

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Донской государственный технический университет»

На правах рукописи



Рыльцева Юлия Александровна

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ОСАДКА СТАНЦИЙ
ПОДГОТОВКИ МАЛОМУТНОЙ И МАЛОЦВЕТНОЙ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ**

Специальность: 05.23.04 – Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Бутко Денис Александрович
кандидат технических наук, доцент

Ростов-на-Дону, 2016

Оглавление

Введение.....	5
1 Обзор существующих методов обработки различных типов осадков природных вод.....	11
1.1 Обработка осадка в естественных условиях.....	11
1.2 Искусственные и механические способы обезвоживания осадка.....	17
1.2.1 Подготовка осадка к обезвоживанию.....	17
1.2.2 Обезвоживание осадка на вакуум-фильтрах.....	21
1.2.3 Обезвоживание осадка на фильтр-прессах.....	22
1.2.4 Обезвоживание осадка на центрифугах.....	24
1.3 Совместная обработка осадка водопроводных станций и городских сточных вод.....	25
1.4 Возможные пути утилизации обезвоженного водопроводного осадка.....	27
Выводы по 1-ой главе.....	30
2 Изучение исходных свойств осадка маломутной и малоцветной природной воды как объекта исследования.....	32
2.1 Характеристика источника водоснабжения.....	32
2.2 Изучение режима работы водопроводных очистных сооружений.....	35
2.2.1 Состав сооружений.....	35
2.2.2 Реагенты, применяемые для очистки воды.....	37
2.3 Изучение физико-химических и минералогических показателей осадка.....	39
2.3.1 Влажность.....	40
2.3.2 Плотность.....	42
2.3.3 Концентрация твердой фазы.....	46
2.3.4 Удельное сопротивление фильтрации.....	48
2.3.5 Предельное напряжение сдвигу.....	53
2.3.6 Прокаленный остаток.....	57

2.3.7	Химический и минеральный анализ сухого остатка	59
2.4	Динамика накопления осадка в отстойниках. Параметры промывки сооружений.....	62
	Выводы по 2-ой главе	65
3	Экспериментально-теоретическое описание процесса обезвоживания осадка маломутной и малоцветной природной воды.....	67
3.1	Исследование вторичного уплотнения осадка	67
3.1.1	Теоретические основы разделения шлама на жидкую и твердую фазы.....	69
3.1.2	Безреагентное уплотнение осадка	71
3.1.3	Уплотнение кондиционированного осадка	76
3.2	Исследование процесса обезвоживания осадка	85
3.2.1	Выбор наиболее приемлемых схем обработки осадка на основании его исходных качественных характеристик	85
3.2.2	Обработка осадка в естественных условиях.....	86
3.2.2.1	Фильтрация влаги из осадка без предварительного кондиционирования	87
3.2.2.2	Фильтрация влаги из кондиционированного осадка.....	95
3.2.2.3	Удаление влаги из осадка капиллярным поглощением	100
3.2.2.4	Испарение влаги из осадка.....	109
3.2.3	Обезвоживание осадка вакуумным фильтрованием.....	118
3.3	Исследование свойств воды, выделенной при обработке осадка.....	120
3.3.1	Органолептические показатели надосадочной воды.....	123
3.3.2	Органолептические показатели фильтрата.....	130
	Выводы по 3-ей главе	135
4	Разработка технологических решений по оптимизации процесса обработки осадка маломутной и малоцветной природной воды.....	138
4.1	Анализ экспериментально изученных способов обработки осадка и целесообразность их применимости.....	138

4.2	Конструктивные решения сооружения для обезвоживания осадка в естественных условиях	140
4.3	Общая технологическая схема обработки осадка.....	143
4.4	Расчет основных сооружений для обработки осадка	146
4.5	Математическая модель процесса обезвоживания осадка в условиях полного факторного эксперимента.....	154
	Выводы по 4-ой главе	158
5	Технико-экономическое обоснование проектного решения обработки осадка	160
	Выводы по 5-ой главе	166
	Заключение	167
	Список литературы	170
	Приложение А. Кинетика фильтрации влаги из осадка с высокой концентрацией твердой фазы	185
	Приложение Б. Кинетика сушки осадка на открытом воздухе	187
	Приложение В. Обработка результатов полного факторного эксперимента	192
	Приложение Г. Патенты на полезные модели, акт о внедрении.....	193

Введение

Актуальность темы исследования. Подготовка воды поверхностных источников для нужд водоснабжения, как известно, сопровождается образованием отходов – осадков, основными аккумуляторами которых при двухступенчатой схеме очистки являются отстойники и осветлители. В процессе их промывки образуются сточные воды (шлам, шламовые воды, промывные воды), характеризующиеся высоким содержанием веществ органического и минерального происхождения различной степени дисперсности, а также химических соединений реагентов. Для предотвращения пагубного воздействия на экологию осадок нуждается в обработке, цель которой состоит в снижении его влажности до уровня, позволяющего произвести утилизацию.

Достаточно широкое распространение в практике обработки осадка получили иловые площадки на естественном основании. Зачастую, ввиду несовершенства конструкции, не обеспечивающей эффективного обезвоживания осадка, а также несвоевременной уборки обезвоженного осадка (кека) из-за трудоемкости процесса, они являются как таковой зоной отчуждения, требующей постоянного вовлечения дополнительных территорий. Механические аппараты, которым все чаще в последние годы отдается предпочтение при реконструкции и модернизации станций водоподготовки, в свою очередь, по ряду причин не всегда гарантируют достаточный уровень снижения влажности осадка.

Немаловажным этапом обращения с осадком является его утилизация. При этом как технология складирования (захоронения), так и направления «полезной» утилизации, подразумевающие использование осадка для производства какой-либо продукции, требуют максимально возможного снижения его влажности. В отношении первого варианта это позволяет сократить потребность в территории для размещения отходов, второго – обеспечить постоянство физических показателей сырья для соблюдения технических условий производства.

Степень разработанности. Фундаментальные основы изучения состава и свойств различных типов осадков природных вод составляют труды советских

ученых: Е.Ф. Кургаева, И.С. Лебедевой, В.М. Любарского, Е.Н. Тетеркина, а также зарубежных исследователей: D. Benn, E. Elgerley, G. Logsdon, I. Wilhelm и др. Изучению отдельных показателей осадка конкретно маломутных и малоцветных источников посвящены исследования ученых Ростовского государственного строительного университета (РГСУ): В.А. Лысова, Л.И.Нечаевой, Д.А. Бутко, А.Ю. Скрыбина.

На основании обзора научной и научно-производственной литературы обозначена необходимость углубления в проблематику обезвоживания осадка природной воды малой мутности и цветности (на примере реки Дон) в направлении повышения эффективности процесса в естественных условиях, установления целесообразности использования механического обезвоживания, а также детального рассмотрения вопросов качества воды, образующейся на различных этапах обработки осадка. Это актуально и ввиду изменившихся за последние годы подходов реагентной обработки речной воды, в значительной мере влияющей на свойства осадка.

Цель работы – оптимизировать процесс обработки осадка маломутной и малоцветной речной воды (на примере водопроводных очистных сооружений (ВОС) г. Ростова-на-Дону), обеспечив при этом его эффективное обезвоживание до уровня, позволяющего произвести дальнейшую утилизацию. При этом потребовалось решение ряда **задач**:

- исследование исходных физико-химических характеристик осадка отстойников и их изменчивости под воздействием внешних условий;
- изучение эффективности водоотдачи осадка в различных процессах обезвоживания с целью выявления наиболее подходящих для данного осадка;
- проведение испытаний по обезвоживанию осадка естественными и искусственными методами (в частности, вакуумным фильтрованием) для определения эффективности снижения влажности, продолжительности процесса, а также выявления факторов, препятствующих успешной влагоотдаче;
- изучение свойств воды, выделенной из осадка, с целью обоснования наиболее приемлемых вариантов обращения с ней;

– выявление целесообразности применения реагентной обработки шлама с целью интенсификации процесса обезвоживания осадка, а также осветления и обесцвечивания выделенной из него воды;

– разработка ресурсосберегающей технологии обработки осадка, включающей совокупность сетей и сооружений от точки выпуска шламовых вод до точки получения обезвоженного кека, пригодного для дальнейшей утилизации.

Объектом исследования является осадок, образующийся на водопроводных очистных сооружениях при отстаивании маломутной и малоцветной природной воды (на примере реки Дон). **Предметом исследования** – процессы обработки осадка.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложен способ интенсификации процесса обезвоживания осадка в естественных условиях, основанный на поглощении влаги из осадка твердым капиллярно-пористым материалом и отличающийся от стандартных методов обезвоживания, которые ориентированы на воздействие давлением (избыточным, отрицательным) или температурой.

2. Разработана и научно обоснована конструкция технологического комплекса для обезвоживания осадка, имеющая ряд новых инженерных решений, отличающих ее от аналогов. Особенности устройства комплекса позволяют сократить продолжительность обезвоживания осадка и трудозатраты при эксплуатации в сравнении с аналогами.

3. Получена математическая модель, описывающая процесс обезвоживания осадка в естественных условиях (на предлагаемой конструкции сооружения) и способствующая комплексной оценке влияния отдельных факторов на его продолжительность.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в совершенствовании подходов и методов обработки осадка, полученного в результате очистки маломутной и малоцветной речной воды алюминийсодержащими коагулянтами и высокомолекулярными полиэлектролитами группы полидиаллилдиметиламмоний хлоридов

(полиДАДМАХов), в частности, вопросов его вторичного уплотнения, эффективности непосредственного обезвоживания до уровня, позволяющего произвести утилизацию. Практическая значимость состоит в возможности использования основных положений и выводов исследования при проектировании и эксплуатации сооружений для обработки осадка станций очистки природной воды малой мутности и цветности, а также при подготовке и совершенствовании учебно-методических пособий в процессе преподавания дисциплин по профилю «Водоснабжение и водоотведение».

Методология и методы исследования. Методология включала в себя следующую систему методов: теоретических, заключающихся в анализе отечественной и зарубежной научной и научно-производственной литературы, электронных ресурсов и охранных документов; эмпирических, включающих наблюдение (непосредственное, опосредованное, косвенное), описание (качественное, количественное), измерение и эксперимент (лабораторный, полупроизводственный, производственный). Обработка результатов экспериментальных исследований проведена методами математической статистики, в частности, корреляционного и регрессионного анализов.

Положения, выносимые на защиту:

- исследования зависимостей физико-химических и минералогических показателей осадка от типов реагентов, применяемых для очистки воды, сезона осадкообразования и интервала работы отстойника между промывками;
- регрессионная зависимость, позволяющая определять удельное сопротивление осадка фильтрации (один из ключевых показателей водоотдающей способности) с высокой достоверностью аппроксимации (более 0,95);
- результаты расчета коэффициентов разбавления осадка при его удалении из отстойников ручным способом (на примере ВОС г. Ростова-на-Дону);
- кинетические характеристики вторичного уплотнения осадка и влияние реагентной обработки на данный процесс;
- исследования эффективности водоотдачи осадка в естественных условиях и в процессе вакуумного фильтрования;

– результаты исследования химических и органолептических показателей воды, выделенной в процессе обработки осадка, влияния предварительной реагентной обработки шлама на степень ее осветления и обесцвечивания;

– технология обработки осадка отстойников (на примере ВОС г. Ростова-на-Дону) с применением его реагентного кондиционирования в сгустителе и последующего обезвоживания в естественных условиях при дополнительной интенсификации процесса капиллярным влагопоглощением;

– математическая модель, описывающая процесс обезвоживания осадка в естественных условиях на предлагаемой модели технологического комплекса;

– показатели технико-экономической целесообразности обработки осадка предлагаемым методом.

Достоверность результатов исследования обеспечивается применением классических теорий, формул, общепринятых стандартов и нормативов при проведении экспериментов и исследований с реальным осадком, планированием необходимого количества опытов. Учету и анализу подлежали экспериментальные данные, отвечающие относительному отклонению при уровне доверительной вероятности 0,95 и более.

Апробация результатов. Основные результаты исследования доложены и обсуждены на Международных научно-практических конференциях РГСУ (г.Ростов-на-Дону, 2011-2014 гг.), VII Международной научно-практической конференции «Технологии очистки воды» (г. Новочеркасск, 2012 г.), II Международной научно-практической конференции «Теория и практика актуальных исследований» (г. Краснодар, 2012 г.), X Международной научно-практической конференции «Современная наука: тенденции развития» (г.Краснодар, 2015 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 14 печатных работ, в том числе три статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получены три патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 133 наименований и четырех приложений. Основная часть работы изложена на 169 страницах машинописного текста, включает 50 рисунков и 21 таблицу.

Вклад автора в проведенное исследование состоит в формулировке цели и постановке задач исследований, проведении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, разработке новых технологических решений, их обосновании и проверке, формулировке научных положений и выводов.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю кандидату технических наук, доценту кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ) Денису Александровичу Бутко за помощь в организации исследований, чуткое руководство, конструктивные советы при написании диссертации, а также кандидату технических наук, профессору кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО ДГТУ Владимиру Афанасьевичу Лысову за постоянное внимание к работе, ценные наставления и всестороннюю поддержку.

1 Обзор существующих методов обработки различных типов осадков природных вод

1.1 Обработка осадка в естественных условиях

Основными способами обезвоживания осадка в естественных условиях являются: хранение в прудах-накопителях (естественных или искусственно созданных шламонакопителях), обработка на иловых площадках подсушивания или замораживания.

Пруды-накопители (шламонакопители, лагуны) представляют собой глубокие земляные емкости с основанием выше уровня грунтовых вод. Их применение для складирования и обезвоживания осадков (шламов) получило достаточно широкое распространение в мировой практике, что объясняется простотой инженерного обеспечения, низкими капитальными и эксплуатационными затратами. В качестве накопителей используют овраги, карьеры или площадки на естественном основании, глубина которых за счет обвалования должна составлять не менее 2 м [1].

Учеными по-разному оценивается эффективность и целесообразность применения прудов-накопителей. Так, профессор В.М. Любарский [2] отмечает, что их использование наиболее приемлемо для осадков мутных вод, поскольку в случае с осадком маломутных вод (полученного с применением гидроксида алюминия) концентрация твердой фазы возрастает незначительно и редко превышает 9 %. Исследователи данное явление объясняют образованием корки, формирующейся на поверхности и препятствующей дальнейшему подсыханию осадка [2, 3, 4]. Эффективность использования прудов-накопителей повышается в районах, где есть возможность промораживания осадка, которое способствует значительному увеличению концентрации твердых веществ в единице объема [2, 3, 4]. Очистку шламонакопителя от осадка не предусматривают. При заполнении всего объема дальнейшее его использование прекращается.

