\text{ПГК}}^2}{f}\right)5,2\sqrt{\mu N/\rho_{\text{в}}G} = d_{\text{ПГК}} \cdot N$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Исходя из данных, приведенных в [9] прочность структуры и плотность микрохлопьев зависят от градиента скорости следующим образом:

$$E = A \cdot G^{0,56}$$

$$\rho_M = B \cdot G^{0,5}$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от диаметра частиц загрязнений d , а также расстояния между соприкасающимися частицами примесей.

Для определения величины E для сформированной в процессе реагентной обработки структуры, состоящей из частиц загрязнений различного размера, необходимо установить зависимость между величиной силы контакта частиц примесей, E (или θ), от диаметра данных частиц, d , в формуле (1). Величина степени покрытия поверхности частиц примесей продуктами гидролиза коагулянта, θ , вне всякого сомнения зависит от концентрации взвешенных частиц, находящихся в очищаемой воде в процессе коагуляционной обработки [9], которая в свою очередь оказывает прямое влияние на дозу коагулянта, требуемую для качественной очистки воды. Согласно уравнению (1), наилучшие условия коагуляционной обработки будут наблюдаться при значении $\theta=0,5$.

Величины площадей поверхности частиц примесей и продуктов гидролиза коагулянта, учитывая их геометрическую форму найдем соответственно $\omega = \pi d^2$ и $\omega' = \frac{\pi D^2}{4}$. Исходя из этого, с учетом формулы (1), силу контакта между частицами загрязнений F , Н, можно определить:

$$F = \frac{4 \cdot \theta_{\text{тр}} \cdot d^2 \cdot F'}{\pi D^2} \quad (2)$$

где $\theta_{\text{тр}}$ – требуемая степень покрытия частиц примесей продуктами гидролиза коагулянта.

Величина силы элементарного контакта между частицами продуктов гидролиза коагулянта пропорциональна величине диаметра частицы, а, следовательно, сила контакта между частицами загрязнений обратно пропорциональна диаметру частиц. Исходя из этого, доза коагулянта на единицу объема воды может быть найдена из соотношения:

$$D_W = \frac{4 \cdot \theta_{\text{тр}} \cdot d^2 \cdot \pi}{\pi D^2} \cdot \frac{\pi D^3}{6} \quad (3)$$

Согласно (2) и (3), прочность коагуляционной структуры для частицы примесей определенного размера обратно пропорциональна размеру частиц продуктов гидролиза коагулянта и, следовательно, может быть увеличена за счет более интенсивного перемешивания в процессе реагентной обработки воды.

Преобразуем уравнение (3) с учетом того, что объем частицы шарообразной формы определяется, как $\frac{\pi d^3}{6}$:

$$D_W = \frac{4 \cdot \theta_{\text{тр}} \cdot D}{d} \cdot W_{\text{част}} \quad (4)$$

На практике требуется определение весовой дозы коагулянта, мг/л. Для получения выражения, позволяющего определить данную величину, умножим обе части формулы (4) на, соответственно, количество и плотность частиц примесей $n_{\text{част}}$ и $\rho_{\text{част}}$. Обозначив концентрацию загрязняющих веществ в воде, как:

$$C_{\text{пр}} = W_{\text{част}} \cdot n_{\text{част}} \cdot \rho_{\text{част}},$$

Получим:

$$D_k = 4\theta_{\text{тр}} C_{\text{пр}} \frac{D}{d} \quad (5)$$

Из формулы (5) очевидно, что при некоторых постоянных значениях концентрации примесей, размеров частиц примесей и продуктов гидролиза коагулянта, доза реагента напрямую зависит от величины $\theta_{\text{тр}}$, снижая которую можно достичь экономии используемого коагулянта. Достигнуть этого возможно с помощью аэрации, в процессе которой пузырьки воздуха за счет электростатических сил взаимодействия будут занимать часть поверхности частиц загрязнений. Следует отметить, что процесс прикрепления пузырьков к частицам загрязнений возможен в кислой среде, в которой пузырьки и частицы имеют противоположный заряд и соответственно будут притягиваться.

Требуемую степень покрытия продуктами гидролиза коагулянта при наличии пузырьков воздуха можно определить:

$$\theta_{\text{тр.п}} = \frac{\theta_{\text{тр}}}{k_{\text{пр}} F_{\text{пз}}^m}$$

где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент пропорциональности;

$F_{\text{пз}}$ – удельная поверхность пузырька воздуха, $m=0,5-1$.

Площадь поверхностей пузырьков воздуха, $\text{м}^2/\text{м}^3$, используемых в процессе аэрации с учетом их размера и количества, можно определить по соотношению:

$$\omega_{\text{п}} = \frac{6\varphi}{D_{\text{п}}}$$

где φ – газонасыщение воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$D_{\text{п}}$ – диаметр пузырька, м.

