

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Институт «Архитектурно-строительный»
Кафедра «Градостроительство, инженерные сети и системы»

ВКР МАГИСТРА
ПРОВЕРЕНА

Рецензент

Китаева С.В. начальник ПТО
СП ОСВ МУП ПОВВ г. Челябинска

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

Д.В. Ульрих

_____ 2017 г.

Исследование свойств осадков очистных сооружений водопровода
и методов их кондиционирования

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА
ЮУрГУ–08.04.01.2017.305-04.165 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР
магистра

Е.В. Николаенко

_____ 2017 г.

Автор ВКР
магистр группы АС-260

М.Ю. Белканова

_____ 2017 г.

Нормоконтролер

Е.В. Николаенко

_____ 2017 г.

Челябинск
2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОСАДКА НА ОСВ Г. ЧЕЛЯБИНСКА	
1.1 Краткая характеристика очистных сооружений водопровода	10
1.2 Качество воды в Шершневском водохранилище.....	11
1.3 Основные реагенты, оказывающие влияние на состав осадка.....	14
1.4 Типы сооружений, в которых образуется осадок	16
1.4.1 Двухъярусные отстойники блока № 1	17
1.4.2 Горизонтальные отстойники блока № 2	19
1.4.3 Горизонтальные отстойники блока № 3	21
1.5 Объем осадка, образующегося на ОСВ г. Челябинска.....	23
1.6 Факторы, лимитирующие сброс водопроводных осадков в канализацию.....	25
1.7 Задачи исследования.....	29
2 СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОСАДКА ОСВ	
2.1 Особенности образования осадка ОСВ и его основные свойства ...	30
2.2 Управление осадками ОСВ	41
2.2.1 Методы кондиционирования осадка перед обезвоживанием ...	44
2.2.1.1 Реагентная обработка	45
2.2.1.2 Замораживание-оттаивание	49
2.2.2 Технологии механического обезвоживания.....	50
2.2.3 Направления утилизации.....	57
3 ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ИСХОДНОГО ОСАДКА ОСВ Г. ЧЕЛЯБИНСКА	
3.1 Состав осадков	
3.1.1 Влажность и содержание сухого вещества	60
3.1.2 Элементный состав осадка.....	62
3.1.3 Гранулометрический состав осадка	64
3.2 Водоотдающая способность.....	65
3.2.1 Удельное сопротивление фильтрации	65
3.2.2 Термолиз	69
3.3 Старение	74
3.4 Выводы	75
4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОСАДКОВ ОСВ....	77
4.1 Замораживание – оттаивание	77
4.1.1 Водоотдающая способность и гранулометрический	

состав осадков после оттаивания	77
4.1.2 Термолиз осадков после оттаивания.....	79
4.2 Обработка флокулянтами, флокулянтами и присадочным материалом.....	82
4.2.1 Водоотдающая способность кондиционированных осадков ..	84
4.2.2 Термолиз осадков, обработанных флокулянтами, флокулянтами и вермикулитом.....	90
4.3 Выводы	94
5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ ОСВ	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	99

РЕФЕРАТ

Белканова М.Ю. Осадки очистных сооружений водопровода, обезвоживание, замораживание-оттаивание, флокулянт, присадочный материал, удельное сопротивление фильтрации. – Челябинск: ЮУрГУ, АС-260, 2017. – 101 с., 35 ил., 31 табл., библиогр. список – 36 наим.

Объектом исследования являются осадки очистных сооружений водопровода г. Челябинска.

Цель работы – изучить возможность перехода на технологию механического обезвоживания осадков очистных сооружений водопровода г. Челябинска.

В первом разделе рассмотрены условия образования осадка очистных сооружений водопровода. Приведена динамика изменения показателей качества источника водоснабжения, существенно влияющих на состав и свойства осадков. Рассмотрены типы сооружений ОСВ, в которых образуется осадок, выявлены особенности их работы. Выявлены недостатки существующей системы сброса осадков сооружений водопровода в систему канализации и поставлены задачи исследования.

Второй раздел посвящен изучению состояния вопроса обработки осадков сооружений водопровода, рассмотрены варианты кондиционирования, указаны современные направления утилизации обезвоженных осадков.

В третьем разделе представлены результаты исследований состава и свойств исходного осадка ОСВ г. Челябинска. Установлен элементный, гранулометрический состав осадков, отобранных в различные периоды года, определена их влажность и водоотдающая способность. Значения удельного сопротивления фильтрации осадков показали необходимость их кондиционирования перед механическим обезвоживанием.

В четвертом разделе приведены результаты кондиционирования осадка следующими методами: замораживание с последующим оттаиванием; реагентная обработка флокулянтом на основе полиакриламида и совместная обработка флокулянтом и присадочным материалом вермикулитом. С помощью термоаналитических кривых, гранулометрического анализа показано перераспределение связанной и свободной воды в процессе обработки осадков указанными методами.

В пятом разделе даны краткие рекомендации по технологии обработки осадка ОСВ г. Челябинска с использованием реагентного метода.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что подготовка воды для хозяйственно-питьевых целей приводит к образованию значительных объемов осадков. По приблизительным оценкам ежедневно в мире образуется около 10 000 тонн осадков станций водоподготовки (по сухому веществу), и эта величина растет с увеличением водопотребления. Экологические требования к размещению таких осадков постоянно ужесточаются.

Вместе с тем, осадки водопроводных станций обладают значительным потенциалом как продукт, пригодный для повторного использования в производстве огнеупорной керамики, строительных материалов, в сельском хозяйстве, лесоводстве и т.д.

В настоящее время отсутствуют унифицированные методы обработки осадков очистных сооружений водопровода, поскольку свойства осадков определяются качеством воды в водоисточнике и технологией водоподготовки. Кроме того, водопроводные осадки имеют низкую водоотдающую способность в сочетании с высокой влажностью, достигающей 98–99 %, что затрудняет их механическое обезвоживание.

Очистные сооружения водопровода г. Челябинска ежегодно производят около 2 млн кубометров осадков, которые в настоящее время перекачиваются на городские очистные сооружения канализации и обрабатываются совместно со сточными водами.

Актуальность работы заключается в необходимости научного и комплексного подхода в создании технологий обработки осадков водопроводных станций.

Целью работы является изучение возможности перехода очистных сооружений водопровода г. Челябинска на технологию механического обезвоживания осадков.

Задачи исследования:

1. Выявить недостатки существующей схемы сброса водопроводных осадков ОСВ г. Челябинска в городскую систему канализации.
2. Изучить состав осадков ОСВ и выявить факторы, влияющие на их свойства.
3. Изучить методы кондиционирования осадка ОСВ.
4. Дать рекомендации по технологии обработки осадка и направлениям его дальнейшей утилизации.

1 УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОСАДКА НА ОСВ Г. ЧЕЛЯБИНСКА

1.1 Краткая характеристика очистных сооружений водопровода

Очистные сооружения водопровода г. Челябинска предназначены для подготовки воды питьевого качества централизованной системы водоснабжения городов Челябинска, Коркино, Копейска и Еманжелинска. Проектная производительность очистных сооружений водопровода составляет 975 000 м³/сут.

Забор воды осуществляется из Шершневого водохранилища, которое расположено в бассейне реки Миасс. Забор и предварительная очистка от взвеси и плавающих загрязнений требуемого количества воды производится двумя водозаборами берегового типа с совмещенными насосными станциями первого подъема. Также в насосной станции первого подъема осуществляется подщелачивание воды и обработка перманганатом калия при необходимости.

Далее вода поступает в камеру переключений, где установлены коммерческие приборы учета подаваемой воды и откуда вода подается на все блоки водоподготовки.

Очистные сооружения представлены двумя схемами очистки: по принципу двухступенчатой схемы очистки работают блоки № 1, 2 и 3, по одноступенчатой схеме – блоки № 4 и 5.

На блоки № 1, 2 и 3 исходная вода подается через блок микрофильтров, где в быстросействующий трубчатый смеситель плоскопараллельного типа подается коагулянт. В этом же здании находится точка ввода первичного хлора. Далее вода подается в камеры хлопьеобразования. Перед камерами хлопьеобразования вводится флокулянт.

При одноступенчатой схеме очистки исходная вода поступает из КП-1 на микрофильтры, расположенные в зданиях блоков № 4 и 5. После микрофильтров вода направляется в контактную камеру, куда вводится хлор. Коагулянт подается в трубопровод при помощи быстросействующего смесителя. Во входной коллектор перед контактными осветлителями вводится флокулянт.

Промывка фильтров всех блоков осуществляется промывными насосами с забором воды на промывку из резервуаров чистой воды.

Для обеззараживания воды используют хлорную воду.

Вторичное хлорирование осуществляется перед резервуарами чистой воды.

Из резервуаров чистой воды вода подается в сеть города тремя насосными станциями второго подъема.

От очистных сооружений водопровода вода подается в город по семи главным водоводам.

Для приема промывных вод и осадков существуют две насосные станции. Промывные воды образуются от промывки фильтров, микрофильтров, контактных осветлителей и баков реагентного хозяйства. Осадки образуются при продувке, сбросе и промывке отстойников.

Промывная вода, поступающая на насосную станцию № 37, сбрасывается в Шершневское водохранилище по выпускам, либо возвращается в «голову» очистных сооружений для повторной обработки. Осадки перекачиваются на канализационную насосную станцию № 16, откуда совместно с другими стоками направляются на очистные сооружения канализации г. Челябинска.

Насосная станция № 38 работает совместно с блоками № 4 и 5, где осветленные (отстоянные) промывные воды перекачиваются в «голову» сооружений для повторной обработки.

1.2 Качество воды в Шершневском водохранилище

Состав и свойства осадка определяются в первую очередь качеством воды в водоисточнике [1]. Шершневское водохранилище относится к гидрокарбонатному классу, группе кальция. Вода в нем маломутная (1,5 – 40 мг/л), цветность от средней до высокой (18 – 120 град.). Для оценки качества воды в различные периоды 2016 года были собраны сведения о динамике изменения мутности, цветности и температуры в Шершневском водохранилище (рисунки 1, 2 и 3).

В 2016 году максимальное значение мутности – 33,6 мг/л – соответствует периоду паводка, в летние месяцы мутность не превышает 14 мг/л, в зимний период – менее 4 мг/л. Цветность в паводок достигала 61 град., летом не превышала 25 град, а зимний период колебалась в интервале 10–20 град.

Температура воды в водохранилище с ноября по март включительно составляла 1 °С. С повышением температуры атмосферы наблюдался рост среднемесячных значений температуры очищаемой воды: с 8,6 °С в апреле до 23,44 °С в августе. В сентябре–октябре среднемесячные температуры воды снижались, достигнув в октябре 5,7 °С.

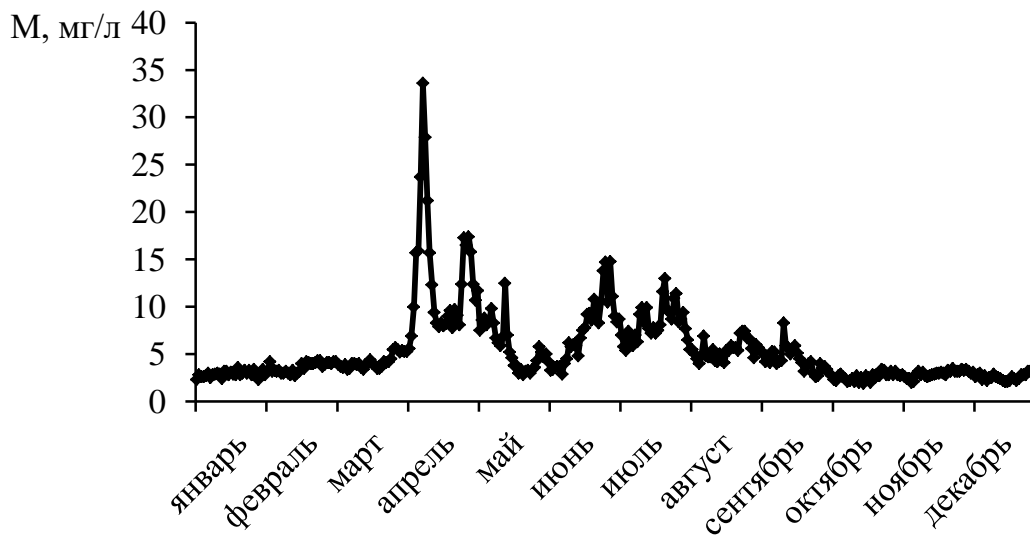


Рисунок 1 – Мутность воды Шершневого водохранилища, 2016 год

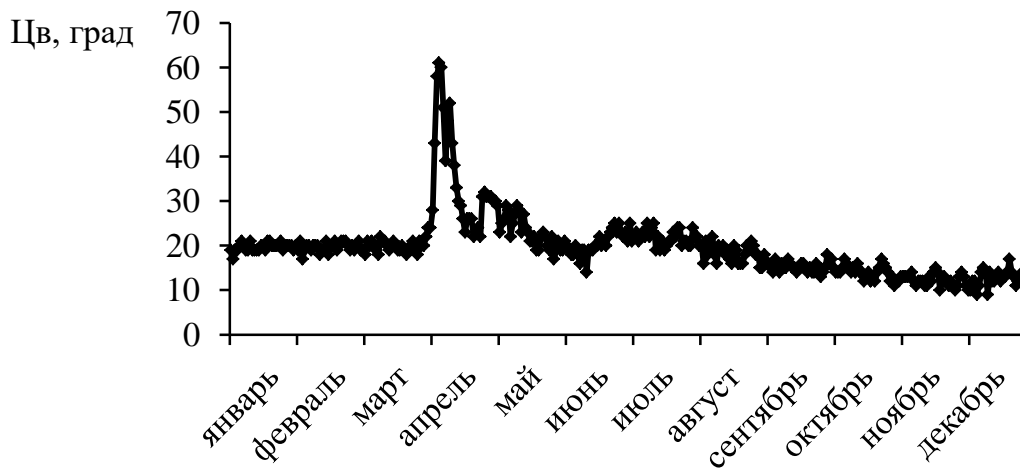


Рисунок 2 – Цветность воды Шершневого водохранилища, 2016 год

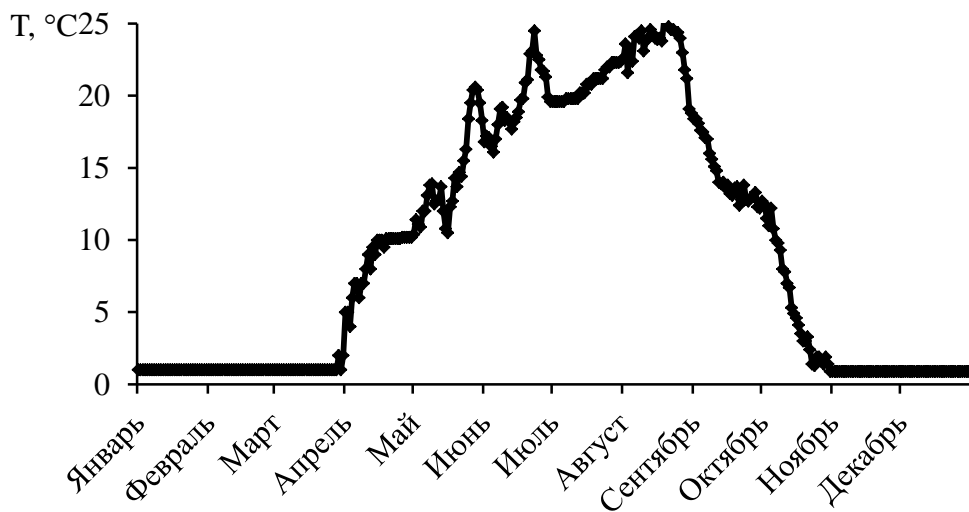


Рисунок 3 – Температура воды Шершневого водохранилища, 2016 год

На рисунке 4 представлена диаграмма, отражающая сезонную динамику численности фитопланктона за период с 2012 по 2016 год. По данным гидробиологов [2–3] доминирующее положение в фитопланктоне занимают синезеленые. За многолетний период наблюдений отмечаются устойчивые признаки эвтрофирования Шершневого водохранилища, в том числе: слабо выраженные пики диатомовых водорослей, ежегодные пики цветения за счёт синезеленых. Указанные авторы также отмечают увеличение встречаемости эвритермных видов *Microcystis aeruginosa* и *Planktothrix agardhii*, усваивающих соответственно аммонийную и нитратную форму азота. Это указывает на значительное увеличение поступления в водохранилище легкоокисляемых органических веществ в течение всего года. Очевидно, что единственная причина этого явления – это поступление в водохранилище сточных вод, близких по составу к хозяйственно-бытовым.

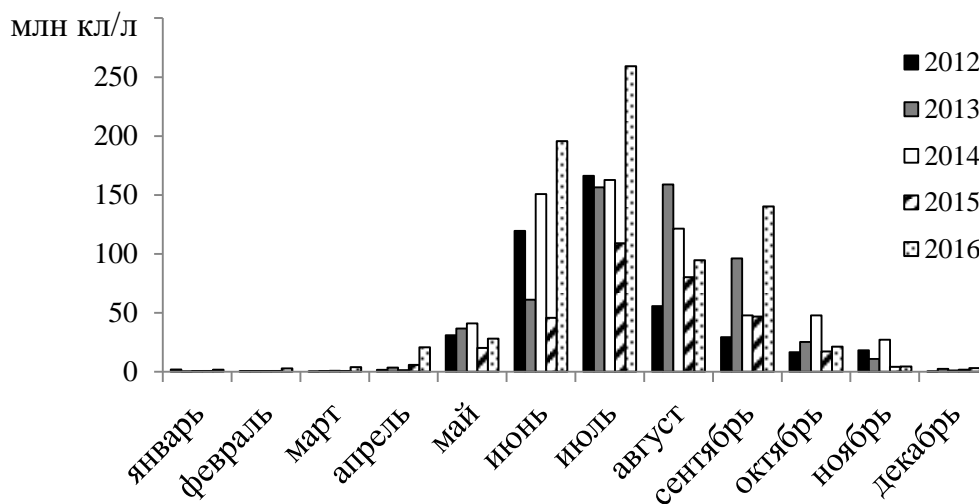


Рисунок 4 – Сезонная динамика численности фитопланктона в период с 2012 по 2016 гг

Усредненные значения мутности и цветности, температура и содержание планктона в периоды, предшествующие отбору осадков, представлены в таблице 4. Усреднение проводили по данным за месяц до отбора проб осадка. Более точно определить период формирования осадков не представляется возможным.

Анализ таблицы 4 показывает, что мутность и цветность воды в водохранилище незначительно изменяются по периодам года, в которые производился отбор осадков. Существенные изменения наблюдаются по температуре воды и содержанию клеток планктона.

Таблица 4 – Усредненное качество воды в водоисточнике в период формирования осадков

Дата отбора осадков	М, мг/л	Цв., град.	t, °С	фитопланктон, млн. кл/л		
				всего	синезеленые	диатомовые
март 2016	3,6	19,7	1	3,3	3,2	0,1
июнь 2016	4,3	19,7	10,5 – 18,5	111,9	100,5	11,4
октябрь–ноябрь 2016	3,9	14,2	12,7 – 1	21,1	17,4	3,7

Температурный фактор значительно влияет как на процесс формирования осадков, так и на интенсивность их обезвоживания, поскольку с ростом температуры динамическая вязкость воды существенно понижается.

В составе планктона круглогодично преобладают синезеленые, второй по значимости объект наблюдения гидробиологов – диатомовые водоросли (по сведениям технологов зеленые, эвгленовые и др. присутствуют в незначительном количестве). Численность и соотношение синезеленых и диатомовых меняются по сезонам года.

В зимний период образования осадка (отбор – март 2016) содержание планктона минимально, 97 % его составляют синезеленые. Следует ожидать минимального содержания органической составляющей в осадках.

В летний период (отбор – июнь 2016) наблюдается «цветение», вызванное массовым размножением синезеленых. В осадках следует ожидать высокого содержания органического вещества.

Наконец, в осенний период количество планктона уменьшается, синезеленые продолжают доминировать, но при этом до 18 % возрастает доля диатомовых водорослей.

1.3 Основные реагенты, оказывающие влияние на состав осадка

Режимы реагентной обработки воды в различные периоды года и виды применяемых реагентов устанавливаются на основе данных физико-химических, санитарно-бактериологических и технологических анализов, а также опыта водоподготовки.

На ОСВ г. Челябинска используются следующие реагенты: коагулянты (сульфат алюминия; оксихлорид алюминия), флокулянты (FL-4540; AN-905), перманганат калия, известь строительная [7]. На блоках № 1–3 для коагуляции используются сульфат алюминия и флокулянт AN-905. Технические и технологические характеристики используемых реагентов представлены в таблице 5.

Введение коагулянтов приводит к агрегации взвешенных частиц за счет нейтрализации заряда и химического связывания. В результате применения коагулянтов происходит дестабилизация коллоидной суспензии и образование микрохлопьев.

Предварительная обработка воды такими окислителями, как перманганат калия, хлор повышает эффективность коагуляции. Это объясняется тем, что хлор разрушает органические соединения при предварительном хлорировании воды (перед введением коагулянта). Количество поляризованных групп уменьшается за счет окисления отрицательно заряженных ионов, т.е. частицы становятся более «нейтральными», высота барьера отталкивания снижается.

Твердый коагулянт $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (I сорт по Al_2O_3) используется круглогодично. Это вещество 2-го класса опасности, содержание его в питьевой воде не должно превышать 0,2 мг/л [8].

К флокулянтам относятся неорганические или органические высокомолекулярные соединения (полимеры), способные удерживать на активных центрах своих макромолекул по несколько загрязняющих воду коллоидных частиц. Большая молекулярная масса флокулянтов способствует образованию мостиков между микрохлопьями и формированию макрохлопьев (флокул). Содержание флокулянта в питьевой воде не более 2 мг/л. Флокулянты используются для интенсификации процессов коагуляции, преимущественно в период паводка и летнего «цветения».

Рабочие дозы реагентов подбираются методом пробного коагулирования (флокулирования) в лаборатории технологического анализа.

Известь используется только в паводок при дефиците щелочного запаса. Продолжительность использования от 10 до 30 дней. В период 2016 года известь в паводок не применялась.

Перманганат калия вводится по необходимости в следующие периоды: в паводок; в период цветения при появлении у чистой воды запаха и привкуса и при повышении окисляемости чистой воды до значений, превышающих 5 мг/л. Дозы по перманганату калия составляют 0,1 мг/л (по Mn).

Таблица 5 – Основные характеристики реагентов водоподготовки блоков № 1–3

реагент	ГОСТ	марка, сорт	активное вещество	содержание активного вещества, %	рабочие дозы, мг/л
алюминий сернокислый очищенный технический	ГОСТ 12966-85	высший 1 сорт 2 сорт	Al_2O_3	$\leq 16,3$ $\leq 15,0$ $\leq 14,0$	4–50 по $Al_2(SO_4)_3$
флокулянт AN-905	–	–	полиакриламид	90	0,05–0,20
гашеная и негашеная воздушная известь	ГОСТ 91-79-77	1 сорт 2 сорт 3 сорт	$CaO + MgO$	90 80 70 (на сухой продукт)	до 5 мг/л по CaO
перманганат калия	ГОСТ 5777-71	1 сорт 2 сорт	$KMnO_4$	99,0 98,0	0,05 – 1,0
хлор жидкий	ГОСТ 6718-86	-	Cl_2	99,5	Первичный хлор: 5–6; Вторичный хлор: 1,2–1,3

Хлорирование воды производится круглогодично с целью окисления органических примесей воды (первичное хлорирование) и для обеззараживания (вторичное хлорирование). В чистой воде обеспечиваются следующие концентрации: остаточный свободный хлор – 0,3–0,5 мг/л; остаточный связанный – 0,8–1,2 мг/л.

1.4 Типы сооружений, в которых образуется осадок

На очистных сооружениях водопровода осадки (шламовые воды) образуются на блоках № 1, 2 и 3 при реализации двухступенчатой схемы очистки воды отстойники – скорые фильтры.

Осадки формируются в горизонтальных и двухъярусных отстойниках [7] и сбрасываются при продувке и полном опорожнении отстойников.

Продувка осуществляется в течение 15 мин с периодичностью 1 раз в 3–4 дня в летний период и 1 раз в 7–10 дней в зимний период по графику. Сброс отстойников с промывкой осуществляется в плановом режиме по периодам года:

- 1) перед паводком;
- 2) в период летнего «цветения» воды в водохранилище.

1.4.1 Двухъярусные отстойники блока №1

На блоке №1 в настоящее время работают три очереди с общей производительностью 150 000 м³/сут. В каждой очереди имеется по три камеры хлопьеобразования вертикального типа размером в плане 9,0х4,5 м, высотой 5,6 м.

На входе в распределительный канал перед камерами хлопьеобразования находятся точки ввода флокулянта.

Блок №1 имеет девять двухъярусных отстойников горизонтального типа, по три в каждой очереди. Отстойник представляет собой железобетонный прямоугольный резервуар. Технологические параметры работы отстойника указаны в таблице 6, а его конструкция показана на рисунке 5.

Известно, что отстаивание воды в горизонтальных отстойниках неоднородно по вертикали. Можно выделить две основные зоны: первая – зона осаждения, вторая – зона накопления и уплотнения осадка.

Зону осаждения называют также зоной свободного осаждения, так как в ней отдельные частицы и их агрегаты подчиняются законам свободного падения под действием силы тяжести. Сфлокулированные частицы выпадают в осадок со скоростью, постоянной по высоте зоны. Теоретически в верхней части зоны свободного осаждения плотность системы практически равна плотности жидкости, поступающей на отстаивание. В нижней части зоны осаждения сверху вниз плотность нарастает. С повышением концентрации сфлокулированных частиц при отстаивании взаимодействием между ними уже нельзя пренебрегать – режим осаждения переходит из свободного в стесненный. Скорость стесненного осаждения хлопьев меньше скорости свободного осаждения. В результате вначале этого процесса эффективность отстаивания повышается, однако, по превышении некоторой критической концентрации, процесс переходит в стадию замедленного отстаивания. Скорость осаждения резко падает.

Двухъярусный отстойник отличается увеличенной вдвое площадью отстаивания по сравнению одноярусным отстойником тех же размеров в

плане. Особенностью работы двухъярусного отстойника является также то, что очищаемая вода из камер хлопьеобразования поступает на нижний этаж отстойника, проходит по нему в горизонтальном направлении, у противоположной торцевой стены отстойника поднимается на верхний этаж и движется в обратном направлении. Затем через водосливную стенку переливается в сборный канал и отводится на фильтры. Таким образом, зона осаждения и зона накопления (и сгущения) осадка в двухъярусном отстойнике разделены. Нижний ярус двухъярусного отстойника представляет собой конструктивно выделенную зону накопления осадка. В верхнем ярусе создаются благоприятные условия для формирования зоны свободного осаждения, в верхней части которой образуется слой осветленной воды.

Дополнительный эффект осветления двухъярусных отстойников обусловлен образованием в зоне поворота потока воды взвешенного слоя хлопьев коагулированной взвеси [9]. В таких условиях реализуется не объемное, а контактное коагулирование, что улучшает гидравлические условия очистки и интенсифицирует хлопьеобразование за счет каталитического влияния ранее сформированной взвеси. Особенно актуальна такого рода интенсификация в случае низкой мутности очищаемой воды.

Для удаления осадка из отстойников применяют их сброс, поскольку опыт эксплуатации показал неэффективность их продувки. Период работы перед сбросом составляет от 5 в летний период до 15 суток в зимний период года.

Таблица 6 – Технологические параметры двухъярусных отстойников блока № 1

Конструктивные особенности	Размер, м	Технологический режим		
		Скорость движения воды, мм/с	Время пребывания, мин	Эффект осветления, %
Общая длина яруса	32	0,25–0,30	60–70	40–60
Длина отстойной зоны	30			
Общий путь движения воды	60			
Высота яруса	2,8			
Общая высота	5,6			
Ширина отстойника	9			
Объем отстойника	≈1500			

Контроль эффективности осветления воды в отстойнике ведут с помощью регулярных отборов воды на выходе из отстойника по значениям цветности и мутности. Отбор производят с помощью батометров.