Накопитель рекомендуется оборудовать устройствами для подачи осадка и отвода выделившейся при его уплотнении воды, располагаемыми на

противоположных сторонах. В идеале устройства для отвода воды должны обеспечивать ее удаление с различных уровней по глубине [1, 2].

Исследования доцента РГСУ Л.И. Нечаевой [3] приводят к выводу, что шламонакопитель должен выполнять две основные функции: одна из них заключается в увеличении концентрации твердой фазы выделенных осадков, а именно, в уплотнении, вторая сводится к подготовке надосадочной воды. Ввиду этого габариты и конструкция шламонакопителей должны удовлетворять обоим требованиям. Для удобства эксплуатации большие пруды-накопители следует разбивать на несколько частей (секций), что также позволяет ускорить процесс обезвоживания осадка за счет исключения смешения объемов уже уплотненного осадка с выпускаемым шламом низкой концентрации.

В качестве реагента, интенсифицирующего процесс уплотнения осадка в накопителе, в литературе чаще всего упоминается известь [1, 2, 4]. Однако мнения об ее эффективности неоднозначны: некоторые исследователи отмечают высокую способность осадка к седиментации после известковой обработки [2], другие считают, что ее использование не оправдывается высокой стоимостью [4].

К негативным характеристикам эксплуатации шламонакопителей можно отнести: образование застойных зон, не способствующих эффективному уплотнению осадка, или же напротив, зон повышенной гидродинамической активности, усложняющих процесс разделения шлама [3], высокую вероятность выноса осадка в поверхностные водные объекты за счет повышенных гидравлических нагрузок [5], потребность в отчуждении значительных территорий с учетом объемов образующегося на сооружениях водоподготовки шлама и ухудшение их санитарной обстановки [4].

Обработка осадка на иловых площадках получила широкое распространение в отечественной и зарубежной практике ввиду низких материальных и энергетических затрат, а также относительной простоты их эксплуатации. Данные сооружения были разработаны применительно к осадкам городских сточных вод, а в практику обработки осадка природных поверхностных вод перенесены без значительных конструктивных изменений [2]. В литературе

иловые площадки подразделяются на две основные категории: площадки замораживания и площадки подсушивания.

Площадки замораживания рекомендуется применять в районах с периодом устойчивой среднесуточной отрицательной температуры воздуха не менее двух месяцев в году. Применение их наиболее рационально для труднообезвоживаемых осадков станций осветления маломутных вод, а также станций обезжелезивания и реагентного умягчения воды, и нецелесообразно для станций осветления вод повышенной мутности [1].

Специфика обезвоживания осадка при замораживании заключается в том, что в результате разделения шлама на жидкую и твердую фазы в первую очередь замерзает вода, располагающаяся на поверхности площадки, замерзание же основной части твердых частиц происходит значительно позднее, что способствует максимальному уплотнению взвеси. К началу замерзания коллоидных частиц наступает практически полная их дегидратация в результате диффузии влаги к фронту образования льда [2, 6]. Структурные изменения осадка, происходящие в процессе промораживания, необратимы [2] и способствуют сокращению его объема более чем в 2 раза [4, 7].

Площадки замораживания подразделяются на три вида: весенние, летне-осенние и зимние. В теплый период года для накопления и уплотнения осадка перед замораживанием рекомендуется использовать весенние и летне-осенние площадки, а с наступлением устойчивого мороза – зимние [1].

Площадки замораживания выполняются на естественном основании, грунты которого обладают высокой фильтрующей способностью, и оборудуются системами для отвода надосадочной воды. В случае, если основание недостаточно водопроницаемо, устраивается дренаж [2]. Предлагаются конструкции площадок замораживания, оборудованные устройствами в виде колодцев с изменяющимся по высоте водосливом, подъемными поперечными лотками на гибком рукаве и на шарнире [1] (рисунки 1 а-в). Данные устройства для подачи осадка на площадки способствуют равномерному его распределению без размывания оградительных стенок и слоя замерзшего осадка, ими помимо этого обеспечивается возможность

напуска осадка в зимнее время под слой льда для вытеснения воздуха, а также на поверхность льда тонким слоем для таяния снега и быстрого замораживания выпускаемой массы.

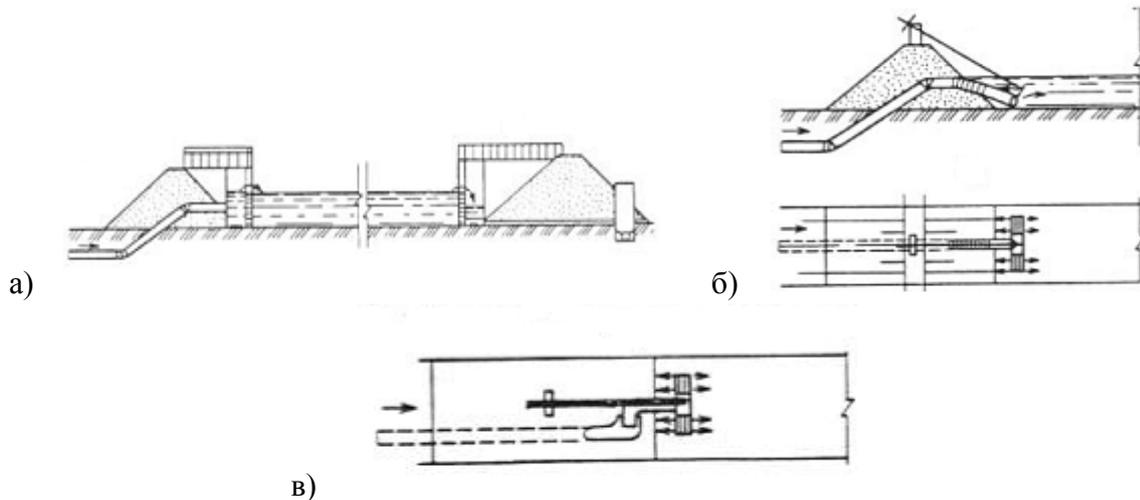


Рисунок 1.1- Конструкции площадок замораживания, оборудованные:

а - колодцами с изменяющимся по высоте водосливом (разрез); б – подъемным поперечным лотком на гибком рукаве (план, разрез); в – подъемным поперечным лотком на шарнире (план)

Размещение устройств напуска осадка в центре площадки (рисунок 1.2) имеет значительные преимущества перед размещением их на периферии, позволяя улучшить условия послойного замораживания осадка и уменьшить высоту оградительных дамб [1].

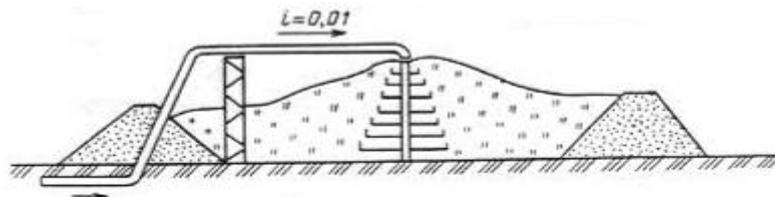


Рисунок 1.2 - Площадки замораживания с центральной каскадной подачей осадка

Повысить эффект обезвоживания осадка на площадках в зимний период возможно путем послойного промораживания, обеспечиваемого поэтапным напуском шлама, в совокупности с послойной срезкой льда с поверхности [2].

В южных районах при устойчивом уровне дефицита влажности воздуха 800 мм и более обезвоживание осадка, согласно справочному пособию [1], целесообразно осуществлять на площадках подсушивания. К основным конструктивным решениям таких сооружений относят площадки на естественном дренирующем основании и площадки на естественном или искусственном

водонепроницаемом основании с дренажом [2]. Искусственный дренаж толщиной около 0,5 м выполняется, как правило, двухслойным: нижний – из гравия или шлака, верхний – из песка. С целью отведения выделенного фильтрата в водонепроницаемом основании на расстоянии 6-10 м устраиваются дренажные траншеи глубиной 0,5-0,7 м, в которых прокладываются дренажные трубы (рисунок 1.3) [2, 8].

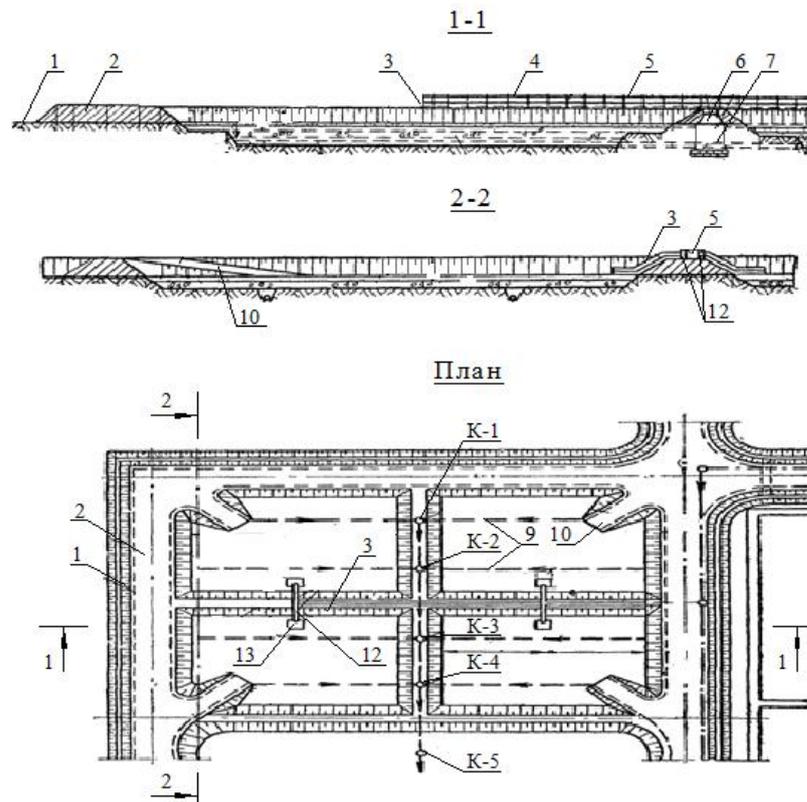


Рисунок 1.3 – Общий вид площадки подсушивания

1 - кювет оградительной канавы; 2 - дорога; 3 - сливной лоток; 4 - бруски, поддерживающие илоразводящий лоток; 5-разводящий лоток; 6-дренажный колодец; 7 - сборная дренажная труба; 8 - дренажный слой; 9 - дренажные трубы; 10 - съезд на карту; 11 - дренажная канава; 12 - шиберы; 13 - деревянный щит под сливным лотком; К-1÷5 - колодцы

На очистных сооружениях небольшой производительности в целях упрощения процесса эксплуатации ширину отдельных карт рекомендуется увеличивать до 35-40 м. Оградительные стенки площадок принимаются на 0,3 м выше рабочего уровня выпускаемого осадка. Шлам распределяется по картам посредством труб или деревянных лотков, размещаемых в оградительных стенках с уклоном 0,01-0,03 [8].

Исследования В.М. Любарского [2] позволяют выделить следующие этапы обезвоживания осадка на площадках с водонепроницаемым основанием без дренажа: разделение фаз с отстаиванием на поверхности осветленной свободной влаги; испарение влаги с поверхности, а затем из толщи осадка. Обезвоживание осадка на площадке с дренажом или естественном фильтрующем основании несколько сложнее и дополняется процессами фильтрации влаги через слои взвешенных твердых частиц, уплотненного осадка и дренажного основания. Если площадки оборудуются системами отвода надосадочной воды, позволяющими значительно сократить продолжительность фильтрации и испарения, то появляется еще один дополнительный этап, включающий отвод влаги с поверхности.

Скорость влагоотдачи в процессе обезвоживания осадка на площадке подсушивания, оборудованной дренажным основанием и системой поверхностного водоотвода, выражается дифференциальным уравнением [9]:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW_c}{dt} + \frac{dW_\phi}{dt} + \frac{dW_d}{dt}, \quad (1.1)$$

где W – общее содержание воды в осадке;

W_c, W_ϕ, W_d – объемы воды, удаляемые в результате сушки, фильтрации и декантации соответственно.

Скорость удаления влаги посредством сушки на открытом воздухе зависит от климатических параметров, стадия фильтрации обусловлена свойствами осадка и особенностями дренажной системы, а скорость декантации – способностью осадка к уплотнению и характеристиками систем отведения воды.

Размеры карт назначаются с учетом толщины слоя осадка, выпускаемого за один раз. Наиболее приемлемая высота напуска осадка летом согласно [8] не должна превышать 0,3 м, зимой – 0,5 м. В литературе [1, 2] рекомендуются формулы, позволяющие, исходя из климатических условий региона и объема образующегося осадка, определить предельно возможную высоту его напуска.

В случае, если осадок обладает слабой фильтруемостью, следует предусматривать возможность предварительной его подготовки к обезвоживанию

(кондиционирование), а при климатических условиях размещения иловой площадки, исключающих интенсивное испарение влаги и ее промораживание, необходимо изыскание прочих приемов обработки (на механических устройствах или канализационных очистных сооружениях совместно с городскими сточными водами) [2].

1.2 Искусственные и механические способы обезвоживания осадка

1.2.1 Подготовка осадка к обезвоживанию

С целью повышения эффективности обезвоживания осадка как в естественных условиях, так и на механических аппаратах, а также снижения нагрузки на сооружения, весьма целесообразным является предварительное его уплотнение [1-4, 7]. Применяют пять основных методов уплотнения осадка [10]: гравитационный [11, 12], флотационный [13], уплотнение способом кондиционирования [2], сгущение в центробежном поле и фильтрование [14].

Гравитационное уплотнение осадка может осуществляться как под действием только лишь сил тяжести твердого вещества, так и при воздействии перемешивания для интенсификации процесса. Медленное механическое перемешивание способствует сближению частиц осадка и их укрупнению [15, 16].

Флотационный метод уплотнения осадка в сравнении с гравитационным имеет некоторые преимущества, к которым можно отнести более высокую степень и скорость уплотнения, возможность регулирования процесса.

В литературе достаточно подробно рассматриваются приемы кондиционирования осадка, осуществляемые с применением химических реагентов (коагулянтов и флокулянтов), минеральных присадочных материалов, а также сочетание данных методов [2]. Нагрев осадка до 60-90 °С, метод поочередного замораживания-оттаивания, обозначенные в справочном пособии [17], наиболее приемлемы при подготовке к обезвоживанию осадков маломутных цветных вод, обладающих низкой водоотдающей способностью. Также

кондиционирование может осуществляться с применением радиационной, магнитной, кислотной обработки и электрокоагуляцией [4].

