

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ОЧИСТКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
АКТИВИРОВАННОГО РАСТВОРА КОАГУЛЯНТА**

Душкин С.С., д.т.н., профессор,
Шевченко Т.А., к.т.н., доцент,
Душкин С.С., к.т.н.

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова
d.akass@ukr.net

Аннотация. Выполнено моделирование технологических процессов очистки питьевой воды при использовании активированного раствора коагулянта. При построении математических моделей был использован полный факторный эксперимент в двух уровнях с варьированием трех факторов. Получены функциональные зависимости, описывающие исследуемый процесс очистки воды, выполнено сопоставление экспериментальных и расчетных данных, которые достаточно полно освещают процесс очистки воды с применением активированного раствора коагулянта и могут быть использованы в технологических расчетах при проектировании очистных сооружений водопровода.

Ключевые слова: процесс коагуляции, подготовка питьевой воды, активированные растворы коагулянта, гидравлическая крупность коагулированной взвеси, параметры активации, интенсификация процессов очистки воды.

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ
ПРИ ВИКОРИСТАННІ АКТИВОВАНОГО РОЗЧИНУ КОАГУЛЯНТА**

Душкін С.С., д.т.н., професор,
Шевченко Т.А., к.т.н., доцент,
Душкін С.С., к.т.н.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
d.akass@ukr.net

Анотація. Виконано моделювання технологічних процесів очистки питної води при використанні активованого розчину коагулянту. При побудові математичних моделей був використаний повний факторний експеримент в двох рівнях з варіюванням трьох чинників. Отримані функціональні залежності, що описують досліджуваний процес очистки води, виконано зіставлення експериментальних і розрахункових даних, які досить повно освітлюють процес очистки води із застосуванням активованого розчину коагулянту і можуть бути використані в технологічних розрахунках при проектуванні очисних споруджень водопроводу.

Ключові слова: процес коагуляції, підготовка питної води, активовані розчини коагулянту, гідралічна крупність коагульованого завису, параметри активації, інтенсифікація процесів очищення води.

**MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF TREATMENT DRINKING
WATER WHEN USING THE ACTIVATED COAGULANT SOLUTION**

Dushkin S., Dr.Tech.Sc., Professor,
Shevchenko T., Ph.D., Assistant Professor,

Abstract. The modeling of treatment drinking water technological process using the activated coagulant solution was performed. It was found that the use of an activated solution of aluminum sulfate coagulant allows to reduce the consumption of reagents, improve the quality of water treatment, and increase the productivity of sewage treatment plants. A mathematical model for predicting the efficiency of water clarification using an activated solution of aluminum sulfate coagulant is developed. The mathematical model is developed for the low turbid colored water and water with enhanced content of suspended matter and small colored. For the construction of mathematical models a complete factorial experiment was used in two levels with varying of three factors, which the little turbid colored waters (colored, dose of the entered coagulant, temperature of water) behave to the number of that, for water with enhanced content of suspended matter and small colored the followings factors were accepted: (dose of the entered coagulant and temperature of water). Functional dependences describing the investigated process of water treatment are got, comparison of experimental and calculation data that explain the process of water treatment with the use of the activated solution of coagulant fully enough and can be used in technological calculations at planning of sewage treatment plants of plumbing is executed.

Keywords: process of coagulation, drinking water treatment, the activated solutions coagulant, particle sedimentation rate of coagulated suspension, the activation parameters, intensification of water treatment processes.

Введение. Одним из наиболее распространенных методов очистки воды от грубодисперсных и коллоидных загрязнений является метод обработки воды коагулянтами. Однако, при неблагоприятных условиях коагуляции: недостаточная щелочность, высокая цветность и низкая температура воды, расход реагента достаточно значителен, поэтому этот метод требует усовершенствования, а именно: повышение скорости формирования и выпадения коагулированной взвеси в осадок [1, 2].

Применение активированного раствора коагулянта сульфата алюминия позволяет снизить расход реагентов, улучшить качество очистки воды, увеличить производительность очистных сооружений [3].