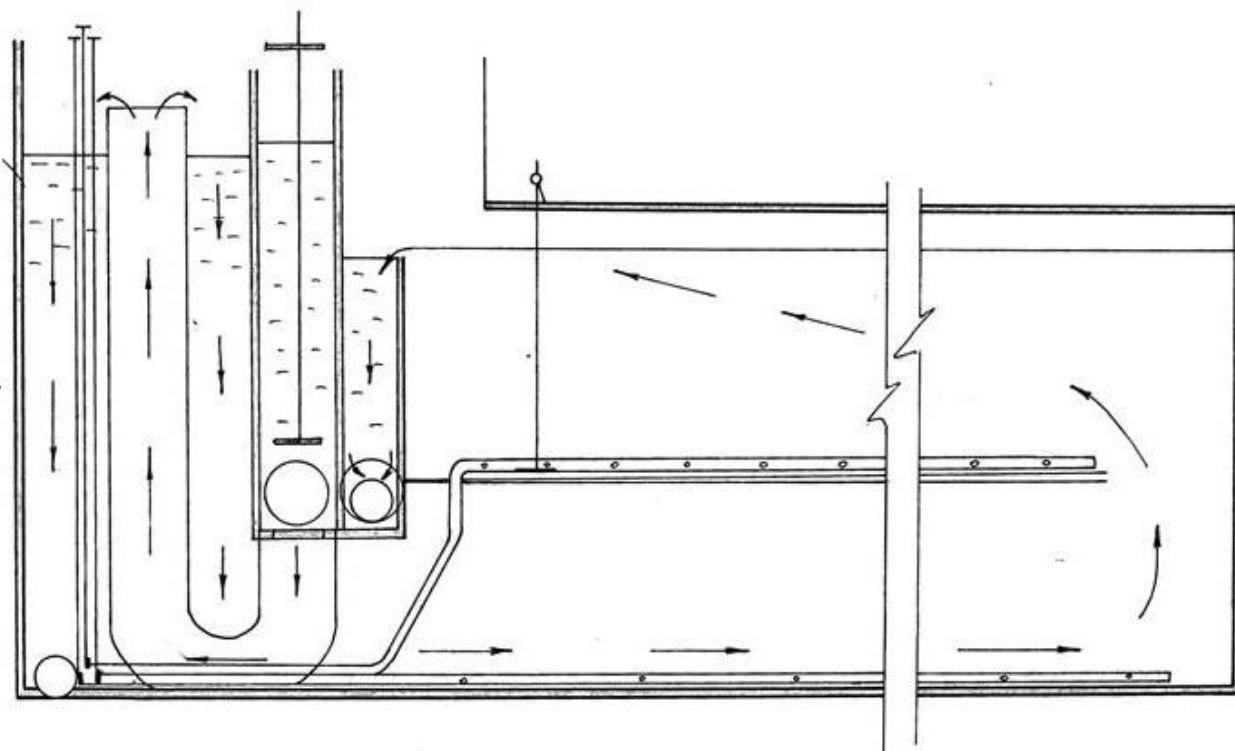


Рисунок 5 – Схема конструкции двухъярусного отстойника горизонтального типа [7]

1.4.2 Горизонтальные отстойники блока № 2

В состав блока № 2 входят 20 горизонтальных односекционных отстойников и 10 скорых фильтров. Производительность блока – 200 000 м³/сут.

Вода из водохранилища проходит через блок микрофильтров, где подается коагулянт и первичный хлор. Далее по водоводам осуществляется подача воды в камеры хлопьеобразования блока № 2. Перед камерами хлопьеобразования с помощью быстродействующих смесителей вводится флокулянт.

Камеры хлопьеобразования вихревого типа совмещены с горизонтальными отстойниками. Каждая камера представляет собой железобетонный резервуар прямоугольный в плане с размером 6,0х3,6 м. Нижняя часть, размером 6,0х1,5 м, выполнена пирамидальной.

После камер хлопьеобразования вода поступает в одноярусные горизонтальные отстойники блока № 2. Каждый из отстойников представляет собой железобетонный резервуар, прямоугольный в плане, с размером 50,0х6,0 м, высотой от 4,7 до 5,2 м. Объем отстойника – 1500 м³. Дно отстойника имеет уклон 0,01 в сторону камеры хлопьеобразования. Для удаления осадка из отстойников применяют их продувку. Период работы

перед сбросом составляет 5 – 15 суток. Технологические параметры отстойников указаны в таблице 7.

Таблица 7 – Технологические параметры одноярусных отстойников блока № 2

Конструктивные особенности	Размер, м	Технологический режим		
		Скорость движения воды, мм/с	Время пребывания, мин	Эффект осветления, %
Длина	50	1,9–2,1	70–80	40–60
Ширина	6			
Высота	4,7–5,2			

Конструкция горизонтальных отстойников приведена на рисунке 6. Площадь отстаивания при такой конструкции составляет 300 м², в то время как для двухъярусных отстойников блока № 1 с учетом общей длины отстойной зоны эта величина достигает 540 м². Кроме того, в одноярусном горизонтальном отстойнике отсутствует выраженная граница между зонами осаждения и накопления осадка. Высота зоны накопления осадка ориентировочно составляет 3–3,5 м от низа сооружения.

Упрощенно считается, что сфлуктурированные частицы в отстойнике осаждаются так же, как и в неподвижном объеме воды. Последний перемещается в горизонтальном направлении со скоростью, равной скорости движения воды в отстойнике. На практике в жидкости, особенно в зоне входа потока, может возникать турбулентность за счет трудностей в реализации гидравлического распределения потока по вертикали, разницы локальных температур, возмущений, связанных с изменением состава поступающей воды [10]. Кроме того, формирование и накопление осадка снижает рабочую площадь сечения. В результате возникают конвекционные потоки, перемешивающие содержимое отстойника, размывающие зоны осветления, осаждения и накопления осадка. Конвективные потоки могут снижать эффективность осветления. В то же время, условия для накопления и уплотнения осадка в одноярусных отстойниках менее благоприятны по сравнению с двухъярусными.

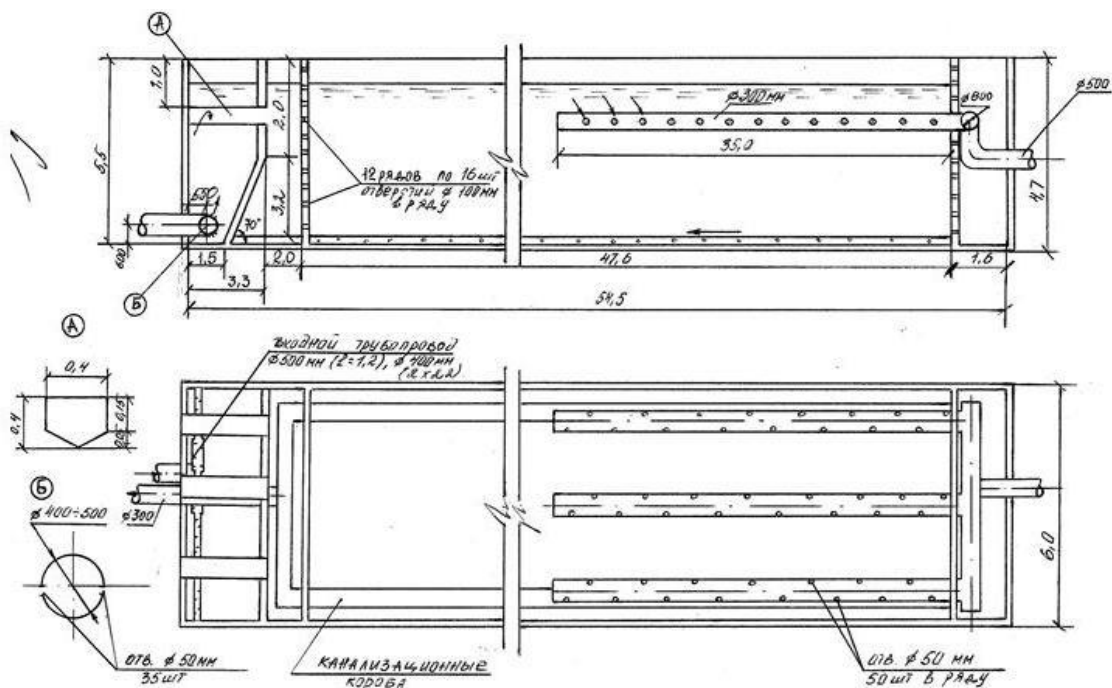


Рисунок 6 – Схема конструкции горизонтального отстойника блока №2

1.4.3 Горизонтальные отстойники блока № 3

Производительность блока № 3 составляет 250 000 м³/сут. В состав блока входят 10 двухкоридорных горизонтальных отстойников и 10 скорых фильтров. Исходная вода поступает на блок после микрофильтров, аналогично блокам № 1 и 2.

Камеры хлопьеобразования со взвешенным слоем осадка (10 шт) совмещены с горизонтальными отстойниками. Каждая камера представляет собой железобетонный резервуар, квадратный в плане, размером 12x12 м, высотой 5,1 м.

Горизонтальный отстойник – прямоугольный железобетонный резервуар с размерами в плане 12x76 м, высота 4,7-5,1 м. В каждой секции отстойника расположены два перфорированных короба для продувки и сброса отстойника, которые соединяются с канализационным коллектором. Конструктивные особенности и технологический режим отстойника приведены в таблице 8 и на рисунке 7.

Дно отстойника имеет продольный уклон $i=0,005$ в направлении, обратном движению воды и поперечные уклоны в каждом коридоре к коробам, для удаления осадка. Период работы отстойников перед сбросом 5–20 суток.

Конструктивно отстойники блока № 3 отличаются от отстойников второго блока. Длина отстойников блока № 3 в 1,5 раза больше; площадь

отстаивания значительно превышает аналогичный показатель для отстойников второго блока; наличие секционирования создает дополнительные преимущества и улучшает гидравлические условия отстаивания; расчетная скорость движения воды в отстойниках блока № 3 существенно ниже по сравнению с аналогичным значением для второго блока.

Таблица 8 – Технологические параметры горизонтальных двухсекционных отстойников блока № 3

Конструктивные особенности	Размер, м	Технологический режим		
		Скорость движения воды, мм/с	Время пребывания, мин	Эффект осветления, %
Длина	75	0,23–0,25	70–80	40–60
Ширина общая	12			
Ширина секции	5,65			
Высота	5,2			

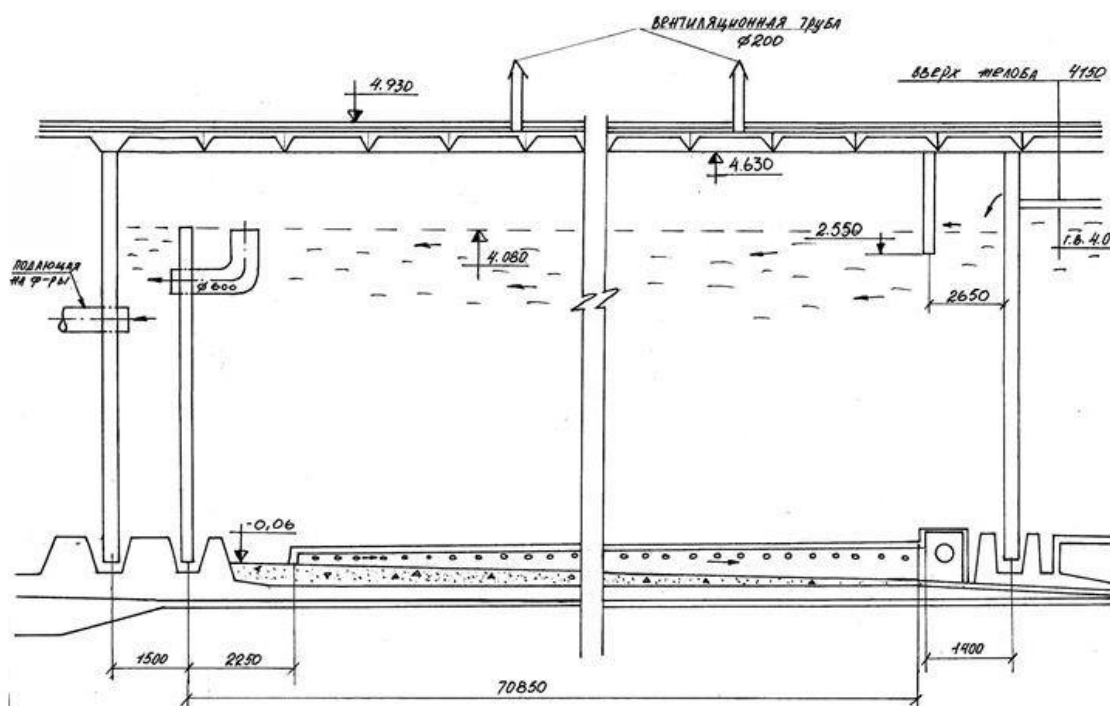


Рисунок 7 – Схема конструкции горизонтального двухсекционного отстойника блока № 3

Особенностью работы блока № 3 является возврат промывных вод скорых фильтров. Такой технологический прием позволяет повысить мутность очищаемой воды, создать дополнительные центры возникновения зародышей твердой фазы, ускорить коагуляцию примесей при очистке

маломутных вод, что весьма актуально для Шершневого водохранилища. Кроме того, повышение мутности резко усиливает действие флокулянтов, утяжеляет осадок [9]. Возврат промывных вод позволяет повысить полезную производительность ОСВ.

Возврат промывных вод оказывает влияние на формирование и свойства осадка: возможно образование более крупных фракций. В работе [11] показано, что с увеличением размера частиц увеличивается количество свободной воды, уменьшается количество связанной воды и, соответственно, снижается удельное сопротивление осадка. В связи с этим следует ожидать отличий в водоотойной способности осадков блока № 3 по сравнению с осадками блоков № 1 и 2.

1.4 Объем осадка, образующегося на ОСВ г. Челябинска

По технологическим данным за 2016 год, представленным в таблице 9, забор воды из Шершневого водохранилища составил 170,634 475 млн. м³. Из них около 6,7 % затрачивается на технологические и собственные нужды, остальной объем подается в сеть. В среднем ежесуточная подача воды в сеть составляет 435 тыс. м³. Технологические нужды очистных сооружений водопровода складываются из следующих расходов:

- промывка вращающихся сеток 1-го подъема
- промывка сеток микрофильтров
- опорожнение, промывка контактной камеры и сброс первого фильтрата (4, 5 блоки)
- промывка фильтров (1, 2, 3, 4, 5 блоки)
- выгрузка/загрузка материала скорых фильтров и контактных осветлителей
- продувка отстойников
- опорожнение отстойников и их промывка

Объемы осадков в год можно оценить по расходам воды при продувке и опорожнении отстойников (см. таблицу 9). Суммируя расходы по месяцам, получаем, что в год образуется 2060699 м³ осадков. Это составляет около 1,3 % от полезной производительности очистных сооружений, т.е. на каждый кубометр питьевой воды образуется около 13 литров осадков ОСВ.

Наибольшие объемы осадка в год образуются на блоке № 3 (57 % годового объема), на блоке № 2 – 32 % осадка и на блоке № 1 – 11 %.

1.6 Факторы, лимитирующие сброс водопроводных осадков в канализацию

Осадки водоочистных станций без какой-либо обработки представляют собой жидкие системы, плотность которых близка к плотности воды. Такие осадки без какой-либо обработки транспортируются на очистные сооружения канализации вывозным способом, по отдельно выделенной трубе или совместно с бытовой канализацией. Далее осадки обрабатываются совместно со сточными водами города. Такая схема реализуется в настоящее время в г. Челябинске. Рассмотрим достоинства и недостатки совместной обработки водопроводных и канализационных осадков.

При совместной обработке осадков используется остаточная флокулирующая способность реагентов, применяемых для водоподготовки; наблюдается разбавление потенциально опасных веществ в канализационном осадке. Содержащийся в водопроводном осадке гидроксид алюминия способствует осаждению фосфора бытовых сточных вод. В смеси со сброженными осадками сточных вод водопроводный осадок подвергается обезвоживанию, но при этом требуется повышенная доза флокулянта, приращение в пределах 0,5–1 кг/т сухого вещества [1]. Сброс осадка в канализацию и его обработка совместно с городскими сточными водами особенно эффективны для условий крупных городов [12–13].

Если на станции обработки сточных вод имеется цех механического обезвоживания, то на водопроводной станции необходимо лишь строительство резервуара усреднения и насосной станции. Обычно водопроводный осадок характеризуется высокой биологической стабильностью органического вещества. В большей степени загниванию с выделением гнилостных запахов подвержен осадок, полученный в период цветения исходной поверхностной воды. Благодаря биостабильности органического вещества, прочной связи азота в гумусе, а фосфора в алюминатах, водопроводный осадок не создает дополнительной нагрузки по БПК, N и P на сооружения биологической очистки сточной воды.

В то же время сброс водопроводных осадков в городскую канализацию требует высоких затрат на его транспортирование и приводит к нарушению режима работы очистных сооружений: к увеличению гидравлической нагрузки, поступлению несвойственных веществ и др. [14].

Перед направлением водопроводных осадков на станцию очистки сточных вод необходимо выяснить следующие обстоятельства: путь прохождения осадка по канализационной сети и гидравлическую нагрузку на

сеть; влияние осадка на процесс обработки сточных вод и на степень очистки; возможность более равномерной перекачки осадка в канализационную сеть; возможность заиливания канализационной сети.

Показано, что одним из лимитирующих факторов использования совместной обработки осадков является расстояние между очистными сооружениями водопровода и канализации – экономически выгодным является расстояние менее 5–6 км [15].

При сбросе водопроводных осадков в канализацию количество образующихся на станции очистки сточных вод осадков обычно возрастает на 2–3%, максимально – на 10–20%.

Прием водопроводного осадка в период паводка оказывает существенное воздействие на работу очистных сооружений канализации, т.к. в результате повышения мутности поверхностных вод количество водопроводного осадка возрастает примерно в два раза. Поскольку в этот же период поступление осадкообразующих загрязнений в канализационную сеть с территории города увеличивается, то суммарное действие двух паводковых факторов приводит к увеличению расхода смеси сырого осадка и избыточного ила на 20–30% по сравнению с межпаводковым периодом [12]. Для решения этой проблемы необходимо аппаратное сгущение избыточного активного ила.

Следует учитывать, что осадок высокоцветных вод отличается плохими седиментационными свойствами, что может оказывать отрицательное влияние на эффективность механической очистки сточной воды, влажность сырого осадка, прирост активного ила, водоотдающие свойства сброженного осадка.

В работе [16] показаны следующие недостатки сброса в канализацию осадков ОСВ:

- Водопроводный осадок оказывает существенное влияние на кинетику уплотнения ила в первичных отстойниках: снижение скорости осаждения и уплотнения взвешенных частиц приводит к увеличению уровня осадка в первичных отстойниках, увеличивает риск вымывания ранее осевших частиц в осветленную воду.

- Требуется увеличение объема и продолжительности откачки сырого осадка для сохранения регламентной эффективности задержания взвешенных веществ, ведет к повышению влажности сырого осадка в среднем на один процент.

- Значимого снижения фосфатов в осветленной и очищенной сточной воде не зарегистрировано, но при высоких нагрузках водопроводного осадка возможно снижение показателей процесса нитрификации.

- Объемы сырого осадка и уплотненного избыточного активного ила возрастают непропорционально количественному сбросу сухого вещества водопроводного осадка. В результате приема 50-60 т/сут (по сухому веществу) осадка водопроводных станций, очищающих воду с малой цветностью и высокой мутностью, объемный расход осадка канализационных очистных сооружений возрастает на 25 %. Прием водопроводных осадков в количестве 30–40 т/сут. (по сухому веществу) при очистке воды с высокой цветностью и малой мутностью приведет к увеличению объемного расхода канализационного осадка на 60–80 %. Причины столь существенных различий – коллоидная природа веществ и высокое содержание гидроксида алюминия (40–50 % по сухому веществу) в осадке, выделяемом из поверхностных вод с высокой мутностью.

При увеличении дозы коагулянта в процессе водоподготовки, технологические возможности очистных сооружений по приему водопроводных осадков снижаются.

Осадок, который планируется перекачивать на очистные сооружения канализации, необходимо предварительно обрабатывать для необратимого улучшения его седиментационных свойств и обеспечивать оптимальный режим подачи осадка на очистные сооружения канализации. Для этого предназначены следующие мероприятия [12]:

- 1) выдержка осадка в специальных хранилищах и его гравитационное уплотнение осадка, в том числе с применением флокулянтов.

- 2) Обеспечение равномерного (на протяжении декады, месяца) вывода осадка из сооружений водоподготовки в канализационную сеть – самостоятельная и важная задача. В то же время неравномерный вывод осадка в течение суток может дать положительные результаты, например, при синхронизации минимального притока сточных вод с поступлением основной части суточного расхода водопроводного осадка на очистные сооружения.

Авторы [12] делают следующие выводы по внедрению совместной обработки водопроводных и канализационных осадков:

- Перекачка водопроводных осадков на ОСК экономически оправдана при условии централизации механического обезвоживания и инфраструктуры по вывозу и размещению осадка при станциях аэрации.

- Прием водопроводного осадка, особенно от очистки высокоцветных природных вод, приводит к непропорциональному увеличению объемов осадков сточных вод на станции аэрации. Это не столь существенно при обезвоживании сырого осадка, но для схем, включающих в себя метантенки

и уплотнители сброженного осадка, создает серьезные технические проблемы.

- Перспективы утилизации (размещения) обезвоженных осадков сточных вод оказывают наибольшее воздействие на решение проблемы обезвоживания водопроводных осадков. Ориентация на широкое применение осадков сточных вод в качестве удобрения стимулирует прием водопроводных осадков в систему канализации. Если обезвоженный осадок будет только депонироваться, то совместная обработка осадков становится менее экономичной, так как отдельно обезвоженный осадок имеет более широкие возможности утилизации.

Ориентация на сжигание канализационных осадков также будет способствовать выделению осадка станций водоподготовки, обладающего высокой зольностью и низкой теплотворной способностью, в отдельный цикл переработки.

Таким образом, можно выделить следующие факторы, показывающие нецелесообразность перекачки осадков ОСВ г. Челябинска для совместной обработки с канализационными осадками:

1. Высокие затраты на транспортирование, т.к. расстояние до очистных сооружений канализации значительно превышает экономически оправданные 5–6 км.

2. Неравномерность поступления водопроводных осадков в канализационные сети, что увеличивает нагрузку на ОСК, особенно в период паводка.

3. Неудовлетворительные седиментационные свойства водопроводного осадка, имеющего гидроксидную природу, что может снижать скорость осаждения и уплотнения взвешенных частиц в первичных отстойниках ОСК, увеличивать риск вымывания ранее осевших частиц в осветленную воду.

4. Увеличение объемов осадков при совместной обработке. Поскольку в настоящее время на очистных сооружениях канализации не предусмотрено механическое обезвоживание, то увеличение объемов приводит к отчуждению дополнительных площадей для организации иловых площадок.

5. Осадок сточных вод г. Челябинска является типичным для промышленных городов с развитой металлообрабатывающей промышленностью и непригоден для использования в качестве удобрений. Перспективы утилизации водопроводных и канализационных осадков различные, поэтому целесообразно их раздельное обезвоживание.

1.7 Задачи исследования

Существующая схема совместной обработки водопроводных и канализационных осадков, реализуемая в г. Челябинске, имеет ряд недостатков, включая экономические и технологические аспекты.

Цель данной работы – изучить возможность перехода на технологию механического обезвоживания осадков очистных сооружений водопровода г. Челябинска. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить состав и свойства осадков.
2. Изучить различные методы кондиционирования осадка ОСВ.
3. Дать рекомендации по технологии обработки осадка и направлениям его дальнейшей утилизации.

2 СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОСАДКА ПРИРОДНЫХ ВОД

2.1 Особенности образования водопроводного осадка и его основные свойства

По приблизительным оценкам на станциях подготовки питьевой воды по всему миру ежедневно образуется около 10000 тонн осадков (по сухому веществу) [17]. В настоящее время в Европейском списке отходов они позиционируются как неопасные. До 1946 года в Европе был разрешен сброс такого рода осадков в водоисточник, однако, в текущих условиях экологические требования к обращению с осадками природных вод ужесточились.

Вопросы безопасного размещения и экологически оправданной утилизации осадков водопроводных станций весьма важны для России, где основными источниками централизованного водоснабжения являются поверхностные воды. Доля поверхностных вод в общем объеме водозабора составляет 68 %. Водоснабжение таких крупных городов России как Москва, Санкт-Петербург, Саратов, Самара, Екатеринбург, Челябинск, Новосибирск и др. практически полностью основано на поверхностных водоисточниках – реках и водохранилищах [18]. Около 50 % городов с населением свыше 100 тыс. человек имеют централизованное водоснабжение либо полностью основанное на поверхностных водах, либо его доля в балансе водопотребления свыше 90%. Около 90% поверхностной воды, поступающей на водопроводные станции, подвергается обработке с удалением избыточных примесей (чаще всего коагулированием) и обеззараживанием.

На водопроводных станциях г. Москвы образуется не менее 30 тыс. т/год осадка в пересчете на сухое вещество [12]. На типичной водопроводной станции производительностью 750 тыс. м³/сут. в среднем образуется до 12 тыс. т/год сухого осадка.

На большинстве водопроводных станций России обработка промывных вод и утилизация образующегося осадка не производится. Частично это объясняется тем, что в период создания таких станций нормативами утилизация образующегося при очистке поверхностных вод осадка не предусматривалась. Осадок, как правило, накапливался и продолжает размещаться в накопителях или на иловых площадках.

Кроме того, качество вод поверхностных водных объектов России в большинстве случаев не отвечает нормативным требованиям и оценивается как неудовлетворительное почти для всех видов водопользования. Это

приводит к наращиванию доз реагентов, используемых при водоподготовке. Поэтому в водопроводных осадках депонируются различные примеси природных вод и накапливаются реагенты, используемые для водоподготовки. Вместе с тем увеличиваются темпы образования и накопления осадков на станциях водоподготовки.

Проблема обработки ВПО справедливо считается одной из наименее разработанных, наиболее технически сложной и дорогостоящей.

Количество и состав образующегося водопроводного осадка зависят от качества исходной воды, в существенной мере определяемого сезонными вариациями мутности поверхностных вод, вида, дозы и типа применяемых коагулянтов и других реагентов, технологической схемы обработки и конструктивных особенностей сооружений, в которых осаждается осадок, и изменяется обычно от 0,1 до 1%, а в отдельных случаях достигает 5% объема очищаемой воды [1].

Количество сточных вод на водопроводных станциях составляет 5–15%, а осадков – 1–2% от полезной производительности очистных сооружений [14]. Промывные воды, загрязненные реагентами и удаленными примесями, образуются на водопроводных станциях при промывке фильтров (до 7,5% от производительности), промывке контактных осветлителей (до 11%), опорожнении и промывке отстойников (до 2,5% от общей производительности станции), промывке растворных баков реагентов и т. д.

Технологическими схемами работы очистных сооружений водопроводных станций предусмотрен расход воды на собственные нужды (в количестве от 10 до 14 % суточной производительности станции). Промывные воды фильтров или контактных осветлителей (составляющие до 90% воды, используемой на собственные нужды станций) нередко сбрасываются в водоемы и водотоки, что наносит ощутимый вред окружающей среде, вызывая их антропогенную эвтрофикацию.

Повышенная мутность поверхностных вод обычно благоприятно сказывается на седиментационных и водоотдающих свойствах осадка (расход флокулянта 2–3 кг/т сухого вещества). Высокая цветность и низкая мутность обрабатываемых вод, напротив, приводят к образованию практически не уплотняющегося осадка (предел уплотнения по влажности $98 \pm 0,5\%$). При механическом обезвоживании осадков высокоцветных низкомутных вод необходимы высокие дозы флокулянта (10–12 кг/т сухого вещества).

Резкие колебания мутности речных вод, свойственные многим регионам, обуславливают неравномерность образования осадка в отстойных сооружениях, а, следовательно, неритмичность его удаления и обработки. Повышенное количество взвешенных частиц, особенно грубодисперсных, в

поверхностных водах наблюдается в период весеннего половодья и после выпадения дождей. Например, вода из рек Кубани и Казачий Ерик, подаваемая на Таманский групповой водопровод, отличается резким сезонным колебанием состава. Так мутность изменяется от 9,7 до 170 мг/л (в паводки до 600 мг/л и более) [19].

Одним из принципов классификации осадков является деление в зависимости от реагентов, используемых при коагуляции. Применение минеральных коагулянтов для интенсификации процессов коагуляции и увеличения полноты изъятия взвешенных веществ приводит к образованию разнообразных гидратированных оксидов алюминия или железа, положительный заряд и обладающих повышенной коагулирующей способностью по сравнению с катионами железа и алюминия. Наиболее вероятные формы промежуточных продуктов гидролиза алюминия и железа имеют следующий вид: $[\text{Al}(\text{OH})]^{2+}$, $[\text{Al}_2(\text{OH})_2]^{4+}$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]^{4+}$, $[\text{Al}_{16}(\text{OH})_{15}]^{3+}$, $[\text{Al}(\text{OH})_2]^+$, $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$, $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}]^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $[\text{Fe}_2(\text{OH})_3]^{3+}$, $[\text{Fe}_2(\text{OH})_5]^+$, $[\text{Fe}_3(\text{OH})_2]^{7+}$, $[\text{Fe}_3(\text{OH})_4]^{5+}$ [9]. Указанные гидратированные оксиды представляют собой коллоидные вещества, легко коагулирующие с образованием аморфных хлопьев с сильно развитой поверхностью, которая обладает большим запасом поверхностной энергии, обуславливающей высокую адсорбционную способность хлопьев. Сульфат алюминия обладает высокой эффективностью при удалении из воды дубильных и гуминовых веществ.

Подавляющее большинство осадков природных вод образуются при использовании солей алюминия или железа в качестве коагулянтов. Такие осадки называют «алюмосодержащие» и «железосодержащие» («alum sludge» и «ferric sludge»). Усредненный состав таких осадков по материалам [17] приведен в таблице 10. Авторы подчеркивают, что состав осадков в большой степени определяется качеством воды в водоисточнике, применяемыми реагентами и технологией обработки воды. Эти факторы приводят к большому разнообразию состава и свойств осадков.

Авторы [20] предлагают подбирать схемы обработки водопроводных осадков на основании их водоотдающей способности. Опираясь на качество воды в водоисточнике и удельное сопротивление фильтрации осадков водопроводных станций, указанные авторы классифицируют осадки водопроводных очистных сооружений Украины по четырем группам водоисточников. Основные физико-химические свойства осадков сведены в таблицу 11.