Применение минеральных коагулянтов, используемых при очистке воды, таких как сернокислый алюминий и хлорное железо, не обеспечивает достаточного обезвоживания осадков [18]. Более значительного изменения структуры осадка можно достичь флокулянтами катионного и анионного типов, способствующими активной агрегации частиц дисперсной фазы, сокращению количества пор, изменению форм связи влаги с твердыми частицами, позволяющему сократить количество связанной влаги [2, 4]. Особое значение здесь следует уделять дозе флокулянта и продолжительности перемешивания шлама с реагентом. В [19] сообщается, что при механическом обезвоживании водопроводного осадка расход флокулянта и влажность кека в значительной степени зависят от величины цветности очищаемой воды.

Повышение водоотдающей способности обработанного химическими реагентами осадка на этапе уплотнения не всегда способствует интенсификации процесса удаления влаги на механических аппаратах, поскольку удельное сопротивление фильтрации осадка может остаться весьма значительным, что в свою очередь негативно скажется на эффекте последующего обезвоживания [2].

Улучшению водоотдающей способности и снижению показателя сжимаемости осадков маломутных вод (в том числе содержащих гидроксид алюминия) способствует добавление присадок [20, 21]. Минеральные присадки изменяют структуру осадка в направлении снижения удельного сопротивления фильтрации, упрощают отделение кека от фильтровальной перегородки. Наиболее часто для этих целей используют диатомит, перлит, уголь, древесную муку [2, 4] или осадок от флотационных ловушек процесса производства офсетной бумаги [22]. Присадки в первую очередь должны обладать химической инертностью, малой удельной площадью поверхности твердых частиц, незначительной сжимаемостью в диапазонах давлений, применяемых при обезвоживании, а также определенной плотностью, исключающей возможность быстрой седиментации после смешения с осадком [2]. Применение того или иного вспомогательного

вещества следует обосновывать технико-экономическими показателями. Совместное применение химических реагентов и вспомогательных присадочных материалов позволяет сократить расход первых в 2 и более раза [4].

В технологии подготовки осадка к механическому обезвоживанию достаточно часто находит свое применение известь (как коагулянт и присадочный материал). Доза извести может варьироваться в широком диапазоне (от 20 до 100 % в пересчете на СаО по массе сухого вещества (м.с.в.) осадка), поскольку ее количество определяется исходными свойствами обрабатываемого осадка [2, 4]. Так, в случае с труднообезвоживаемым осадком, полученным при подготовке высокоцветных вод малой мутности (при отношении $C/M \geq 10$ град·дм³/мг), для достижения приемлемого уровня снижения его влагосодержания приходится использовать повышенные дозы реагента.

Эффективным способом подготовки к обезвоживанию осадков, характеризующихся низкой водоотдачей, является метод замораживания и оттаивания на специальных устройствах [23-28]. В процессе замораживания в осадке наблюдается изменение форм связи воды с твердой фазой, при этом большая часть связанной воды переходит в свободное состояние и может быть удалена из структуры осадка.

Отечественными и зарубежными исследователями предлагаются различные способы интенсификации процесса искусственного замораживания: оснащение приемного резервуара дополнительными трубчатыми теплообменными элементами, в которых попеременно испаряется и конденсируется хладагент (аммиак) [29], организация непосредственного контакта осадка с жидким хладагентом [30], использование вращающегося барабана [31], ускоряющего процесс замораживания, устройство ленточного кристаллизатора [32] для лучшего промораживающего эффекта. Установлено, что приемлемый результат достигается процедурой замораживания лишь в том случае, если обеспечивается полное промерзание всего слоя массы. В случае несоблюдения данного условия, часть осадка, не подвергшаяся воздействию отрицательных температур, значительно снизит общий эффект обезвоживания. Также отмечается, что

продолжительность воздействия на осадок холодом, а также специфика процесса последующего оттаивания не влияют на его итоговую водоотдающую способность [2].

Весьма нестандартен способ ультразвуковой обработки осадка для подготовки его к обезвоживанию [33], способствующий сокращению объема шлама, а также повышению степени осветления выделенной воды.

В качестве безреагентного способа изменения свойств осадка предлагается применение магнитных полей, однако, как показали лабораторные и полупроизводственные опыты, влияние их на физические показатели осадка нестабильно [34, 35].

Большой интерес, по мнению исследователей [36], представляет использование гидроциклонов для подготовки осадка к обезвоживанию, в которых за счет высоких скоростей и разделения потоков происходит изменение структуры осадка, способствующее быстрому отделению твердой фазы и эффективному уплотнению осадка. Результаты исследования показывают, что увеличение концентрации твердой фазы находится в прямой зависимости от мощности аппаратов: чем выше рабочее давление, тем более концентрирован осадок на выходе. Данный метод, по утверждениям исследователей, отличается высокой экологичностью.

В [37] рекомендуется применение сетчатых гравитационных сгустителей ленточного и барабанного типов. Процесс сгущения осадков реализуется в непрерывном режиме путем его фильтрования через синтетическую сетку под действием сил гравитации. Как показывает практика, применение сетчатых сгустителей в технологических процессах механического обезвоживания наиболее целесообразно в комбинации с ленточными фильтр-прессами.

В заключение описания процесса подготовки осадка к механическому обезвоживанию нельзя не упомянуть, что согласно рекомендациям справочного пособия [17] для перекачки осадка на обезвоживающие устройства во избежание разрушения структуры следует отказаться от применения центробежных насосов, более приемлемы для этого плунжерные или шнековые.

1.2.2 Обезвоживание осадка на вакуум-фильтрах

В практике обезвоживания осадков вод поверхностных водоисточников применяются различные конструкции вакуум-фильтров: барабанные, дисковые, ленточные. Вне зависимости от конструктивных особенностей процесс обработки осадка на вакуум-фильтрах можно разделить на этапы: фильтрование шлама, промывка и сушка осадка, съём обезвоженного кека, очистка фильтровальной перегородки [4].

Исследователи сходятся во мнении, что обезвоживание на вакуум-фильтрах осадка маломутных цветных вод, обладающего высоким удельным сопротивлением, малоэффективно ввиду низкой производительности процесса и высокой влажности кека на выходе [2, 38, 39].

Для интенсификации процесса обезвоживания осадка вакуумной фильтрацией рекомендуется добавление не только химических реагентов, но также и минеральных или органических добавок (каменноугольной пыли, древесной муки, мела), что позволяет получить кек с влажностью 65-75 %. Данный метод способствует увеличению производительности аппаратов в 2,5-3,0 раза [4].

Неплохие результаты можно получить с применением извести, однако она, как и прочие добавки, не гарантирует полного исключения возможности срыва вакуума, являющегося причиной высокой влажности полученного кека [2].

Известен способ интенсификации работы вакуум-фильтра зарубежных исследователей [40], заключающийся в нанесении на фильтровальную перегородку дополнительного фильтрующего слоя из осадочных горных пород. Ввиду сложности эксплуатации и повышенной стоимости данная технология не получила широкого распространения.

Применение метода обезвоживания водопроводных осадков с использованием вакуум-фильтров сдерживается такими факторами, как: недолговечность ткани, высокая стоимость эксплуатации, большой расход

реагентов. Из преимуществ данного метода обезвоживания можно выделить: непрерывность в работе, потребность в небольших производственных площадях для размещения оборудования, возможность автоматизации процесса, надежность эксплуатации [41].

Ориентируясь на зарубежный и отечественный опыт эксплуатации вакуум-фильтров, можно ограничить область применения данных аппаратов осадками вод низкой цветности.

1.2.3 Обезвоживание осадка на фильтр-прессах

Достаточно широкое распространение в мировой практике обезвоживания осадков природных вод получили фильтр-прессы (ленточные, камерные, мембранные) [2, 4].

Ленточные фильтр-прессы предназначены для механического обезвоживания осадков под действием сил гравитации, вакуума и давления. Главными конструктивными элементами данных аппаратов являются: устройства подачи и распределения осадка на пресс, фильтровальные ленты, приводной механизм, направляющие движения лент, системы сбора и отведения выделенного фильтрата и воды для промывки, ножи для съема кека [4, 42]. Общий принцип работы ленточных фильтр-прессов различных типов заключается в отжиме осадка между двумя непрерывно передвигающимися лентами, выполняемыми из полиэфира, лавсана, пропилена или другого синтетического материала. По направлению движения лент ленточные фильтр-прессы подразделяют на горизонтальные, вертикальные, угловые, петлеобразные и барабанные. Исследователями А.С. Кериным и И.А. Нечаевым [37] выполнен обзор всевозможных конструкций фильтр-прессов, используемых в настоящее время. Так, установки могут отличаться друг от друга шириной фильтровальных лент, количеством отжимных валов, способом подачи осадка на ленты и конфигурацией ножей.

Обезвоженные с помощью ленточных фильтр-прессов осадки характеризуются низкими значениями влажности, а эффективность задержания твердой фазы, как правило, составляет 96-99 % [37, 42].

Для снижения уровня водопотребления цехов механического обезвоживания, на которых эксплуатируются ленточные фильтр-прессы, исследователями предлагается внедрение технологии оборотного водоснабжения для регенерации лент. С этой целью рекомендовано использовать осветленный фильтрат, полученный в результате обезвоживания осадка [37].

Камерные и мембранные фильтр-прессы, а также фильтр-прессы со смешанным пакетом фильтровальных плит, имеют принципиальные отличия от ленточных. В первую очередь следует отметить, что это периодически действующие устройства, основу конструкции которых составляют камеры (мембраны). Они образуются в пространстве герметично прижатых друг к другу по периметру фильтровальных плит. Фильтровальные плиты с обеих сторон покрыты фильтровальной тканью. Каждая плита снабжена каналом, по которому производится подача осадка, а также дренажом, по которому отводится фильтрат и осуществляется продувка кека [7, 43].

Опыт эксплуатации фильтр-прессов показывает, что увеличению производительности данных аппаратов способствует снижение влажности исходного осадка, которого можно добиться предварительной обработкой известью или флокулянтами [2, 4, 7, 40, 42]. В целом, фильтр-прессы позволяют достичь приемлемых результатов по снижению влажности большинства типов осадков природных вод, исключением являются осадки маломутных высокоцветных вод с отношением Ц/М > 30 град·дм³/мг, которые склонны к значительной сжимаемости в процессе фильтрования [2]. Особое внимание здесь также следует уделить выбору давления фильтрования, поскольку увеличение давления сопровождается резким возрастанием показателя удельного сопротивления, а слишком низкое давление снижает водоотдачу. Помимо этого, многие исследователи причиной неудовлетворительной работы фильтр-прессов с

осадком высокоцветных вод считают относительно большую высоту слоя обезвоживаемого осадка, что препятствует фильтрации воды из центральных слоев. В связи с этим немалый интерес представляют конструкции современных фильтр-прессов [44-50].

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что фильтр-прессы положительно зарекомендовали себя в области обезвоживания осадка. Среди основных их недостатков – небольшой срок службы фильтровальных лент (в случае с ленточными образцами), высокая стоимость мембран (мембранные аппараты), сравнительно невысокий эффект обезвоживания осадка в камерных фильтр-прессах.

1.2.4 Обезвоживание осадка на центрифугах

В основе метода обработки осадка центрифугированием – принцип разделения частиц смеси твердой и жидкой фаз под воздействием центробежной силы.

В камере центрифугирования образуются две разные фазы [7]:

– остаток центрифугирования (осадок), не имеющий однородной структуры, поскольку при центрифугировании происходит распределение твердых частиц по их плотности;

– отстоявшаяся надосадочная жидкость (фугат), имеющая повышенную мутность ввиду присутствия примесей высокой степени дисперсности.

Авторы [2, 51, 52] сообщают, что для повышения концентрации осадка при его обезвоживании на центрифугах, рекомендуется применение извести, катионных или анионных флокулянтов. Эффективность применения реагентов, а также их оптимальные дозы могут изменяться в зависимости от типа осадка, образующегося на очистных сооружениях.

В [7, 53] обозначены преимущества и недостатки метода центрифугирования. Преимущества:

- процесс обезвоживания проходит в закрытом пространстве, что позволяет сократить до минимума неприятные запахи, и, следовательно, сократить расходы на вентиляцию цеха;

- отсутствие загрязнений в цехе, которое обеспечивается закрытым корпусом аппарата и автоматической промывкой;

- надежная работа без дополнительного контроля (при условии стабильности свойств поступающего осадка);

- приемлемые результаты снижения влажности даже при работе с труднообезвоживаемым осадком;

- возможность быстрого изменения рабочих параметров машины для корректировки необходимой степени обезвоживания;

- отсутствие в составе агрегата быстроизнашиваемых деталей.

Существуют и некоторые недостатки, заключающиеся в высоком потреблении реагентов, значительном расходе электрической энергии, истирании рабочих элементов конструкции, потребности в периодическом специализированном обслуживании и сложности пусконаладочных работ.

1.3 Совместная обработка осадка водопроводных станций и городских сточных вод

Помимо ранее описанных методов обезвоживания водопроводного осадка в отечественной и зарубежной практике применяется способ совместной обработки данного отхода со сточными водами на канализационных очистных сооружениях. Сброс осадка природных вод в городскую канализацию включает мероприятия по усреднению его расхода и концентрации на водоочистных станциях, проверку пропускной способности канализационных сетей и производительности сооружений канализационных очистных станций [54].

В [54, 55] отмечается, что транспортирование осадка водопроводных станций на канализационные очистные сооружения может осуществляться

автотранспортом, по отдельному трубопроводу или уже существующей канализационной сети города. Важным моментом в случае последних двух способов является поддержание заданной скорости движения стоков, которая должна равняться или превышать значение самоочищающей, что позволит предотвратить заиливание трубопроводов.

Главный инженер МГУП «Мосводоканал» М.Г. Хамидов [56] сообщает, что количественным маркером поступления водопроводного осадка в канализацию, а также его распределения по объектам очистных сооружений, могут являться соединения алюминия (в случае обработки природной воды алюминийсодержащими коагулянтами).