Анализ последних исследований и публикаций. Современные методы повышения эффективности работы сооружений при подготовке питьевой воды свидетельствует о том, что наиболее перспективным с технической точки зрения является метод магнитно-электрической активации раствора коагулянта сульфата алюминия для очистки питьевой воды. Данный метод позволяет повысить качество осветленной воды, уменьшить расход реагентов и воды на собственные нужды, снизить себестоимость очистки воды [4, 5].

Улучшение физико-химических условий коагуляции примесей при подготовке питьевой воды вызвано снижением агрегативной устойчивости коллоидных систем и увеличением адсорбционной емкости гидроксида алюминия, что позволяет интенсифицировать процесс коагуляции при подготовке питьевой воды [6, 7].

Определено, что обработка воды активированным раствором коагулянта позволяет увеличить гидравлическую крупность коагулированной взвеси. Наибольшее влияние активированный раствор коагулянта оказывает на гидравлическую крупность взвеси 0,2 мм/с и более [8].

Обработку воды активированным раствором коагулянта целесообразно выполнять при содержании в осветляемой воде взвешенных веществ до 100-250 мг/дм³.

Эффективность влияния активированных растворов сульфата и оксихлорида алюминия зависит от содержания взвешенных веществ в осветляемой воде и параметров активации, что подтверждают опытные данные, приведенные на рис. 1.

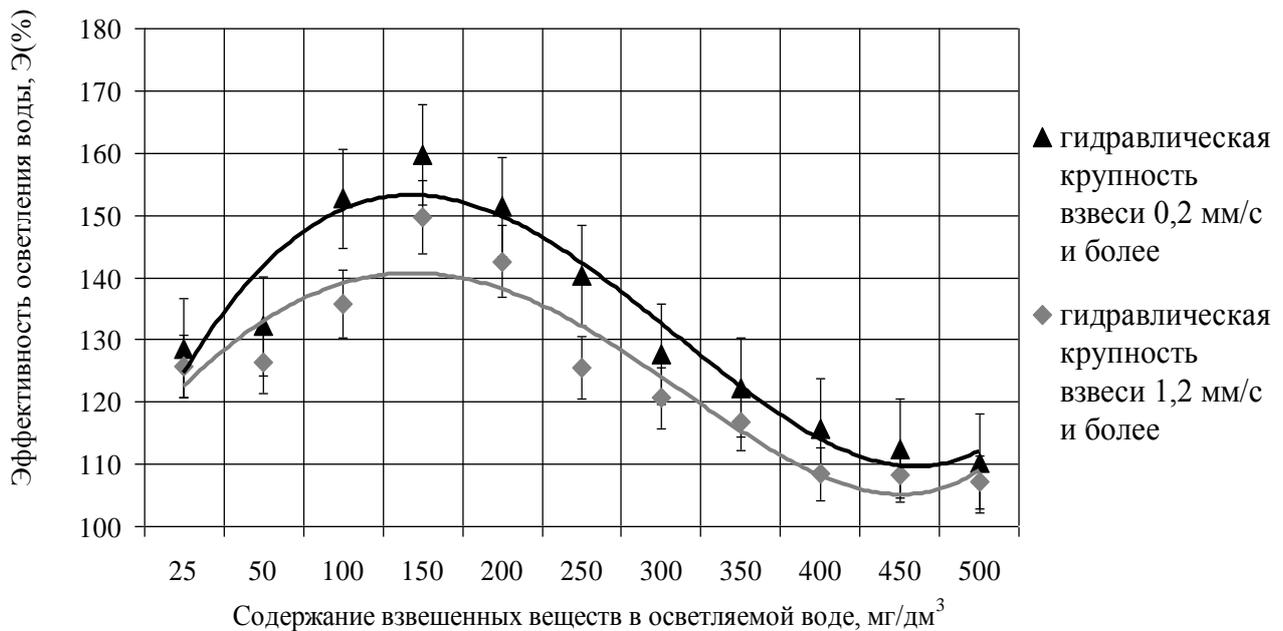


Рис. 1. Влияние активированного раствора коагулянта сульфата алюминия на гидравлическую крупность коагулированной взвеси

При повышении мутности эффективность обработки уменьшается, а при дальнейшем повышении содержания взвешенных веществ использование активированных растворов коагулянтов сульфата и оксихлорида алюминия для обработки воды не целесообразно.