Первая группа объединяет осадки, обладающие наиболее высоким удельным сопротивлением фильтрации, плохо отдающие воду при уплотнении и обезвоживании. Это осадки станций, водозаборы которых расположены на водохранилищах Днепра, характеризующихся малой мутностью воды и средней цветностью (см табл. 11). Органическая часть таких осадков составляет около половины (58-63%) веса сухого вещества и представлена в основном остатками водорослей. Незначительное количество минеральных примесей в воде и высокая ее цветность, наличие органики и коллоидов приводят к образованию рыхлых с гелеобразной структурой осадков, содержащих трудно освобождаемую при обычных методах воздействия структурно заземленную воду.

Таблица 10 – Типичный состав осадков (% по сух. веществу) очистных сооружений водопровода

Показатель	Алюмосодержащий осадок	Железосодержащий осадок
Алюминий	29,7±13,3	10,0±4,8
Железо	10,2±12	26,0±15,5
Кальций	2,9±1,7	8,32±9,5
Магний	0,89±0,8	1,6
Диоксид кремния	33,4±26,2	нет данных
pH	7,0±1,4	8,0±1,6
БПК ₅	45 (2–104)	нет данных
Фосфор	0,35	0,36
Цинк	33,9±28	18,7±16
Свинец	44,1±38,2	19,3±25,3
Кадмий	0,5	0,48±0,26
Никель	44,3±38,4	42,9±39,2
Медь	33,72±32,5	18,7±25,8
Хром	25±20,1	25,7±21,6
Кобальт	1,06	1,61±1,1
Солесодержание	2500–52345	(2132–5074)

Вторая группа – осадки рек с малым содержанием взвеси и, как правило, малой цветностью воды (см таблицу 11). Количество органических веществ составляет 35–45%. Эти осадки отдают воду лучше, чем осадки первой группы.

Третья группа – осадки рек, характеризующихся средней мутностью воды и малой цветностью. Такие осадки имеют значительное количество крупных включений, содержание органических веществ в них не превышает 30%, а коллоидных гидроксидов содержится не более 3–6%. При уплотнении

таких осадков наблюдается деформация их структуры, они сравнительно легко отдают воду, обладая при этом небольшим удельным сопротивлением фильтрации.

Четвертая группа объединяет осадки рек, берущих свое начало в горах. Воды таких рек несут в себе значительное количество крупнодисперсной взвеси. Такие осадки обладают наиболее плотной структурой с незначительным содержанием органики. Удельное сопротивление фильтрации минимальное (см. таблицу 11).

Таблица 11 – Классификация осадков водопроводных станций [по 20]

Группа осадков	Мутность, мг/дм ³	Цветность, град. пкш	Удельное сопротивление осадков, г·10 ¹⁰ , м/кг	Примеры водоисточников
Первая	3–5	35–120	8 000–16 000	Водоохранилища на Днестре
Вторая	1–50	до 35	3 500–9 000	Реки Южный Буг, Тетерев, Рось
Третья	50–250	до 35	1 000–1 700	Реки Северский Донец, Рось, Десна
Четвертая	более 250	низкая	100–1 600	реки Крыма, Днестр, Прут

В зависимости от преобладающего состава и свойств осадка той или иной станции могут быть выбраны различные схемы их обезвоживания и утилизации. Рекомендуемые схемы обработки осадков по группам водоисточников приведены на рисунках 8–11.

Коагуляционный осадок, образующийся на водопроводных станциях в ходе очистки поверхностных вод, представляет собой сложную многокомпонентную систему с сильно развитой поверхностью, объединяющую в единое целое комплекс различных по происхождению, качеству и свойствам веществ. По внешнему виду водопроводный осадок представляет собой гелеобразную массу серо-коричневого цвета. Основными компонентами осадков являются продукты гидролиза химических реагентов (гидроксиды алюминия и железа, кремниевая кислота неорганических флокулянтов) в сочетании с минеральными (каолинит, монтмориллонит, гидрослюда, кварц, карбонаты, нерастворимые или малорастворимые соли металлов и др.) и органическим (планктоном, микроорганизмами и бактериями, продуктами жизнедеятельности водных организмов и растений,

коллоидами гуминовых и фульвокислот, адсорбированными высокомолекулярными флокулянтами и др.) веществами [1, 18, 20, 21]. Обычно для свежего осадка высокоцветных маломутных вод после 45–60 мин. отстаивания содержание сухого вещества составляет 0,3–0,4%, для осадка вод средней цветности и мутности – 0,4–0,8%, для осадка мутных вод – 0,8–3% и более [18]. Основным компонентом водопроводных осадков является гидроксид алюминия, который образуется в процессе гидролиза коагулянта (25–45%). Главными примесями водопроводного осадка являются содержащиеся в очищаемой воде глинистые частицы, мелкий песок, частицы карбонатных пород, органические вещества, фитопланктон и др. (SiO_2 – 8–20% , органические вещества – 15–40%; Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , K_2O , Na_2O – от 0,1 до 3,0 %). Кроме того, обычно содержатся различные металлы, нефтепродукты, бактерии. Состав и свойства осадка отстойников и контактных осветлителей приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Химический состав и физические свойства водопроводного осадка [1, 22]

Показатель	Из отстойников ОСВ г. Москвы			Из контактных осветлителей		
	Северная	Западная	Рублевская	Петербурга		Сестрорецка
				Северной	Южной	
Влажность, %	99,7–95	99,2–93,6	99,2–94	99,5–97	99,5–96	99,6–98,5
ППП*, %	40–60	24–28	22–28	27–60	30–60	65–67
БПК ₅ , мг/л	145–160	125–134				
ХПК, мг/л	4000–4500	5810–7120				
Состав прокаленного осадка, %:						
SiO_2	1,6–7	27–42	30–40	8–28	8–28,6	5–7
Al_2O_3	20–36	15–20	14–15	15–24,5	17–25	20–30
Fe_2O_3	0,8–2,8	2–5	2,6–5	0,2–1,8	0,2–1,8	2–5
CaO	1–3 (23**)	2–3	1,5–2,5	0,2–0,5	0,1–0,3	1,5–2
MgO	0,3–1,3	0,6–1,2	0,6–1,1	0,4–0,6	0,2–3,5	0,8–3,5
Нерастворимый в кислоте остаток, %	5–16	33–47	27–42,5	20–25	2–8	2–8
Начальное удельное сопротивление, $\text{r} \times 10^{-10}$ см/г	1870–2590	850–1420	1050–1980			

* – ППП – потери при прокаливании.

** – при подщелачивании воды.

Химический состав некоторых ОСВ Молдовы приведен в таблице 13. Отмечаются сильные колебания по содержанию оксидов алюминия и

кремния, что, вероятно, связано с варьированием дозы коагулянтов и различным качеством исходной воды по мутности, фитопланктону.

Таблица 13 – Химический состав водопроводного осадка ОСВ Молдовы, % [по материалам 18]

Компонент	Кишинев	Унгень	Корнешть
Al ₂ O ₃	22,4	19,9	59,2
SiO ₂	46,11	49,6	3,6
Fe ₂ O ₃	4,21	5,61	2,9
MgO	1,5	1,12	0,61
CaO	3,63	3,21	2,16
Na ₂ O	0,005	0,006	0,01
Потери при прокаливании	22,11	20,26	31,53

В таблице 14 представлены данные по сезонным изменениям состава водопроводных осадков некоторых станций г. Москвы. Значительные сезонные колебания отмечаются для CaO; марганец присутствует только в летний период. Возможно, это обусловлено марганцеванием воды для частичного окисления органических веществ.

Таблица 14 – Химический состав водопроводного осадка ОСВ г. Москвы по сезонам [по материалам 18]

Сезон	Влажность, %	ППП, %	pH	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	ОВ ^{**} , %
Северная станция									
Весна	96	40,4	6,5–7	21	2	7,5	1,1	—	9,24/15,4
Лето	95	32,1	6,2–6,6	26,3	1,71	9,2	2,8	0,24	5,73/9,74
Осень	96	37,21	6,5–6,9	24,5	1,21	10,4	1,76	—	8,92/15,25
Рублевская станция									
Весна	96	33,0	6,2–6,5	10,23	1,27	4,5	—	—	—
Лето	97	33,5	6,2–6,5	9,12	1,12	3,7	—	—	—
Осень	97	33,25	6,2–6,5	9,56	1,01	3,95	—	—	—

*ППП – потери при прокаливании.

**ОВ – органические вещества. В числителе органические вещества по содержанию углерода; в знаменателе – то же, в гуминовых веществах.

Основными свойствами осадков, определяющими выбор технологической схемы его обработки и утилизации, являются влажность, плотность, водоотдающая способность, угол скольжения, вязкость и др. В общем случае осадок водопровода обладает свойствами вязкопластической жидкости и характеризуется высокой влажностью от 92–94 до 99,5–99,8%. Влажность зависит от качества исходной воды и технологической схемы ее обработки. Такой осадок обладает высоким сопротивлением фильтрации (10^{10} – 10^{12} м/кг), несколько меняющимся при изменении температуры, pH среды и начальной влажности. Внутренняя поверхность осадков весьма развита и составляет от нескольких десятков до сотен м²/г. Осадки содержат значительные количества сапрофитных организмов (10^4 – 10^5 мл⁻¹) и

бактерий ($10^3 - 10^4$ мл⁻¹), высокими значениями БПК₅ (~ 80 мгО/л) и ХПК (~ 300 мгО/л). Осадок характеризуется относительно низким содержанием азота (0,5–0,9% N_{общ}) и фосфора (1 % P₂O₅).

Гранулометрический состав осадков зависит от сезона года, а также от технологической схемы очистки воды и конструктивных особенностей сооружений, в которых он образуется (таблица 15). Так, при двухступенчатой очистке воды наиболее крупные частицы задерживаются в отстойниках и осветлителях с взвешенным слоем. Осадок промывных вод фильтров является более высокодисперсным. При одноступенчатой схеме очистки воды осадок содержит частицы всех размеров. Существенное влияние на гранулометрический состав осадка оказывает наличие в воде гуминовых веществ, основная масса которых обычно представлена коллоидными гуминовыми кислотами и (особенно) фульвокислотами, а также органоминеральными взвешенными веществами. Коллоидные фульвокислоты имеют более высокую степень дисперсности, чем гуминовые, и обладают повышенной устойчивостью к действию сорбентов и окислителей.

Таблица 15 – Гранулометрический состав водопроводных осадков ОСВ Молдовы [по материалам 18]

Диаметр частиц, мм	Относительное содержание частиц, %					
	Кишинев		Унгень		Корнешть	
	Паводок	Межень	Паводок	Межень	Паводок	Межень
1,0–0,5	1,1	1	2,2	0,9	0,05	0,8
0,5–0,25	1,6	0,9	2,0	1,0	0,5	1,1
0,25–0,1	2,0	1,6	4,6	1,6	0,65	2,7
0,1–0,05	40–46	20	38–45	19–25	6,8	10–15
Менее 0,05	53–60	75–80	49–54	71–78	92,0	80–86

Состав и свойства осадков, зависящие от качества исходной воды, влияют на интенсивность и глубину их уплотнения [18]. В осадке мутных вод нерастворимый осадок составляет 40–50%, в то время как в осадке цветных вод – лишь 2–15%. С увеличением в исходной воде минеральных примесей осадок получается более плотным и возрастает скорость протекания процесса уплотнения. Увеличение цветности воды и сокращение содержания в ней минеральных примесей приводит к образованию легкого (рыхлого) осадка высокой влажности, степень уплотнения которого снижается, а продолжительность уплотнения возрастает. Так, если для гравитационного уплотнения осадка вод повышенной мутности достаточно всего несколько часов, то для уплотнения осадка маломутных высокоцветных вод требуются десятки и сотни часов, при этом в первом случае в процессе уплотнения

влажность осадка снижается до 92–94%, а во втором – до 98–99%. Плотность осадка варьируется в пределах 1002–1041 кг/м³. Исследования, выполненные на водопроводных станциях г. Москвы, показали, что для осадка вод волжского и москворецкого водоисточников характерно наличие вегетативных и споровых форм бактерий (с присутствием гнилостных) [1]. Бактерии *E. coli* в осадке практически отсутствовали. В тех случаях, когда при обеззараживании воды применяется предварительное ее хлорирование, бактериальное загрязнение осадка резко снижается.

Содержание сухого вещества в осадке высокоцветных маломутных вод составляет 0,3–0,4%, в осадке вод средней цветности и мутности 0,4–0,8% и в осадке мутных вод 0,8–3% и более.

Содержание твердого вещества в осадке, полученном в осветлителе, составляет 0,6–4%, в вертикальных отстойниках – 0,1–1,5%, в горизонтальных – 3–6%. Нерастворимый остаток в осадке обусловлен наличием минеральных примесей (песок, глина и др.), и в мутных водах он составляет 40–50%, в цветных 2–15%. Диоксид кремния находится в осадке в виде кремниевой или поликремниевой кислоты. При использовании сульфата или хлорида Fe (III) определяющими компонентами осадка являются оксиды железа и кальция. В случаях, когда для повышения щелочного резерва в воду добавляют известь, содержание солей кальция в осадке может достигать 30% и более от массы сухого вещества. Содержание органических веществ в пересчете на органический углерод Северной водопроводной станции г. Москвы находится в пределах 5,7–16,7% [8]. В составе органических веществ преобладают фульвокислоты, относительное содержание которых составляет 81,3%. Доминируют фульвокислоты коллоидной степени дисперсности. Максимальное количество гуминовых веществ закономерно характерно для осадка, образующегося в летний период.

Осадок из горизонтальных отстойников Кочетовской водопроводной станции (г. Харьков), где применяется электрокоагуляционная обработка, представляет собой тонкодисперсную (более 45% частиц менее 1 мкм) суспензию, преимущественно каолинитового состава (70% каолинита), содержащую также примеси кварца, карбонатов, слюд и органических веществ [8].

Осадок, полученный при осветлении вод южных рек России, по своим физико-химическим свойствам отличается от осадка рек центральных районов повышенным содержанием минеральных примесей (75–90%), большим содержанием SiO₂ (55–75%), низким Al₂O₃ (2–10%) [18]. В водопроводных осадках г. Ростова-на-Дону (р. Дон), г. Невинномыска и г. Армавира (р. Кубань) глинистые минералы представлены гидрослюдами,

монтмориллонитом, каолинитом с частицами менее 5 мкм (частицы кварца имели размеры более 1 мкм). Из 60% глинистых частиц на долю каолинита в среднем приходилось 25%, гидрослюды – 45%, монтмориллонита – 29% [18]. Осадок, образующийся в отстойниках, характеризуется неоднородным строением (таблица 16) как по бактериологическим показателям, так и по химическим.

Таблица 16 – Характеристика осадка из горизонтальных отстойников станции водоподготовки г. Ростова-на-Дону

Слой осадка	ОМЧ, в 1 дм ³	КОЕ ОКБ в 100 мл	КОЕ ТТБ в 100 мл	Споры сульфитредуцирующих бактерий в 20 мл	Орг. вещества, мг/дм ³	рН
Верхний	1000–3000	500–12000	0	600–1200	4700–16632	7,2–8,3
Донный	2000–2600	0–300	0–300	400–1000	4200–8700	7,3–7,5

Среднее содержание гидроксида алюминия $Al(OH)_3$ в абсолютно сухом водопроводном осадке является важнейшей характеристикой его химического состава, физических и технологических свойств. На водопроводных станциях, где водоподготовка осуществляется с применением коагулянта на основе алюминия, образуются осадки, которые по содержанию алюминия (по сух. веществу) могут быть разделены на следующие технологические группы:

1) осадок в виде геля с содержанием алюминия более 15%; образуется в процессах очистки поверхностных высокоцветных вод низкой мутности; характеризуется неудовлетворительной способностью к гравитационному уплотнению;

2) глинистый осадок с содержанием алюминия до 10%; образуется в процессах очистки поверхностных вод низкой цветности средней мутности; характеризуется удовлетворительной способностью к гравитационному уплотнению;

3) эвтрофированный осадок с содержанием алюминия 10–15%; образуется в процессах очистки поверхностных вод низкой и средней мутности в периоды эвтрофирования водоисточника; характеризуется ухудшением способности к гравитационному уплотнению по сравнению с типовыми для данного водоисточника седиментационными свойствами.

Осадок первых двух групп является биологически инертным, как правило, не склонным к загниванию и характеризуется относительно невысоким содержанием органических загрязнений. Эвтрофированный

осадок является переходной группой, отличается склонностью к загниванию и повышенным содержанием органических веществ.

Применение полимерных флокулянтов на стадии коагуляции природной воды отчасти сглаживает технологические различия между группами осадков, улучшает его седиментационные свойства, способность к уплотнению и механическому обезвоживанию. Как правило, осадок, образующийся при обработке воды катионными флокулянтами, характеризуется более крупными и прочными хлопьями, чем это наблюдается при использовании минеральных коагулянтов. Анионные флокулянты обычно используются в сочетании с минеральными коагулянтами. Осадок, образующийся при этом, состоит из загрязнений, скоагулированных гидроксидами алюминия или железа в хлопья, которые объединены в крупные агрегаты с помощью макроионов флокулянтов. Адсорбируясь одновременно на нескольких твердых частицах, принадлежащих разным хлопьям, эти макроионы объединяют всю массу осадка полимерными мостиками в единое целое. Применение в процессе водоподготовки полимерных электролитов (флокулянтов) позволяет уменьшить дозу коагулянта и, как следствие, снизить содержание гидроксида алюминия в осадке и образование сухого вещества [23].

Исследования токсичности осадков природных вод немногочисленны и зачастую противоречивы [17]. Имеются сведения, что водорастворимые компоненты алюмосодержащих осадков приводят к замедлению роста зеленых водорослей *S. carpicornutum* при содержании карбоната кальция менее 35 мг/л. Другие авторы не нашли доказательств токсичности алюмосодержащих осадков при использовании их в качестве питательной среды для роста одноклеточных.

При экспозиции 48 часов не обнаружено токсичное действие на дафнии вида *Daphnia similis*, однако, длительное воздействие осадков вызвало гибель и снижение размножения дафний. При этом алюмосодержащий осадок оказался менее токсичен, чем осадок, полученный при использовании коагулянта хлорида железа.

Исследование осадков на способность к выщелачиванию металлов показало, что содержание тяжелых металлов в надосадочной жидкости значительно ниже, чем нормативный уровень выщелачивания, установленный для неопасных металлосодержащих осадков. Однако, железосодержащие осадки зачастую содержат повышенные количества цинка, никеля, меди и мышьяка до 4 г/кг сухого вещества осадка. Мышьяк остается наиболее опасным и часто встречающимся неорганическим загрязняющим веществом в осадке водопроводных станций.

Несмотря на различия в свойствах осадков водопроводных станций, не наблюдали взаимосвязи между свойствами и степенью их токсичности. В целом, большинство вопросов, поднятых в отношении токсичности и содержания металла в осадках водопроводных станций, обусловлено перспективами их использования в сельском хозяйстве, садоводстве, лесоводстве и др. областях.

Таким образом, несмотря на некоторые потенциальные риски токсичности осадка водопроводных станций, масштаб такого эффекта явно переоценен и не имеет в настоящее время однозначной качественной и количественной оценки.

Таким образом, осадок ОСВ состоит из примесей, скоагулированных гидроксидными продуктами гидролиза коагулянта в хлопья, которые объединены в крупные агрегаты с помощью макроионов флокулянтов. Применение полимерных флокулянтов на стадии коагуляции природной воды отчасти сглаживает технологические различия между группами осадков, улучшает его седиментационные свойства, способность к уплотнению и механическому обезвоживанию. Гранулометрический состав осадков зависит от сезона года, а также от технологической схемы очистки воды и конструктивных особенностей сооружений, в которых он образуется.

Осадки ОСВ г. Челябинска по классификации [24] можно отнести к осадкам второй группы по качеству воды в водоемисточнике (малое содержание взвеси и, как правило, малая цветность воды).

2.2 Управление осадками природных вод

В настоящее время в мировой практике используются следующие основные направления обработки водопроводного осадка:

- сброс осадка в поверхностные водотоки и водоемы,
- захоронение в открытом море,
- обезвоживание осадка в естественных условиях (размещение осадка и промывных вод в прудах-накопителях с возвратом осветленной воды на очистку),
- подсушивание осадка на иловых (дренажных) площадках в режиме испарения и/или замораживания-оттаивания,
- уплотнение осадка в гравитационных уплотнителях с медленным перемешиванием перед механическим обезвоживанием или перед подачей осадка на дренажные площадки,
- механическое обезвоживание уплотненного осадка на камерных или ленточных фильтр-прессах или в центрифугах с предварительным

кондиционированием его с применением реагентов или метода замораживания-оттаивания,

- сброс на канализационные очистные сооружения или обработка смеси предварительно сгущенного водопроводного осадка совместно с городскими сточными водами.

Сброс и захоронение осадка без обработки является устаревшим методом, однако до сих пор практикуется, например, на Одесской водопроводной станции Украины, на большинстве действующих станций в Молдове, в г. Ростове-на-Дону [по 18] и др.

Обработка осадков ОСВ в естественных условиях (в прудах-накопителях и на иловых площадках) в настоящее время представляется малоперспективной.

Пруды-накопители представляют собой глубокие земляные емкости с основанием выше уровня грунтовых вод. Такие сооружения должны быть оборудованы устройствами для отвода осветленной воды с любого уровня по глубине.

В районах, где отсутствует возможность промораживания, после отвода осветленной воды на поверхности пруда-накопителя образуется корка, препятствующая дальнейшему подсыханию осадка, который под этой коркой находится в тиксотропном состоянии и имеет желеобразную консистенцию с удельным сопротивлением сдвигу, равным нулю. В таком виде осадок может находиться в течение многих лет.

После заполнения прудов-накопителей уплотненным осадком их навсегда выключают из работы или (в отдельных случаях) через ряд лет очищают для повторного использования. В нормативной литературе [25] рекомендуют в качестве прудов-накопителей использовать овраги, отработанные карьеры или обвалованные грунтом спланированные площади, хотя нередко используют водоемы естественного происхождения, например, старицы. Накопление осадков в последнем случае обуславливает заиливание участков ниже сброса и загрязнение речной системы соединениями алюминия и железа, которые формируют с органическими веществами (фульвокислотами и т. п.) растворимые комплексные соединения. Органические соединения алюминия менее устойчивы, чем соединения железа. Присутствие органических веществ способствует миграции металла [по 18].

Обработка гидроксидного осадка с помощью прудов-накопителей не является совершенным методом, однако в качестве временного мероприятия (при наличии вблизи водопроводной станции свободных земельных

участков) может оказаться экономически оправданной из-за низких капитальных и эксплуатационных затрат. Такие накопители целесообразно использовать в качестве уплотнителей и накопителей осадка перед его последующей обработкой [1].

Ранее широко применяли обезвоживание осадка ОСВ на иловых площадках. Технология обработки осадка на таких площадках заключается в подсушке его слоями толщиной 0,2–0,3 м, причем каждый последующий слой осадка заливают после подсушки предыдущего до влажности не более 80%.

Основными конструктивными решениями иловых площадок, получивших наибольшее распространение, являются [1]:

1) площадки на естественном дренирующем основании, устраиваемые на хорошо дренирующих грунтах в местах, где грунтовые воды залегают на глубине не менее 1,5 м от поверхности площадок;

2) площадки на естественном или искусственном водонепроницаемом основании с дренажем.

В первом случае обезвоживание осадка осуществляется в основном путем фильтрации влаги и частичного ее испарения с поверхности площадок. Достаточная степень обезвоживания осадка достигается при снижении его влажности ниже 70%, что позволяет в дальнейшем осуществить его обработку. Иловые площадки, оборудованные дренажными системами, обеспечивают более эффективное обезвоживание осадка – до среднего содержания твердого вещества 20–25 % в течение 3–4 сут.

Использование прудов-накопителей и иловых площадок для обезвоживания осадков ОСВ, даже при благоприятных климатических, конструктивных и почвенных условиях, имеет существенные недостатки. Так, большие площади, занятые ими, создают, особенно в тех случаях, когда водопроводный осадок загнивает, антисанитарные условия в окрестностях, способствуют разведению насекомых, а сбор и вывоз осадка являются достаточно трудоемкими процессами.

Таким образом, обработка водопроводного осадка с помощью иловых площадок и прудов-накопителей сопровождается негативными экологическими явлениями и может служить временной мерой, экономически целесообразной для водоочистных станций малой и средней производительности.

2.2.1 Методы кондиционирования осадка перед обезвоживанием

Осадки природных вод сильнообводненными системами, состав которых определяется качеством исходной воды и реагентами, используемыми для водоподготовки (коагулянты, флокулянты, подщелачивающие реагенты, окислители и др.). Использование коагулянтов на основе солей алюминия обуславливает гидроксидную природу образующихся осадков. Особенностью такого рода осадков является их сжимаемость и нефильтруемость.

Практически любая схема обработки осадка ОСВ начинается с предварительного уплотнения, что обусловлено высокой исходной влажностью осадков [1]. Целью предварительного уплотнения является сокращение объема осадка с выделением части свободно-защемленной воды. Сокращение объема осадка при уплотнении является наиболее простым способом его частичного обезвоживания, позволяющим также снизить затраты на последующее обезвоживание.

Интенсификация уплотнения осуществляется путем добавки уплотняющих присадок и химических реагентов, а также путем непрерывного нарушения структуры осадка при медленном его перемешивании, либо путем кавитации (обработка осадка на специальных аппаратах-кавитаторах для быстрого его перемешивания). Хороший эффект наблюдается при уплотнении осадка, предварительно обработанного полиакриламидом, необходимая доза которого составляет 0,02–0,044 % (от сухой массы осадка). Например, добавление полиакриламида при уплотнении в условиях медленного перемешивания осадка цветных вод р. Невы и Клязьминского водохранилища повышало концентрацию осадка до 5% при сокращении продолжительности уплотнения с 8–10 до 2–4 час.

Установлено, что медленное перемешивание осадка позволяет увеличить скорость его уплотнения на 30–70 % и повысить содержание твердой фазы в нем в 1,4–2,2 раза [по 18]. В основе этого явления лежит, по-видимому, известный в коллоидной химии эффект реопексии, проявляющийся при застудневании золя с сильно анизодиаметрическими частицами. Реопексия – редкое свойство некоторых неньютоновских жидкостей, которое заключается в увеличении вязкости с ростом напряжения сдвига. Т.е. реопексионные жидкости густеют или даже твердеют при перемешивании. Реопексия является свойством, противоположным тиксотропии: тиксотропные жидкости становятся менее вязкими при перемешивании. Рекомендуют использовать мешалки, лопасти которых имеют сетчатые и стержневые вращающиеся элементы.

Механическая обработка осадков ОСВ позволяет значительно уменьшить их объем, но невозможна без их предварительного кондиционирования с помощью реагентов или термической обработки в режиме замораживание-оттаивание. Такие предварительные операции позволяют повысить водоотдающую способность водопроводных осадков и направить их на аппараты механического обезвоживания.

Трудности реализации механического обезвоживания водопроводных осадков на месте их образования следующие:

- 1) необходимость создания новой инфраструктуры для уплотнения, обезвоживания, вывоза и размещения осадка;
- 2) необходимость предварительной обработки осадков перед механическим обезвоживанием (реагентная обработка, гравитационное или термическое обезвоживание);
- 3) низкая температура осадка в зимний период, требующая значительных энергетических затрат и использования высоких доз коагулянтов.

2.2.1.1 Реагентная обработка

Предварительная реагентная обработка водопроводного осадка направлена на его структурирование и утяжеление. Для решения такого рода задач обычно предлагается использование следующих реагентов [1, 21, 26]:

- флокулянты;
- присадочные вещества и материалы;
- известь,
- кислотная обработка с целью извлечения коагулянтов (не нашла широкого применения).

Расчет дозы реагентов ведется по сухому веществу осадка.

При обработке осадка только полиакриламидом его доза должна составлять не менее 0,1 % массы сухого вещества осадка [1]. Подбор реагентов и их доз осуществляется в предварительных экспериментах, технология обработки (режимы дозирования и перемешивания) отрабатывается в лабораторных условиях. Например, следует опробовать применение флокулянтов неионного типа и катионных и анионных различной плотности заряда (от слабо- до сильноионных).

Основной трудностью при использовании флокулянта является подбор реагента, поскольку общих теоретических обоснований такого выбора не существует. Краткий обзор современных флокулянтов, используемых для обработки производственных и коммунальных осадков, представлен в работе

[26]. Из отечественных флокулянтов, выпускаемых в промышленных масштабах, известны следующие: ПАА, СФ-1, ВПК-101 и 102, Аквапол; катионные флокулянты – Сибфлок (ООО НПП «Экохим», г. Новосибирск), Каустамин-15 (ЗАО «Каустик», Стерлитамак), Рекомин-100 (лесохимический завод, пос. Нейво-Рудянка Свердловской области).

Современной тенденцией является синтез поперечно сшитых флокулянтов на основе полиакриламида. Флокулы, образованный такими реагентами, имеют высокое сопротивление сдвигу, увеличение концентрации сухого вещества в осадке с одновременным увеличением пропускной способности аппаратов для обезвоживания. Особенно актуальны такие реагенты для труднофильтруемых осадков.

Для кондиционирования можно использовать достаточно разбавленные растворы 0,1–0,25 %, однако, для снижения доли воды, вводимой с флокулянтом, рекомендуется использовать рабочие растворы флокулянта 0,25–1 % [26].

