

УДК 628.16

## ПРИМЕНЕНИЕ КОАГУЛЯНТОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ВОДООЧИСТНОЙ СТАНЦИИ Г. МИНСКА

**А.Ю. Шуберт**

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь,  
e-mail: [a.shubert0333@gmail.com](mailto:a.shubert0333@gmail.com)

*В данной статье представлены результаты пробного коагулирования воды с применением алюмосодержащих коагулянтов полиоксихлорид алюминия марки «АКВА-АУРАТ™» модификации «АКВА-АУРАТ™ 10» производства ОАО «АУРАТ», «алюминия полиоксихлорид раствор» марки «АQUAMix-BV» производства ООО «Ксант-Инвест» г. Гомель, «оксихлорид алюминия» марки «ОА-10» производства ООО «Скоропусковский Синтез» г. Москва при температуре воды менее 6 °С.*

**Ключевые слова:** водоподготовка, коагуляция, показатели качества, полиоксихлорид алюминия, оксихлорид алюминия.

## APPLICATION OF COAGULANTS IN OPTIMIZING THE OPERATION OF THE WATER PURIFICATION PLANT IN MINSK

**A. Shubert**

Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus  
e-mail: [a.shubert0333@gmail.com](mailto:a.shubert0333@gmail.com)

*This article presents the results of trial coagulation of water using coagulants AQUA-AURAT™ brand aluminum polyoxochloride modification AQUA-AURAT™ 10 manufactured by AURAT JSC, aluminum polyoxochloride solution brand AQUAMix-BV manufactured by Xant-Invest" Gomel, "aluminum oxychloride" brand "OA-10" produced by "Skoropuskovsky Sintez" LLC, Moscow at a water temperature of less than 6 °C.*

**Keywords:** water treatment, coagulation, quality indicators, aluminum polyoxochloride, aluminum oxychloride.

**Введение.** Целью данной работы является проведение анализа эффективности и экономической целесообразности применения коагулянтов, получивших заключение УП «МИНСКВОДОКАНАЛ» о пригодности для использования в технологии водоподготовки на очистной водопроводной станции (ОВС) с целью интенсификации процесса коагуляционной обработки природной воды, снижения требуемых доз коагулянта и затрат на закупку химического реагента.

**Основная часть.** Для придания воде потребительских качеств с возможностью применения в питьевом водоснабжении применяют многоступенчатую очистку, включающую разные методы водоподготовки, одним из которых является метод коагуляционной обработки воды. Несмотря на достаточно широкий перечень методов очистки природных вод, реагентные методы водоподготовки с использованием коагулянтов на сегодняшний день остаются одними из наиболее эффективным, относительно бюджетным и компактным решением.

Коагулирование – это обработка воды реагентом, приводящая к укрупнению частиц с целью ускорения их оседания. Обработку воды коагулянтами применяют для интенсификации и повышения эффективности процессов осветления и обесцвечивания.

Пробное коагулирование представляет собой лабораторный эксперимент, основной целью которого является подбор доз реагентов и, при необходимости, поиск оптимальных условий их применения.

Существует четыре периода за года, характерных для изучения эффективности коагулянтов:

- ноябрь-март (ориентировочно при температуре обрабатываемой воды менее 6 °С);
- апрель-май (6 – 15 °С);
- июнь-сентябрь (более 15 °С);
- сентябрь-октябрь (6 – 15 °С).

Применение коагулянтов на основе алюминия приводит к увеличению остаточного алюминия в питьевой воде, который в свою очередь относится к 2 классу опасности (высоко опасное вещество) санитарно-токсикологического признака вредности [1]. Накапливаясь в организме, алюминий может умиротвлять клетки мозга (парализует центральную нервную систему, вызывает дрожание головы и судороги), вызывать анемию и артрит (у больных артритом алюминия в крови в пять раз больше, чем у здоровых), угнетать выработку желудочных и слюнных ферментов, способствовать развитию остеопороза (хрупкости костей) и рахита. СанПиН 10-124 РБ99 [1] ограничивает предельно допустимую концентрацию величиной 0,5 мг/дм<sup>3</sup>. Выбор оптимального вида коагулянта, а также рациональное дозирование позволяют не только обеспечить очистку воды до требований, регламентированных установленными гигиеническими нормативами, определяющими показатели безопасности питьевой воды, но и сократить затраты на химический реагент, что является одной из важнейших задач при оптимизации работы водоочистной станции.