В целом, можно обозначить, что водопроводный шлам негативно сказывается на работе канализационных очистных сооружений. Так, в [56] отмечается увеличение влажности сырого осадка с 94-95 % до 96 %, а также снижение эффективности задержания взвешенных веществ в первичных отстойниках до 40-45 %. Профессора М.Н. Шевцов и М.О. Носенко [36] сообщают о нецелесообразности совместной обработки ввиду поступления в канализацию несвойственных для нее веществ и соединений, а также больших затрат на транспортирование (географически станции подготовки питьевой воды и канализационные очистные сооружения находятся в противоположных частях города).

Ухудшение механической очистки сточной воды в первичных отстойниках, вызванное совместной обработкой осадка природных вод и канализационных стоков, по опытным исследованиям М.Г. Хамидова, оказывает неблагоприятное воздействие на все последующие этапы обработки: увеличивается прирост активного ила, снижается его возраст и нитрифицирующая способность, увеличивается объем смеси, подлежащей к загрузке в метантенки, снижается глубина сбраживания осадка [57]. Однако, автор сообщает и о возможности минимизации негативных проявлений. Во-первых, необходимо отказаться от стремления поддержания низкой влажности сырого осадка, обозначенной в типовых регламентах: в случае эффективности задержания взвешенных веществ в

отстойнике порядка 60 % откачивание сырого осадка допустимо при достижении им влажности 96,8 %. Во-вторых, с целью сокращения объема осадка, направляемого на стабилизацию в метантенки, рациональным является его предварительное сгущение. В качестве мероприятий, способствующих снижению объема осадка, наиболее приемлемы три способа: гравитационное уплотнение, напорная флотация и аппаратное сгущение.

1.4 Возможные пути утилизации обезвоженного водопроводного осадка

Обезвоженный осадок может накапливаться на водоочистных станциях в значительных количествах. Складирование и хранение данного отхода требует отчуждения немалых площадей, а также периодического обслуживания, заключающегося в расширении площади карт, наращивании ограждающих стенок, организации систем отведения атмосферных осадков. При этом обезвоженный осадок природных вод, представляющий собой сложную органо-минеральную смесь, может быть использован в различных отраслях производственно-хозяйственной деятельности.

Профессором Л.Я. Шевченко [58] предложена классификация возможных направлений утилизации осадка водопроводных станций в зависимости от типа природной воды, из которой данный осадок получен. Автор выделяет четыре основные группы: к первой отнесены осадки маломутных и среднецветных вод, использование которых перспективно в металлургии (в качестве жаростойких покрытий), ко второй группе – осадки маломутных высокоцветных вод с применением их главным образом в сельском хозяйстве и при изготовлении керамзитового гравия, к третьей и четвертой группам – осадки вод средней и высокой мутности малоцветных с возможной их утилизацией в производстве строительных материалов.

Осадки маломутных среднецветных водоисточников, представляющие собой смесь тонкодисперсных частиц, после обезвоживания до влажности

50-55 % в [59] рекомендуется использовать в составе жаростойких покрытий, основным требованием к которым является хорошая кроющая способность, обусловленная высокой дисперсностью материала и позволяющая равномерно заполнить все неровности защищаемой поверхности. Такое покрытие толщиной 2,0-2,5 мм выдерживает на 20 % больше наливов слитков в сравнении со стандартными смесями за счет повышенной стойкости футеровки.

В работах [60, 61] доказаны благоприятные агрохимические свойства обезвоженного осадка вод повышенной цветности, что позволяет рассматривать его в качестве компонента почвогрунта. По оценке специалистов, состав осадка аналогичен сапропелям (донным отложениям пресных водоемов) и содержит до 40 % плодородного гумуса, вымытого из почвы атмосферными осадками. Но, несмотря на приемлемые значения рН, достаточное содержание органики, азота, фосфора и калия в доступной для растений форме, специфика структуры и текстуры осадка не предоставляет возможности его применения в качестве единственного компонента почвогрунта: необходимо сочетание осадка с торфом или минеральным грунтом. По мнению исследователей, наиболее экономически выгодной и экологически оправданной является такая утилизация осадка, при которой его объем в составе почвогрунта не превышает 30 %. Почвогрунт подобного состава оптимально сбалансирован по элементам питания и физическим показателям: содержит около 17-20 % органического вещества, 0,4-0,6 % общего азота, 200-250 мг/кг подвижного калия (по K_2O), 100-150 мг/кг подвижного фосфора (по P_2O), около 17 % частиц размером менее 0,01 мм. По санитарным показателям почвогрунт подобного состава отвечает всем гигиеническим требованиям. Кроме того данный грунт не требует специального ухода, может быть использован как в закрытом, так и открытом пространстве, имеет устойчивую структуру [61].

Осадок маломутных высокоцветных водоисточников, характеризующийся повышенным содержанием коллоидных гидроксидов (от 20 до 40 %) и органических веществ, обладает хорошими огнеупорными свойствами, что обуславливает возможность его использования в производстве керамзитового

гравия [58]. Влага, содержащаяся в осадке, способствует порообразованию гранул керамзита и, как результат, снижению его объемной массы.

Осадок малоцветных вод средней и высокой мутности, схожий по составу с глинистыми или лессовидными породами, предпочтительно использовать в качестве компонента строительных материалов, таких как керамика, цементы, бетоны.

Известен положительный опыт реализации применения осадка (до 15 % по объемной части) в составе керамического сырья, позволяющий в определенном соотношении компонентов решить проблему утилизации отхода водоочистки без ущерба показателей качества готовой продукции [60]. При этом авторами отмечается возрастание пластичности сырьевой массы, улучшение процесса спекания и общее повышение потребительского качества керамики.

Профессор М.Г. Журба и коллеги сообщают о положительном опыте использования водопроводного осадка в производстве силикатного кирпича. Благодаря данному компоненту в составе (до 5 % по объемной части) можно не только снизить эксплуатационные расходы, но и увеличить производительность технологического оборудования [4].

Весьма интересен способ производства глиноземистого цемента из осадка природных вод [62]. Выявлено, что наилучшими прочностными характеристиками обладали образцы, заформованные с содержанием осадка около 30 %. Кроме того, исследователи утверждают, что во всех образцах, содержащих в своем составе осадок, рентгенофазовый анализ не выявил минерал геленит, отрицательно влияющий на прочность глиноземистого цемента.

Д.Н. Бухариной [63] предложен и обоснован метод утилизации осадка водоочистных станций в легкие жаростойкие бетоны и сухие теплоизоляционные смеси с одновременным улучшением их эксплуатационных характеристик. Технология позволяет утилизировать 70 кг алюминийсодержащего осадка на 1 т готовой продукции, сэкономив при этом до 7 % жидкого стекла. О возможности применения осадка в составе теплоизоляционных материалов (в частности, пеностеклогранулянтах) сообщается и в прочих источниках [60, 64].

Положительные результаты были достигнуты при использовании осадка в производстве полнотелого кирпича [64]. Сырьем для изготовления опытной партии продукции послужили суглинки месторождения Московской области (50-70 % по объему), шамот (3 % по объему) и осадок водопровода (5-13 % по объему влажностью около 79 %). Обжиг производился при температуре 950 °С. Марка готового кирпича – М100. Испытания образцов на предел прочности при сжатии и изгибе подтвердили возможность применения осадка при его содержании не более 7 % без ухудшения прочностных показателей.

Таким образом, вовлечение осадка водопроводных станций в хозяйственно-промышленный оборот имеет не только природоохранное, но и немалое экономическое значение.

Выводы по 1-ой главе

1. Выбор способа обезвоживания осадка природных вод должен основываться на всесторонних исследованиях его исходных физико-химических и минералогических характеристик.

2. Подготовка осадка к обезвоживанию – важнейший этап обработки в целом, от эффективности проведения которого зависит продолжительность и результативность последующих технологических операций.

3. Эффективность обезвоживания осадка в естественных условиях определяется как его водоотдающими свойствами, так и климатическими параметрами местности.

4. Обработка осадка на механических аппаратах не всегда гарантирует высокие показатели обезвоживания, в результате чего осуществление отдельных направлений утилизации требует организации дополнительной сушки кека.

5. В результате выполненного анализа научной и научно-производственной литературы обозначена необходимость исследований по следующим направлениям:

- изучение химических показателей воды источника водоснабжения, а также технологии и режима работы основных сооружений станции водоподготовки;
- детальное изучение структуры и свойств осадка, выбранного в качестве объекта исследования;
- установление оптимальных параметров подготовки осадка к обработке, а также эффективности возможных способов непосредственного обезвоживания с теоретической и практической точек зрения;
- разработка конкретной технологической схемы обработки осадка, включающей совокупность сетей и сооружений от точки выпуска шламовых вод промывки отстойников до точки получения обезвоженного кека, пригодного к утилизации;
- выполнение технико-экономического обоснования выбранного варианта технологической схемы обработки осадка.

2 Изучение исходных свойств осадка маломутной и малоцветной природной воды как объекта исследования

2.1 Характеристика источника водоснабжения

Осадки образуются при очистке природных вод от содержащихся в их составе растворенных веществ, планктона, загрязнений, поступающих в водоисточники с дождевыми, талыми и сточными водами [2]. Как результат, исходные характеристики осадка определяются главным образом качеством воды источника водоснабжения.

Исследования проводились на станциях водоподготовки г. Ростова-на-Дону, источником водоснабжения которого является река Дон – одна из главных водных объектов Ростовской области. Дон является равнинной рекой, имеет плавный продольный профиль. Наиболее узкая пойма реки составляет не более 0,8 км, а в нижнем течении превышает 10 км. Глубины изменяются в широком диапазоне: от 0,7 до 6,0 м. Скорость течения реки в среднем составляет 1,0 м/с, в паводок повышается до 2,0 м/с. Дон имеет преимущественно снеговое питание, поскольку около 80 % годового объема всего стока составляют талые снеговые воды. Средняя годовая амплитуда колебаний уровня воды не превышает 0,5 м. Ледовые образования наблюдаются во второй декаде декабря, длительность осеннего ледохода составляет около 20 дней. Ледостав устанавливается в третьей декаде декабря и обычно не превышает четырех месяцев, весенний ледоход начинается в начале марта.

Сравнительный анализ показателей качества донской воды в точках водозаборов №1 и №2, выполненных Центральной лабораторией АО «Ростовводоканал», показал, что за период исследования (2010 – 2013 гг.):

– по органолептическим показателям, а также отдельным показателям химического состава качество речной воды соответствовало требованиям [65] и характеризовалось значениями мутности в интервале (от минимальных до максимальных значений) $1,19 \div 50,35$ мг/дм³, цветности $7,75 \div 73,05$ град, содержанием взвешенных веществ на уровне $2,20 \div 102,50$ мг/дм³ (рисунок 2.1 а-в),

водородным показателем в интервале 7,73÷8,68 единиц рН, а также запахом до 2 баллов при температуре 60 °С;

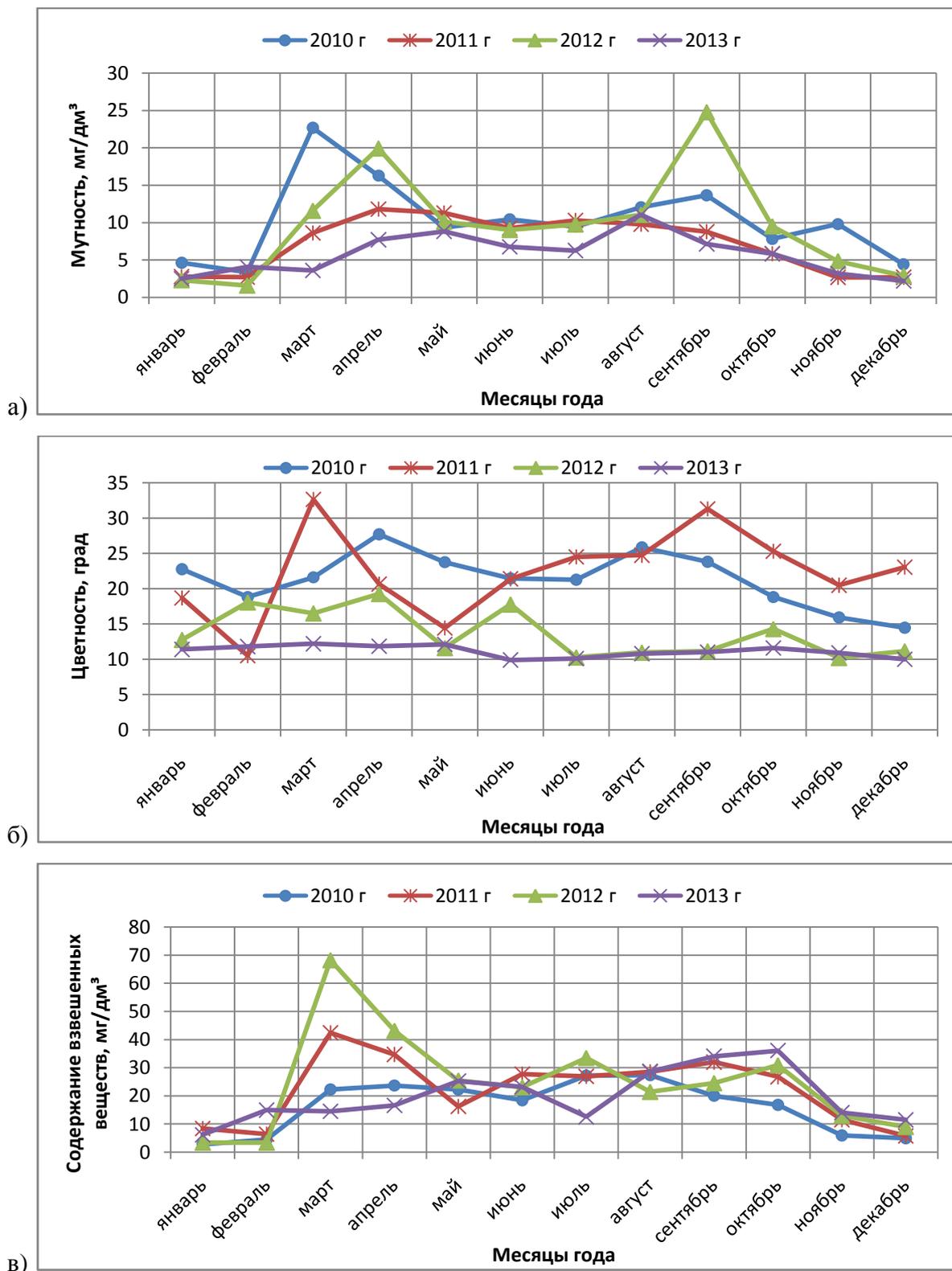


Рисунок 2.1 - Усредненные органолептические показатели донской воды по месяцам года за период наблюдения (2010-2013 гг.) в районе водозаборов г. Ростова-на-Дону:
а – мутность; б – цветность; в – содержание взвешенных веществ