По результатам исследования обезвоживания водопроводных осадков г. Екатеринбурга предложена двухстадийная схема сгущения: первая стадия сгущения приводит к увеличению содержания взвеси в осадке с 1–1,5 до 7–9 г/дм³. Вторая стадия сгущения проводится с добавкой флокулянта и иногда извести и повышает содержание взвеси до 30 г/ дм³. Рекомендованы следующие дозы реагентов: флокулянт Праестол 2540 в количестве 45 мг дм³ осадка; известковое молоко (при необходимости) – до 20 г/дм³ осадка [26]. Однако, добавление извести нежелательно ввиду резкого повышения жесткости в фильтрате. Получаемая при сгущении осветленная вода далее используется.

В 1998 г. на малогабаритном мембраннокамерном фильтр-прессе фирмы «Netzsch» (Германия) были проведены промышленные испытания процесса обезвоживания осадка Рублевской и Западной водопроводных станций г. Москвы с использованием в качестве реагента только органических флокулянтов немецкой фирмы «Stockhausen». Были получены следующие технологические показатели обезвоживания: влажность кека 53–75% в зависимости от зольности осадка; оптимальный флокулянт – катионный высокомолекулярный Праестол 853; расход флокулянта при обезвоживании осадка на основе сульфата алюминия 4,5–6 кг/т сухого вещества, для осадка на основе оксихлорида алюминия 2,5–3 кг/т сухого вещества.

Независимо от типа коагулянта, использованного при водоподготовке, обезвоженный осадок (кек) представлял собой плотные, устойчивые к разрыву пластины толщиной 20–22 мм со слегка увлажненным ядром,

хорошо сходящие с фильтроткани. Фильтрат содержал незначительное количество взвешенных веществ (обычно 20–70 мг/л) на всех стадиях фильтроцикла, однако повышенное содержание в нем железа и марганца исключало возможность его использования в оборотном водоснабжении водопроводных станций.

Обезвоживание осадка Восточной и Северной водопроводных станций характеризовалось следующими технологическими показателями: влажность кека 75–82 %, оптимальный флокулянт – слабокатионный Праестол 644 или Праестол 852. Обезвоженный водопроводный осадок, несмотря на повышенную влажность (в среднем 77 %), обладал высокой прочностью и упругостью, что свидетельствует о высоком содержании в нем химически связанной влаги, которую невозможно отделить физическими методами обезвоживания. При недостаточной дозе флокулянта внутри кека формировалось переувлажненное ядро со свободной водой, отжиму которой препятствовала плотная кора.

При пониженной дозе флокулянта в фильтрате резко возрастает концентрация взвешенных веществ (до 100–200 мг/дм³). При последующем фильтровании наблюдается продавливание осадка через фильтрующую ткань и кольматация дренажа на плитах и мембранах.

При повышенной дозе флокулянта он присутствует в фильтрате в количествах, достаточных для эффективного флокулирования низкоконцентрированных осадков. Этот факт следует учитывать при разработке схем уплотнения и обезвоживания осадка.

Особое внимание следует уделить процессу перемешивания и перекачивания флокулированного осадка, т.к. излишнее механическое воздействие может привести к разрушению образовавшихся флокул.

При правильно проведенном процессе флокулирования флокулянт должен преимущественно находиться в осадке. Имеются сведения [26] об использовании дробного флокулирования: часть реагента добавляют в осадок перед сгущением, остальное количество – перед обезвоживанием.

Кондиционирование химическими реагентами способствует формированию пористой структуры осадка, что облегчает его водоотдачу. Однако, если кек осадка, сформированный на фильтре, высоко сжимаемый, то его агрегаты будут деформироваться по действием приложенного давления и при наращивании слоя кека. Это может привести к закрытию пор и каналов и затруднить водоотдачу осадка. Поэтому авторы [27] указывают, что целью кондиционирования является не только снижение специфической устойчивости гидроксидных осадков к водоотдаче, но и уменьшение

сжимаемости кека. Для достижения этой цели используются так называемые присадочные материалы.

Наиболее эффективно использование флокулянтов в сочетании с присадочными материалами. В качестве таких структурообразующих материалов используют вермикулит, гипс, мелкодиспергированный уголь, клиноптилолит, золу, перлит, диатомит, пыль из электрофильтров, цементную пыль, жом, щепки шелуху и др. материалы, преимущественно отходы промышленности. Присадочные материалы являются вспомогательными и не используются самостоятельно. Это тонкодисперсные, проницаемые для жидкости материалы, не изменяющие заряда частиц осадка и создающие крупнопористую структуру.

В работе [28] установлено, что применение вермикулита в оптимальной дозе позволяет снизить удельное сопротивление фильтрации гидроокисных осадков сточных вод металлообрабатывающих предприятий в 7 раз. Химический состав вермикулита Размановского месторождения (Красноярский край) представлено в таблице 17.

Таблица 17 – Химический состав вермикулита [28]

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O
34,06	10,00	13,38	5,72	0,61	14,25	22,31	0,60	0,65	0,42	7,00

Экономически целесообразной дозой извести (по CaO) считается доза 10–30 % массы сухого вещества осадка. При обработке осадка высокоцветных маломутных вод количество извести может составить (по CaO) 60–100 %. Большой расход извести делает нерациональным данный метод улучшения водоотдачи. Некоторое сокращение дозы извести можно достичь за счет введения в осадок вспомогательных веществ (флокулянтов, золы, перлита и др.) [18].

Известь обычно применяется в форме известкового молока в дозах от 10–15 до 50–80 % массы сухого твердого вещества в осадке. Возможно использование негашеной извести и соединений магния. При использовании флокулянтов особые требования предъявляются к продолжительности их перемешивания с осадком и выбору оптимальной дозы флокулянта.

При механическом обезвоживании на непрерывно действующих ленточных фильтр-прессах для кондиционирования водопроводных осадков наиболее целесообразно использовать сочетание извести с флокулянтами преимущественно анионного типа [по 18]. При этом доза извести может быть значительно снижена; доза флокулянта составляет до 2 кг/т сухого вещества осадка. Флокулянт используется в виде 0,1–0,2 %-ного рабочего раствора, приготовление которого осуществляется в специальных установках или

баках с диспергаторами и мешалками. Первоначально в осадок вводится известь, а затем раствор флокулянта, который обычно дозируется винтовым насосом-дозатором.

Естественно, что добавление в осадок дополнительных реагентов вносит определенные ограничения на выбор дальнейшего (после обезвоживания) способа его утилизации.

В работе [27] авторы предлагают использовать анионный флокулянт Magnafloc LT25 совместно с гипсом ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) для кондиционирования алюмосодержащих осадков ОСВ. Гипс используется в качестве структурообразующей присадки с концентрацией 60 % по сух. веществу осадка. Водоотдающую способность осадков оценивали по влажности обезвоженного кека. В результате взаимодействия флокулянта с гипсом и осадком формируются более компактные флокулы. Структура осадка становится более пористой, что способствует отведению воды в процессе фильтрования под давлением.

2.2.1.2 Замораживание-оттаивание

Известны различные способы искусственного замораживания-оттаивания водопроводных осадков. Особенно эффективен данный способ для обработки осадка маломутных цветных вод, обладающих низкой водоотдающей способностью [1]. Наибольшее практическое применение нашел метод замораживания и оттаивания осадка через теплопередающие поверхности. Замораживание и оттаивание осадка осуществляется в резервуарах, оборудованных трубчатыми теплообменными элементами, в которых попеременно испаряется и конденсируется хладагент (например, аммиак). Искусственное замораживание и оттаивание нашло применение на некоторых водопроводных станциях Англии, Шотландии, Германии, Японии. Ранее считалось, что термические методы обезвоживания осадков примерно на 30 % экономичнее реагентных методов.

На территории нашего государства первая технологическая линия с роторной установкой замораживания-оттаивания была введена в эксплуатацию в 1987 г. на водопроводной станции г. Саратова [1]. Технология предусматривает уплотнение осадка, замораживание-оттаивание и обезвоживание. Влажность осадка после обезвоживания не превышала 70%.

Известно также, что в начале 1990-х гг. осуществлялось проектирование цехов обработки водопроводных осадков методом

искусственного замораживания для городов Энгельса, Самары, Нижнего Новгорода, Ульяновска, Тулы.

При замораживании осадка в его структуре происходит частичный переход воды из связанного в свободное состояние, сопровождаемый коагуляцией твердых веществ [1]. После оттаивания новые водоотдающие свойства осадка сохраняются, и он может быть легко обезвожен. Данный эффект полностью соответствует природному явлению, происходящему в зимне-весенний период года, в результате которого биологические коллоидные системы разрушаются и обезвоживаются.

Установлено, что вымораживание воды из осадка происходит двумя путями: в результате пленочной диффузии воды из слоя осадка к поверхности растущей ледяной фазы или вследствие зарождения новых центров кристаллизации воды внутри пор сетчатой коагуляционной структуры [по 18]. Относительный вклад каждого из механизмов зависит от режима замораживания осадка: чтобы произошло необратимое изменение структуры, замораживание проводят медленно, по всей толщине слоя осадка.

После замораживания-оттаивания фильтрационные свойства осадка значительно улучшаются. Опыт водопроводных станций США показывает, что применение этого метода перед обработкой осадка на вакуум-фильтрах обеспечивает более высокий экономический эффект, чем использование флокулянтов [1].

2.2.2 Технологии механического обезвоживания

Механическая обработка осадков предполагает применение следующих основных типов аппаратов: вакуум-фильтры, фильтр-прессы, центрифуги. Основными факторами, которые необходимо учитывать при выборе аппаратного оформления, являются количество минеральных примесей и тип реагентов, используемых для коагуляции.

Как правило, эффективность процесса обезвоживания прямо пропорциональна мутности воды и количеству получаемого осадка. Если вода умягчается, то осадок может содержать большое количество карбонатов кальция, и в этом случае он будет идеально подходить для обезвоживания.

Механическое обезвоживание водопроводных осадков нашло широкое применение за рубежом. Например, вакуум-фильтрование с разрежением до 50–80 кПа и с предварительным добавлением к осадку флокулянтов, известии, каменноугольной пыли, молотого мела, древесной муки и других наполнителей позволяет получить кек с влажностью 60–80 %.

Фильтр-прессование гравитационно уплотненного осадка обладает технико-экономическими преимуществами по сравнению с другими методами механического обезвоживания.

Тепловая обработка осадка при 40–150 °С снижает вязкость воды, степень гидратации частиц и увеличивает производительность механических обезвоживающих устройств. Однако эта технология требует значительных энергетических затрат и потому находит ограниченное применение.

На ряде водопроводных станций шт. Нью-Йорк (США) предварительную обработку водопроводных осадков проводят в два этапа: сначала его подвергают гравитационному уплотнению до влажности 96%, затем добавляют флокулянт и известь и подвергают вторичному гравитационному уплотнению до влажности примерно 92 %. Во вторично уплотненный осадок вводят летучую золу и обезвоживают его на фильтр-прессах. Конечное содержание твердого вещества в кеке 45–50 %. Применение в фильтр-прессах резиновых мембран, наполняемых воздухом, позволило в 1,2–2 раза увеличить их производительность и довести содержание твердого вещества в кеке до 56 % [по 18].

Центрифугирование осадка без использования дополнительных реагентов дает возможность повысить содержание твердой фазы лишь до 10–15 %, а с использованием реагентов до 25–30 %. Есть сведения, что содержание твердой фазы в осадке водоумягчительных установок можно довести центрифугированием до 60–65 %. Эффективность центрифугирования сильно зависит от состава осадка. Обычно предпочтение отдается корзиночным, маятниковым и цилиндрикоконическим центрифугам.

Для обезвоживания осадка, образующегося при коагуляции примесей сульфатом алюминия, а также осадка, образующегося в процессе осветления, перспективно использование так называемых декантеров (от. франц. *décanter* – сцеживать, сливать; декантация – сливание жидкости с отстоявшегося осадка, «обезвоживание»). Декантер – это цельнометаллическая шнековая центрифуга, которая обеспечивает высокое качество осветления и максимальное обезвоживание осадка (содержание сухого вещества в осадке после обработки составляет 19–23 %). Для применения в промышленных и муниципальных системах предусматривается повышенная износостойкость лопастей шнека, отверстий для выпуска твердого осадка, приемной камеры для твердого осадка и зоны подвода продукта к шнеку.

В России существуют технологии, позволяющие на отечественном оборудовании обезвоживать водопроводные осадки до влажности 60–80 % [1]. Так, в зависимости от требуемой степени обезвоживания проводят на

фильтр-прессах или вакуум-фильтрах после предварительной подготовки осадка физико-химическими методами с целью повышения его водоотдающих свойств. Повышение водоотдачи осадка перед обезвоживанием достигается введением раствора извести, полиакриламида или замораживанием.

Технологическая схема обработки водопроводного осадка на ленточных и камерных фильтр-прессах включает следующие операции [по 18]:

- 1) усреднение и уплотнение осадка;
- 2) приготовление растворов известкового молока и флокулянта;
- 3) дозированное введение химических реагентов в осадок;
- 4) дозированная подача кондиционированного осадка в аппараты механического обезвоживания;
- 5) обезвоживание;
- 6) выгрузка и транспортирование обезвоженного осадка;
- 7) регенерация фильтровальной ткани.

Влажность обезвоженного осадка после обработки составляет 60–75 %.

Уплотнение осадка является необходимым приемом, так как исходный осадок, особенно маломутных цветных вод, имеет высокую влажность (99% и выше). В процессе гравитационного уплотнения влажность осадка снижается до 92–98 % в зависимости от его исходного качества. В конструктивном отношении уплотнители могут быть выполнены в виде вертикальных емкостей круглого или квадратного сечения. Диаметр уплотнителей круглой формы при уплотнении осадка маломутных вод не следует принимать более 6 м, глубину – не менее 5 м. Для интенсификации уплотнения может быть использовано медленное перемешивание.

Для улучшения водоотдающих свойств осадков перед механическим обезвоживанием необходимо применять химические реагенты, продувку воздухом и промывку водой, что позволяет интенсифицировать уплотнение осадка, увеличить содержание твердой фазы на 3–6 % [21].

Для предварительных расчетов, связанных с использованием камерных фильтр-прессов (например, типа ФПАКМ) для обезвоживания осадка природных вод разного качества могут быть рекомендованы исходные данные, приведенные в таблице 18. Подбор дозы извести и параметры фильтрации предлагается подбирать по соотношению цветности и мутности воды в водоисточнике. Параметры работы фильтр-прессов в течение года могут существенно изменяться в соответствии с изменениями показателей цветности и мутности исходной воды.

Таблица 18 – Условия применения камерных фильтр-прессов для обработки осадка

Ц/М исходной воды, град·л/мг	Доза извести *, %	Давление, МПа		Время фильтроцикла, с	Влажность после обезвоживания	Производитель- ность, кг/(м ² ·час)
		фильтрации	отжи- ма			
Более 10	60–80	0,45	1,08	1500	75	6,2–7,9
5–10	40–60	0,57	1,14	1000	65	7,9–10,1
Менее 5	20–40	0,68	1,26	900	60	10,1–10,9

* доза извести в пересчете на СаО от массы сухого вещества.

Институтом «УкркоммунНИИпрогресс» (г. Харьков) разработаны технологии уплотнения и обезвоживания осадка, образующегося более чем на 20 водопроводных станциях Украины, Молдовы и России (реки Днепр, Северский Донец, Южный Буг, Днестр, Прут, Сиса, горные реки Крыма) [24].

По этой схеме промывные воды фильтров через песколовки, резервуары-накопители возвращаются в голову очистных сооружений, а осадок уплотняется, обрабатывается реагентами и обезвоживается на фильтр-прессах. Образовавшийся в результате обезвоживания осадка фильтрат направляется в резервуар-накопитель и совместно с промывными водами фильтров подается также в голову очистных сооружений. Обезвоженный осадок (кек) предполагается использовать в качестве компонента сырьевой смеси для производства красного кирпича взамен глины или в качестве удобрений в лесных питомниках и лесопосадках.

Таким образом, исключается сброс осадка в водоемы, но при этом увеличивается нагрузка на очистные сооружения в среднем на 6–9 % (из них промывная вода 5,5–8 %, декантат 0,5–1 % и фильтрат 0,1–0,2 %), что, однако, вполне приемлемо для их эффективной работы, так как при ступенчатой работе насосов насосной станции 1 подъема колебания расходов воды достигают 15% и выше. Увеличение «грязевой» нагрузки на очистные сооружения при возврате промывной воды составляет 1–2%, что также вполне допустимо.

Для 4-х групп водопроводных осадков, разделяемых по качеству исходной воды (см. таблицу 11), Институтом «УкркоммунНИИ-прогресс» разработаны соответствующие технологические схемы подготовки, уплотнения и обезвоживания водопроводного осадка.

Так, для обработки осадка 1-й группы водоисточников с наиболее высоким удельным сопротивлением фильтрации выбрана бессточная технологическая схема, приведенная на рисунке 8. Осадок водопроводной

станции с исходной влажностью 99,0–99,5 % направляется в вертикальный илоуплотнитель, в котором уплотняется в течение 24 часов с добавкой извести в количестве 20% от веса сухого вещества осадка, или (в период цветения воды в водоисточнике) 20% глины. Влажность уплотненного водопроводного осадка составляет 96–98 %. Уплотненный осадок (перед механическим обезвоживанием) направляется в специальный резервуар. Для улучшения процесса механического обезвоживания в водопроводный осадок добавляется известь в количестве 20% от его массы (на сухое вещество). При добавлении глины (для уплотнения перед механическим обезвоживанием) водопроводный осадок нагревают до 70–80 °С. Осадок обезвоживается на фильтр-прессах типа ФПАКМ, продолжительность одного фильтроцикла составляет 15–17 мин. Количество фильтр-прессов выбирается в зависимости от суточного количества образующегося на водопроводной станции осадка (по сухому веществу). Далее обезвоженный водопроводный осадок утилизируется.

Для обработки осадка 2-й группы водоисточников с более низким удельным сопротивлением фильтрации предлагается (см. таблицу 11) аналогичная схема с пониженными добавками извести или глины, но дозирование реагентов однократное – перед уплотнением (рисунок 9).

Водопроводный осадок 3-й группы водоисточников (см. табл. 11), уплотняется без внесения добавок в течение 18–24 час до влажности порядка 92,0–94,0 %. Осадок из илоуплотнителя через специальный бак подготовленного осадка подается на механическое обезвоживание с предварительным кондиционированием известью с дозой 10–20% (от сухой массы осадка). Схема такой бессточной обработки представлена на рисунке 10.

Для четвертой группы осадков (см. табл. 11) рекомендована безреагентная схема обработки осадков, приведенная на рисунке 11 и включающая осадкоуплотнитель, накопитель уплотненного осадка и фильтр-пресс.

В России, к сожалению, имеется небольшой практический опыт применения современных технологий обработки водопроводного осадка. Например, на очистных сооружениях г. Вологды осадок после гравитационного уплотнения с медленным перемешиванием и добавлением флокулянта обезвоживается на ленточном фильтр-прессе зарубежного производства и направляется на утилизацию [29].

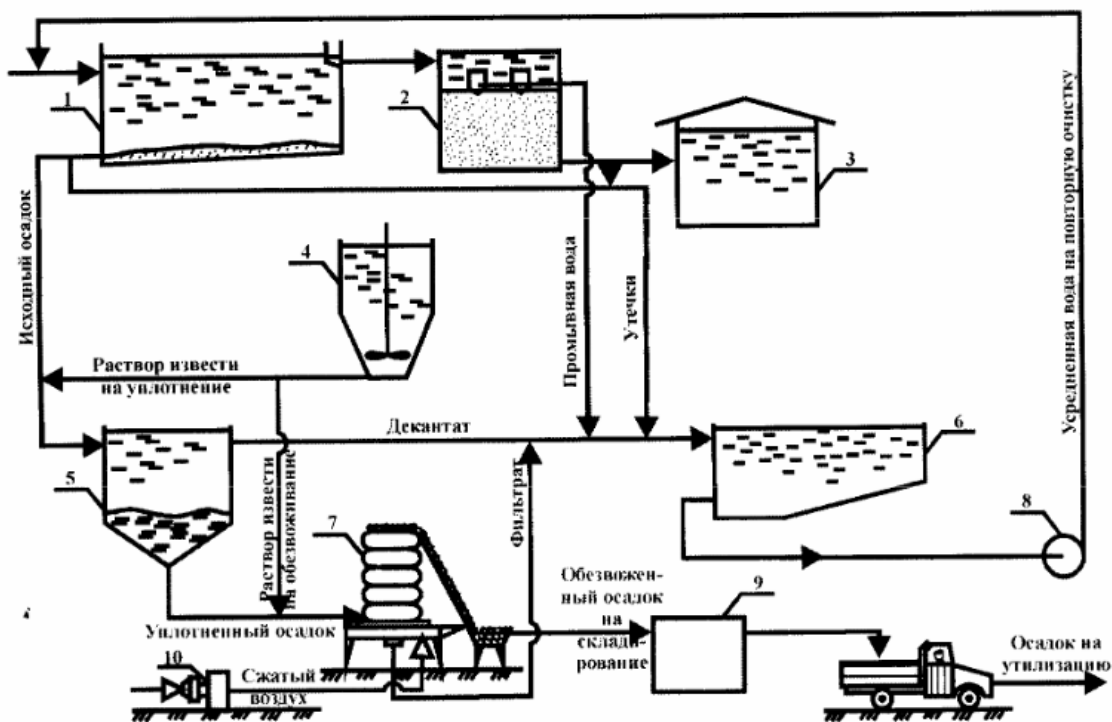


Рисунок 8 – Схема обработки осадков первой группы водоисточников [24]: 1 – горизонтальный отстойник; 2 – скорый фильтр; 3 – РЧВ; 4 – емкости для приготовления известкового молока; 5 – уплотнитель осадка; 6 – резервуар-усреднитель промывной воды; 7 – цех фильтр-прессов; 8 – насос перекачки усредненной воды; 9 – территория для складирования; 10 – компрессор высокого давления

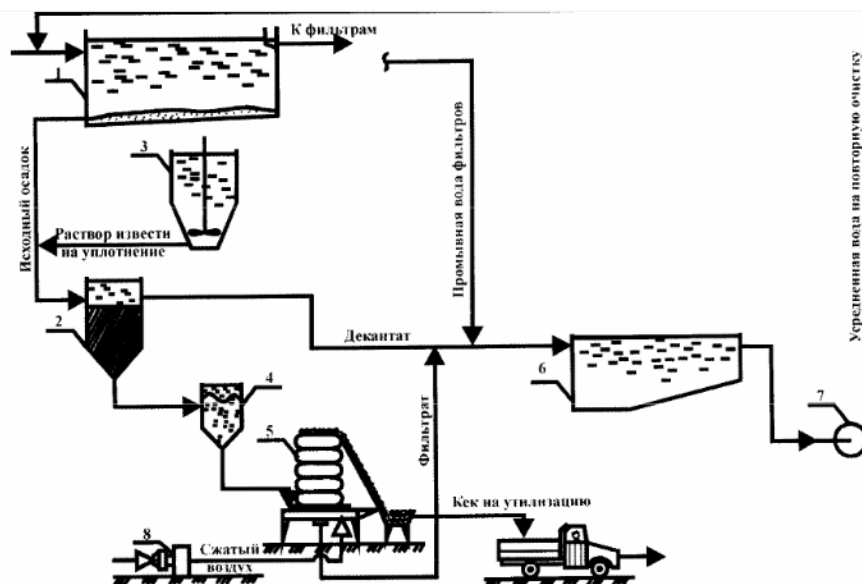


Рисунок 9 – Схема обработки осадков второй группы водоисточников [24]: 1 – горизонтальный отстойник; 2 – осадкоуплотнитель; 3 – емкости для приготовления известкового молока; 4 – накопитель уплотненного осадка; 5 – фильтр-пресс; 6 – резервуар-усреднитель промывной воды; 7 – насос перекачки усредненной воды; 8 – компрессор высокого давления.

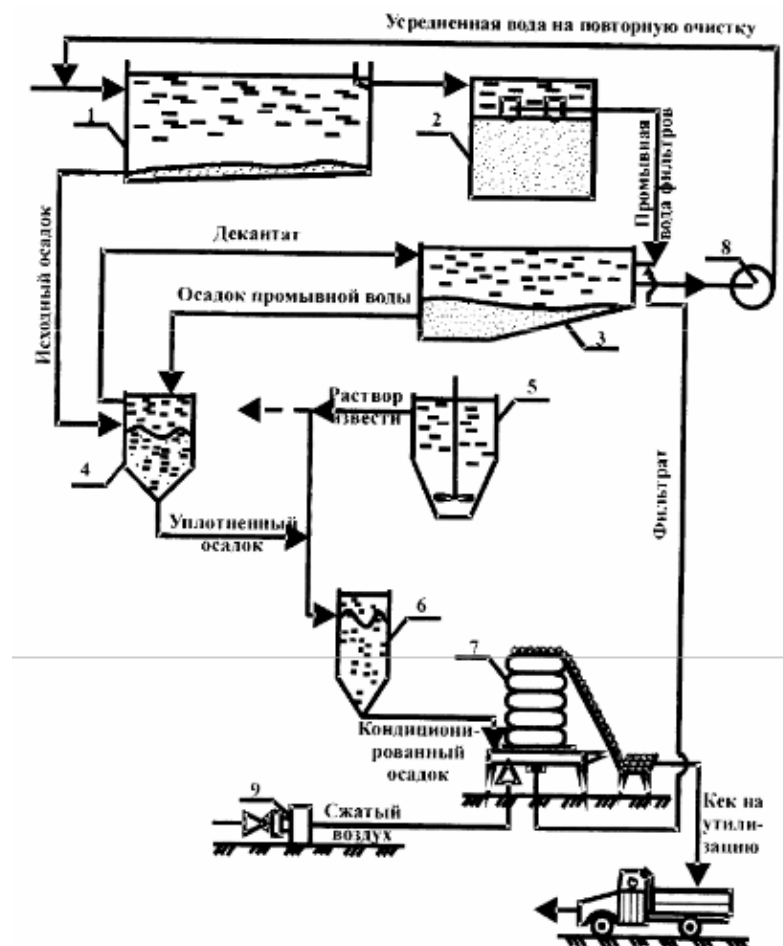


Рисунок 10 – Схема обработки осадков третьей группы водоисточников [24]: 1 – горизонтальный отстойник; 2 – скорый фильтр; 3 – резервуар-усреднитель промывной воды; 4 – осадкоуплотнитель; 5 – емкости для приготовления известкового молока; 6 – накопитель уплотненного осадка; 7 – фильтр-пресс; 8 – насос перекачки усредненной воды; 9 – компрессор высокого давления.

В 1990-е гг. МГП «Мосводканал» была проведена серия промышленных экспериментов по обезвоживанию осадка московских водопроводных станций на мембранном камерном фильтр-прессе с применением извести [12]. Установлено, что при дозе CaO 20–50 % технологических трудностей в процессе механического обезвоживания ВПО не возникает. Однако высокая стоимость извести и увеличение транспортных затрат на вывоз обезвоженного осадка делают этот способ в настоящее время экономически нецелесообразным.

Осадки Восточной и Северной станций (волжский водоисточник) в отличие от осадка Рублевской и Западной станций (москворецкий водоисточник) г. Москвы требуют высокой энергии смешения с раствором флокулянта и предварительной выдержки перед подачей на фильтр-пресс.

Авторы [12] делают вывод о том, что камерные фильтр-прессы рационально использовать для обезвоживания водопроводного осадка низкоцветных вод.

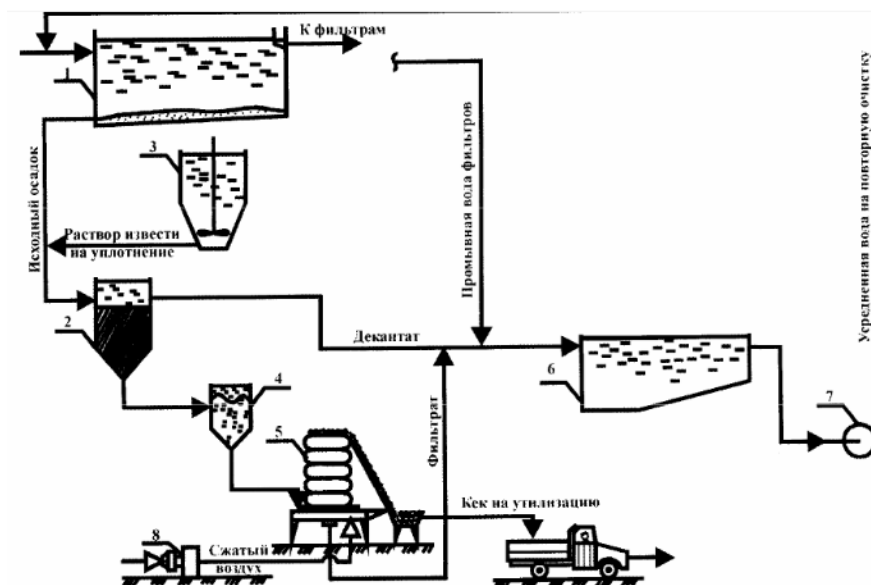


Рисунок 11 – Схема обработки осадков четвертой группы водоисточников [24]: 1 – горизонтальный отстойник; 2 – скорый фильтр; 3 – осадкоуплотнитель; 4 – накопитель уплотненного осадка; 5 – фильтр-пресс; 6 – резервуар-усреднитель промывной воды; 7 – насос перекачки усредненной воды; 8 – компрессор высокого давления.

Промышленное внедрение технологий обработки осадков сдерживается отсутствием производства в России необходимого оборудования и трудным финансовым состоянием жилищно-коммунального хозяйства.

2.2.3 Направления утилизации

В большинстве развитых стран принято предварительно обезвоживать осадки. В литературе [15, 17] выделяют следующие направления использования обезвоженных осадков природных вод.