Таким образом, наличие пузырьков воздуха небольшого размера приводит к более эффективному перемешиванию коагулянта с обрабатываемой водой. Добиться дробления одного пузырька на более мелкие возможно за счет так называемых турбулентных пульсаций, масштаб которых должен быть примерно равным диаметру пузырька. В противном случае будет происходить только перемещение пузырька, а не дробление. Также следует учесть тот факт, что величина энергии турбулентных пульсаций обратно пропорциональна их масштабу. То есть нулевой масштаб турбулентных пульсаций характеризуется максимальной энергией, достаточной для разрушения сплошности поверхности раздела газ-жидкость.

Формула для определения диаметра пузырька с учетом общепринятых характеристик турбулентных пульсаций выглядит следующим образом [10]:

$$D_{\text{п}} = 0,4 \left(\frac{\sigma}{\rho_{\text{в}}} \right)^{0,6} \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{0,4}$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения поверхности раздела газ-жидкость, Н/м;

ε – мощность, на единицу массы смеси, Вт/кг.

С учетом того, что $\varepsilon = G^2 v_{см}$, требуемую дозу коагулянта в случае добавления в смеситель воздуха можно определить по формуле:

$$D_k = \frac{4 \cdot \theta_{тр.п} \cdot C_{пр} \cdot D}{d \cdot k_{пр}} \left[\frac{6\varphi(G^2 v_{см})^{0,4}}{0,4(\sigma/\rho_B)^{0,6}} \right]^{-m} \quad (6)$$

Данная формула может быть использована для расчетов требуемой дозы коагулянта при обработке поверхностных природных вод с использованием аэрации. Из неё следует, что требуемая доза коагулянта зависит от концентрации примесей в воде, а также размеров частиц загрязнений и продуктов гидролиза коагулянта. При некоторых исходных данных очищаемой воды, то есть, если принять, что значения концентрации и размеров загрязнений будут величинами постоянными, требуемая доза коагулянта зависит от градиента скорости перемешивания, а также от величины газонасыщения образующейся водовоздушной смеси. При этом из формулы (6) следует, что D_k обратно пропорциональна φ и G .

Литература

1. Гришин Б.М., Бикунова М.В., Кошев А.Н., Малютина Т.В. Очистка воды поверхностного источника с применением смесевых коагулянтов // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1 (46). С. 153-159.
2. Grishin B.M., Laskov N.N., Perelygin Y.P. Comparison of the effectiveness of mineral and mixed coagulants in the lightening of water from a surface source // Journal of Physics: Conference Series. 2021. pp. 012038.
3. Byun S., Oh J., Lee B.Y., Lee S. Improvement of coagulation efficiency using instantaneous flash mixer (IFM) for water treatment // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2005. №1-3. pp. 104-110.
4. Бабенков Е.Д. Режим перемешивания воды в процессах водоподготовки // Химия и технология воды. 1984. Т. 2 № 3. С. 50-60.

5. Драгинский В.А., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В. Коагуляция в технологии очистки природных и сточных вод. Москва, 2005. 576 с.
6. Тихонова Е. А., Усачев А. С. Использование органических коагулянтов для подготовки питьевой воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2004. № 9. С. 33-34.
7. Щукин Е.Д. О некоторых задачах физико-химической теории прочности тонкодисперсных пористых тел – катализаторов и сорбентов // Кинетика и катализ. 1965. № 4. С. 641-650.
8. Бибик Е.Е., Лавров И.С. Измерение сил сцепления частиц в агрегированных дисперсных системах // Коллоидный журнал. 1970. № 4. С. 483-488.
9. Бабенков Е.Д. Влияние степени дисперсности примесей на физические параметры коагулированной взвеси // Химия и технология воды. 1983. Т. 5, № 1. С. 20-30.
10. Гришин Л.Б. Совершенствование очистки нефтесодержащих производственных сточных вод: дисс. канд. техн. наук: 05.23.04. Пенза, 2009. 144 с.

References

1. Grishin V.M., Bikunova M.V., Koshev A.N., Malyutina T.V. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. 2021. № 1 (46). pp. 153-159.
 2. Grishin V.M., Laskov N.N., Pereygin Y.P. Journal of Physics: Conference Series. 2021. pp. 012038.
 3. Byun S., Oh J., Lee B.Y., Lee S. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2005. №1-3. pp. 104-110.
 4. Babenkov E.D. Khimiya i tekhnologiya vody. 1984. vol. 2 № 3. pp. 50-60.
-



5. 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.
6. Tikhonova E. A., Usachev A. S. Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika. 2004. № 9. pp. 33-34.
7. Shchukin E.D. Kinetika i kataliz. 1965. № 4. pp. 641-650.
8. Bibik E.E., Lavrov I.S. Kolloidnyy zhurnal. 1970. № 4. pp. 483-488.
9. Babenkov E.D. Khimiya i tekhnologiya vody. 1983. vol. 5, № 1. pp. 20-30.
10. Grishin L.B. Sovershenstvovaniye ochistki neftesoderzhashchikh proizvodstvennykh stochnykh vod [Improvement of oil-containing industrial wastewater treatment]: diss. kand. tekhn. nauk: 05.23.04. Penza, 2009. 144 p.