– по солевому составу исследуемые воды относятся к гидрокарбонатному классу как к наиболее благоприятному в физиологическом отношении, имеют общую минерализацию в пределах $359,50 \div 960,60$ мг/дм³, а также характеризуются основными макроэлементами: хлоридами ($91,05 \div 134,80$ мг/дм³), сульфатами ($149,70 \div 299,90$ мг/дм³), фосфатами ($0,26 \div 0,50$ мг/дм³), нитратами ($0,68 \div 8,37$ мг/дм³). По показателю общей жесткости было выявлено некоторое превышение гигиенических требований в период с января по март 2010 г. до $8,35$ °Ж, с января по апрель 2011 г. до $7,78$ °Ж, а также с января по апрель 2012 г. до $7,77$ °Ж. Щелочность воды находится в пределах $2,75 \div 3,94$ ммоль/дм³;

– по органическим показателям в пределах нормы находились: аммиак по азоту $0,07 \div 0,48$ мг/дм³, нитриты $0,008 \div 0,067$ мг/дм³, перманганатная окисляемость $3,27 \div 9,21$ мгО₂/дм³, ПАВ от значений менее $0,025$ (ниже предела обнаружения) до $0,062$ мг/дм³, нефтепродукты от значений менее $0,005$ (ниже предела обнаружения) до $0,059$ мг/дм³. Содержание органических веществ по показателю биологического потребления кислорода (БПК₅) не соответствовало гигиеническим требованиям [66], предъявляемым к поверхностным водоисточникам в июле и сентябре 2010 г. ($2,52$ и $2,78$ мгО₂/дм³ соответственно), апреле 2011 г. ($2,15$ мгО₂/дм³), августе 2012 г. ($2,18$ мгО₂/дм³). Химическое потребление кислорода (ХПК) за период исследования колебалось в пределах $12,10 \div 28,00$ мгО₂/дм³ и в 80 % среднемесячных проб превышало норматив по результатам 2010–2011 гг., в 50 % по итогам 2012 г. и 88 % по итогам 2013 г.;

– по показателям металлов в пределах нормы находились: кадмий от значений менее $0,00001$ (ниже предела обнаружения) до $0,0001$ мг/дм³, свинец от значений менее $0,005$ (ниже предела обнаружения) до $0,011$ мг/дм³, медь от значений менее $0,002$ (ниже предела обнаружения) до $0,008$ мг/дм³, хром от значений менее $0,02$ (ниже предела обнаружения) до $0,022$ мг/дм³, цинк от значений менее $0,005$ (ниже предела обнаружения) до $0,520$ мг/дм³. Количественное содержание алюминия в донской воде находилось в интервале от $0,11$ до $0,48$ мг/дм³, превысив нормативный уровень в марте 2010 г. ($0,50$ мг/дм³),

а также в апреле и мае 2012 г. (0,93 и 0,51 мг/дм³ соответственно), марганца – от 0,020 до 0,071 мг/дм³, не соответствующее требованиям в марте (0,134 мг/дм³) и сентябре (0,25 мг/дм³) 2010 г. Железо в пробах речной воды многократно находилось в концентрациях, превышающих гигиенический регламент [66, 67], однако максимальная зафиксированная его концентрация за исследованный период составила 0,54 мг/дм³, что согласно [65] допустимо для водоисточников 2 класса (при нормативном уровне до 3 мг/дм³).

2.2 Изучение режима работы водопроводных очистных сооружений

2.2.1 Состав сооружений

Очистные сооружения централизованной системы водоснабжения г. Ростова-на-Дону составляют два независимых комплекса – Центральный и Александровский.

Центральные ВОС были построены в 1929 г., расширены в 1934 г. и 1974 г. Проектная мощность составляет 160 тыс. м³/сут, фактическая – 133,5 тыс. м³/сут. Вода подлежит очистке по двухступенчатой технологии: гравитационное отстаивание и скорое безнапорное фильтрование. В составе станции следующие сооружения: смесители вихревого типа, три группы отстойников, три группы скорых фильтров, резервуары чистой воды, реагентное хозяйство, насосная станция второго подъема. Несмотря на то, что проектом предусмотрена система переключений, возможность перераспределения нагрузок затруднена гидравлическими характеристиками, а также высотным расположением основных сооружений и трубопроводов. В результате, Центральные ВОС работают в недогруженном режиме.

Исходная вода подается на Центральные очистные сооружения посредством насосной станции I-го подъема, находящейся в поселке Александровка, из ковшевого водозабора по трем водоводам. Ввод реагента осуществляется во всасывающие патрубки рабочих насосов насосной станции II-го подъема. В дальнейшем вода подается на смесители №1 и №2, где происходит первичное

хлорирование и введение аммиака (при необходимости). После смесителей вода распределяется по трем линиям обработки.

Первая технологическая линия, построенная в 1929 г., состоит из четырех цилиндрических вертикальных отстойников и восьми прямоугольных скорых фильтров. Диаметр отстойника – 11 м, высота – 6 м, объем – 570 м³. Проектная производительность отстойников составляет 20 тыс. м³/сут. Для сбора осветленной воды в верхней части отстойника предусмотрены перфорированные трубопроводы. Отстаивание осуществляется при средней скорости 9 мм/с. Опорожнение отстойника от скопившегося осадка выполняется через выпуск, располагаемый в приемке.

Вторая технологическая линия очистки построена в 1934 г. В ее составе – 11 горизонтальных отстойников и 10 прямоугольных скорых фильтров. Каждый отстойник конструктивно совмещен с камерой хлопьеобразования, однако, на сегодняшний день она не эксплуатируется. Размеры отстойника в плане – 45×6 м, высота – 4 м. Скорость движения воды составляет 9 мм/с, расчетное время пребывания воды в сооружении – 1,25 ч. Расчетная производительность одного отстойника – 8,35 тыс. м³/сут. Сбор отстоянной воды осуществляется железобетонным желобом, устроенным в верхней части отстойника, а удаление осадка – двумя сбросными трубопроводами.

Третья технологическая линия, построенная в 1974 г., состоит из восьми вертикальных отстойников и 10 прямоугольных скорых фильтров. Размеры отстойника в плане – 11,75×8,75 м, высота – 6 м, объем 616,80 м³, общая производительность сооружений – 35 тыс. м³/сут. Отстаивание воды осуществляется при ее движении снизу вверх. Отбор осветленной воды предусмотрен перфорированными трубопроводами, расположенными в верхней части отстойника.

Александровские ВОС введены в эксплуатацию в 1964 г. и в настоящее время состоят из двух блоков очистных сооружений (БОС) – БОС №1 и №2. Первый блок введен в эксплуатацию в 1964 г., второй – в 1984 г. Проектная мощность составляет 320 тыс. м³/сут, фактическая – 450 тыс. м³/сут.

Речная вода поступает на БОС №1 от насосной станции I-го подъема №2. Комплекс водоочистки включает в себя следующие сооружения: 20 горизонтальных отстойников (размеры в плане – 50,0×5,8 м, средняя глубина – 4,5 м), 10 скорых фильтров, реагентное хозяйство, резервуары чистой воды, насосную станцию II-го подъема №2. На БОС №2 вода поступает от насосной станции I-го подъема №3. В составе блока: микрофильтры, смесители вихревого типа, 16 горизонтальных отстойников со встроенными камерами хлопьеобразования вихревого типа (размеры отстойника в плане 62,0×5,8 м, средняя глубина 3,5 м), восемь скорых фильтров, реагентное хозяйство, резервуары чистой воды, насосные станции II-го подъема №3 и №4.

В настоящее время сооружения по обработке осадка на ВОС г. Ростова-на-Дону отсутствуют: шламовые воды промывки сооружений отводятся по балке Кизитериновка в реку Дон.

2.2.2 Реагенты, применяемые для очистки воды

За период исследования (2010-2013 гг.) для осветления и обесцвечивания речной воды на очистных сооружениях г. Ростова-на-Дону (по данным АО «Ростовводоканал») применялись различные реагенты и их комбинации: в 2010 г. – коагулянт оксихлорид алюминия (ОХА) торговых марок Аква-Аурат 10, БОПАК – Е в сочетании с флокулянтom типа полиДАДМАХ торговой марки ВПК-402; в 2011 г. – ВПК-402 в качестве коагулянта; с 2012 г. – полиДАДМАХ торговой марки Floquat FL 4540 также самостоятельно в качестве коагулянта. Подача реагентов осуществляется на следующих водопроводных насосных станциях (ВНС):

- 1) на ВНС I-го подъема №1 во всасывающие трубопроводы работающих насосов, подающих воду на Центральные ВОС;
- 2) на ВНС I-го подъема №2 во всасывающие патрубки насосов, подающих речную воду на Александровские ВОС;

3) на ВНС I-го подъема №3 во всасывающие патрубки насосов, подающих воду на Александровские ВОС.

ОХА (полиалюминий гидрохлорид, хлоргидроксихлорид алюминия, основной хлорид алюминия) имеет общую формулу $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$. Данный реагент способен образовывать мономерные, полимерные и аморфные структуры, взаимодействует с разнообразными органическими и минеральными загрязнениями, содержащимися в воде. ОХА имеет принципиальное отличие от обычных солей алюминия, заключающееся в наличии у него поверхностной кислотной оболочки, которая обеспечивает высокую и устойчивую эффективность очистки воды от взвеси и металлов [7]. Доза ОХА для очистки донской воды составляет не более $0,8 \text{ мг/дм}^3$ (по оксиду алюминия).

Реагенты ВПК-402 и Floquat FL 4540 относятся к группе полиДАДМАХов, их применение в водоочистке возможно как в качестве коагулянтов, так и флокулянтов. Физико-химическая природа коагуляции синтетическими полиэлектролитами отличается от классической коагуляции солями металлов, механизм которой состоит во взаимодействии продуктов гидролиза металлов с загрязнениями воды при дальнейшем образовании крупных взвесей (хлопьев). В основе коагуляции синтетическими полиэлектролитами – химическое связывание. Структура полимера, состоящая из молекулярных цепочек, позволяет объединять агрегированные частицы в более крупные соединения [7]. Согласно техническим условиям реагенты отвечают всем гигиеническим требованиям [68]. Доза полиДАДМАХов (в качестве коагулянта) для очистки донской воды не превышает $0,7 \text{ мг/дм}^3$ (по активному веществу).

В летнее время года для пролонгации действия хлора в питьевой воде, а также предотвращения хлорфенольных запахов используется сульфат аммония дозой $1-2 \text{ мг/дм}^3$. Первичное хлорирование осуществляется введением хлора в смесители дозой $1,8-3,0 \text{ мг/дм}^3$, оно позволяет повысить эффективность коагуляции и флокуляции в результате удаления органической пленки с поверхности частиц, подлежащих осаждению. С декабря 2008 г. для обеззараживания воды на Центральных ВОС применяется гипохлорид натрия,

получаемый на месте потребления путем электролиза раствора поваренной соли. На Александровских ВОС аналогичный комплекс по производству гипохлорита натрия для обеззараживания воды запущен в эксплуатацию в августе 2015 г.

2.3 Изучение физико-химических и минералогических показателей осадка

Целью исследования, приведенного в данном разделе явилось изучение исходных физико-химических и минералогических показателей осадка отстойников ВОС г. Ростова-на-Дону. Под исходными свойствами осадка в данном случае подразумеваются характеристики структуры и химический состав, которые он приобретает в процессе формирования (осаждения и уплотнения) в сооружениях за период между их промывками.

Л.И. Нечаева [3] выделяет три основные зоны в слое скопившегося осадка на дне отстойника (при рассмотрении сверху вниз):

- 1) зона стесненного осаждения взвешенных частиц осадка;
- 2) зона образования сплошной пространственной структуры за счет вытеснения воды между частицами до тех пор, пока плотность структуры не приблизится к плотности частиц, ее слагающих;
- 3) зона нарушения плотности каркаса структуры и увеличения плотности самих частиц за счет давления, создаваемого осадком.

Ввиду вышеперечисленного, для получения наиболее обоснованных данных об исходных свойствах осадка, он извлекался непосредственно перед промывкой отстойника (после выпуска воды) с различных по глубине точек. Отобранные пробы медленно (во избежание нарушения структуры) перемешивались для усреднения концентрации, после чего определялись основные показатели: влажность, плотность, концентрация твердой фазы, удельное сопротивление фильтрации, предельное напряжение сдвигу, прокаленный остаток, а также химический и минеральный составы сухого остатка. Контроль показателей осуществлялся в различные сезоны года на протяжении ряда лет (2010-2013 гг.). В

подразделах 2.3.1–2.3.6 представлены результаты статистической обработки (по методике [93]) зафиксированных исходных показателей осадка, характерных средним по высоте осадочной части отстойника значениям.

2.3.1 Влажность

Влажность (относительная весовая) осадка природных вод (W , %) определяется количеством влаги, содержащейся в порах осадка, и выражается отношением массы данной воды (m_B , г) к массе исследуемого осадка (m_{oc} , г) [2]:

$$W = \frac{m_B}{m_{oc}} \cdot 100. \quad (2.1)$$

Уровень влажности осадка оказывает первостепенное влияние на его объем, исходя из которого рассчитываются производительность и состав сооружений обезвоживания. Исследователи сходятся во мнении, что влажность осадка в значительной мере зависит от качества воды источника водоснабжения, а также типов реагентов, применяемых для ее осветления и обесцвечивания. Так, если вода характеризуется высоким соотношением Ц/М и для ее подготовки используется повышенная доза алюминийсодержащих реагентов, влажность образующегося осадка (при прочих равных условиях) будет повышенной [2].

Поскольку процесс обезвоживания осадка заключается в нарушении связи влаги с частицами осадка, классификация возможных форм исходной связи должна быть построена на основании интенсивности энергии взаимодействия [69]. По данному принципу построена классификация академика П.А. Ребиндера, согласно которой все формы связи делятся на четыре основные группы: химически связанная вода, физико-химически связанная вода, физико-механически связанная вода, свободная вода [16].

Обработка результатов лабораторных исследований по определению влажности осадка производилась по формуле (2.1). Результаты представлены в виде гистограмм (рисунок 2.2 а-в) с указанием времени, за которое осадок образован в отстойниках. Графические характеристики в значительной мере

подтверждают зависимость показателей влажности осадка от величины отношения Ц/М речной воды, изменяющейся по сезонам года.