- 1) захоронение;
- 2) применение в сельском хозяйстве;
- 3) «экологическое» использование;
- 4) добавка при производстве кирпича и цемента;
- 5) снижение содержания фосфора при обработке сточных вод.

Захоронение после обезвоживания связано с высокими затратами. Для стран Европы его стоимость составляет от 60 до 300 евро за тонну отходов и

нарастает со временем по мере исчерпания свободных площадей. Такое направление считается неперспективным и нуждается в пересмотре.

Использование в сельском хозяйстве предполагается на пастбищах, пахотных землях, лесах, парках, питомниках растений, обочинах дорог, полях для гольфа, газонах и домашних садах. Это направление считают перспективным водные компании Франции, Швеции и Великобритании, но трудности его развития во многом связаны с законодательными ограничениями.

«Экологическое» использование собираются развивать в Дании и Великобритании. Это направление включает:

- Восстановление эвтрофных озер (укупорка отложений с иммобилизацией фосфора).
- Использование осадков как наполнителя в мелиорации, т.е. для улучшения свойств почв, повышения их производительности.
- Рекультивация хранилищ отходов, включая ТБО.
- Производство кирпича и цемента. Опыт применения такого способа утилизации осадков есть в Бельгии, Дании, Ирландии, Португалии, Нидерландах и Великобритании.

Обезвоженный водопроводный осадок предлагается смешивать с угольной пылью, мазутом и сжигать. При обжиге смеси водопроводных и канализационных осадков можно получить инертный строительный материал, обладающий высокой механической прочностью.

Способ сжигания водопроводных осадков разработан для станций очистки питьевой воды Симферопольского гидроузла [30]. Ежегодно образуется около 500 т осадка, который при прокаливании теряет более 70% своей массы и пригоден для сжигания. Предложена схема обработки технологических стоков и утилизации осадка, которая включает очистку стоков на фильтрах с плавающей загрузкой (ФПЗ), способных работать с промывной водой с высоким содержанием механических примесей. В фильтрах такой конструкции в одном сооружении протекают процессы отстаивания и фильтрования. При этом не требуется использования насосов и емкостей для хранения промывной воды.

Перед подачей на ФПЗ промывные воды обрабатываются реагентом, вид и доза которого зависят от их качества. В свою очередь, технологические и конструктивные параметры фильтра определяются качеством сформировавшихся в промывной воде агрегатов после обработки ее реагентом. Частично очищенная вода отвечает требованиям технологического регламента станции очистки питьевых вод и может

подаваться в ее смеситель. Локализованный в пруде-накопителе и в улавливателе песка осадок отводится для подсушивания на специальную площадку с гидроизоляционным покрытием, куда также поступает зольная вода из установки сжигания.

Процесс подсушивания осадка в условиях Крыма с высокими среднегодовыми температурами успешно протекает в естественных условиях, что положительно отражается на технико-экономических показателях предложенной схемы очистки технологических сточных вод. Сжигание водопроводного осадка снижает его массу на 69–79 % и позволяет получить щебень, который можно использовать в качестве крупного заполнителя при производстве бетонов или в качестве других строительных материалов. Оплавленная поверхность щебня предотвращает вынос минеральных примесей выжженного осадка.

Кроме того, разработана и проверена в производственных условиях технология сжигания водопроводного осадка с его спеканием и получением из него щебня или кирпича [30].

Применение осадка, образующегося на водопроводной станции, в качестве сырья для кирпичного завода позволило получить кирпич марки М100. В качестве наполнителя в формировочной смеси использовался глинистый сланец (керамическая глина), применяемый на Симферопольском кирпичном заводе. Все полученные материалы могут без ограничения использоваться во всех видах строительства.

Таким образом, при сжигании 500 т осадка, который содержит около 80% горючих веществ, ежегодно будет утилизироваться свыше 100 т минеральных примесей, изъятых из промывной воды. Ежегодно может обезвредить 100 т вредных примесей технологических стоков очистной станции водопровода.

В работе [31] исследовали сорбционные свойства алюминийсодержащего осадка водопроводной станции непосредственно после обезвоживания. Обнаружена способность таких осадков сорбировать фосфор в форме ортофосфатов, полифосфатов и органических фосфорных соединений при низких значениях рН. При рН 4,0 сорбционная емкость в отношении ортофосфатов составила 10,2 мг/г, для полифосфатов – 7,4 мг/г и для органического фосфора – 4,8 мг на грамм осадка. Таким образом, осадок водопроводных станций может быть фильтрующим материалом для удаления фосфора из сточных вод.

3. ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ИСХОДНОГО ОСАДКА ОСВ г. ЧЕЛЯБИНСКА

3.1 Состав осадков

3.1.1 Влажность и содержание сухого вещества

Удаление осадка из отстойников происходит при их опорожнении и продувке. В результате полученный осадок сильно обводнен. Содержание воды в осадке, выраженное в массовых процентах, называется влажностью осадка. Эта величина взаимосвязана с содержанием сухого вещества осадка, которое выражается в г/л. Обе величины являются важнейшими параметрами, определяющими технологию обработки осадка. Так, например, дозы реагентов, применяемых для кондиционирования осадков, рассчитываются в процентах от сухого вещества осадка.

Автор [32, С.59], считает, что для обезвоживания осадков наиболее существенны две величины: пористость («porosity», ϕ) – объемная доля пор и комплиментарная ей величина объемной доли твердой фазы («solidosity», ψ):

$$\phi + \psi = 1$$

Для характеристики способности осадка к обезвоживанию также используется коэффициент пористости, $E = (1 - \psi) / \phi$.

Растворенные вещества не принимают участия в процессе обезвоживания, однако, могут влиять на плотность и вязкость жидкой фазы осадка.

Методика определения влажности осадка и содержания сухого вещества

Мерным цилиндром отбирают 50 мл осадка и количественно переносят его во взвешенный тигель, предварительно высушенный до постоянной массы при 105 °С. Для количественного переноса омывают цилиндр дистиллированной водой из пипетки, строго учитывая объем использованной воды ($V_{\text{в}}$, мл). После взвешивания тигля с сырым осадком из полученной массы сразу вычитают массу воды, соответствующую $V_{\text{в}}$.

Взвешивают тигель с влажным осадком и просушивают в сушильном шкафу при 105 °С до постоянной массы (не менее суток, обычно достаточно 3 суток). После высушивания переносят тигель с осадком в эксикатор, охлаждают до комнатной температуры и взвешивают ($m_{\text{сух}}$).

Взвешивания проводят на аналитических весах.

Вычисляют влажность осадка, W (%), по формуле

$$W = \frac{m_{\text{влажн}} - m_{\text{в}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{влажн}} - m_{\text{т}}} \cdot 100\%$$

где $m_{\text{влажн}}$ – масса тигля с влажным осадком, г; $m_{\text{в}}$ – масса воды для количественного переноса осадка, г, численно равна ее объему $V_{\text{в}}$, мл при плотности 1 г/мл; $m_{\text{сух}}$ – масса тигля с высушенным до постоянной массы осадком, г; $m_{\text{т}}$ – масса тигля, г.

Содержание сухого вещества осадка, $C_{\text{сух}}$, г/л, рассчитывают следующим образом

$$C_{\text{сух}} = (100 - W) \cdot 10$$

Отбор осадков осуществляли по сезонам:

- весенний период – при подготовке к паводку;
- летний период;
- осенний период.

Результаты определений сведены в таблицу 19. Осадки без обработки имеют влажность 95,76–98,74 %, содержание сухого вещества осадка составляет не менее 12,60 и достигает 42,25 г/л.

Таблица 19 – Влажность, содержание сухого вещества исходного осадка и его кека

Дата отбора	Влажность, %	Содержание сухого вещества, г/л	Влажность кека, %
06.10.2015	97,80	22,00	97,00–97,20
26.03.2016	98,26	17,40	95,17
28.06.2016	95,90	41,10	94,36
18.10.2016	98,74	12,60	–
09.03.2016	98,74	12,62	97,67
07.11.2016	97,73	22,70	96,02
09.03.2016	95,76	42,25	94,27
28.06.2016	96,55	34,53	93,90
07.11.2016	97,09	29,10	94,74

В табл. 19 также указаны величины влажности кеков исходных осадков. Кек получали при фильтровании под вакуумом ($66,66 \cdot 10^3$ Па) на установке для определения удельного сопротивления фильтрации (см. п. 3.2.1).

Вода в осадках может находиться в следующих формах (по нарастанию степени связанности): свободная, физико-механически связанная с твердыми частицами, физико-химически связанная и, наконец, химически связанная вода, входящая в состав вещества и не удаляемая даже при термической

сушке осадков. Механическими методами обезвоживания осадков удаляется большая часть свободной воды. Удаление влаги под давлением или выпаривание позволяют удалять физико-механически связанную воду (капиллярная, вода смачивания). Для этого требуется использовать аппараты, создающие давление выше капиллярного и разрушающие структурные связи [11].

При вакууме порядка 500 мм рт. ст. теоретическим пределом будет удаление влаги микрокапилляров с радиусом более $5 \cdot 10^{-6}$ м, однако, скорость водоотдачи капиллярной влаги относительно мала, что требует значительного времени [11]. Центрифуги и фильтр-прессы позволяют добиться удаления части связанной воды, эти аппараты более эффективны по сравнению с вакуум-фильтрами.

Очевидно, что обезвоживание без предварительной обработки осадка неэффективно: влажность снижается на 0,6 – 3 %, в среднем на 1,8 %. В целом влажность кеков после фильтрования под вакуумом не менее 94 %. Для применения механического обезвоживания необходима предварительная обработка осадков для повышения их водоотдающей способности.

3.1.2 Элементный состав осадка

Исследование химического состава натурального осадка проводили на примере образцов осадка двухъярусных отстойников (блок № 1), отобранного 6 октября 2015 года. Усредненные показатели качества воды в водохранилище в этот период следующие: мутность 2,9 мг/л, цветность 14 град., перманганатная окисляемость 5,2 мг О/л, температура 8–10 °С, фитопланктон 20–30 млн. кл/л.

Методика измерения

Элементный состав кека натурального осадка определяли с помощью энергодисперсионного анализатора Oxford INCA электронного сканирующего микроскопа JSM-700 1F в пробе, высушенной под вакуумом при 70° С до постоянного веса (таблица 20).

Таблица 20 – Состав кека исходного осадка

Элемент	C	O	Al	Si	Fe	Ca
% по массе						
Элемент	Mn	S	Mg	K	Cl	
% по массе						

Высокое содержание углерода связано с присутствием в осадках большого количества фитопланктона, а существенная доля кремния –

значительным содержанием в фитопланктоне водоисточника диатомовых водорослей в период, предшествующий отбору.

На рисунке 12 представлены фрагменты клеток диатомовых, обнаруженные нами в образцах высушенных осадков, взятых для определения элементного состава. Изображения получены с помощью сканирующего электронного микроскопа в НОЦ «Нанотехнологии» ЮУрГУ.

Известно, что клеточная стенка диатомовых состоит из аморфного кремния [4]. Диатомеи усваивают растворенный кремний, поддерживая его постоянную концентрацию на уровне, ниже равновесного с твердой фазой SiO_2 (в виде ортокремниевой кислоты и поликремниевых кислот переменного состава $m \text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$). Минимальная концентрация кремнезема, необходимая для роста диатомей, равна 0,2 мг SiO_2 /л. После отмирания диатомовых формируется биогенный кремнийсодержащий ил [5]. Нарастание доли диатомовых водорослей, возможно, приведет к ухудшению водоотдающей способности осадков, т.к. кремнеземы обладают высокой способностью к адсорбции воды [6].

Присутствие в осадке некоторых элементов обусловлено реагентной обработкой воды. Так, наличие алюминия объясняется использованием в качестве коагулянта сульфата алюминия, присутствие марганца – работой установки по марганцеванию воды в летний период, предшествующий опорожнению отстойника. Реагентная обработка приводит к депонированию соответствующих элементов в осадках. В целом состав осадка соответствует осадкам ОСВ, полученным при обработке маломутных и малоцветных вод.

3.1.3 Гранулометрический состав осадка

Методика измерения

Распределение частиц по размерам изучали на анализаторе MICROTRAC S 3500 в диапазоне 0,5 ... 1000 микрон. Для этого измеряли светорассеяние водных суспензий, полученных при воздействии ультразвука мощностью 25 Вт в течение 0; 30 или 60 с. Водную суспензию осадка получали непосредственно в измерительной ячейке, для чего вносили отобранный на ОСВ осадок (или замороженный после оттаивания в последующих экспериментах) до достижения требуемого уровня аналитического сигнала.

Предварительные исследования показали, что необходимо не менее трех параллельных измерений для получения надежного результата.

Гистограммы распределения частиц натурального осадка по размерам представлены на рисунке 13. Для исследования использовали осадок блоков № 1 и 3, отобранный в летний период (28.06.2016). Время воздействия ультразвука (УЗ) при пробоподготовке составило 0, 30 и 60 с.

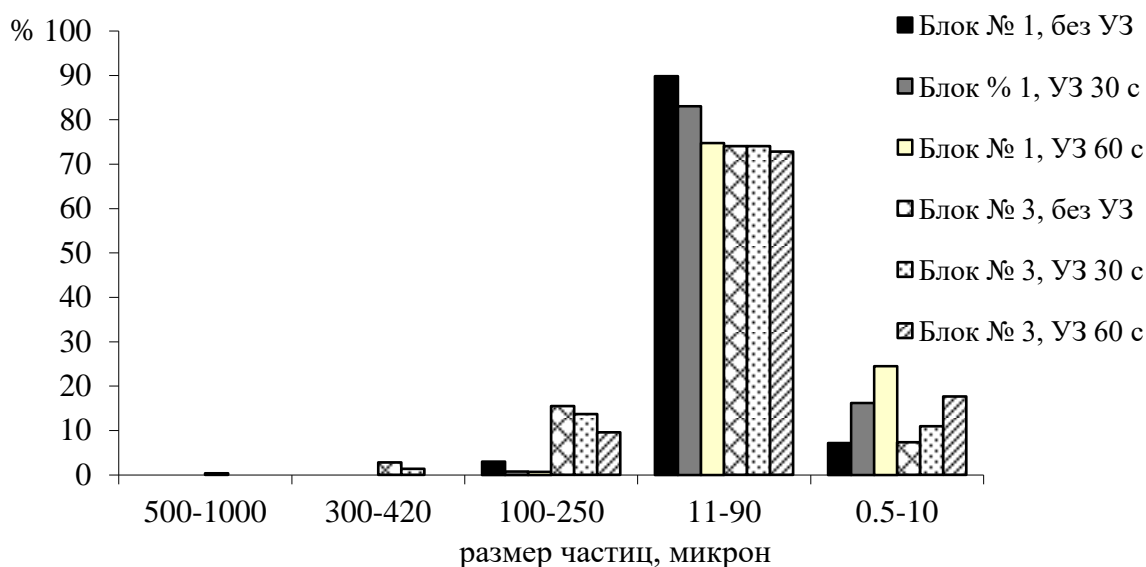


Рисунок 13 – Гистограммы распределения частиц натурального осадка по размерам

В работе [33] авторы на примере осадков производственных сточных вод в зависимости от размера преобладающих частиц суспензий предлагают выделять следующие типы частиц дисперсной фазы:

- грубозернистые – размер частиц более 300 микрон;
- тонкозернистые – размер частиц 100–250 микрон;
- шламopodobные – размер частиц 10–100 микрон;
- илоподобные – размер частиц менее 10 микрон.

Граница между суспензиями и коллоидами находится в пределах 0,1–1 микрон.

Таким образом, осадки ОСВ являются полидисперсными системами с размерами частиц от 0,5 до 1000 микрон. Преобладают частицы до 100 микрон, включая коллоидные. Развитая поверхность осадков, наличие электрохимического потенциала на поверхности раздела и гидратация существенно снижают водоотдающую способность подобных структур.

3.2 Водоотдающая способность осадка

Осадки природных вод представляют собой нефилтруемыe, сжимаемые осадки, состоящие из природных примесей воды и реагентов, используемых при водоподготовке.

Основным технологическим показателем водопроводных осадков, который определяет выбор способа их обработки, является водоотдающая способность, которая характеризуется удельным сопротивлением фильтрации. Этот показатель служит основным критерием при классификации осадков по характерным группам водоисточников с целью определения способов их кондиционирования и обезвоживания.

3.2.1 Удельное сопротивление фильтрации

Удельное сопротивление осадка – сопротивление единицы массы твердой фазы, отлагающейся на единице площади фильтра при фильтровании при постоянном давлении суспензии, вязкость жидкой фазы которой равна единице [11].

Методика определения

Определение удельного сопротивления фильтрации исходного осадка проводили по известной методике на установке, описанной в [11] при вакууме $\Delta P=500$ мм рт ст. Схема установки представлена на рисунке 14.

Расчет удельного сопротивления фильтрации проводили по формуле

$$r = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot F^2}{\mu \cdot x} \cdot B$$

r – удельное сопротивление фильтрации, см/г;

$\Delta P = 66,661 \cdot 10^3$ Па=500 мм рт ст – давление, при котором идет фильтрование;

F – площадь фильтрации, см², равна площади воронки Бюхнера;

μ – динамический коэффициент вязкости фильтрата, равен $1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с (при $t=20,2^\circ\text{C}$);

x – масса твердой фазы кека, отлагающегося на фильтре при получении единица объема фильтрата. Численно равна содержанию сухого вещества в осадке, выраженному в г/мл;

$B = t/V^2$ – параметр, получаемый опытным путем и численно равный углу наклона прямой, построенной в координатах $t/(V-V_0)=f(V)$, где t – время фильтрации, V – объем полученного фильтрата при данном времени фильтрации, V_0 – нулевой объем, фиксируется в момент начала вакуумирования; для экспериментов с осадками очистных сооружений водопровода во всех случаях наблюдали, что $V_0=0$.

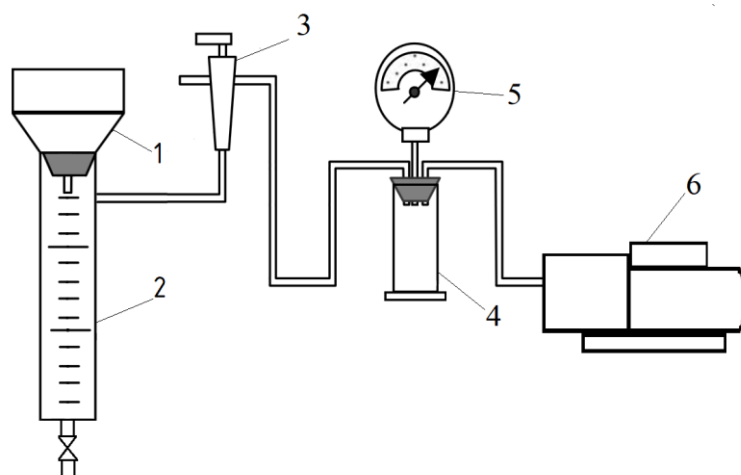


Рисунок 14 – Установка для определения удельного сопротивления фильтрации: 1 – воронка Бюхнера; 2 – мерный цилиндр; 3 – запорный кран; 4 – ресивер; 5 – вакуумметр; 6 – вакуум-насос

Результаты экспериментов по определению удельного сопротивления исходных осадков приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Удельное сопротивление фильтрации исходного осадка

Период	Удельное сопротивление, $\text{г} \cdot 10^{10}, \text{м/кг}$
06.10.2015	6300
26.03.2016	3275
28.06.2016	3841
18.10.2016	7297
09.03.2016	5892
07.11.2016	6066
09.03.2016	6320
28.06.2016	1967
07.11.2016	1546

Таким образом, осадки отстойников очистных сооружений водопровода без обработки имеют удельное сопротивление фильтрации $1500\text{--}7300 \cdot 10^{10}$ м/кг, относятся к трудно фильтруемым и нуждаются в предварительной обработке для увеличения водоотдающей способности.

Пример графического определения параметра В приведен на рисунке 14. По мере фильтрования под вакуумом увеличивается объем кека на фильтровальной перегородке, что служит дополнительным препятствием фильтрованию.

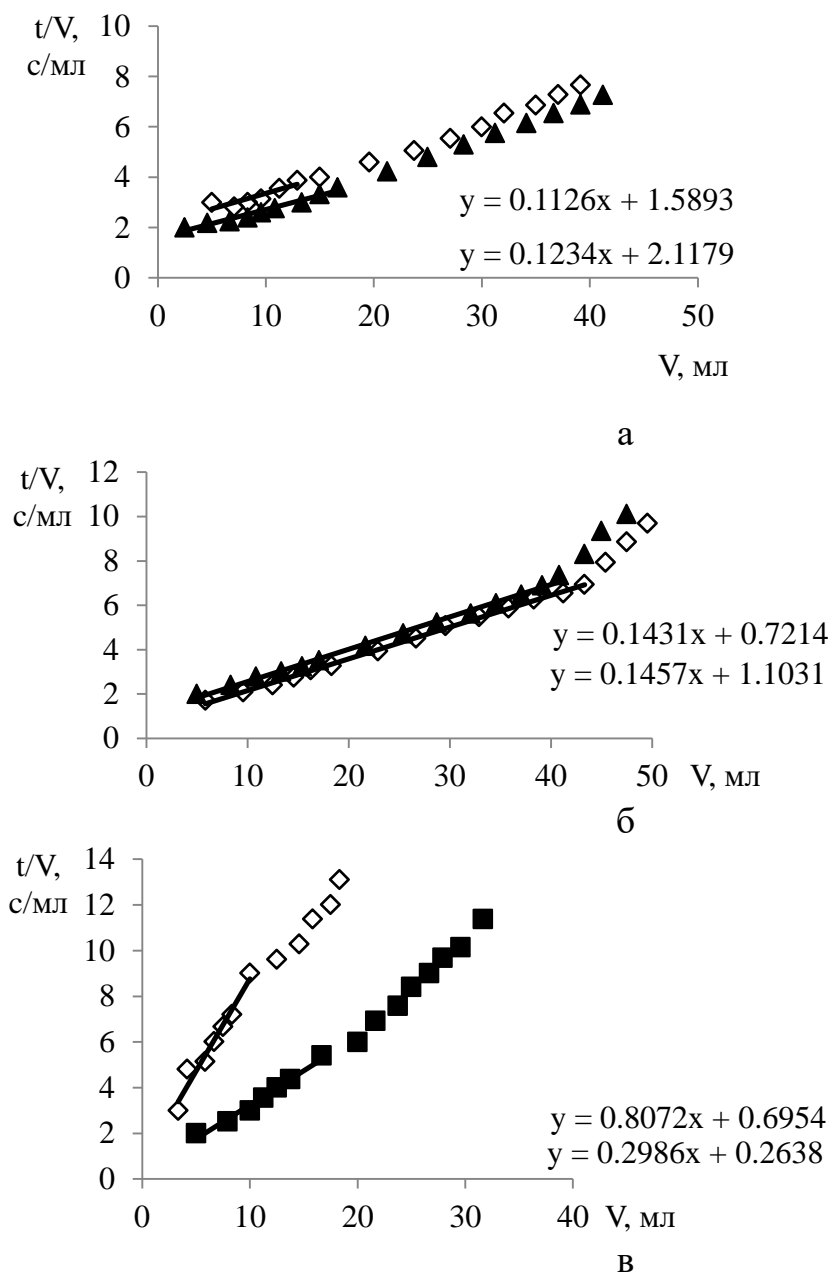


Рисунок 15 – График построения параметра В (в двух параллелях) для исходных осадков ОСВ, отобранных в марте 2016 года: а – блок № 1; б – блок № 2; в – блок № 3

Если кек осадка подвержен сильному сжатию (рис. 14 б), то на графике $t/V=f(V)$ возникает отчетливая точка перегиба, после которой процесса водоотдачи резко замедляется. По-видимому, при сжатии осадка поры и каналы сужаются, препятствуя оттоку воды. На рисунках 14 а, 14 в перегиб выражен слабо, следовательно, по мере формирования кека не происходит значимого изменения структуры осадка. На рисунке 16 представлено изменение величины удельного сопротивления фильтрации по сезонам 2016 года на блоках № 1–3.

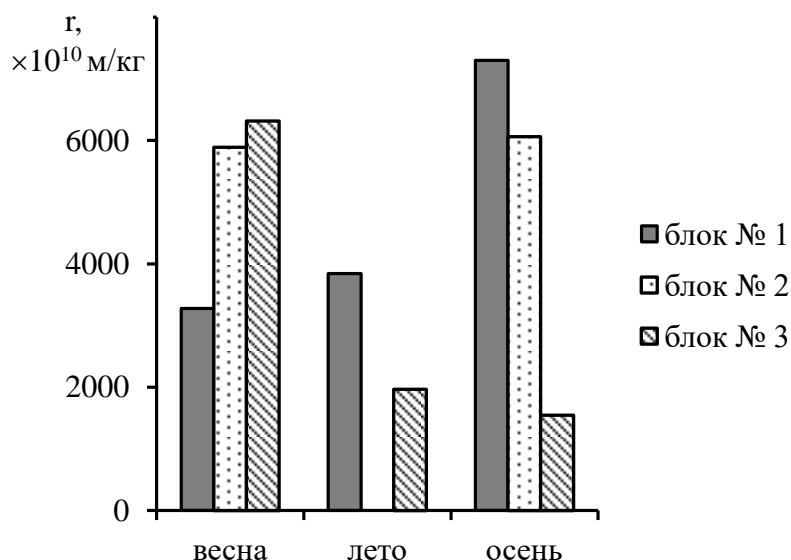


Рисунок 16 – Изменение удельного сопротивления фильтрации исходного осадка по данным 2016 г.

В весенний период удельное сопротивление фильтрации осадка блока № 1 составляет $3275 \cdot 10^{10}$ м/кг, что ниже, чем соответствующие величины для блоков № 2 и 3. Осадок блока № 1, отобранный в летний период, имеет весьма близкое к весеннему значению удельного сопротивления фильтрации $3841 \cdot 10^{10}$ м/кг. Наконец, осенний осадок отличается максимальными значениями этой величины ($7297 \cdot 10^{10}$ м/кг)

Осадок блока № 2 в весенний и осенний периоды имеет близкие значения удельного сопротивления фильтрации – около $6000 \cdot 10^{10}$ м/кг. Осадок блока № 3 имеет максимальные значения удельного сопротивления фильтрации в весенний период ($6320 \cdot 10^{10}$ м/кг), в то же время для летнего и осеннего осадков этого блока удельное сопротивление фильтрации не превышает $2000 \cdot 10^{10}$ м/кг.

В целом, осадок, отобранный в летний период, имеет усредненное значение удельного сопротивления фильтрации около $3000 \cdot 10^{10}$ м/кг, в то время как осадки весеннего и осеннего периодов – около $5000 \cdot 10^{10}$ м/кг. В летний период 2016 года наблюдали массовое размножение синезеленых (см. п 1.2, таблицу 4), в весенний и осенний периоды такое явление отсутствует. По-видимому, присутствие в осадках значительного количества клеток фитопланктона способствует некоторому повышению водоотдающей способности осадков.

Кроме того, существенное значение имеет температура воды в водоисточнике (см. п 1.2, таблицу 4): в весенний период она составила 1 °С, в осенний – снижалась с 12,7 до 1 градуса, а в летний период была высокой

(10,5 – 18,5 °С). При повышении температуры очищаемой воды происходит снижение вязкости, а значит замедление процессов оседания и формирования осадка в зоне накопления отстойника. Это приводит к снижению удельного сопротивления фильтрации осадка.

Высокие значения удельного сопротивления фильтрации для осадка блока № 3 в весенний период (см. рисунок 15) можно объяснить следующим: осадок этого блока имел очень высокое содержание сухого вещества (42,25 мг/л) по сравнению с осадками первого и второго блоков (17,4 и 12,62 мг/л). Более концентрированный осадок имеет большую вязкость фильтрата при равной температуре очищаемой воды [11].

Предположение, что осадок осеннего периода будет скорее приближаться по свойствам к весеннему осадку, чем к летнему, сделанное в п. 1.2, подтверждается усредненными данными значений удельного сопротивления фильтрации. Вместе с этим, все осадки вне зависимости от даты отбора относятся к нефилтруемым и требуют предварительной обработки для эффективного обезвоживания.

3.2.2 Термолиз

Для исследования форм и количества связанной воды в осадках использовали TG–DTA–MS–анализ. Осадок, отобранный 06.10.2015 с исходной влажностью 97,8 %, фильтровали при вакууме 66,66 10³ Па, полученный кек высушивали при 70 °С до постоянной массы. Термоанализ и масс-спектрометрические съемки образцов проводили в токе аргона и токе воздуха. Результаты представлены на рисунках 17–20.

Осадки природных вод являются многокомпонентными полидисперсными системами. В их состав входят гидроксиды металлов, в частности, гидроксиды алюминия, поскольку соли алюминия применяют в качестве коагулянтов. Поэтому термолиз осадков включает множество стадий, соответствующих различным химическим превращениям, по-разному протекающим в атмосфере аргона и воздуха.