Объектом исследования является очистная водопроводная станция г. Минска – комплекс сооружений и инженерных коммуникаций, осуществляющих водоподготовку природной воды из поверхностного источника (исходная вода поступает на ОВС по трем гравитационным водоводам Ø 1400 мм длиной 18,7 км из резервного водохранилища «Крылово» Вилейско-Минской водной системы) с последующей подачей в водопроводную сеть г. Минска, введенный в эксплуатацию в 1978 году. В водохранилище «Крылово» находится запас воды в количестве 15,0 млн. м<sup>3</sup>, что обеспечивает бесперебойную подачу воды на ОВС.

Резервное водохранилище «Крылово» Вилейско-Минской водной системы является единственным поверхностным источником централизованных систем питьевого водоснабжения в Республике Беларусь и служит для повышения надежности источника водоснабжения.

По этой причине вопрос применения коагулянтов для очистки воды из поверхностных источников на территории нашей страны изучен мало. Однако установлено, что при проведении процесса очистки воды в реальных условиях водоочистной станции в теплое время года, когда температура воды составляет около 20 °С, лучше использовать высокоосновные коагулянты ( $B \cong 80 \%$ ). Для холодного времени года (температура воды до 7 °С) более рациональным является применение среднеосновных коагулянтов ( $B \cong 67 \%$ ) [2].

В результате анализа эффективности работы водоочистной станции установлено, что для нужд ОВС ежегодно производится закупка коагулянта объемом около 1500 тонн (суммарно более чем на 1 млн. рублей).

В технологическом процессе подготовки питьевой воды на данный момент могут быть применены коагулянты следующих марок: «АКВА-АУРАТТМ» модификации «АКВА-АУРАТТМ 10» (базовый), ПОЛВАК марка 68; «Pro-AQUA SB»; «БО-ПАК-Е»; «AQUAMix-BV»; «ОА-10».

Применение коагулянта в технологии подготовки питьевой воды может производиться в течение всего года.

В марте 2022 года проведен лабораторный эксперимент обработки исходной воды производится коагулянтами марки «АКВА-АУРАТТМ 10», «AQUAMix-BV», «ОА-10». Основные показатели качества выбранных марок коагулянтов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Входной контроль качества

Наименование показателя	Результат лабораторных исследований		
	AQUAMIX-BV	ОА-10	Аква-Аурат 10
Массовая доля оксида алюминия (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	19,8	9,5	10
Массовая доля хлорид-ионов (Cl <sup>-</sup> ), %	9,3	14,1	12,4
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	1,28	1,3	1,24
Массовая доля нерастворимого в воде остатка, %, не более	0,12	0,2	0,05
Основность (степень гидролиза), %	78,9	67,5	67
Показатель концентрации ионов водорода, (рН), не менее	3,4	2,5	2,5

Опыты пробного коагулирования воды проводились на установке с механическим перемешиванием (флокулятор лабораторный программируемый, «JarTester PB-900™») обеспечивающей имитацию режимов, соответствующих условиям технологической очистки воды.

Лабораторный флокулятор обеспечивает поддержание одинаковых условий перемешивания реагентов с обрабатываемой водой одновременно в шести стаканах вместимостью 2 дм<sup>3</sup> и, таким образом, позволяет точно оценить влияние на эффект очистки воды типа и дозы реагента.

Постановка опыта пробной коагуляции.

В стаканы (по 2 дм<sup>3</sup>) экспериментальной установки наливается исходная вода. Добавляется рассчитанный объем хлорной воды, соответствующий дозе первичного хлорирования. Содержимое перемешиваем вручную. Производится введение коагулянта, ручное перемешивание в течение 30 секунд. Затем осуществляется перемешивание со скоростью 50 об./мин в течение 30 секунд. Далее происходит перемешивание со скоростью 5 об./мин в течение 30 минут (формирование хлопьев) и отстаивание в течение 40 минут. Во время перемешивания и отстаивания визуально оценивается время появления хлопьев, их размер и толщина осадка. После окончания процесса пробного коагулирования производится отбор усредненных проб воды (вода после отстаивания) из стаканов экспериментальной установки на глубине 10 см (от верха). Температура исходной воды на момент отбора составляла 4,7 °С. Хлорпоглощаемость исходной воды – 2,23 мг/дм<sup>3</sup>. Эффективность осветления в отобранной пробе воды оценивается по мутности, цветности, рН, перманганатной окисляемости, остаточному алюминию, численности и биомассе фитопланктона. Применяемые методы контроля представлены в таблице 2.