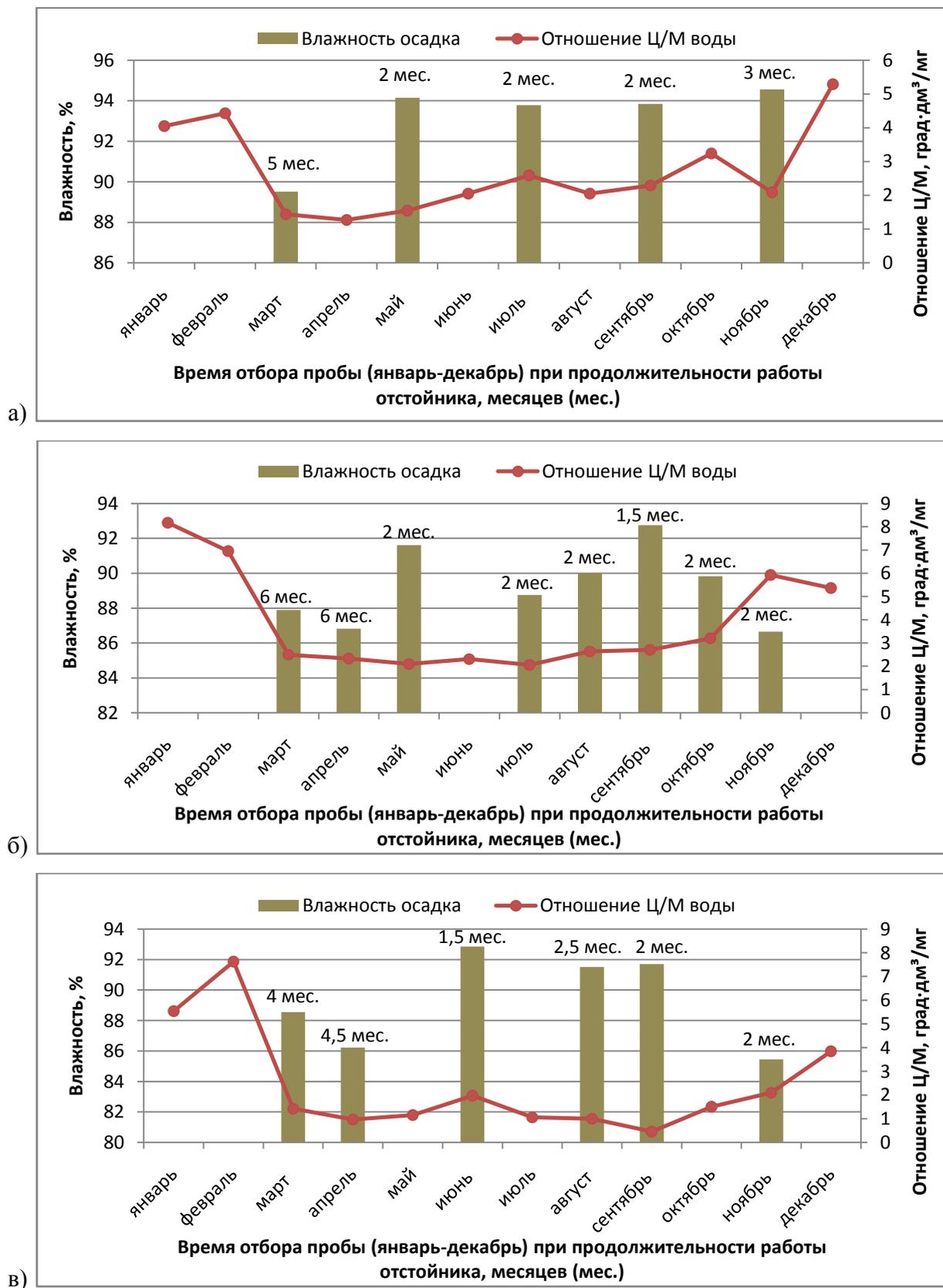


Рисунок 2.2 – Средняя по высоте осадочной части отстойника влажность осадка, отобранного в период: а – 2010 г.; б – 2011 г.; в – 2012 г.

Однако, немаловажное значение оказывает и продолжительность работы отстойника. Так, величина влажности осадка, сформированного за длительный зимне-весенний период невысока в сравнении с прочими зафиксированными. Несмотря на повышенные показатели значений отношения Ц/М речной воды (обусловленные в основном снижением мутности) в период с ноября по февраль, длительное пребывание осадка в отстойнике способствует уплотнению его структуры.

Результаты значений влажности осадка, зафиксированные в 2010 г., когда для подготовки речной воды использовались алюминийсодержащие коагулянты (в сочетании с флокулянтom ВПК-402), несколько отличаются от соответствующих значений, характерных для периода самостоятельного применения полиДАДМАХов: данный осадок наиболее обводнен (влажность выше на 1,2-1,6 %), что указывает на негативное влияние гидроксида алюминия на его водоотдающие характеристики.

В целом, ориентируясь на опытные данные, можно выделить следующие интервалы значений влажности осадка по сезонам его образования: зимне-весенний период – от 86,2 до 89,5 %, летний – от 88,8 до 93,8 %, летне-осенний – от 85,4 до 94,6 %.

2.3.2 Плотность

Плотность осадка с содержащейся в нем влагой (объемный вес) является следующим важным показателем, по величине которого можно косвенно судить о количественном содержании твердой фазы, входящей в состав осадка, а также ее структурных характеристиках.

Следует отметить, что плотность осадка в значительной степени отличается от плотности хлопьев частиц, агломерированных коагулянтom, которые составляют его структуру [2]. Объясняется этот факт тем, что после выпадения в осадок хлопья образуют единую систему, способную к уплотнению под действием собственного веса и внешнего давления верхних слоев осадка и воды.

Причем деформация структуры осадка, образованного из воды повышенной мутности, содержащей большое количество взвешенных минеральных веществ, происходит быстрее и эффективнее, ввиду чего высвобождается большее количество влаги, и осадок формируется более тяжелым и плотным. Увеличение цветности речной воды и снижение содержания взвешенных частиц, напротив, способствуют формированию более легкого и рыхлого осадка за счет присутствия гуминовых коллоидов, препятствующих образованию мостиковых связей между частицами твердого вещества, а также их адсорбции.

Плотность осадка (объемный вес γ , г/см³) – это отношение веса осадка с содержащейся в нем влагой к его объему [2]:

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad (2.2)$$

где G – вес осадка, г;

V – объем осадка, см³.

Для определения объемного веса осадка использовался пикнометрический метод [70]. Результаты лабораторных исследований, представлены в виде гистограмм (рисунок 2.3 а-в) с указанием времени, за которое осадок образован в отстойнике.

Анализ опытных данных, приведенных на рисунке 2.3, позволяет характеризовать изменение сезонных значений объемного веса осадка в соответствии с величинами его влажности (увеличение влажности влечет понижение объемного веса и наоборот). Ввиду этого исходное влияние на фиксируемый параметр, также как и в случае с влажностью, оказывают отношение Ц/М воды источника и продолжительность работы отстойника между промывками. Плотность осадка, образованного за длительный (до шести месяцев) зимне-весенний период устойчиво велика и изменяется в узком диапазоне от 1,07 до 1,08 г/см³, в летние месяцы образования – несколько снижается и составляет 1,02–1,06 г/см³. Плотность осадка, отобранного осенью, зависит от продолжительности периода цветения воды, в течение которого он формировался, и составляет 1,01–1,09 г/см³.

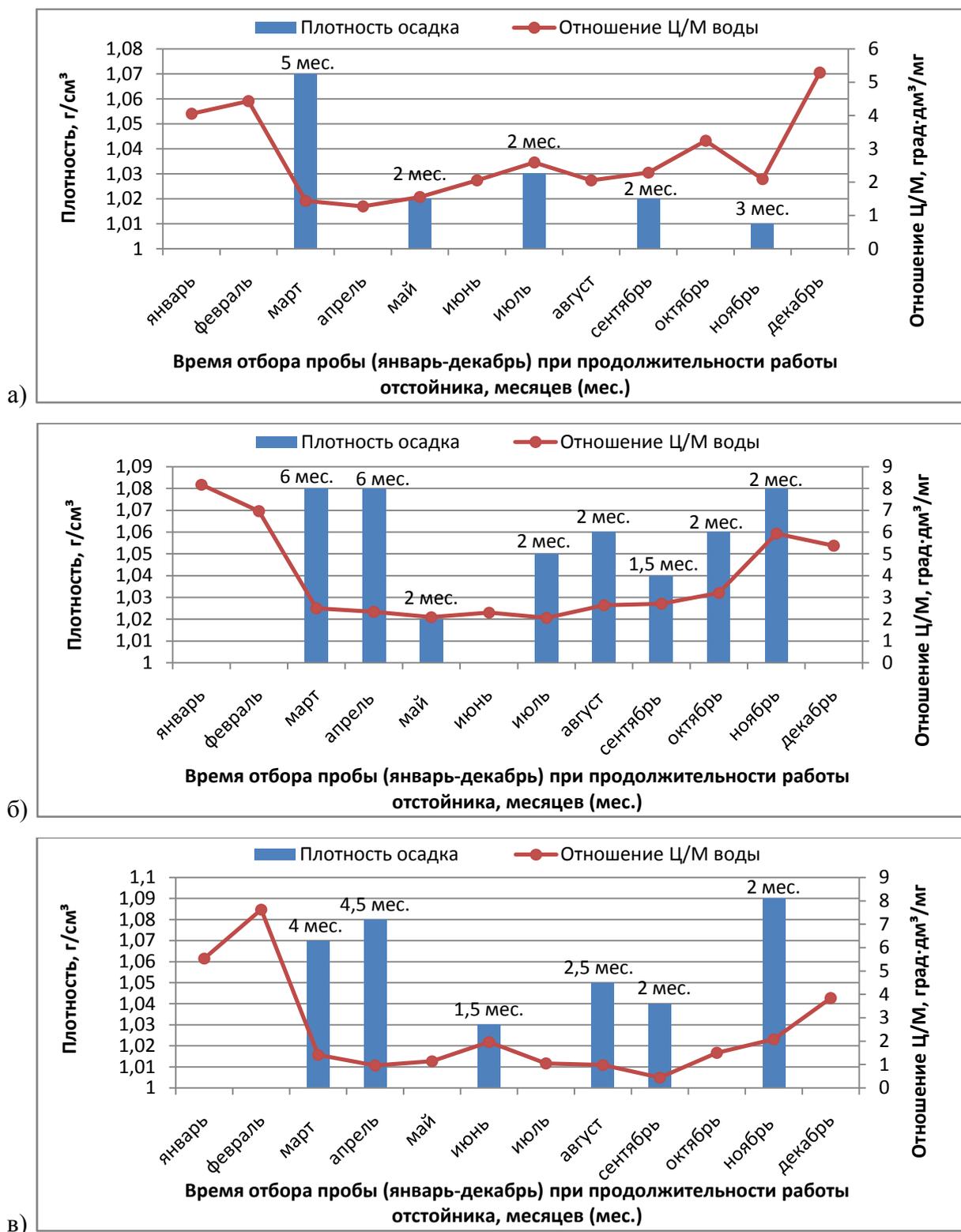


Рисунок 2.3 – Средняя по высоте осадочной части отстойника плотность (объемный вес) влажного осадка, отобранного в период: а – 2010 г.; б – 2011 г.; в – 2012 г.

Помимо объемного веса осадка, согласно [70] проведено исследование плотности сухих частиц осадка. Плотность частиц осадка – масса единицы объема твердых (скелетных) частиц его структуры. Для анализа использовался осадок,

находящийся в воздушно-сухом состоянии. Результаты опытных исследований представлены на рисунке 2.4 (а-в).

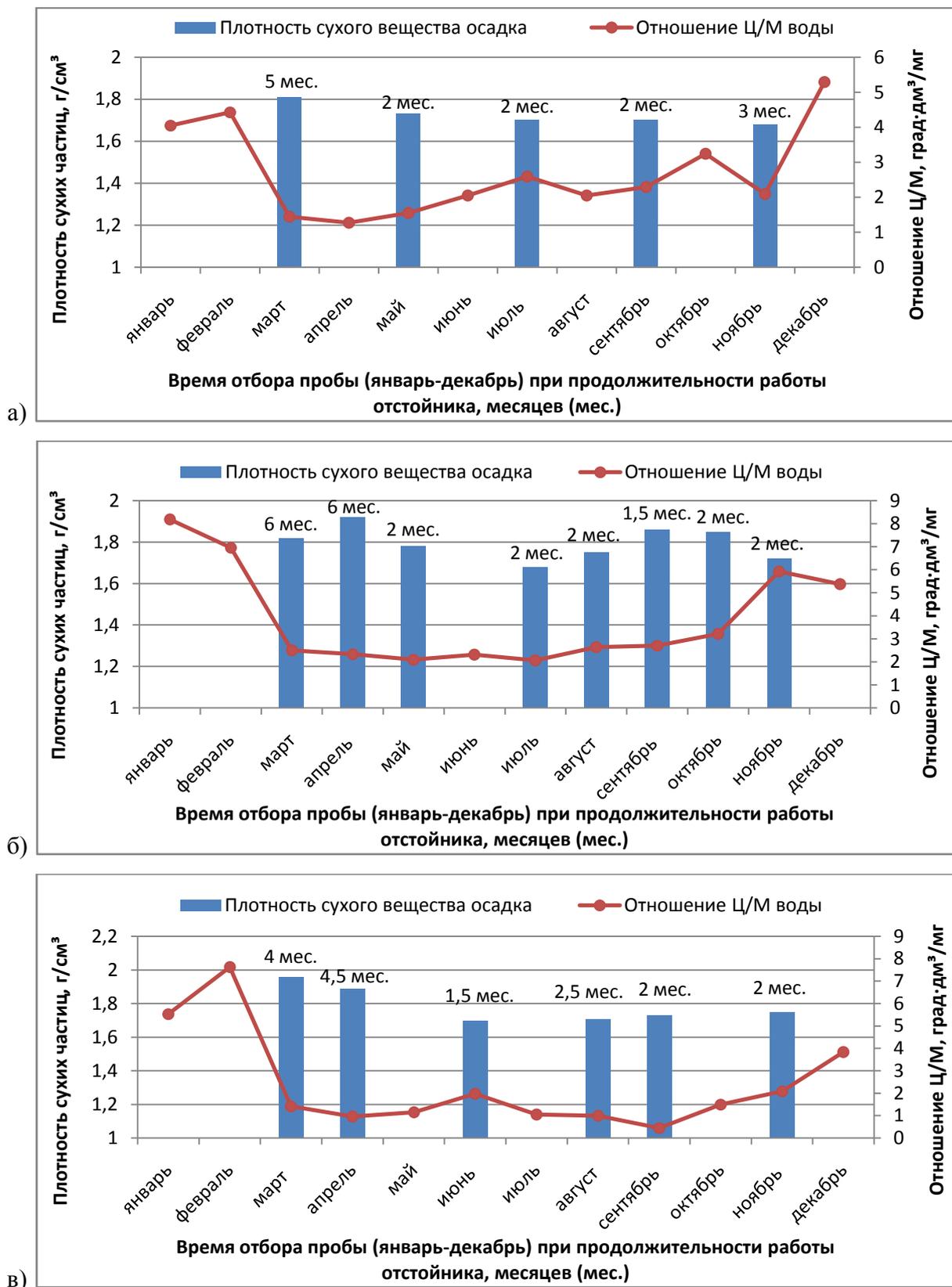


Рисунок 2.4 – Средняя по высоте осадочной части отстойника плотность сухих частиц осадка, отобранного в период: а – 2010 г.; б – 2011 г.; в – 2012 г.