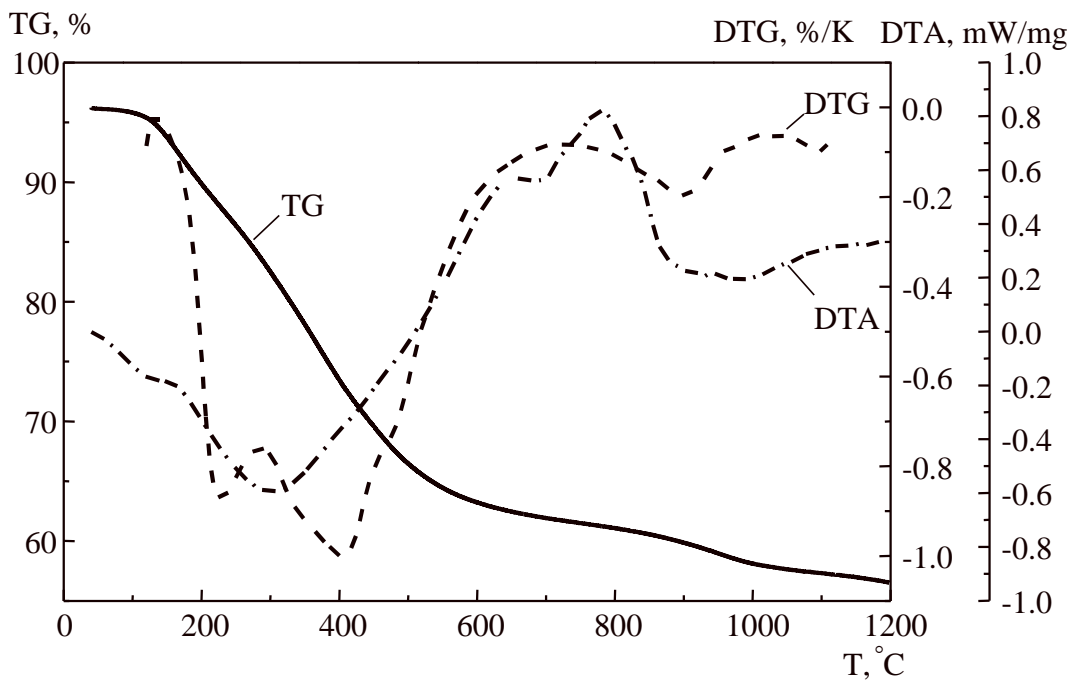


Рисунок 17 – Термоаналитические кривые образца исходного осадка при исследовании в токе воздуха

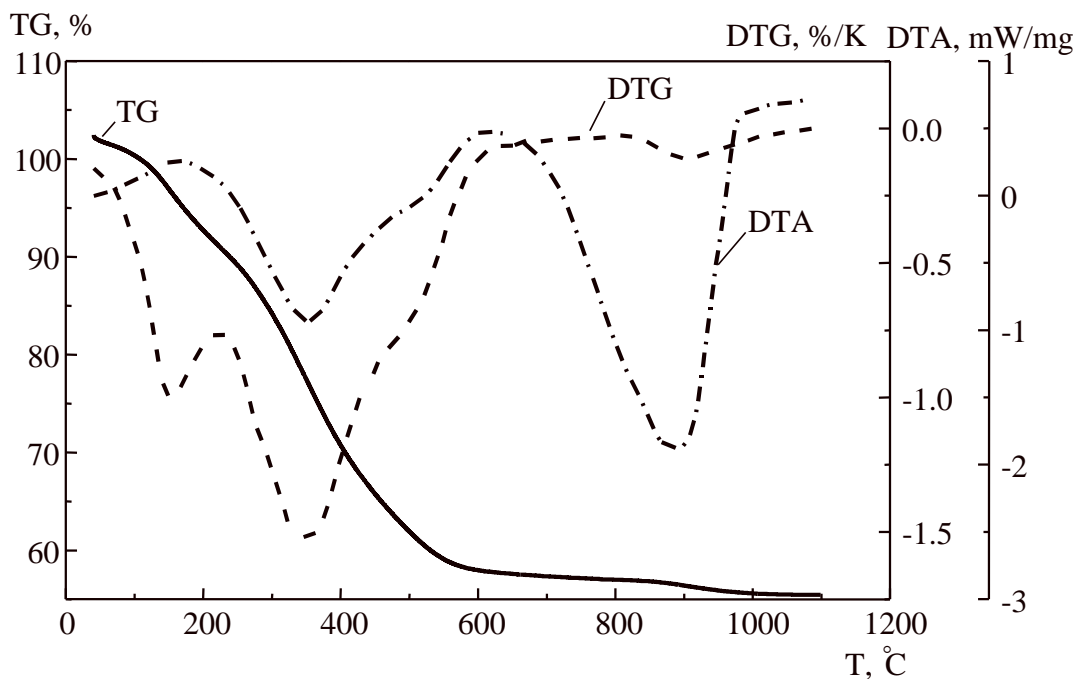


Рисунок 18 – Термоаналитические кривые образца исходного осадка при исследовании в токе аргона

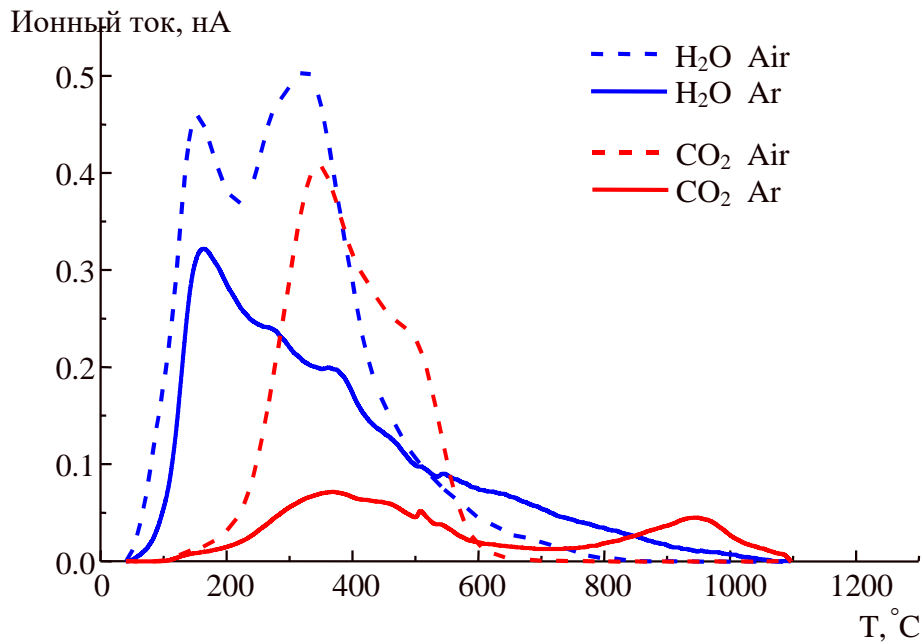


Рисунок 19 – Масс-спектрометрические кривые воды и углекислого газа для образца исходного осадка при исследовании в токе воздуха (Air) и аргона (Ar)

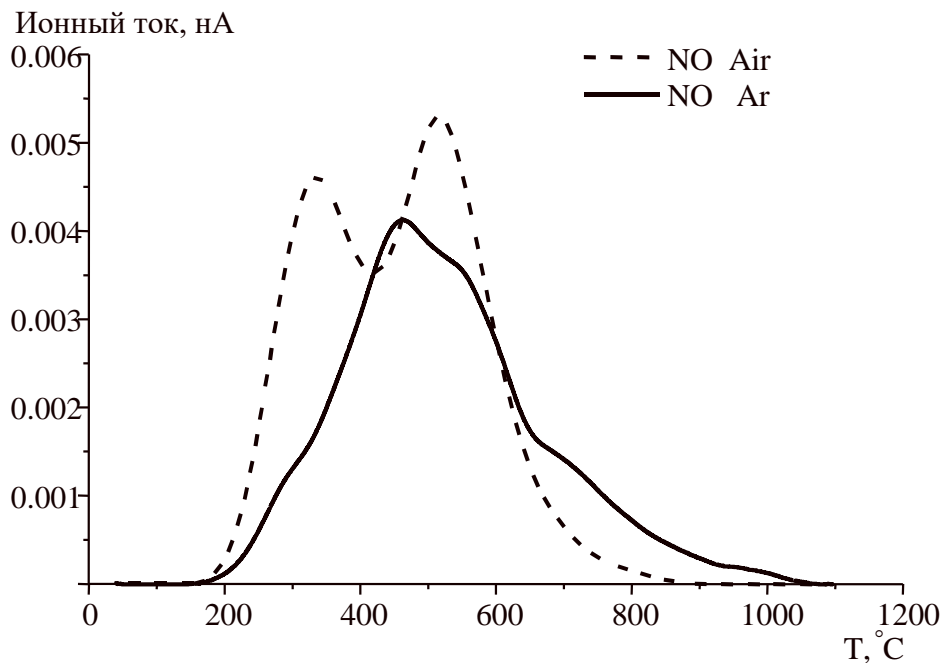


Рисунок 20 – Масс-спектрометрические кривые оксида азота (II) для образца исходного осадка при исследовании в токе воздуха (Air) и аргона (Ar)

В атмосфере аргона окислительных процессов не протекает, органические вещества при этом обугливаются. Пики на масс-спектрах углекислого газа обусловлены разложением карбонатов и оксалатов.

В токе воздуха кривые масс-спектров имеют более сложные профили. Это обусловлено окислением (сгоранием) органических веществ в присутствии кислорода воздуха с выделением углекислого газа, воды и других продуктов окисления.

Тип связи воды в образцах определяется температурой ее удаления. До 200 °С удаляется капиллярно связанная и кристаллогидратная вода. После 200 °С происходит отщепление воды ОН-групп (оловая вода). Положение ОН-групп определяет температуру их отщепления, которая в общем случае увеличивается в ряду: геминальное положение, вицинальное, мостиковые и изолированные ОН-группы [32].

Выделение капиллярной воды происходит в интервале $\approx 105 \dots \approx 140$ °С. Удаление кристаллогидратной воды требует больших энергетических затрат и происходит при температурах $\approx 130 \dots \approx 200$ °С и выше. Отщепление кристаллогидратной воды происходит поэтапно и определяется строением гидратной сферы (молекулы воды входят во внутреннюю или наружную гидратную оболочку), природой центрального атома.

Масс-спектр воды, записанный в токе аргона (рисунок 19), имеет асимметричный пик при 163 °С с последующим плавным ниспаданием. При 163 °С вероятно отщепляется кристаллогидратная вода. Плавное снижение интенсивности выделения воды после 200 °С связано с удалением изолированных ОН-групп аморфного гидроксида кремния [34].

Масс-спектр воды, записанный в токе воздуха (рисунок 19) имеет два выраженных пика. Первый из них при температуре 153 °С соотносится с пиком при 163,5 °С на масс-спектре воды в токе аргона и соответствует удалению кристаллогидратной воды. Второй пик (324 °С) обусловлен сгоранием органических веществ осадка на воздухе с выделением воды и углекислого газа. Это предположение подтверждается пиком при 345 ° на масс-спектре углекислого газа в токе воздуха. В токе аргона обугливание с выделением углекислого газа соответствует пику 368,7 °С. Карбонаты осадков разлагаются в области температур порядка 550–900 °С [10].

На всех масс-спектрах углекислого газа в токе аргона фиксировали пик при температурах 938–949 °С. При таких температурах идет выделение CO_2 за счёт взаимодействия высокодисперсного углерода с оставшимися поверхностными гидроксидными группами.

Выделение NO при термолизе образцов низкое и составляет не более 1 %. Характерный вид масс-спектров представлен на рисунке 20. Масс-спектрометрическая кривая оксида азота (II) в токе воздуха имеет два максимума. Первый максимум в области температур 330...339 °С соответствует окислению органических веществ на воздухе с выделением NO, CO₂, H₂O и других продуктов горения. Второй максимум для натурального осадка соответствует 514,3 °С и обусловлен разложением нитратов.

На основании массы выделившегося углекислого газа при термолизе рассчитали соотношение органического и неорганического углерода в высушенном осадке. Результаты представлены в таблице 22.

Суммарное количество органического и неорганического углерода приняли по массе CO₂, выделившегося в токе воздуха, что составило 26,75 % (в пересчете на углерод). Количество неорганического углерода рассчитывали по массе CO₂, выделившегося в токе аргона в интервале температур до 700 °С. При более высоких температурах идет выделение CO₂ за счёт взаимодействия высокодисперсного углерода с оставшимися поверхностными гидроксидными группами.

Таблица 22 – Полуколичественный расчет массы выделившихся газов при термолизе исходного осадка сооружений водопровода

m(H ₂ O), % масс.		m(CO ₂), % масс.		m(NO), % масс.	
в токе воздуха	в токе аргона	в токе воздуха	в токе аргона	в токе воздуха	в токе аргона
76,50	52,10	98,1	34,10	0,98	0,81

Выявлено, что доля углерода органических соединений в высушенном осадке составляет 73,4 – 75,9 %, остальные 26,6 – 24,1 % приходятся на углерод неорганического происхождения (карбонаты, гидрокарбонаты).

Таким образом, с учетом данных по влажности (таблица 19) и результатов обработки масс-спектров осадка, отобранного 06.10.2015, выявили следующий его состав:

- 97,8 % – вода свободная и физико-механически связанная.
- 2,2 % – сухое вещество осадка, из которого более половины (52,1 %) приходится на физико-химически и химически связанную воду; Преимущественно это кристаллогидратная вода и вода ОН-групп. Плавное снижение интенсивности выделения воды при высоких температурах (свыше 600°С) связано с удалением изолированных ОН-групп аморфного гидроксида кремния.

- В сухом веществе осадка 26,75 % (масс.) приходится на углерод, из которого в среднем 20 % – углерод органического происхождения, а оставшаяся часть соответствует углероду неорганического происхождения (карбонаты, гидрокарбонаты).

3.3 Старение

При хранении осадка в течение долгого времени между экспериментами вероятно старение образца. Авторы [32] называют этот процесс ‘interexperimental’ ageing, т.е. внутриэкспериментальным старением. Так, хранение осадка в течение 7 месяцев привело к существенному росту водоотдающей способности железосодержащих сточных вод.

В общем случае авторы [32, С. 433] выделяют основные причины старения:

- упрочнение связей, связанное с увеличением площади контакта между частицами осадка;
- уплотнение агрегированной массы, которое приводит к синерезису;
- фазовые переходы оксигидроксидов металлов в более стабильные формы;
- биологическая активность бактерий, водорослей и других микроорганизмов.

С течением времени должны происходить процессы оксоляции оксигидроксидов алюминия. Однако, авторы [32] не нашли подтверждений тому, что рост степени кристалличности флокул существенно увеличивает фильтруемость осадков: хотя оксоляция приводит к увеличению содержания капиллярной воды, менее связанной с твердой фазой, но одновременно растет устойчивость структуры осадка к действию механических сил. Для железо- и алюминийсодержащих водопроводных осадков наблюдали увеличение напряжения сдвига (shear strength) при хранении в герметичных пластиковых бутылках от недели до месяца.

Однако, мы не наблюдали существенных изменений величины удельного сопротивления фильтрованию при хранении образцов в герметичных пластиковых бутылках (таблица 23). Хранили осадки в при температуре +8 °С в холодильнике для сдерживания процессов брожения.

Таким образом, при хранении исходного осадка в пластиковых емкостях при температуре +8 °С до 3 месяцев внутриэкспериментального старения, существенно влияющего на удельное сопротивление фильтрации, не наблюдали.

Таблица 23 – Удельное сопротивление фильтрации осадков при хранении

Место отбора осадка	Дата эксперимента	Возраст осадка, дни	Удельное сопротивление фильтрации, $\text{г} \times 10^{10}$, м/кг
Блок № 2	09.03.2016	свежеотобранный	5 892
	28.03.2016	19	5 190
	05.05.2016	57	5 553
Блок № 3	09.03.2016	свежеотобранный	6 320
	28.03.2016	19	4 210
Блоки № 2 и № 3 (смешанный осадок)	09.03.2016	свежеотобранный	4 054
	21.03.2016	11	4 523

3.4 Выводы

Изучен состав и свойства осадков ОСВ г. Челябинска, отобранных в весенний, летний и осенний периоды года. Определен элементный состав сухого вещества осадка. Показано, что вещества, используемые для реагентной обработки очищаемой воды, депонируются в осадке.

Осадки без обработки имеют следующие характеристики:

- влажность 95,76–98,74 %,
- содержание сухого вещества 12,60–42,25 г/л,
- удельное сопротивление фильтрации $1500\text{--}7300 \cdot 10^{10}$ м/кг.

Осадки ОСВ являются полидисперсными системами с размерами частиц от 0,5 до 1000 микрон. Преобладают частицы с размерами менее 100 микрон, включая коллоидные. Существенными факторами, влияющими на свойства осадка, являются температура и содержание клеток планктона в очищаемой воде, содержание сухого вещества осадка.

Изучен термолиз воздушно-сухого осадка. Установлено, что в сухом веществе осадка 52,1 % приходится на физико-химически и химически связанную воду. Преимущественно это капиллярно связанная и кристаллогидратная вода, удаляемая при температурах до 200 °С, и химически связанная вода ОН-групп, которая отщепляется при более высоких температурах. В сухом веществе осадка 26,75 % приходится на углерод, из которого в среднем 20 % – углерод органического происхождения, а оставшаяся часть соответствует углероду неорганического происхождения (карбонаты, гидрокарбонаты).

В целом состав осадка соответствует осадкам ОСВ, полученным при обработке маломутных и малоцветных вод, и относится к нефилтруемым. Усредненное значение удельного сопротивления фильтрации осадков,

отобранного в летний период, около $3000 \cdot 10^{10}$ м/кг, осадков весеннего и осеннего периодов – около $5000 \cdot 10^{10}$ м/кг.

Возврат промывных вод, реализуемый на блоке № 3, способствует повышению мутности очищаемой воды, формированию осадков с несколько более низким значением удельного сопротивления фильтрации, по сравнению с осадками блоков № 1 и 2.

Однако, на свойства осадка блока № 3, отобранного в весенний период, в большей степени оказывает влияние высокое содержание сухого вещества осадка (42,25 мг/л) – более концентрированный осадок имеет большую вязкость фильтрата, что повышает удельное сопротивление фильтрации. В летний период формирования осадков более значимыми факторами, по-видимому, становятся повышение температуры очищаемой воды и резкое увеличение численности фитопланктона в ней (до значений «цветения»). Осадок, сформированный в летний период, отличается более высокой водоотдачей, включая образцы осадка с высоким содержанием сухого вещества (41,10 мг/л).

При хранении осадка при температуре +8 °С в течение 3 месяцев внутриэкспериментального старения, существенно влияющего на удельное сопротивление фильтрации, не наблюдается.

4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОСАДКОВ ОСВ

Предварительные исследования (п. 3) показали, что осадки, образующиеся на ОСВ г. Челябинска, относятся к трудно фильтруемым и нуждаются в предварительной обработке для увеличения водоотдающей способности.

Анализ литературных данных позволяет считать наиболее перспективными способами повышения водоотдающей способности осадков ОСВ замораживание – оттаивание и реагентную обработку.

4.1 Замораживание – оттаивание

Образцы осадка, объемом от 0,5 до 1 дм³, промораживали в течение 7 суток. После оттаивания определяли удельное сопротивление фильтрации, влажность кека после обезвоживания и гранулометрический состав по методикам, изложенным в п. 3.

Замораживание существенно изменяет текстуру осадка: если натуральный осадок представляет собой неоднородную гелеобразную массу, то после оттаивания он расслаивается на прозрачную надосадочную жидкость и твердую фазу в виде гранулоподобных частиц. Надосадочная жидкость может быть легко декантирована.

4.1.1 Водоотдающая способность и гранулометрический состав осадков после оттаивания

Процесс замораживания-оттаивания создает условия для существенного увеличения водоотдающей способности осадков. Удельное сопротивление фильтрации снижается на 1–3 порядка (см. таблицу 24) и достигает значений, приемлемых для дальнейшей механической обработки. Влажность кека замороженного осадка после оттаивания и фильтрования под вакуумом составила от 41 до 75 %. Текстура профильтрованного осадка также существенно изменилась: если кек исходного осадка неоднородный гелеобразный, то после замораживания-оттаивания – это однородная текстура типа «влажная земля».

Процесс перехода осадка из жидкого состояния в твердое при охлаждении наблюдали в тонком слое осадка и зафиксировали его с помощью микрофотосъемки. На рисунке 21 виден процесс кристаллизации, в результате которого образуются игольчатые фрагменты твердой фазы воды.

При снижении температуры до 0 °С происходит фазовый переход свободной влаги из жидкого состояния в твердое. Далее лед образуется за счет связанной воды осадка, но для этого необходимо преодолеть силы сцепления воды с твердой фазой осадка, поэтому интенсивность образования льда снижается [18]. Кристаллизация сопровождается сжатием, уплотнением прилегающих областей жидкой фазы осадка. Флокулы осадка сжимаются в крупные конгломераты, разделенные областями льда. После оттаивания такой системы вода легко дренирует через трещины, поры и каналы, образовавшиеся в процессе кристаллизации. Поэтому осадок после замораживания–оттаивания легко обезвоживается. Подобные явления описывает и автор [32, С.445].

Таблица 24 – Повышение водоотдающей способности осадков после замораживания-оттаивания

Дата отбора	Свойства исходного осадка		Условия обработки	Удельное сопротивление, $\times 10^{10}$ М/кг	Влажность кека, %
	Влажность, %	$m_{\text{сух. в-ва}}$, г/л			
Блок № 1					
06.10.2015	97,8	22,00	без обработки	6300–7300	97,2
			замораживание-оттаивание	146	75,3
28.06.2016	95,89	41,14	без обработки	3841	94,36
			замораживание-оттаивание	34	41,73
Блок № 2					
09.03.2016	98,74	12,62	без обработки	5892	97,67
			замораживание-оттаивание	6	60,75
Блок № 3					
09.03.2016	95,76	42,25	без обработки	4210–6320	94,86-94,27
			замораживание-оттаивание	24	59,04
Смесь осадков блоков № 2 и № 3					
09.03.2016	96,75	31,17	без обработки	4054	94,85
			замораживание-оттаивание	28	58,12

В работе [18] отмечается, что наиболее эффективное снижение удельного сопротивления фильтрации осадков достигается путем медленного промораживания. При таком условии вся связанная влага, способная к диффузии, мигрирует изнутри коллоидных частиц наружу, в межчастичное пространство, где и замерзает. Давление, возникающее при расширении кристаллизующейся воды, способствует коагуляции и укрупнению обезвоженных частиц твердой фазы осадков.

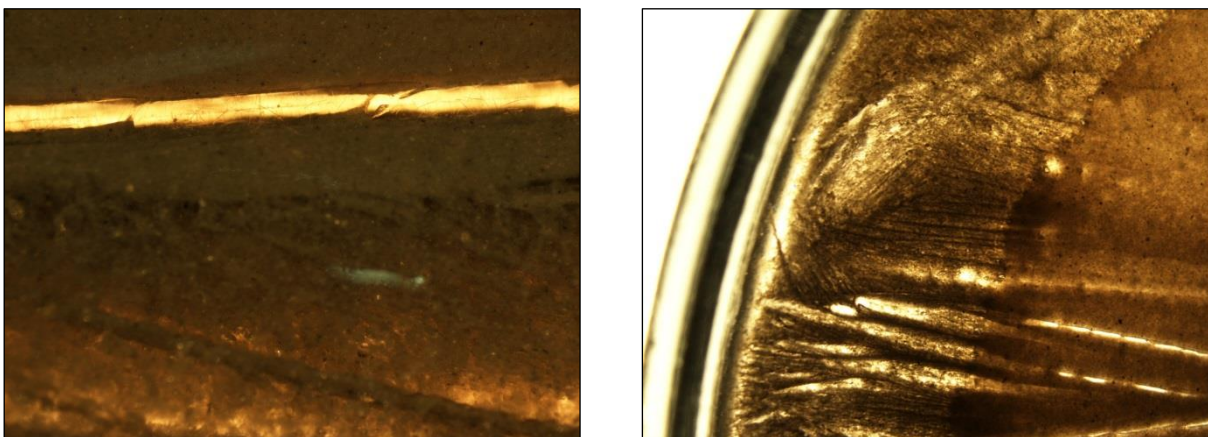


Рисунок 21 – Микрофотографирование процесса замораживания осадка

Увеличение размеров частиц дисперсной фазы осадка в процессе замораживания зафиксировано нами на диаграммах распределения (рисунок 22). Для исходного осадка диаграмма распределения частиц по размерам узкая, с максимумом, соответствующим размерам от 11 до 90 микрон.

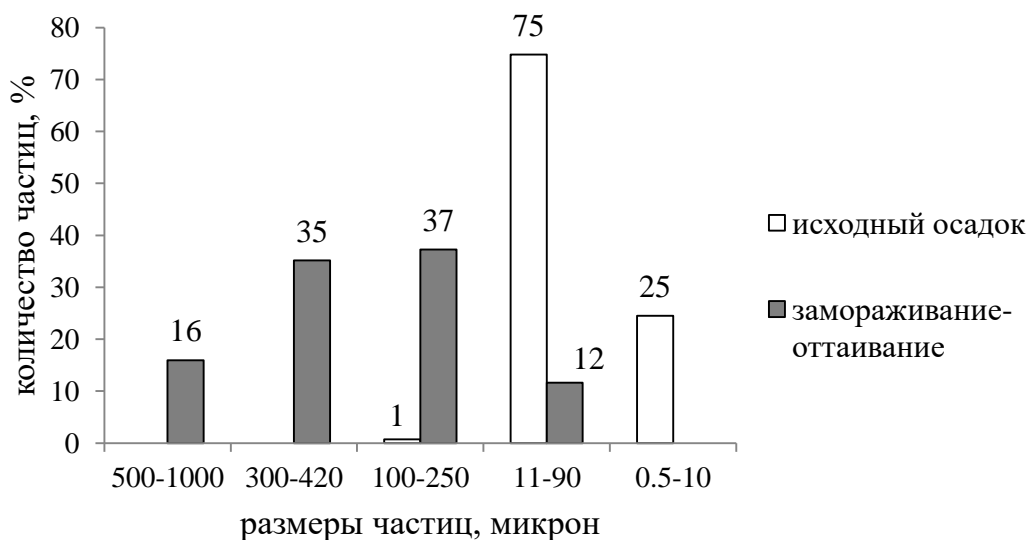


Рисунок 22 – Гистограммы распределения по размерам частиц исходного осадка и осадка, обработанного в режиме замораживание-оттаивание

Диаграмма распределения частиц по размерам для осадка, обработанного в режиме замораживание-оттаивание, расширяется и смещается в область более крупных по размерам частиц. Преобладают частицы с размером 100–420 мкм, количество частиц с размером 11–90 мкм снижается с 75 до 12 %, 16 % составляют частицы размером 500–1000 мкм.

4.1.2 Термолиз осадков после оттаивания

Термолиз образцов осадка после замораживания-оттаивания проводили по методике, описанной в п. 3.2.2. В эксперименте использовали осадки,

отобранные в октябре 2015 г. TG–DTA–кривые представлены на рисунках 23 – 24, масс-спектры приведены на рисунках 25 – 26.