Таблица 2. - Методы контроля [3-9]

Параметр	Наименование документа
Температура, °С	руководство по хим. анализу поверхн. вод под ред. А. Д. Семенова
Мутность, мг/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 3351-74
рН	СТБ ISO 10523-2009
Цветность, градус	ГОСТ 31868-2012
Остаточный Al, мг/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 18165
Окисляемость перманганатная, мгО/дм <sup>3</sup>	“Методы исследования качества воды водоемов” под ред. Шицковой А.П.
Фитопланктон клетки, кл/см <sup>3</sup> Биомасса, мг/дм <sup>3</sup>	Руководство по гидробиологическому мониторингу под ред В.А. Абакумова

Для оценки эффективности применения алюмосодержащих коагулянтов в процессе водоподготовки на очистной водопроводной станции при проведении пробного коагулирования воды были выбраны дозы коагулянта 7,5 мг/дм<sup>3</sup> (рабочая доза на момент проведения пробного коагулирования) и 5,0 мг/дм<sup>3</sup>. Доза гипохлорита натрия (ГПХН) для пробной коагуляции устанавливается равной средней дозе, фактически используемой в технологическом процессе за предыдущие 3-5 дней для первичного хлорирования. Данные о дозах химических реагентов, применяемых в ходе лабораторного эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Исходные данные используемых реагентов

№ пробы	Коагулянт			Доза ГПХН, мг/дм <sup>3</sup>
	наименование	основность, %	доза, мг/дм <sup>3</sup> по Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
1	AQUAMIX-BV	78,9	5,0	3,22
2	ОА-10	67,5		
3	Аква-Аурат 10	67,0		
4	AQUAMIX-BV	78,9	7,5	
5	ОА-10	67,5		
6	Аква-Аурат 10	67,0		

Размер хлопьев, наличие осадка фиксируется через 15, 30 минут после начала перемешивания и через 40 мин после отстаивания проб (таблица 4). Результаты лабораторных исследований по основным показателям качества осветленной воды представлены в таблице 5.

На основании данных лабораторных экспериментов определена эффективность очистки воды по основным показателям качества.

Мутность. При обработке воды высокоосновным коагулянтом (AQUAMIX-BV) с дозой коагулянта 7,5 мг/дм<sup>3</sup> наблюдается повышение мутности осветленной воды в сравнении с исходной. Это свидетельствует о том, что в ходе коагуляционной обработки были сформированы мельчайшие и мелкие хлопья, для осаждения которых требуется увеличение времени отстаивания, что в условиях технологического процесса не всегда предоставляется возможным.

Наибольшая эффективность очистки достигнута в пробах № 2 (48,25 %) и № 5 (55,26 %), в которых производилась обработка коагулянтом ОА-10 (основность 67,5 %).

Цветность. Эффективность очистки по показателю цветность во всех пробах примерно одинакова и находится на достаточно высоком уровне. Можно отметить лишь относительное снижение эффективности очистки в пробах № 1(AQUAMIX-BV) и № 3 (Аква-Аурат 10) при обработке воды дозой коагулянта равной 5,0 мг/дм<sup>3</sup>.

Остаточный алюминий. Наименьшее содержание остаточного алюминия достигнуто в пробах, обработанных коагулянтом марки AQUAMIX-BV, в среднем концентрация Al<sup>3+</sup> в данных пробах ниже чем в пробах, обработанных коагулянтом марки ОА-10 на 44,93 %, а Аква-Аурат 10 – на 50,66 %.

Перманганатная окисляемость. Согласно результатам лабораторного эксперимента, эффективность очистки по данному показателю качества воды достигает максимальных значений при дозе коагулянта 5,0 мг/дм<sup>3</sup> в пробе № 2 (ОА-10 – 36,61 %), при дозе коагулянта 7,5 мг/дм<sup>3</sup> - № 5(ОА-10 – 43,26 %) и № 6(Аква-Аурат 10 – 41,05 %). Отмечено значительное увеличение эффективности очистки при использовании коагулянта марки Аква-Аурат 10 при повышении дозы коагулянта с 5,0 до 7,5 мг/дм<sup>3</sup> (на 15,38 %).

Клетки фитопланктона. По данному показателю качества осветленной воды во всех пробах отмечается высокий эффект очистки, относительно низкий результат достигнут только в пробе № 1 (AQUAMIX-BV – 67,77 %), но при увеличении дозы коагулянта до 7,5 мг/дм<sup>3</sup> отмечается повышение эффективности на 25,26 % и достижение соразмерного эффекта очистки в сравнении с пробами воды, обработанными аналогичной дозой коагулянта.