Сезонные изменения значений плотности сухих частиц осадка в большинстве случаев соответствуют изменениям значений объемного веса влажного осадка. Максимальные значения определяемого параметра характерны для паводкового периода. Так, плотность частиц проб, отобранных в марте – апреле весьма велика и составляет интервал от 1,80 до 1,95 г/см³, летом – от 1,70 до 1,80 г/см³, осенью интервал зафиксированных значений несколько возрастает, причиной чему, возможно, является повышение содержания минеральной взвеси в воде, вызванное обильными атмосферными осадками, и соответствует значениям от 1,65 до 1,85 г/см³.

2.3.3 Концентрация твердой фазы

Природная вода в своем составе имеет примеси органического и неорганического происхождения, которые профессор Л.А. Кульский разделил на группы: взвешенные вещества, вещества коллоидной степени дисперсности, растворенные вещества [71].

К грубодисперсным примесям, входящим в состав осадка, можно отнести ил, планктон, песчаные и глинистые частицы, гидроксиды металлов, частицы карбонатных пород. В коллоидной степени дисперсности в осадке могут содержаться минеральные и органические частицы почв, продукты жизнедеятельности микроорганизмов и растительности, а также коллоидные формы гумуса. В истинно растворенном виде представлены гуминовые и фульвовые кислоты [2, 4].

При двухступенчатой системе очистки воды основное количество взвеси задерживается на стадии отстаивания, соответственно осадок в данных сооружениях наиболее концентрирован.

Массовая концентрация твердой фазы осадка (C , г/дм³) рассчитывалась по формуле [2]:

$$C = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{т}} (1 - W_{\text{исх}})}{\rho_{\text{ж}} + (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) W_{\text{исх}}} \cdot 1000, \quad (2.3)$$

где $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{т}}$ – плотность воды и твердого вещества соответственно, г/см³;

$W_{исх}$ – исходная влажность осадка, частей единицы.

Сезонные изменения концентрации твердой фазы осадка, образованного в отстойниках за период между промывками, представлены на рисунке 2.5 (а-в).

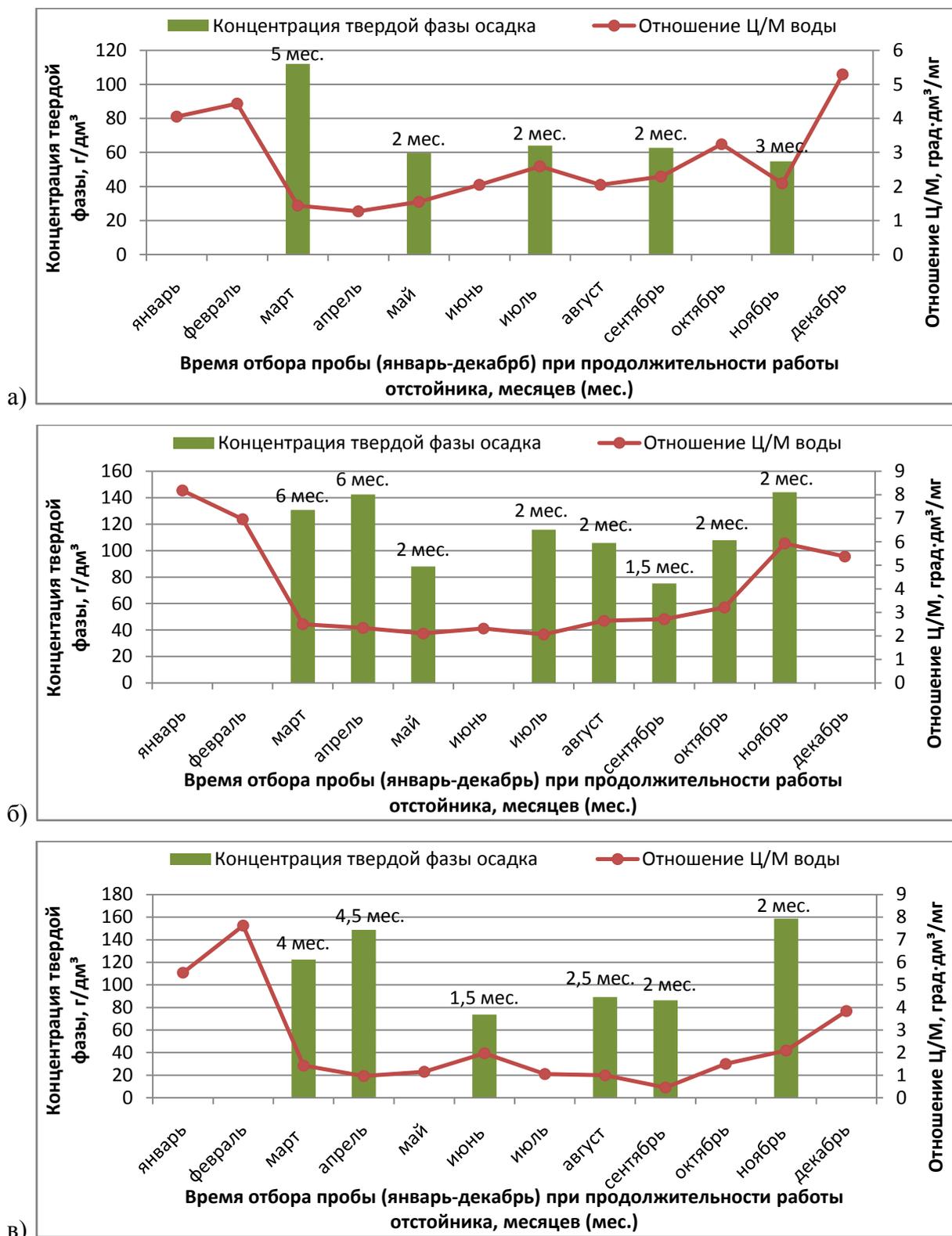


Рисунок 2.5 – Средняя по высоте осадочной части отстойника концентрация твердой фазы осадка, отобранного в период: а – 2010 г.; б – 2011 г.; в – 2012 г.

Гистограммы распределения значений концентрации твердой фазы осадка по месяцам года аналогичны колебаниям значений плотности в соответствующие периоды. Концентрация твердой фазы проб осадка, отобранных в марте – апреле, составляет 112,1-148,7 г/дм³, летом изменяется от 64,1 до 115,9 г/дм³, осенью – от 54,8 до 158,7 г/дм³.

Анализ экспериментальных данных (рисунок 2.2-2.5) позволил установить регрессионную зависимость показателей влажности (W) и концентрации твердой фазы ($C = f(W, \gamma)$) осадка. Линейная аппроксимация (рисунок 2.6) при высоком уровне достоверности позволяет оценивать концентрацию осадка по значению влажности (и наоборот) без дополнительного определения его плотности и применима в расчетах отдельных характеристик процессов обезвоживания.

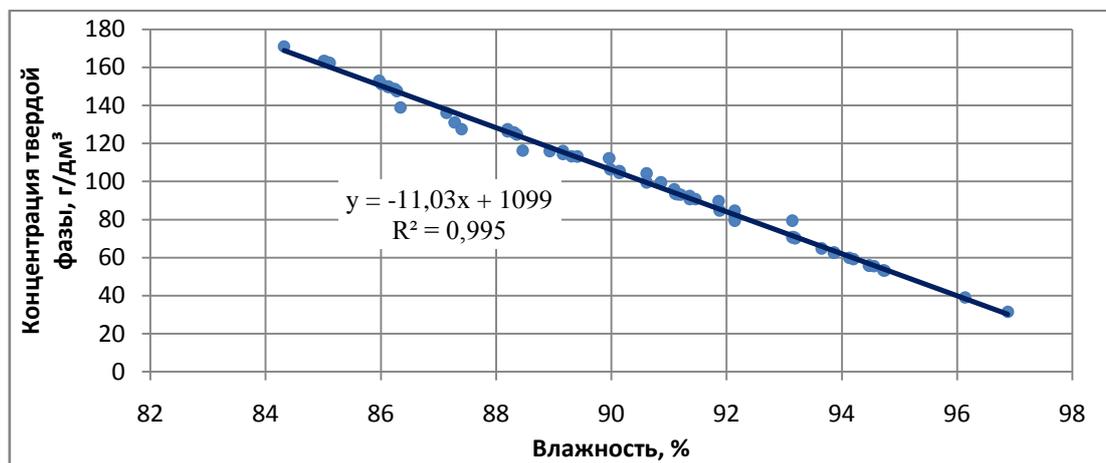


Рисунок 2.6 – Зависимость между величинами влажности и концентрации твердой фазы осадка

2.3.4 Удельное сопротивление фильтрации

Профессором И.С. Туровским сформулировано определение удельного сопротивления осадка (фильтруемости) как сопротивление единицы массы твердой фазы, отлагающейся на единице площади фильтра, при фильтровании под постоянным давлением суспензии, вязкость жидкой фазы которой равна 1,0 мПа·с [72].

Удельное сопротивление фильтрации осадка является показателем, определяющим степень его возможного обезвоживания тем или иным способом.

Чем он выше, тем более затратной и трудоемкой может оказаться технология обработки. Для повышения фильтруемости осадка в мировой практике находят применение различные реагенты (коагулянты, флокулянты, известь) и всевозможные минеральные добавки.

Определение удельного сопротивления осадка проводилось по методике, изложенной в [73, 74], которая основывается на способе фильтрования определенного объема осадка под вакуумом. Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рисунке 2.7.

Уравнение для определения удельного сопротивления фильтрации осадка (r , м/кг) имеет вид [2, 72]:

$$r = \frac{2\Delta p F^2 b}{\mu x}, \quad (2.4)$$

где F – единица площади поверхности фильтра, м²;

Δp – перепад давления над и под фильтровальной перегородкой, Па;

μ – вязкость фильтрата, Па·с;

b – параметр, определяемый при построении графика отделения фильтрата в координатах V и τ/v (V – объем фильтрата за единицу времени, τ – время наблюдения). Значение b может быть рассчитано по формуле:

$$b = \frac{m}{n}, \text{ с/м}^6, \quad (2.5)$$

где m и n – значения по оси τ/v и V соответственно в произвольно выбранной точке на графике;

x – коэффициент пропорциональности между массой твердой фазы осадка, отлагающегося на фильтровальной перегородке, и объемом фильтрата, кг/м³.

Согласно [75] значение x может быть определено по формуле:

$$x = \frac{C_{исх} \cdot \rho_{ж} (100 - W_{ос})}{100 [100 - (W_{ос} + C_{исх})]}, \quad (2.6)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность фильтрата, кг/м³;

$C_{исх}$ – концентрация твердой фазы исходного осадка, %;

$W_{ос}$ – влажность осадка, отлагающегося на фильтре, %.

Определение параметра b производилось на установке, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2.7, аналогично последовательности, описанной в [72]. На дно воронки Бюхнера укладывался слегка смоченный водой двойной бумажный фильтр, соответствующий диаметру воронки. Далее включался вакуум-насос, работающий от электродвигателя, а с помощью запорного крана на резиновой трубке давление доводилось до необходимого значения (0,067 МПа). В воронку Бюхнера заливался предварительно перемешанный осадок объемом 200-300 мл, после чего производилась корректировка уровня вакуума. Одновременно включался секундомер. По мере прибавления фильтрата в цилиндре на каждые 5 мл фиксировалось время (τ_c , с), равное интервалу от начала испытания до указанного момента.

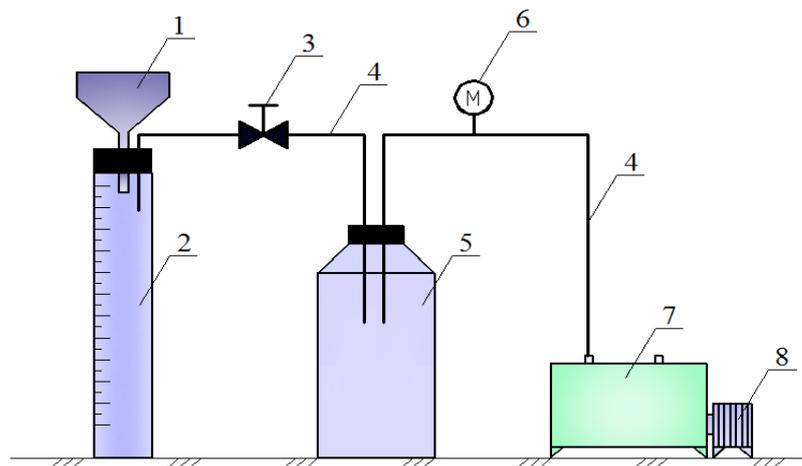


Рисунок 2.7 – Схема установки для моделирования процесса фильтрации осадка под вакуумом: 1-воронка Бюхнера; 2-мерный цилиндр для сбора фильтрата; 3-запорный кран; 4-вакуумные шланги; 5-бутылка-ресивер; 6-манометр; 7-вакуум-насос; 8-электродвигатель

Кинетика сезонных изменений удельного сопротивления фильтрации осадка, образованного в отстойниках за период между чистками, представлена на рисунке 2.8 (а-в). В процессе фильтрации структуре исследуемого осадка свойственна перестройка, отражающаяся на показателе его фильтруемости. Перестройке структуры осадка (в проводимых испытаниях наблюдалась одна перестройка структуры) соответствовал перелом графической зависимости $\tau/v=f(V)$. Именно поэтому на изображенных ниже диаграммах отражены значения удельного сопротивления фильтрации на начальном и конечном этапах процесса.