Цветность осветляемой воды при обработке активированным раствором коагулянта сульфата алюминия, не зависит от содержания взвешенных веществ и в 1,5-1,6 раза ниже цветности, зафиксированной при использовании обычного раствора коагулянта [4, 5, 8, 9].

Оптимальные режимы активации растворов сульфата и оксихлорида алюминия приведены в табл. 1.

Технология активации растворов реагентов, используемых в процессе очистки воды, и устройство для ее реализации защищены патентами Украины 54932А, 89835, 103295, 103698.

Постановка задачи. Построение математической модели процессов очистки питьевой воды с использованием активированного раствора коагулянта сульфата алюминия для прогнозирования качества осветленной воды в системах водоснабжения.

Результаты исследования. На основании выполненных исследований разработана математическая модель прогнозирования эффективности осветления воды при обработке активированным раствором коагулянта.

Одной из важных целей при разработке математической модели для процессов с непрерывным характером производства, к которым относятся очистные сооружения водопровода, является поддержание технологически обоснованного режима очистки воды при оптимальных условиях магнитно-электрической активации раствора сульфата алюминия.

При построении математической модели был использован полный факторный эксперимент (ПФЭ) в двух уровнях с варьированием трех факторов – 2^3 .

Математические модели разработаны для маломутных цветных вод и воды с повышенным содержанием взвешенных веществ малой цветности. Характеристика этих видов воды приведена в [10, 11]. Там же приведены эффективные параметры активации раствора коагулянта сульфата алюминия в зависимости от качественных показателей осветляемой воды.

Таблица 1 – Оптимальные режимы активации растворов сульфата и оксихлорида алюминия

Содержание взвешенных веществ в осветляемой воде, мг/дм ³	Параметры активации (оптимальные)		Остаточное содержание взвешенных веществ, мг/дм ³			
	Напряженность магнитного поля, кА/м	Содержание в растворе анодного растворенного железа, мг/дм ³	Вид коагулянта			
			Сульфат алюминия		Оксихлорид алюминия	
			Гидравлическая крупность коагулированной взвеси 0,2 мм/с и более			
			Обычный раствор коагулянта	Активированный раствор коагулянта	Обычный раствор коагулянта	Активированный раствор коагулянта
25	325	200	3,3	2,6	2,8	2,3
50	175	200	3,8	2,9	3,1	2,2
100	425	350	3,8	2,3	3,0	2,0
150	550	625	3,2	2,0	2,8	1,7
200	600	700	3,8	2,5	3,3	2,3
250	750	850	4,5	3,2	4,2	3,3
300	825	750	5,2	4,1	4,4	3,8
350	925	850	5,3	4,3	4,6	3,9
400	975	925	5,8	5,0	5,2	4,5
450	475	950	6,1	5,4	5,2	4,6
500	1150	950	6,2	5,6	5,4	4,9

В качестве основных факторов, влияющих на осветление воды при использовании активированного раствора коагулянта, приняты следующие:

– для маломутных цветных вод:

- цветность, Ц, град;
- доза вводимого реагента, Д, мг/дм³;
- температура воды, Т, °С.

– для воды с повышенным содержанием взвешенных веществ и низкой цветностью:

- содержание взвешенных веществ, М, мг/дм³;
- доза вводимого реагента, Д, мг/дм³;
- температура воды, Т, °С.

Функциональные зависимости эффекта очистки природных вод при эффективных режимах активации раствора коагулянта имеют вид:

– для маломутных цветных вод:

$$\mathcal{E} = f(C, D, T) \text{ или } Y = f(X_1, X_2, X_3) \quad (1)$$

где Y – эффект очистки природных вод, Ц=X₁, Д=X₂, Т=X₃.