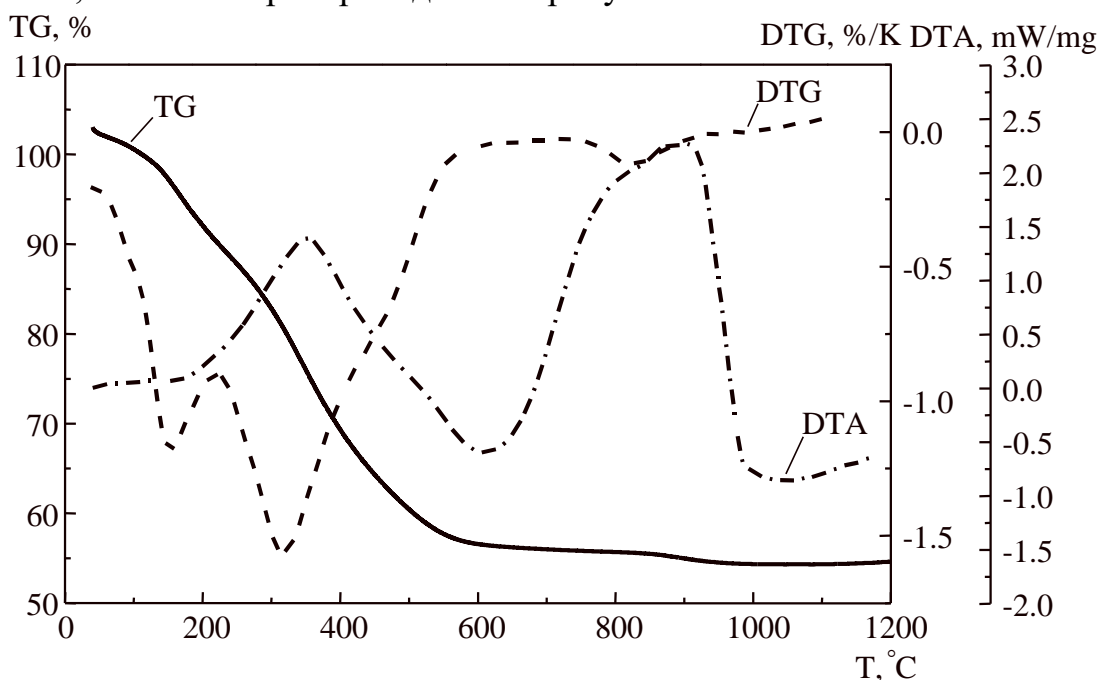


Рисунок 23 – Термоаналитические кривые осадка, обработанного в режиме замораживание-оттаивание, при исследовании в токе воздуха

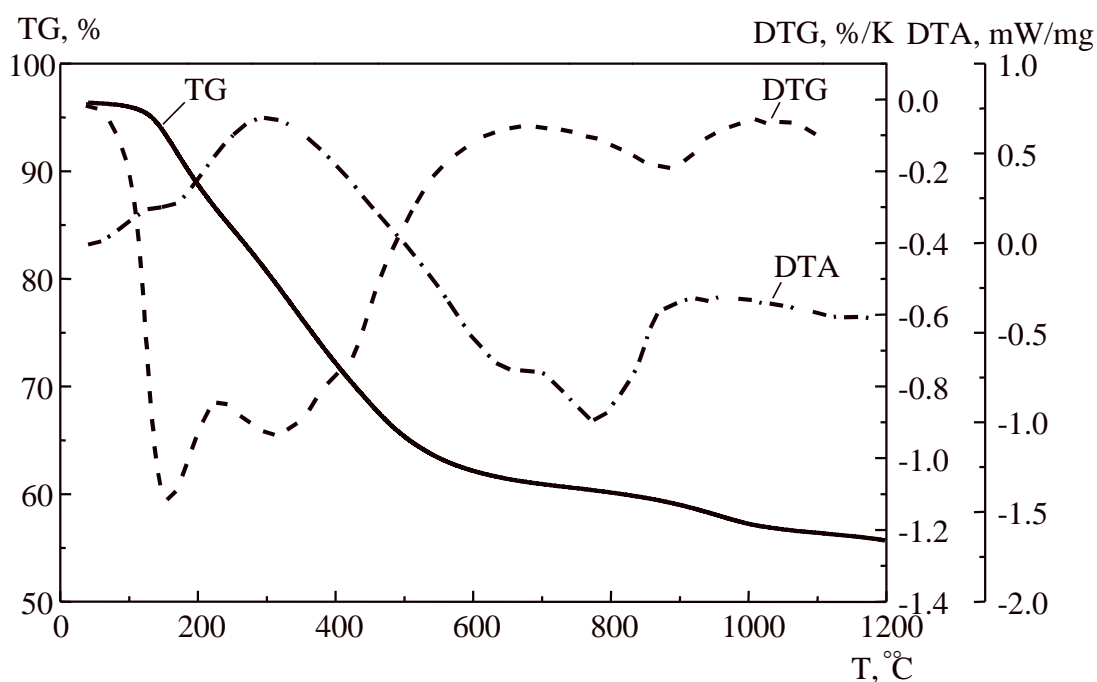


Рисунок 24 – Термоаналитические кривые осадка, обработанного в режиме замораживание-оттаивание, при исследовании в токе аргона

Для термолиза осадка, обработанного в режиме замораживание–оттаивание, характерны те же процессы, что и для натурального осадка. Масс-спектрометрические кривые в целом имеют близкие профили. Однако,

после оттаивания осадка на масс-спектре воды в токе аргона наблюдается более выраженный пик при 168,6 °С: высота пика в 1,2 выше, ширина 190,4. Соответствующий пик на масс-спектре осадка без обработки при 163,5 °С имеет высоту 0,32 ширину 285,4.

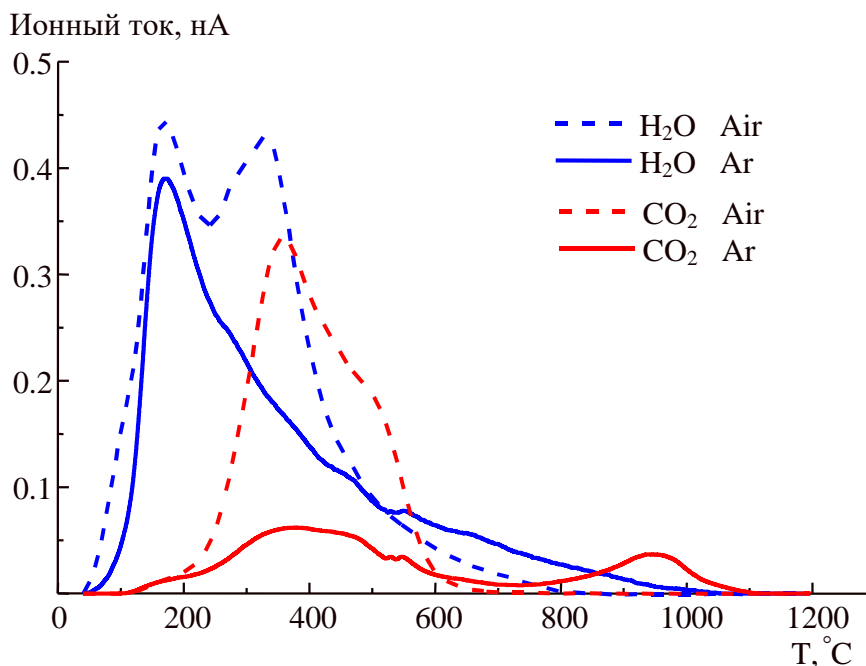


Рисунок 25 – Масс-спектрометрические кривые воды и углекислого газа для осадка, обработанного в режиме замораживание-оттаивание, при исследовании в токе воздуха (Air) и аргона (Ar)

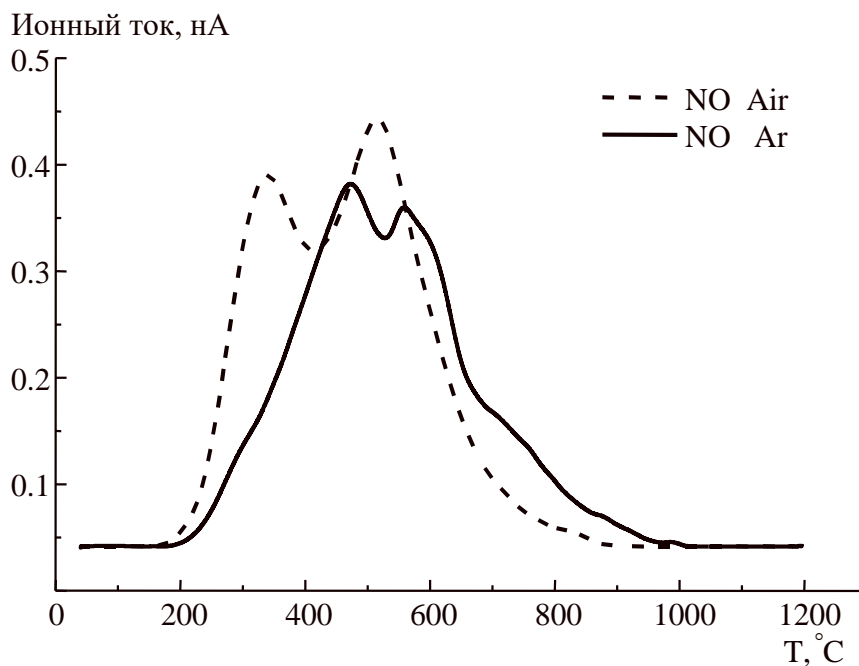


Рисунок 26 – Масс-спектрометрические кривые оксида азота (II) для осадка, обработанного в режиме замораживание-оттаивание, при исследовании в токе воздуха (Air) и аргона (Ar)

Сравним MS-кривых воды в токе воздуха для исходного и замороженного осадков. Интенсивность второго пика (329 °С) снизилась в образце после замораживания. Следовательно, уменьшилось количество ОН-групп, удаляемых при температурах выше 200 °С.

Вероятно, при замораживании осадка частично кристаллизуется вода, отщепляемая от ОН-групп. После оттаивания осадка такая вода остается в свободной форме и частично входит в состав гидратных оболочек. Свободная вода легко удаляется при фильтрации под вакуумом, поэтому удельное сопротивление такого осадка 146×10^{10} , м/кг, что в 50 раз ниже, чем у исходного осадка.

4.2 Обработка флокулянтами, флокулянтами и присадочным материалом

Для кондиционирования осадка использовали катионный флокулянт на основе полиакриламида (ПАА) марки Besfloc, серия 6841. Флокулянт представляет собой порошок со следующими характеристиками [35]:

- степень ионного заряда – высокая;
- содержанием активного вещества 98 %;
- размер гранул $0,1 \text{ мм} < 95\% < 1 \text{ мм}$;
- вязкость раствора 0,5% (по Брукфильду) при 25°С – 60 ~ 90 сР;
- рН 0,2 % раствора 2,0 ~ 5,0.

Основное назначение флокулянта, рекомендуемое производителем, – сгущение осадков и / или обезвоживание на ленточном или фильтр-прессе.

В качестве присадочного материала использовали вермикулит. Это легкий тонкодисперсный материал со слоистой структурой, который не изменяет заряда частиц осадка, но формирует крупнопористую структуру, препятствующую сжатию кека в процессе фильтрования. Вермикулит относится к минералам из группы гидрослюд. В процессе нагревания он вспучивается с образованием материала с высокой упругостью частиц и развитой капиллярной пористостью. Размер частиц при этом увеличивается в направлении, перпендикулярном слоистым слоям в 20 – 30 раз [36].

Одно из наиболее востребованных направлений использования вермикулита – улучшение структуры почв. Также этот материал активно используется при производстве строительных материалов. Россия обладает собственной богатейшей сырьевой базой вермикулита, в Челябинской области расположено Потанинское месторождение вермикулита (Вишневогорский массив Каслинского района).

Состав вермикулита (рисунок 27 б и в таблица 25) близок к составу осадка ОСВ г. Челябинска, но отличается пониженным содержанием углерода, повышенным содержанием железа и наличием элемента титана.

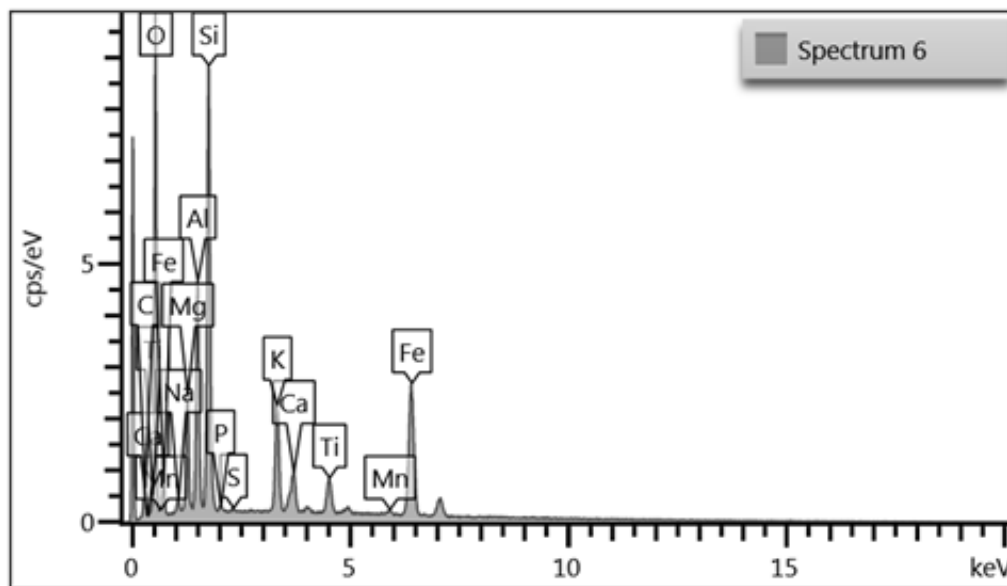


Рисунок 27 – Электронный спектр вермикулита

Методика обработки осадка флокулянтом, флокулянтом и присадочным материалом

Посуда, реактивы и приборы:

- Стакан стеклянный химический объемом 500 мл.
- Стеклянная палочка для перемешивания.
- Мешалка магнитная.
- Вермикулит (присадочный материал).
- Раствор флокулянта 0,1 %: к 100 мл дистиллированной воды при интенсивном перемешивании на магнитной мешалке добавляют навеску порошка флокулянта массой 0,1 г. Перемешивание продолжают в течение 30–60 мин до получения однородной вязкой жидкости без комков. Раствор используют в день приготовления. Плотность его для расчетов принимают равной 1 кг/дм³. Титр такого раствора составляет 1 мг/мл.

Обработка осадка флокулянтом: 100 мл осадка вносят в стеклянный стакан и добавляют рассчитанное количество флокулянта. Полученную смесь аккуратно, тщательно и медленно перемешивают круговыми движениями от центра к периферии и обратно не менее 10 раз. При этом консистенция осадка становится более неоднородной, вязкость нарастает, могут появиться комки.

Обработка осадка флокулянтом и вермикулитом: 100 мл осадка вносят в стеклянный стакан и добавляют навеску вермикулита,

перемешивают. Затем добавляют рассчитанное количество флокулянта. Перемешивание проводят, как описано выше.

Предварительно рассчитывают требуемое количество реагентов (флокулянта, вермикулита) по сухому веществу осадка. Например, при содержании сухого вещества 22 г/л, дозе флокулянта 1 % (по сух. веществу) на 100 мл осадка потребуется внести 22 мл 0,1 %-го раствора флокулянта.

4.2.1.1 Водоотдающая способность кондиционированных осадков

Внесение флокулянта приводит к заметному выделению свободной воды из осадка. При этом нарастает вязкость осадка, а образующиеся неоднородные крупные агрегаты осадка затрудняют перемешивание. При дозе флокулянта 1 % и выше значительная вязкость оказывает существенное влияние на измерение объема фильтрата при определении удельного сопротивления фильтрации.

Флокулянт заметно агрегирует частица осадка, повышает прозрачность фильтрата. Так, при обработке осадка флокулянтом (1 %) мутность фильтрата снизилась с 10,8 мг/л (фильтрат необработанного осадка) до 0,8 мг/л.

Эффективность кондиционирования осадка флокулянтом на основе полиакриламида и совместной обработкой флокулянтом и вермикулитом можно оценить по изменению угла наклона прямой в координатах $t/V=f(V)$. На рисунке 28 представлены графики построения параметра V при кондиционировании осадка флокулянтом, а на рисунке 29 – флокулянтом и вермикулитом. В таблице 26 указаны значения удельного сопротивления фильтрации и влажности кека после вакуумирования. Для сравнения показаны соответствующие графики для исходного осадка и осадка после замораживания – оттаивания.

Для исследования в октябре 2015 г был отобран осадок блока № 1. Усредненные показатели качества воды в Шершневском водохранилище в период, предшествующий отбору: содержание планктона (20–30 млн кл/ л), цветность и мутность соответственно 14 град. и 2,9 мг/л.

Сравнительный анализ графиков на рисунке 28 показал следующее. При увеличении концентрации флокулянта для обработки осадка с 0,2 до 0,5 % удельное сопротивление фильтрации снижается, и при концентрации 0,5 % достигает значений, приемлемых для механической обработки (см. таблицу 26).

Осадки, обработанные флокулянтом и вермикулитом с концентрацией 0,6 %, близки по водоотдаче к осадку, обработанному только флокулянтом

(см. рисунок 29, таблицу 26). Отчетливо выделяется группа графиков для осадков, обработанных вермикулитом с концентрацией 1,2 – 3,5 %. В такой концентрации присадочный материал позволяет интенсифицировать водоотдачу осадков, снизить удельное сопротивление фильтрации в 3 – 4 раза по сравнению с осадком, обработанным только флокулянтom или при низком содержании вермикулита (0,6 %). Оптимальной дозой вермикулита можно считать 1,2 %, дальнейшее ее увеличение приводит к росту значений удельного сопротивления фильтрации.

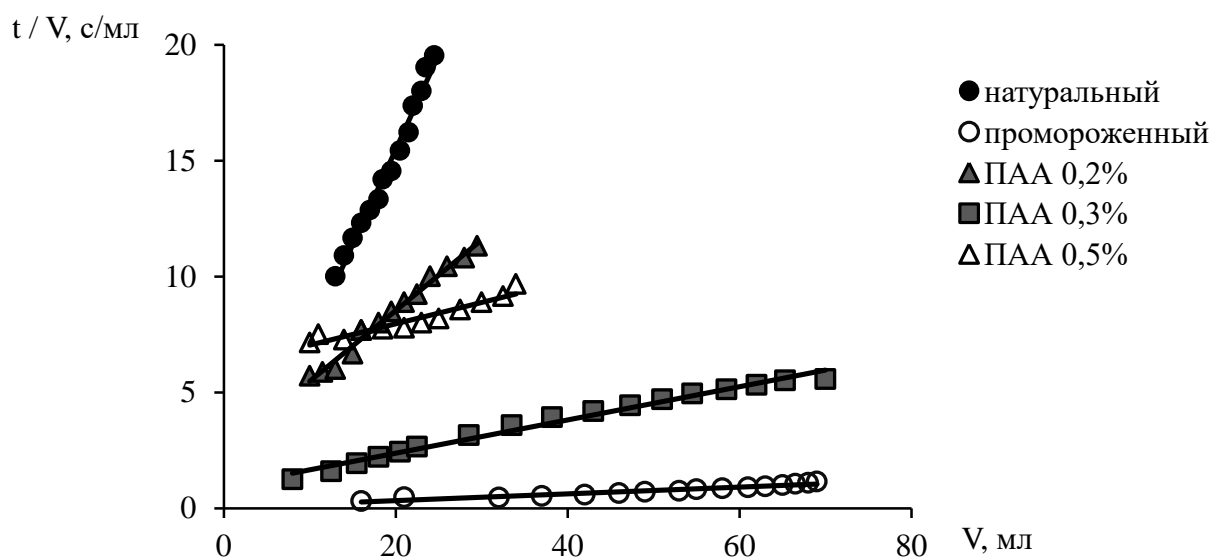


Рисунок 28 – График построения параметра В исходного осадка и осадка после кондиционирования

Таблица 26 – Результаты кондиционирования осадка блока № 1, отобранного в октябре 2015 г

Условия обработки осадка	Влажность кека, %
натуральный осадок	97,0–97,2
замораживание-оттаивание	75,3
ПАА 0,2 %	97,0
ПАА 0,3 %	95,4
ПАА 0,5 %	96,3
вермикулит 0,6 % + ПАА 0,3 %	94,5
вермикулит 1,2 % + ПАА 0,3 %	93,3
вермикулит 2 % + ПАА 0,3 %	92,6
вермикулит 3,5 % + ПАА 0,3 %	92,5

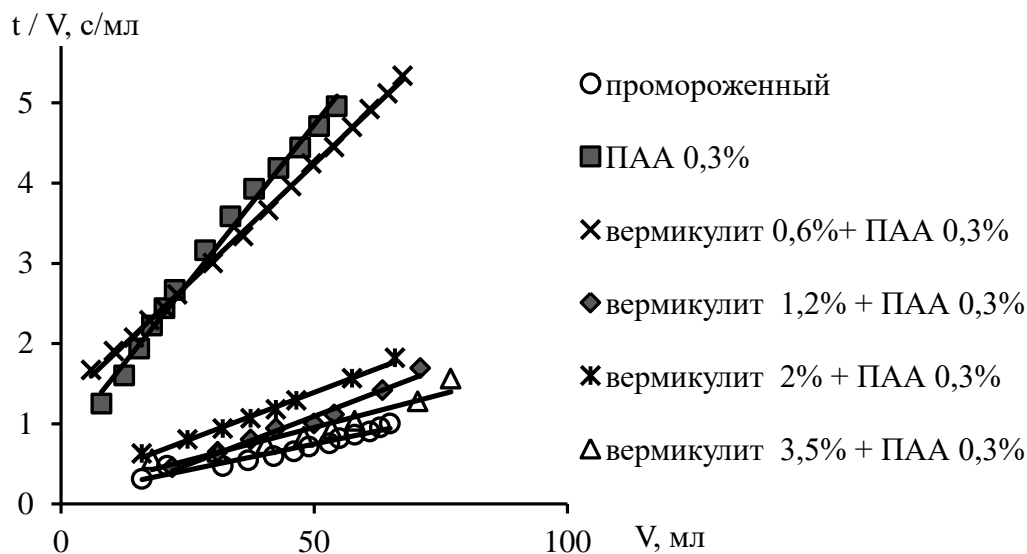


Рисунок 29 – График построения параметра t/V осадков, обработанных флокулянт совместно с вермикулитом

Исследования по реагентному кондиционированию осадков ОСВ были продолжены в весенний, летний и осенний периоды 2016 г. с целью подбора оптимальных доз флокулянта и вермикулита.

Концентрации реагентов варьировали следующим образом: флокулянт 0,15 – 1 %, вермикулит 0 – 3,5 %. Назначение флокулянта в том, чтобы создать крупные агрегаты из частиц осадка и высвободить механически защемленную воду. По этой причине при недостаточной дозе флокулянта присадочный материал не будет способствовать водоотдаче осадка. Удовлетворительные результаты наблюдали при дозе флокулянта не менее 0,2–0,3 %.

Анализ данных по кондиционированию осадка, отобранного в марте 2016 г (см. таблицу 27) позволяет сделать следующие обобщения. Максимальные дозы реагентов требуются для обработки осадка блока № 1: 1 % флокулянта и 2 % вермикулита. По-видимому, наличие зоны уплотнения осадка, а также эффект контактного коагулирования, возникающий в зоне поворота потока воды при поступлении на верхний ярус, способствуют созреванию осадка. Высвобождение механически защемленной воды при внесении флокулянта в таких условиях происходит менее интенсивно и требует повышенного расхода флокулянта.

Для кондиционирования осадка блока № 3, напротив, требуется минимальный расход реагентов: 0,2 % флокулянта. Добавка вермикулита

(2 %) при этой же концентрации флокулянта позволяет дополнительно снизить удельное сопротивление фильтрации до $231 \cdot 10^{10}$ м/кг.

Кондиционирование осадка блока № 2 достигается внесением 0,3 % флокулянта с одновременным дозированием вермикулита (0,6 %). Несколько улучшить водоотачу можно, повысив дозу флокулянта до 0,5 %.

Таблица 27 – Результаты реagentного кондиционирования осадка, отобранного в марте 2016

Доза реагентов, % от сух. вещества		Удельное сопротивление г, $\cdot 10^{10}$ м/кг	Влажность кека, %
ПАА	Вермикулит		
Осадок блока № 1, $r=3275 \cdot 10^{10}$ м/кг, $m_{\text{сух в-ва}}=17,40$ г/л			
0,3	–	4196	96,32
0,5	–	2164	95,58
0,3	0,6	1844	94,95
0,3	2	1558	94,15
0,3	3,5	1657	93,91
1	–	576	93,53
1	1	744	93,60
1	2	507	95,45
1	3,5	744	94,26
Осадок блока № 2, $r=5892 \cdot 10^{10}$ м/кг, $m_{\text{сух в-ва}}=12,62$ г/л			
0,3	–	672	92,63
0,5	–	165	91,66
0,15	0,6	2867	96,01
0,3	0,6	335	89,94
Осадок блока № 3, $r=6320 \cdot 10^{10}$ м/кг, $m_{\text{сух в-ва}}=42,25$ г/л			
0,1	–	1834	94,43
0,1	2	1842	94,31
0,2	–	508	93,26
0,2	2	231	92,91

Осадок, отобранный в июне 2016 г, в целом отличается более высокой водоотдающей способностью (см. таблицу 28). Так, при дозе флокулянта 0,5 % для осадков блоков № 1 и № 3 удается достичь значений удельного сопротивления фильтрации $(40-80) \cdot 10^{10}$ м/кг, что сравнимо с эффектом замораживания-оттаивания (см. таблицу 24). Вероятно, существенное влияние на формирование осадков в летний период оказывает температура

воды, достигающая в этот период максимальных значений. С повышением температуры понижается вязкость воды, что способствует более быстрому осаждению осадка в сооружениях. Вместе с тем, с повышением температуры увеличивается десорбция воды, удерживаемой в осадке за счет сил физической адсорбции.

Таблица 28 – Результаты реагентного кондиционирования осадка, отобранного в июне 2016

Доза реагентов, % от сух. вещества		Удельное сопротивление $r, \cdot 10^{10}$ м/кг	Влажность кека, %
ПАА	Вермикулит		
Осадок блока № 1, $r=3841 \cdot 10^{10}$ м/кг, $m_{\text{сух в-ва}}= 41,10$ г/л			
0,3	–	1963	93,60
0,3	0,6	870	93,12
0,3	1	700	92,08
0,3	2	73	91,24
0,5	–	80	90,83
0,5	0,6	41	90,77
0,5	1	нет данных	95,58
0,5	2	нет данных	95,46
Осадок блока № 3, $r=1972 \cdot 10^{10}$ м/кг, $m_{\text{сух в-ва}}= 34,53$ г/л			
0,3	–	1787	93,13
0,3	0,6	488	92,84
0,3	1	149	92,47
0,3	2	337	92,89
0,5	–	588	92,22
0,5	0,6	591	93,32
0,5	1	86	92,17
0,5	2	84	91,64

Анализ результатов по кондиционированию осадка, отобранного в осенний период (таблица 29), позволяет рекомендовать следующие оптимальные дозы реагентов: для блоков № 1 и 2 – достаточная доза флокулянта 0,5 %; для кондиционирования осадка блока № 3, как и в весенний период отбора, достаточно более низких доз флокулянта (0,3 %).

Таким образом, лабораторные исследования позволяют подобрать оптимальные дозы реагентов для подготовки осадка к механическому обезвоживанию. Возврат промывных вод, реализуемый на блоке № 3, создает

условия для формирования осадка с повышенной водоотдающей способностью по сравнению с осадками блоков № 1 и 2.

Таблица 29 – Результаты реагентного кондиционирования осадка, отобранного в октябре–ноябре 2016

Доза реагентов, % от сух. вещества		Удельное сопротивление $r, \cdot 10^{10} \text{ м/кг}$	Влажность кека, %
ПАА	Вермикулит		
Осадок блока № 1, $r=7297 \cdot 10^{10} \text{ м/кг}$, $m_{\text{сух в-ва}}= 12,06 \text{ г/л}$			
0,3	–	3540	96,60
0,3	1	3360	97,20
0,3	2	3585	95,99
0,5	–	2074	94,50
0,5	1	420	92,00
0,5	2	273	92,60
0,5	3	3184	96,74
Осадок блока № 2, $r=6066 \cdot 10^{10} \text{ м/кг}$, $m_{\text{сух в-ва}}= 22,70 \text{ г/л}$			
0,3	–	2473	95,52
0,5	–	275	93,47
0,5	1	849	94,47
0,5	2	848	94,68
0,5	3	339	94,02
1	–	638	95,89
1	2	600	94,01
Осадок блока № 3, $r=1546 \cdot 10^{10} \text{ м/кг}$, $m_{\text{сух в-ва}}= 29,10 \text{ г/л}$			
0,1	–	1352	94,81
0,1	2	1170	94,26
0,3	–	261	94,34
0,3	1	311	94,00
0,3	2	227	93,81
0,5	–	1991	93,62

Существенным фактором, определяющим свойства осадка, является температура очищаемой воды. Реагентное кондиционирование флокулянтами, флокулянтами и вермикулитом представляется наиболее эффективным в летний период и позволяет достичь значений удельного сопротивления фильтрации, сравнимых с соответствующими величинами после замораживания-оттаивания.

4.2.1.2 Термолиз осадков, обработанных флокулянтom, флокулянтom и вермикулитом

Термолиз образцов осадка после реагентной обработки флокулянтom и вермикулитом проводили по методике, описанной в п. 3.2.2. В эксперименте использовали осадки, отобранные 06.10.2015. TG–DTA–кривые представлены на рисунках 30–31 и 33–34, масс-спектры приведены на рисунках 32 и 35.