Биомасса фитопланктона. При дозе коагулянта 5,0 мг/дм<sup>3</sup> наилучший эффект очистки достигнут в пробе № 2 (ОА-10), при дозе коагулянта 7,5 мг/дм<sup>3</sup> – высокие результаты достигнуты во всех образцах. Стоит отметить, что эффект очистки при обработке воды коагулянтом марки ОА-10 при дозе 5,0 мг/дм<sup>3</sup> соизмерим с эффектом очистки при дозе коагулянтов 7,5 мг/дм<sup>3</sup>.

Таблица 4. – Ход процесса коагуляции

Время появления хлопьев		Доза коагулянта, мг/дм <sup>3</sup> по Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
		5		7,5		7,5	
		Номер пробы					
1	2	3	4	5	6		
АQUAMIX-BV 30 мин 00 с	ОА-10 18 мин 46 с	Аква-Аурат 10 28 мин 10 с	АQUAMIX-BV 17 мин 15 с	ОА-10 14 мин 55 с	Аква-Аурат 10 14 мин 20 с		
15 мин	-	-	мельчайшие/ осадоk 0 мм	мельчайшие/ осадоk 0 мм	мельчайшие/ осадоk 0 мм		
перемешивание	мельчайшие/ мелькие/ осадоk 0 мм	мельчайшие, мелькие/ осадоk 0 мм	мелькие, средние/ осадоk 1 мм	мелькие, сред- ние/ осадоk 1 мм	мелькие, сред- ние/ осадоk 1 мм		
30 мин	мельчайшие/ осадоk 0 мм	мельчайшие/ мелькие/ осадоk 0 мм	мелькие / осадоk 1 мм	мельчайшие/ осадоk 2 мм	мелькие / осадоk 2 мм		
отстаивание	мелькие/ осадоk 1 мм	мельчайшие/ осадоk 1 мм	мелькие / осадоk 1 мм	мельчайшие/ осадоk 2 мм	мельчайшие/ осадоk 3 мм		
40 мин	мелькие/ осадоk 1 мм	мельчайшие/ осадоk 1 мм	мелькие / осадоk 1 мм	мельчайшие/ осадоk 2 мм	мельчайшие/ осадоk 3 мм		

Таблица 5. – Результаты пробного коагулирования воды

№	Качественный показатель осветленной воды	Доза коагулянта, мг/дм <sup>3</sup> по Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						Качественный показатель исходной воды
		5		7,5		7,5		
		Номер пробы						
		АQUAMIX-BV 30 мин 00 с	ОА-10 18 мин 46 с	Аква-Аурат 10 28 мин 10 с	АQUAMIX-BV 17 мин 15 с	ОА-10 14 мин 55 с	Аква-Аурат 10 14 мин 20 с	
1	Время появления хлопьев	7,9	7,8	7,7	7,9	7,9	7,6	8
2	pH, ед. pH	7,6	7,2	7,5	7,4	7,4	7,6	7,6
	pH при T °C	1,46	0,59	1,12	0,83	0,51	0,70	1,14
3	Мутность, мг/дм <sup>3</sup>	-28,07	48,25	1,75	27,19	55,26	38,60	-
4	Эффективность очистки, %	10	8	9	8	8	8	22
5	Цветность, град	54,55	63,64	59,09	63,64	63,64	63,64	-
6	Эффективность очистки, %	0,665	0,775	0,905	0,47	0,87	0,805	-
7	Остаточный Al <sup>3+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	4,73	4,00	4,69	4,03	3,58	3,72	6,31
8	Перманганатная окисляемость, мг O/дм <sup>3</sup>	25,04	36,61	25,67	36,13	43,26	41,05	-
9	Эффективность очистки, %	15,16	266	703	328	219	31	4703
10	Клетки фитопланктона, кл/см <sup>3</sup>	67,77	94,34	85,05	93,03	95,34	99,34	-
11	Эффективность очистки, %	0,17	0,05	0,2	0,03	0,04	0,01	0,81
12	Биомасса фитопланктона, мг/дм <sup>3</sup>	79,01	93,83	75,31	96,30	95,06	98,77	-
13	Эффективность очистки, %	1/2 хлорный	1/2 хлорный	1/2 хлорный	1/2 хлорный	1/2 хлорный	1/2 хлорный	1/1 земл- стый
14	Запах, балл							
15	20°С/60°С Характер							