– для воды с повышенным содержанием взвешенных веществ и низкой цветностью:

$$\mathcal{E} = f(M, D, T) \text{ или } Y = f(X_1, X_2, X_3), \quad (2)$$

где Y – эффект очистки природных вод, М=X₁, Д=X₂, Т=X₃.

В общем виде функциональная зависимость, описанная уравнениями (1 и 2), имеет вид:

$$Y = b_0 X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (3)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коэффициенты регрессии.

Следует отметить, что степень точности математической модели определяется диапазоном изменения факторов: для каждого i -го фактора устанавливается X_{i0} – основной уровень фактора; $X_{i\max}, X_{i\min}$ – верхний и нижний уровни i -го фактора, которые принимаются во время исследований; ΔX_i – интервал варьирования равный

$$\Delta X_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}, i = 1 \dots k \quad (4)$$

Условия планирования эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Наименование	Кодовый вид	-1	0	+1	
Маломутная цветная вода (коагулянт – сульфат алюминия)					
Цветность, град	X_1	35	65	95	30
Доза реагента, мг/дм ³ ;	X_2	6,25	12,50	18,75	6,25
Температура воды, °С	X_3	3	12	21	9
Воды с повышенным содержанием взвешенных веществ и малой цветностью (коагулянт – сульфат алюминия)					
Взвешенные вещества, мг/дм ³	X_1	70	105	140	35
Доза реагента, мг/дм ³	X_2	6,25	12,50	18,75	6,25
Температура воды, °С	X_3	3	12	21	9

После выполнения необходимых преобразований описывающих исследуемый процесс очистки воды с применением активированного раствора коагулянта сульфата алюминия функциональная зависимость эффекта осветления природной воды имеет вид:

– для маломутных цветных вод:

$$\mathcal{E} = 80,96 + 0,58 \cdot C + 0,879 \cdot T - 0,709 \cdot D \cdot T \quad (5)$$

– для воды с повышенным содержанием взвешенных веществ и низкой цветностью:

$$\mathcal{E} = 97,36 - 0,303 \cdot M + 0,44 \cdot D + 0,348 \cdot M \cdot T \quad (6)$$

В табл. 3 приведен анализ достоверности расчетных зависимостей эффективности осветления воды с использованием активированного раствора коагулянта сульфата алюминия полученных теоретическим (формулы 5, 6) и экспериментальным путем.

Полученные математические зависимости эффекта осветления природных вод при применении активированного раствора сульфата алюминия достаточно полно описывает исследуемый процесс, что позволяет сделать вывод о возможности использования зависимостей в технологических расчетах работы очистных сооружений и обосновании применения активированного раствора коагулянта для интенсификации процесса осветления воды на очистных сооружениях водопровода.

Выводы.

1. Моделирование технологических процессов очистки питьевой воды с использованием активированного раствора сульфата алюминия при осветлении маломутных цветных вод и воды с повышенным содержанием взвешенных веществ и низкой цветности, которые достаточно полно описывают исследуемый процесс, могут быть использованы в технологических расчетах при проектировании очистных сооружений водопровода.

Таблица 3 – Анализ достоверности расчетной зависимости эффективности осветления воды с использованием активированного раствора коагулянта сульфата алюминия