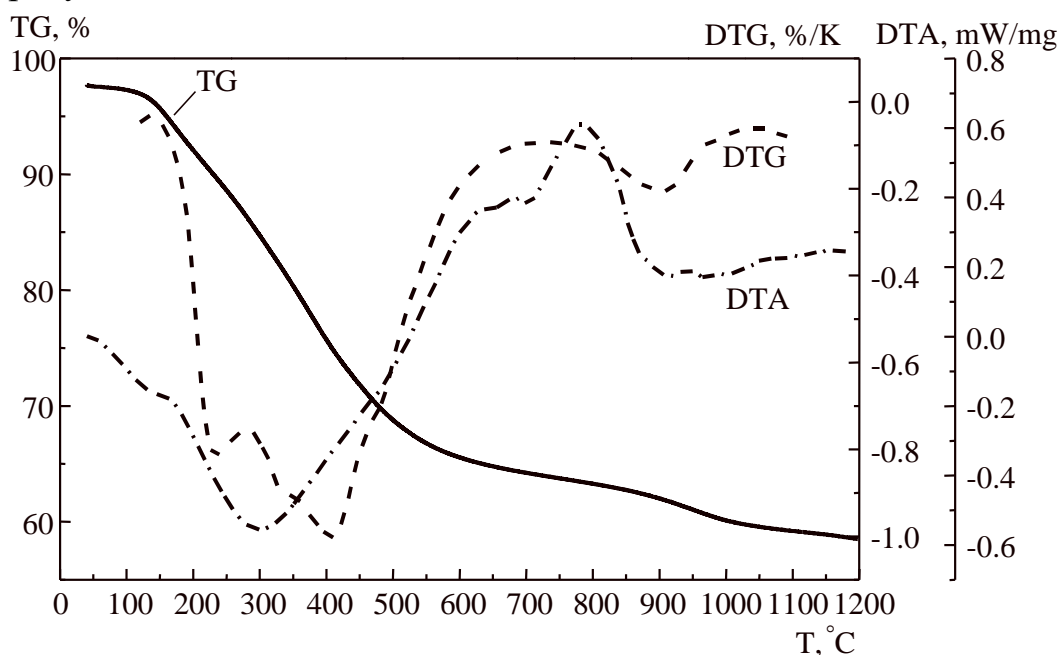


Рисунок 30 – Термоаналитические кривые, снятые в атмосфере аргона для образца осадка, обработанного 0,3% ПАА

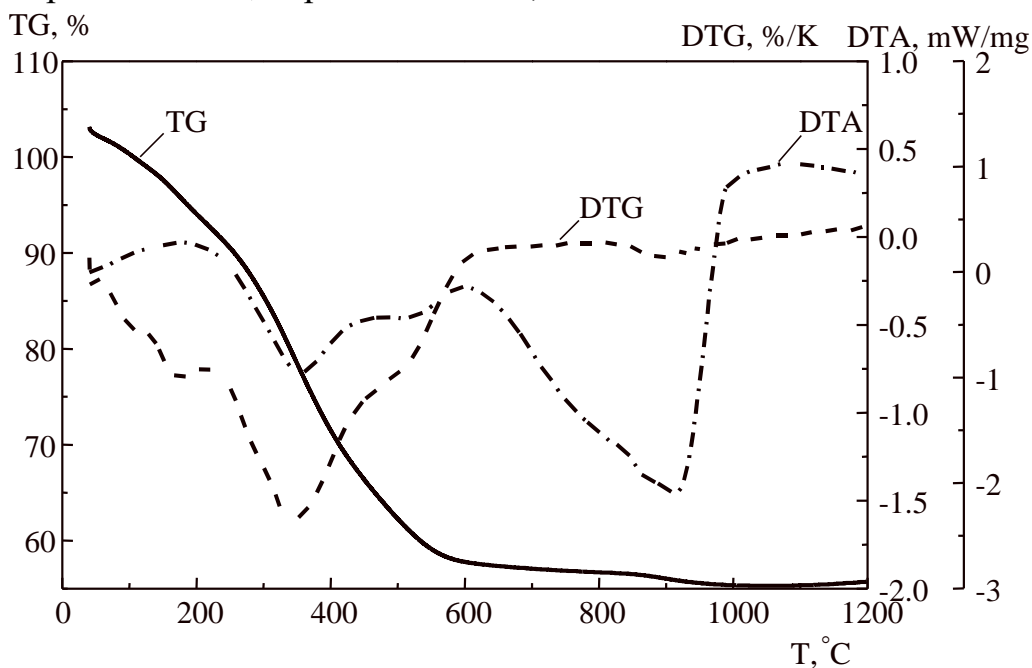


Рисунок 31 – Термоаналитические кривые, снятые в атмосфере воздуха для образца осадка, обработанного 0,3% ПАА

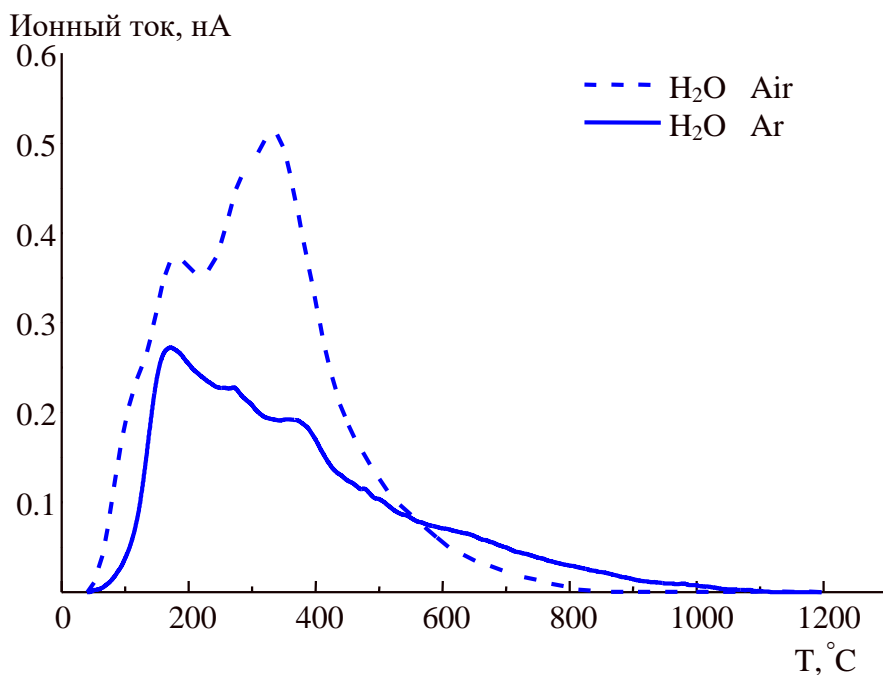


Рисунок 32 – Масс-спектрометрические кривые воды для образца осадка, обработанного 0,3% ПАА, при исследовании в токе воздуха (Air) и аргона (Ar)

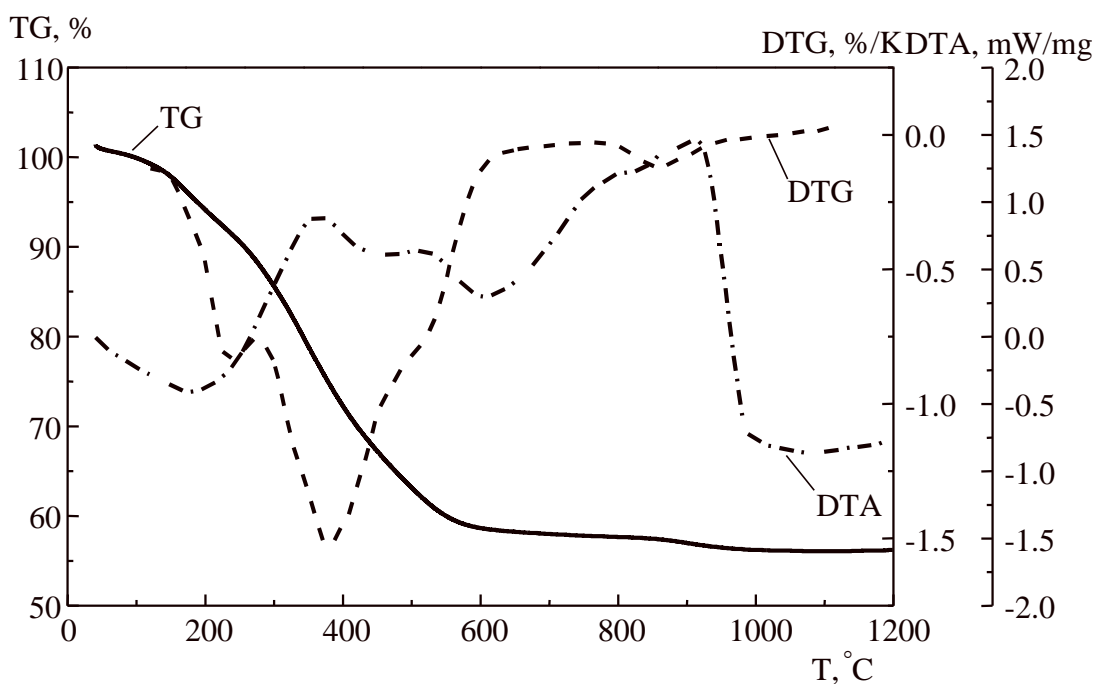


Рисунок 33 – Термоаналитические кривые, снятые в атмосфере воздуха для образца осадка, обработанного 0,3% ПАА и 2 % вермикулита

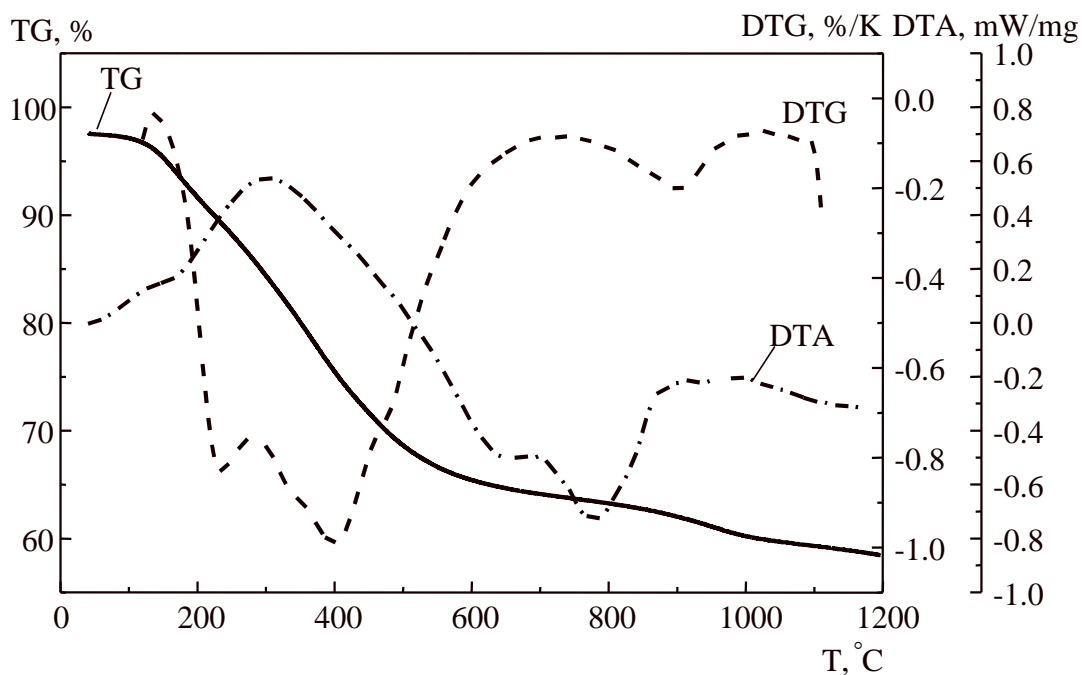


Рисунок 34 – Термоаналитические кривые, снятые в атмосфере аргона для образца осадка, обработанного 0,3% ПАА и 2 % вермикулита

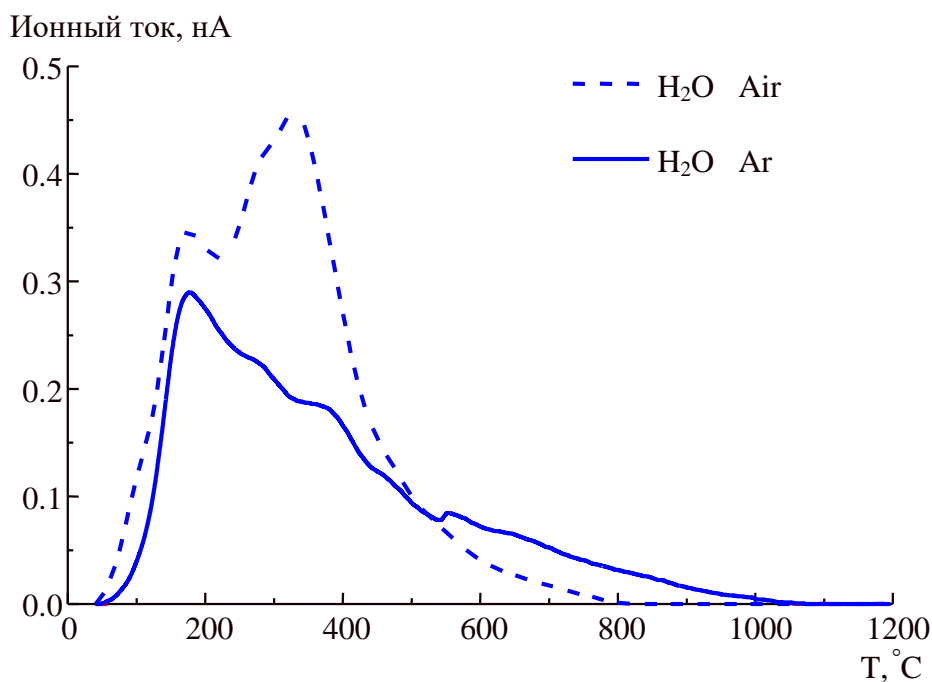


Рисунок 35 – Масс-спектрометрические кривые воды для образца осадка, обработанного 0,3% ПАА и 2 % вермикулита, при исследовании в токе воздуха (Air) и аргона (Ar)

Проанализируем масс-спектры воды в образцах осадка с ПАА (рисунок 32) и сравним с соответствующим масс-спектром натурального осадка (см. рисунок 19). В присутствии флокулянта на масс-спектрах H_2O в токе воздуха

интенсивность первого пика (при температурах 150–170 °С) снижается в 1,2–1,3 раза по сравнению с пиком на спектре натурального осадка, что свидетельствует о некотором снижении содержания кристаллогидратной воды при обработке осадка ПАА. Второй пик на масс-спектрах H₂O в токе воздуха соответствует температурам 324–332 °С. Для натурального осадка и осадка, обработанного только ПАА интенсивность этого пика одинаковая (0,51), а при совместной обработке ПАА и вермикулитом интенсивность пика несколько снижается (0,45). По результатам термолиза образцов осадка выполнен полуколичественный расчет массы паров воды. Сравним количество воды, выделившейся в токе воздуха, при различных условиях обработки осадка (таблица 30). Для натурального осадка и осадка, обработанного только 0,3 % ПАА, эти величины близки: 76,50 и 75,40 % соответственно. Удельное сопротивление фильтрации таких осадков также высокое (см. табл. 26). Совместная обработка флокулянтами и вермикулитом при оптимальных концентрациях (0,3 % и 2 % соответственно) эффективно снижают удельное сопротивление фильтрации, создают благоприятные условия для обезвоживания таких осадков. Поэтому масса воды, выделившейся в токе воздуха, для такого образца ниже: 64,69 % (ПАА 0,3 % и вермикулит 2,0 %).

Таблица 30 – Полуколичественный расчет массы паров воды при термолизе

Условия обработки осадка	m(H ₂ O), % масс.	
	в токе воздуха	в токе аргона
Без обработки	76,50	52,10
ПАА 0,3 %	75,40	47,20
ПАА 0,3 % и вермикулит 2,0 %	64,69	47,53

Флокулянт на основе полиакриламида содержит ионогенные группы и углеводородный радикал. При добавлении флокулянта к осадку происходит формирование крупных агрегатов с вытеснением некоторого количества воды в межагрегатное пространство. Одновременно поровая поверхность осадка гидрофилизуется, повышается ее смачиваемость. Вермикулит вспученный обладает гидрофобными, вместе с тем, благодаря межслоевому пространству, способен впитывать влагу и удерживать ее. Кроме того, вермикулит создает крупнопористую структуру в осадке, препятствует сжатию кека и закрытию его пор в процессе фильтрации и тем самым улучшает влагоотдачу осадка. Вода, удерживаемая в порах вермикулита, не

удаляется при обезвоживании под вакуумом, но улетучивается при высушивании до постоянной массы при 105 °С.

4.3 Выводы

Исследованы следующие методы кондиционирования осадка ОСВ г. Челябинска: замораживание-оттаивание и реагентная обработка флокулянтам на основе ПАА и совместная обработка флокулянтам и присадочным материалом вермикулитом.

Выявлены особенности процесса замораживания, приводящие к повышению водоотдающей способности осадка после его оттаивания. Кристаллизация сопровождается сжатием, уплотнением прилегающих областей жидкой фазы осадка. Флокулы осадка сжимаются в крупные конгломераты, разделенные областями льда. После оттаивания такой системы вода легко дренирует через трещины, поры и каналы, образовавшиеся в процессе кристаллизации. Установлено существенное укрупнение размеров частиц дисперсной фазы осадка после промораживания. На основании результатов термолиза осадка сделано предположение, что при замораживании осадка частично кристаллизуется вода, отщепляемая от ОН-групп. Такое перераспределение воды от химически связанной к свободной и способствует резкому повышению водоотдающей способности осадков после оттаивания.

Проведены исследования по реагентному кондиционированию осадков ОСВ в весенний, летний и осенний периоды 2016 г., подобраны оптимальные дозы реагентов. Установлено, что оптимальные дозы флокулянта следует подбирать в интервале 0,2–1 %, вермикулита – в интервале 0,6–2 %.

Выявлено, что осадок блока № 3, где реализуется возврат промывных вод, требует меньших доз реагентов для кондиционирования.

Показано, что кондиционирование осадка, сформированного в летний период, флокулянтам и вермикулитом позволяет достичь эффекта, сравнимого с промораживанием по повышению водоотдающей способности осадка.

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ ОСВ

На основании проведенных исследований установлено, что осадок ОСВ г. Челябинска относится к нефилтруемым и требует предварительного кондиционирования перед механическим обезвоживанием.

Показано, что наиболее эффективный метод повышения водоотдающей способности – это замораживание-оттаивание, что позволяет снизить удельное сопротивление фильтрации в среднем до $50 \cdot 10^{10}$ м/кг. Однако, практическая реализация этого метода на площадке ОСВ г. Челябинска крайне затруднительна: создание площадок промораживания требует отчуждения значительных площадей, а внедрение льдогенераторных аппаратов является весьма дорогостоящим мероприятием.

Достойной альтернативой методу замораживания-оттаивания является реагентная обработка флокулянтами на основе ПАА и совместная обработка флокулянтами и вермикулитом. Подобраны оптимальные дозы реагентов для осадков, сформированных в различные сезоны года.

Таблица 31 – Оптимальные условия реагентной обработки осадка ОСВ флокулянтами и вермикулитом

точка отбора осадка	удельное сопротивление фильтрации, $\times 10^{10}$ м/кг		оптимальные условия обработки, % от сухого вещества осадка	
	натуральный осадок	обработанный осадок	ПАА	вермикулит
Отбор осадка – март 2016				
Блок № 1	3275	507	1	2
Блок № 2	5892	335	0,3	0,6
		165	0,5	–
Блок № 3	6320	508	0,2	–
		321	0,2	2
Отбор осадка – июнь 2016				
Блок № 1	3841	80	0,5	–
		41	0,5	0,6
Блок № 3	1972	149	0,3	1
		86	0,5	1
Отбор осадка – октябрь–ноябрь 2016				
Блок № 1	7297	273	0,5	2
Блок № 2	6065	275	0,5	–
Блок № 3	1546	261	0,3	–

В целом, оптимальные дозы реагентов следует подбирать в следующих интервалах:

- 0,2–1 % флокулянта на основе ПАА;
- 0,6–2 % присадочного материала вермикулита.

Осадок блока № 1, сформированный в двухъярусных отстойниках, несколько труднее поддается кондиционированию и требует повышенных расходов реагентов.

Осадок блока № 3, на котором реализуется возврат промывных вод, отличается повышенной водоотдачей при кондиционировании и пониженных доз флокулянта и вермикулита.

Следует учитывать, что высокое содержание сухого вещества в осадке (около 40 г/л и выше) не только требует повышенного расхода реагентов, но и создает существенные трудности при перемешивании и приводит к нестабильным результатам по кондиционированию.

Наиболее эффективна реагентная обработка осадков, сформированных в летний период при повышенных температурах очищаемой воды. При этом кондиционирование позволяет достичь значений удельного сопротивления фильтрации, приближающихся к соответствующим величинам после промораживания осадка.

Результаты исследований показали, что с целью минимизации расходов реагентов возможно выделение осадков блока № 3 для отдельной обработки.

Перспективным представляется изучение кондиционирования смеси осадков блоков № 1, 2 и 3, формирующейся в резервуаре-накопителе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что существующая схема сброса водопроводных осадков ОСВ г. Челябинска в городскую систему канализации для совместной обработки со сточными водами имеет ряд недостатков. В работе изучена возможность перехода очистных сооружений водопровода г. Челябинска на технологию механического обезвоживания осадков после их предварительного кондиционирования.

Изучен элементный, гранулометрический состав осадков. Показано, что осадки ОСВ г. Челябинска имеют низкую водоотдающую способность. Исследование особенностей термолиза позволило выявить количество физико-химической и химически связанной воды в осадках.

Проанализированы факторы, влияющие на свойства осадков. Установлено положительное влияние возврата промывных вод на водоотдающую способность осадков. Выявлена значимость температурного фактора на способность осадков к кондиционированию.

С целью повышению водоотдающей способности осадков предложены следующие методы: замораживание-оттаивание, обработка флокулянтom и совместная обработка флокулянтom и присадочным материалом.

Исследованы процессы, происходящие при замораживании: выявлено перераспределение типов воды в осадке и изменение гранулометрического состава осадка после промораживания.

Показано, что альтернативой методу замораживания-оттаивания является реагентная обработка флокулянтom на основе полиакриламида и совместная обработка флокулянтom и вермикулитom. Подобраны оптимальные дозы реагентов для осадков, сформированных в различные сезоны года.

Научная новизна работы: детально изучены состав и свойства осадков ОСВ г. Челябинска; выявлены процессы, увеличивающие водоотдающую способность осадков при замораживании-оттаивании.

Практическая значимость работы заключается в получении технологических параметров для разработки технологического регламента механической обработки осадков.

Основные результаты работы представлены на конференциях и опубликованы:

1. Белканова, М.Ю. Способы повышения водоотдающей способности осадков природных вод / М.Ю. Белканова, Е.В. Николаенко // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии:

- сборник статей [Электронный ресурс] / под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, А.К. Стрелкова; СГАСУ. – Электронные текстовые и графические данные (11,7 Мбайт). – Самара, 2016. – С. 296–300.
2. Nikolaenko, E.V. Influence of the Treatment Method on the Water Yielding Capacity of Natural Water Sediments / E.V. Nikolaenko, M.Yu. Belkanova // *Procedia Engineering*. – 2016. – V. 250. – P. 2315–2320.
 3. Николаенко, Е.В. Методы повышения водоотдающей способности осадков природных вод / Е.В. Николаенко, М.Ю. Белканова // *Водосбережение, мелиорация и гидротехнические сооружения как основа формирования агрокультурных кластеров России в XXI веке: Сборник докладов XVIII Международной научно-практической конференции: в 3-х т. – Т. 1.* – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2016. – С. 122–125.
 4. Николаенко, Е.В. Технологические аспекты обработки осадка сооружений водоподготовки / Е.В. Николаенко, М.Ю. Белканова, Н.Е. Репников // *Перспективы развития строительного комплекса: Материалы X Международной научно-практической конференции «Перспективы развития научно-технического сотрудничества стран – участниц Евразийского экономического союза».* – Астрахань: ГАОУ АО «АГАСУ», 2016. – С. 80–86.
 5. Белканова, М.Ю. Влияние сезонных изменений качества воды водоисточника на водоотдающую способность осадка очистных сооружений водопровода / М.Ю. Белканова, Н.Е. Репников // *Проблемы управления речными бассейнами при освоении Сибири и Арктики в контексте глобального изменения климата планеты в XXI веке: Сб. докладов XIX Международной научно-практической конференции. Том I.* – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 10–14.
 6. Николаенко, Е.В. Повышение водоотдающей способности осадков природных вод реагентными методами / Е.В. Николаенко, М.Ю. Белканова, Д.А. Гевель // *Проблемы управления речными бассейнами при освоении Сибири и Арктики в контексте глобального изменения климата планеты в XXI веке: Сб. докладов XIX Международной научно-практической конференции. Том I.* – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 216–220.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Любарский, В.М. Осадки природных вод и методы их обработки / В.М. Любарский. – М.: Стройиздат, 1980. – 129 с.
2. Ходоровская, Н.И. Оценка экологического состояния Шершневского водохранилища в современных условиях / Н.И. Ходоровская, Л.В. Дерябина, С.В. Крайнева, А.Ю. Утопленникова // Вестник Челябинского государственного университета. – 2013. – № 7 (298). – Биология. – Вып. 2. – С. 165–167.
3. Гаязова, А.О. Смена доминирующих видов фитопланктонного сообщества Шершневского водохранилища: «случайная» или закономерная сукцессия? / А.О. Гаязова, В.А. Антипова, С.М. Абдуллаев // Молодой ученый. – 2015. – № 22 (102). – С. 82–84.
4. Карюхина, Т.А. Химия воды и микробиология / Т.А. Карюхина, И.Н. Чурбанова. – М.: Стройиздат, 1995. – 208 с.
5. Офицеров, Е.Н. Кремний в биосфере // Химия и жизнь. – 2002. – № 7. – С. 32–35.
6. Воюцкий, С.С. Курс коллоидной химии /С.С. Воюцкий. – М.: Химия, 1975. – 574 с.
7. Технологический регламент очистных сооружений водопровода г. Челябинска, 2014.
8. ГН 2.1.5.2280-07 «Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315 –03 Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования».
9. Бабенков, Е.Д. Очистка воды коагулянтами. – М.: Наука, 1977. – 356 с.
10. Технический справочник по обработке воды DEGREMONT: в 2-х т. – СПб.: Новый журнал, 2007. – 1696 с.
11. Туровский, И.С. Обработка осадка сточных вод / И.С. Туровский. – М.: Стройиздат, 1982. – 223 с.
12. Пахомов, А.Н. Исследование и практическая реализация процесса обезвоживания осадков водопроводных станций / А.Н. Пахомов, В.Н. Штопоров, Д.А. Данилович // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 12. – С. 25–31.
13. Артеменок, Н.Д. Усовершенствование процесса обработки промывных вод и осадков водопроводных станций г. Новосибирска / Н.Д. Артеменок, Ю.Н. Похил, В.В. Мамаев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2014. – № 4. – С. 34–38.

14. Шевцов, М.Н. Особенности обработки осадков водопроводных сооружений г. Хабаровска / М.Н. Шевцов, М.О. Носенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – № 6, ч. 2. – С. 58–62.
15. Verlicchi, P. Reuse of drinking water treatment plants sludges in agriculture: problems, perspectives and limitations / P. Verlicchi, L. Masotti.
http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/VERLICCHI%20and%20Masotti%20ny%20Reuse%20of%20Sludges%20in%20Agriculture.pdf – Доступ свободный.
16. Жмаков, Г.Н. Промышленный опыт совместной обработки водопроводных и канализационных осадков на очистных сооружениях канализации // [http://www.rusnauka.com/NTSB_2006/Stroitelstvo/7_zhmakov%20g.n.%20\(2\).doc.htm](http://www.rusnauka.com/NTSB_2006/Stroitelstvo/7_zhmakov%20g.n.%20(2).doc.htm)
17. Babatunde, A.O. Constructive approach towards water treatment works sludge management: an international review of beneficial re-uses // A.O. Babatunde, Y.O. Zhao // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2008. – № 37. – P. 129–164.
18. Янин, Е.Я. Осадок водопроводных станций (состав, обработка, утилизация) // *Экологическая экспертиза*. – 2010. – № 5. – С. 2–45.
19. Гетманцев, С.В. Коагуляционная водообработка на Таманском групповом водопроводе / С.В. Гетманцев, С.Н. Линевич, Л.С. Казанок // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 9. – С. 30–32.
20. Шевченко, Л.Я. Осадки водопроводных станций: извлечение и утилизация / Л.Я. Шевченко, Г.Я. Дрозд, Н.И. Зотов, В.Н. Маслак. – СПб., 2004. – 195 с.
21. Запольский, А.К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: Свойства. Получение. Применение / А.К. Запольский, А.А. Баран Л.: Химия, 1987. – 208 с.
22. Яковлев, С.В. Совместная обработка осадков сточных вод и осадков, образующихся на водопроводных станциях / С.В. Яковлев, Б.А. Ганин, А.С. Матросов, Б.М. Кольчугин. – М.: Стройиздат, 1990. – 104 с.
23. Драгинский, В.Л. Обработка промывных вод фильтров водоочистных станций / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – № 8. – С. 25–31.
24. Козловская, С.Б., Преимущества бессточных схем водопроводных очистных сооружений / С.Б. Козловская, Е.Б. Сорокина // *Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник*. – № 74. – 2007. – С. 58–64.

25. СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – М.: ГУП ЦПП, 2001. – 128 с.
26. Аксенов, В.И. Применение флокулянтов в системах водного хозяйства: учеб. пособие / В.И. Аксенов, Ю.В. Аникин, Ю.А. Галкин, И.И. Ничкова, Л.И. Ушакова, Н.С. Царев. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 92 с.
27. Zhao, Y.Q. Enhancement of alum sludge dewatering capacity by using gypsum as skeleton builder // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* – 2002. – 211. – P. 205–212.
28. Хомутова, Ю.В. Интенсификация обезвоживания гидроокисных осадков сточных вод металлообрабатывающих предприятий : автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.23.04 / Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Новосибирск, 2005. – 23 с.
29. Жуков, Н.Н. Состояние и перспективы развития сооружений по обработке водопроводных и канализационных осадков в городах России // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2002. – № 12. – Ч.1, С. 3–6.
30. Гироль, Н.Н. Обработка технологических стоков и утилизация осадков станций очистки питьевых вод / Н.Н. Гироль, А.Н. Гироль, Б.Н. Якимчук и др. // <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/764>
31. Razali, M. Effectiveness of a drinking-water treatment sludge in removing different phosphorus species from aqueous solution / M. Razali, Y.Q. Zhao, M. Bruen // *Separation and Purification Technology.* – 2007. – № 55. – P. 300–306.
32. Verrelli, D.I. Drinking water treatment sludge production and dewaterability. PhD thesis, Faculty of Engineering, Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, 2008. – 1031 p.
33. Кузькин, С.Ф. Синтетические флокулянты в процессах обезвоживания / С.Ф. Кузькин, В.П. Небера. – М: Изд. Госгортехиздат, 1963. – 244 с.
34. Iler, R.K. *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica.* – Chichester: John Wiley and Sons, 1979. – 896 p.
35. Каталог флокулянтов марки Besfloc.
<http://floculant.com.ua/catalog/view/flokulyanty-besfloc>
36. Ахтямов, Р.Я. Вермикулит – сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов / Р.Я. Ахтямов // *Огнеупоры и техническая керамика.* – 2009. – № 1–2. – С. 58–64.