**Вывод.** В результате проведения лабораторного эксперимента установлено:

- в данном в период года, характеризующийся температурой исходной воды до 6 °С наиболее целесообразно использование среднеосновных алюмосодержащих коагулянтов (ОА-10 с основностью 67,5 % и Аква-Аурат 10 с основностью 67 %). Применении высокоосновных коагулянтов в данный период, учитывая относительно низкие значения показателей качества исходной воды, влечет за собой увеличение дозы коагулянта, что существенно удорожает процесс водоподготовки;

- при относительно равной основности коагулянтов марки ОА-10 и Аква-Аурат 10 эффективность очистки по основным показателям качества имеет существенные отличия (таблица 6). Сравнение эффективности очистки между данными марками коагулянтов производилось относительно проб № 2 и № 5 (эффективность очистки коагулянтом марки ОА-10 при дозе 5,0 мг/дм<sup>3</sup> по показателю мутность выше на 89,83 % при обработке воды с той же дозой коагулянтом марки Аква-Аурат 10).

- с точки зрения выбора оптимальной дозы коагулянта по результатам пробного коагулирования воды наилучший результат достигнут при обработке исходной воды коагулянтом марки ОА-10 с дозой 5,0 мг/дм<sup>3</sup>. Значения показателей качества воды, достигнутые при проведении лабораторного эксперимента, обеспечивают получение осветленной воды высокого качества. Применение меньшей дозы реагента влечет за собой снижение расхода товарного продукта, а как следствие, снижение затрат на водоподготовку.

Таблица 6. – Сравнение результатов эффективности очистки

Доза коагулянта, мг/дм <sup>3</sup> по Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Мутность, мг/дм <sup>3</sup>	Эффек-сть, %	Цветность, град	Эффек-сть, %	Остаточный Al <sup>3+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Эффек-сть, %	Окисляемость, мг О/дм <sup>3</sup>	Эффек-сть, %	Клетки фито-планктона, кл/см <sup>3</sup>	Эффек-сть, %	Биомасса фито-планктона, мг/дм <sup>3</sup>	Эффек-сть, %
5	ОА-10	0,59	89,8	8,00	12,5	0,78	16,8	4,00	17,2	266,00	164,3	0,05	300
	Аква-Аурат 10	1,12		9,00		0,91		4,69		703,00		0,20	
7,5	ОА-10	0,51	37,2	8,00	0	0,87	-8,1	3,58	3,9	219,00	-85,8	0,04	-75
	Аква-Аурат 10	0,70		8,00		0,81		3,72		31,00		0,01	

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Санитарные правила и нормы Республики Беларусь СанПиН 10-124 РБ 99 «Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарные правила и нормы».

2. Зыгмант, А. В. Основные факторы, определяющие эффективность действия неорганических коагулянтов при различных температурах НИИ физико-химических проблем / Зыгмант, А. В., Савицкая, Т. А., Цыганкова, Н. Г., Гриншпан, Д. Д. // Свиридовские чтения : сб. ст. Вып. 11 / редкол. : О. А. Ивашкевич (пред.) [и др.]. - Минск: БГУ, 2015. - С. 41-50.
3. Семенов, А.Д. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. - Л., Гидрометеиздат, 1977. - 541с.
4. Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности (с Изменением № 1): ГОСТ 3351-74. - Взамен ГОСТ 3351-46; введ. РБ 24.05.74. – Москва: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР, 1974. – 8 с.
5. Качество воды. Определение pH: СТБ ISO 10523-2009. – Введ. 01.07.2010. – Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2009. – 16 с.
6. Вода. Методы определения цветности (с редакцией от 01.02.2019): ГОСТ 31868-2012. – Введ. 01.01.2014. - М.: Стандартиформ, 2019. – 12 с.
7. Вода. Методы определения содержания алюминия (с редакцией от 01.09.2019): ГОСТ 18165-2014. - Взамен ГОСТ 18165-89; введ. 01.01.2016. - М.: Стандартиформ, 2019. – 27 с.
8. Новиков, Ю.В. Методы исследования качества воды водоемов / Ю.В. Новиков, К.О. Ласточкина, З.Н. Болдина; Под ред. А.П. Шицковой. - 2-е изд. - М.: Медицина, 1990. – 399 [1] с.
9. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Ин-т глобал. климата и экологии; [Подгот. В. А. Абакумов и др.]; Под ред. В. А. Абакумова. - СПб.: Гидрометеиздат, 1992. - 317, [1] с.