Источник водоснабжения	Содержание взвешенных веществ в осветляемой воде, мг/дм ³		Остаточное содержание взвешенных веществ в осветленной воде, мг/дм ³			Эффективность осветления воды, %		Величина доверительного интервала, (а), мВ, (γ=0,95); (n=4)		Примечания
	Обычный раствор коагулянта	Активированный раствор коагулянта	теоретические значения	экспериментальные значения	Теоретические значения	Экспериментальные значения	Расчетные значения	Опытные значения		
									теоретические значения	
Модельная вода	10,6	2,2	1,9	1,7	115,8	129,4	114,6<a<116,62	128,1<a<130,6	1. Период проведения исследований: 15 – 19.04.2013г.;	
Вода канала Сев. Донец-Донбасс, поступающая на очистные сооружения КПП «Краматорский водоканал»	25,3	4,7	3,4	3,5	138,2	134,2	137,4<a<134,2	133,2<a<135,5	2. Параметры активации: Н=120кА/м, Fe ³⁺ =250мг/дм ³ ;	
Модельная вода	50,6	6,8	4,9	4,6	138,7	147,8	137,1<a<140,2	146,6<a<148,3	3. Средние результаты из 4-х экспериментов.	
Модельная вода	80,5	7,5	5,6	5,2	133,9	144,2	132,5<a<134,5	143,3<a<145,8		
Модельная вода	101,8	7,3	5,8	5,3	125,8	137,7	126,1<a<126,3	136,2<a<138,9		
Вода канала Сев. Донец-Донбасс, поступающая на очистные сооружения КПП «Краматорский водоканал»	21,8	5,4	4,1	3,9	131,7	138,5	130,9<a<132,9	137,1<a<140,1	1. Период проведения исследований: 13 – 16.04.2013г.;	
									2. Параметры активации: Н=175кА/м, Fe ³⁺ =200мг/дм ³ ;	
									3. Средние результаты из 4-х экспериментов	

2. Выполненные исследования позволяют сделать вывод о возможности использования активированного раствора коагулянта сульфата алюминия при очистке природной воды для систем промышленного водоснабжения, однако, в этом направлении необходимо выполнить дополнительные исследования.

Литература

1. Бабенков С.Д. Очистка воды коагулянтами. / С.Д. Бабенков. – М.: Наука, 1977. – 356 с.
2. Грабовский П.А. Очистка природных вод: Учебное пособие. / П.А. Грабовский, Г.М. Ларкина, В.И. Прогульный. – Одесса: ОГАСА, 2003. – 267 с.
3. Благодарная Г.И.. Экологическая безопасность систем водоподготовки / Г.И. Благодарная, А.Н. Коваленко // Коммунальное хозяйство городов. – 2009. – Вып. 90. – С. 337–341.
4. Душкин С.С. Очистка маломутных вод высокой цветности / С.С. Душкин // Наук. вісник будівництва. – 2012. – Вып. 71. – С. 410–416.
5. Душкин С.С. Использование активированных растворов реагентов при подготовке экологически чистой питьевой воды / С.С. Душкин // Экология: образование, наука, промышленность и здоровье: сб. докл. V междунар. науч.-практ. конф., Белгород 14–16 ноября 2013 г. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2013. – С. 26–29.
6. Эпоян С.М. Снижение агрегативной устойчивости коллоидной примеси природных вод активированным раствором коагулянта сульфата алюминия / С.М. Эпоян, С.С. Душкин // MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin-Rzeszow, 2013. – Vol. 15. – No 5. – P. 11–16.
7. Эпоян С.М. Теория и практика использования активированного раствора коагулянта сульфата алюминия для интенсификации работы очистных сооружений водопровода / С.М. Эпоян, С.С. Душкин // Матер. междунар. научн.-практ. конф. Санкт-Петербург, ПГУПС 23 апреля 2013 г. – С.-П.: ОМ-пресс, 2013. – С. 72–74.
8. Крамаренко Л.В. Влияние активированного раствора коагулянта на гидравлическую крупность коагулированной взвеси / Л.В. Крамаренко // XXVIII научн.-техн. конф. ХНАГХ. – Харьков, 1996. – С. 31.
9. Душкин С.С. Исследование процессов очистки питьевой воды на скорых фильтрах с использованием активированного раствора коагулянта / С.С. Душкин // Наук. вісник будівництва. – 2016. – №2 (84). – С. 323–329.
10. Душкин С.С. Методологические аспекты проведения исследований при использовании активированных растворов коагулянта в процессе очистки воды / С.С. Душкин // Комунальне господарство міст: наук.- техн. зб. – 2012. – Вып. 105. – С. 320–334.
11. Душкин С.С. Ресурсосберегающие технологии очистки сточных вод: монография / С.С. Душкин, А.Н. Коваленко, М.В. Дегтярь, Т.А. Шевченко // Харьк. нац. акад. городского хоз-ва. Х.: ХНАГХ, 2011.– 146 с.

Стаття надійшла 20.09.2017