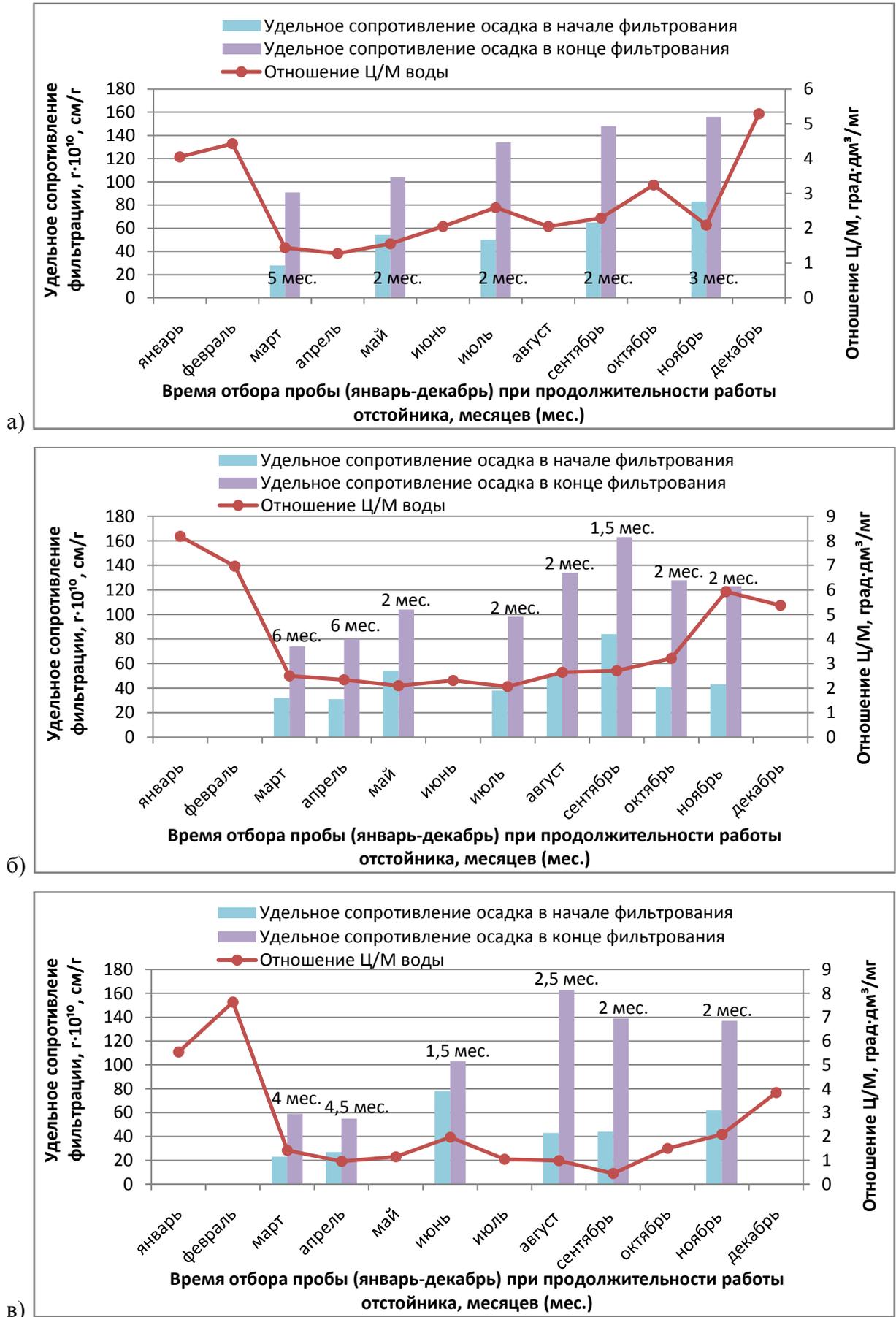


Рисунок 2.8 – Среднее по высоте осадочной части отстойника удельное сопротивление фильтрации осадка, отобранного в период: а – 2010 г.; б – 2011 г.; в – 2012 г.

Графические зависимости демонстрируют возрастание удельного сопротивления осадка в 1,9-3,0 раза в процессе фильтрования, что указывает на предрасположенность его структуры к сжимаемости. Лучшей фильтруемостью обладает шлам, образованный в процессе осветления воды полиДАДМАХом за зимние месяцы (2011-2012 гг.) при длительном скоплении в отстойнике.

Фильтруемость осадка донской воды изучена не только методом вакуумного фильтрования, но и проведением упрощенного теста на время капиллярного всасывания фильтрата. Целью исследования явилось получение графической зависимости, позволяющей в оперативном порядке косвенно оценивать уровень удельного сопротивления фильтрации осадка по скорости капиллярного поглощения фильтрата бумажным фильтром. Принцип метода аналогичен последовательности, описанной в [7]. Для исследований использовался прибор, представленный на рисунке 2.9.

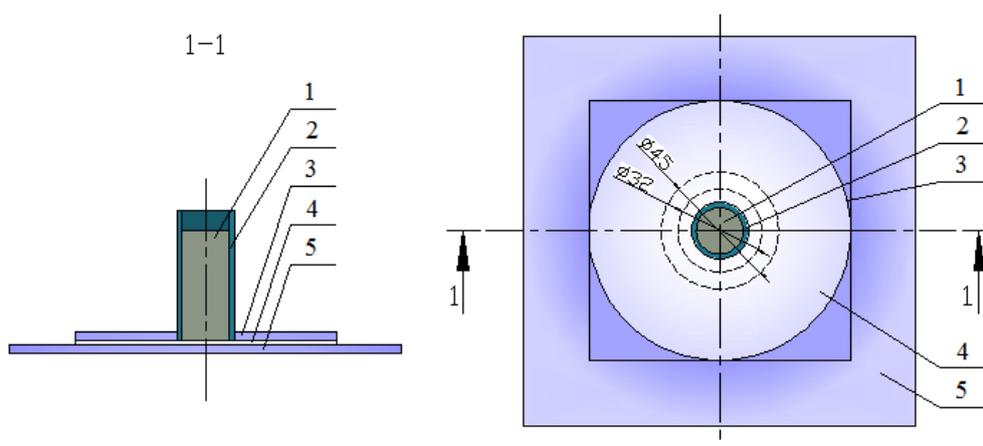


Рисунок 2.9 – Прибор для измерения эффективности капиллярного всасывания фильтрата осадка

1 – осадок; 2 – полый цилиндр; 3 – верхняя пластина с эталонными окружностями; 4 – бумажный фильтр; 5 – нижняя пластина

Последовательность экспериментов заключалась в следующем: на гладкую пластину (5) укладывался бумажный фильтр «синяя лента» диаметром 11 см (4); сверху фильтра устанавливалась пластина (3) из прозрачного пластика, имеющая отверстие диаметром, равным наружному диаметру полого цилиндра (2), в который заливалась исследуемая проба осадка (1). В результате капиллярного поглощения бумагой фильтрат постепенно распространяется в зоне,

превышающей диаметр цилиндра. В момент достижения фильтратом выгравированной на верхней пластине окружности диаметром 32 мм включался секундомер, в момент достижения границы окружности диаметром 45 мм – отключался. Фильтрующая способность осадка оценивалась по времени перемещения фронта фильтрата от внутренней окружности к внешней.

В результате экспериментов получена зависимость (при величине достоверности более 0,95) времени капиллярного всасывания фильтрата от показателя удельного сопротивления фильтрации осадка (рисунок 2.10).

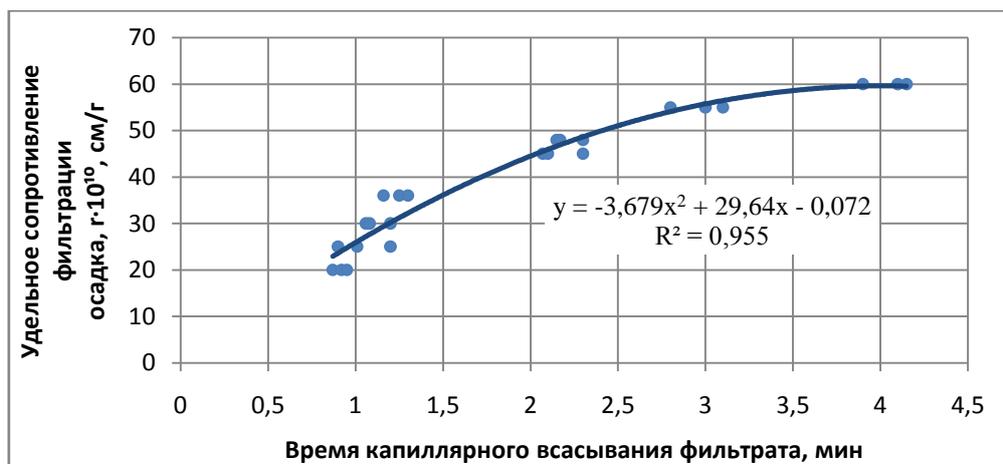


Рисунок 2.10 – Зависимость времени капиллярного всасывания влаги от удельного сопротивления фильтрации осадка

Представленная аппроксимация позволяет косвенно определять ориентировочное значение удельного сопротивления фильтрации осадка в кратчайшие сроки и без использования специального вакуумного оборудования.

2.3.5 Предельное напряжение сдвигу

Предельное напряжение осадка сдвигу является прочностным показателем, зависящим от таких его физических характеристик как влажность и плотность. Данная величина складывается из сопротивления трению твердых частиц по поверхности скольжения и сопротивления связности, обусловленной наличием взаимосвязи между твердой фазой, водой и веществами коллоидной степени дисперсности, содержащимися в осадке. На практике изучается именно минимально возможное сопротивление осадка сдвигу, называемое предельным

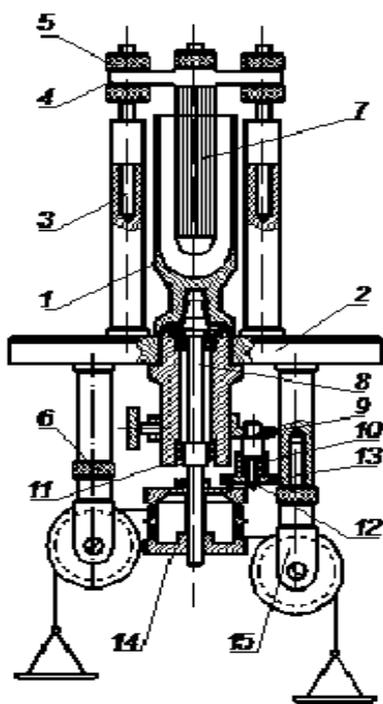


Рисунок 2.11 -

Ротационный вискозиметр

РВ-4

1-наружный цилиндр; 2-основание центрирующей стойки; 3-центральная стойка; 4-центрирующий тройник; 5- регулирующие гайки; 6- контргайки; 7-внутренний цилиндр; 8-вал; 9-ось суппорта; 10-пружина; 11-шариковый подшипник; 12-стопорная шайба; 13-диск стопора; 14-корпус барабана; 15-роликoderжатель

сопротивлением, соответствующее такому напряженному состоянию, при котором наступает нарушение целостности слоя в некоторой области по возможным поверхностям скольжения [76]. Осадок природных вод относится к неньютоновским системам, поскольку его структура неоднородна ввиду наличия минеральной составляющей и обладает малопрочной структурной сеткой.

Кандидат геолого-минералогических наук В.И.Савельев, обращаясь к вопросу о методах испытания на сдвиг различных илов, отмечает зависимость величины сдвигающего напряжения не только от их физических показателей (в частности, степени дисперсности частиц, минералогических характеристик, количества и качества жидкой фазы), но и непосредственно от величины и продолжительности воздействия нагрузок [77]. Из этого следует, что, говоря о величине предельного напряжения сдвигу осадка, образованного при осветлении природных вод, необходимо указывать не только на его период формирования в отстойных сооружениях, определяющий физические характеристики, но и на сам способ испытания.

Для исследования вязкопластических свойств осадка воды реки Дон использовался ротационный вискозиметр РВ-4, схематически представленный на рисунке 2.11. Перед началом работы с прибором строилась кривая трения подшипников, для чего вискозиметр, не наполненный осадком, приводился во вращение под действием постепенно увеличиваемых грузов. Таким образом, для каждого прикладываемого груза P' вычислялось значение скорости вращения внешнего цилиндра V , после чего

строился график в координатах P' и V . При определении напряжения сдвигу осадок помещался в наружный полый цилиндр. Цилиндр укреплялся на оси вращения барабана, после чего в него погружался внутренний сплошной цилиндр. В случае вытеснения пробы осадка за пределы полого цилиндра в результате погружения в него сплошного, поверхность осадка сглаживалась с целью соблюдения равномерности глубины погружения внутреннего цилиндра.

Измерения начинались с постепенного нагружения системы грузами, не превышающими каждый предшествующий более чем на 0,5 г. Фиксировался груз P_0 , приводящий систему во вращение с учетом трения подшипников. Величина предельного напряжения сдвигу осадка (τ_s , Па), вычислялась по формуле:

$$\tau_s = \frac{k_0 \cdot P_0}{10}, \quad (2.7)$$

где P_0 – минимальный груз, приводящий систему во вращение с учетом трения подшипников, г;

k_0 – константа прибора РВ-4.

Константа прибора РВ-4 вычислялась по формуле:

$$k_0 = \frac{R \cdot g}{2\pi \cdot r^2 \cdot h}, \quad (2.8)$$

где R – радиус барабана, см;

r – радиус внутреннего цилиндра, см;

h – глубина погружения внутреннего цилиндра в исследуемый осадок, см;

g – ускорение силы тяжести, см/с².

Значения предельного напряжения сдвигу осадка воды реки Дон, определенные на приборе РВ-4, представлены на рисунке 2.12 (а-в). Значения предельного напряжения осадка сдвигу по месяцам года соответствуют значениям влажности, плотности и концентрации твердой фазы в аналогичные временные периоды. Предельное напряжение осадка, отобранного весной, спустя продолжительный интервал работы отстойников, составляет от 41,5 до 51,5 Па, летом – от 16,5 до 44,8 Па, осенью – от 15,5 (в периоды интенсивного цветения воды) до 64,9 Па.

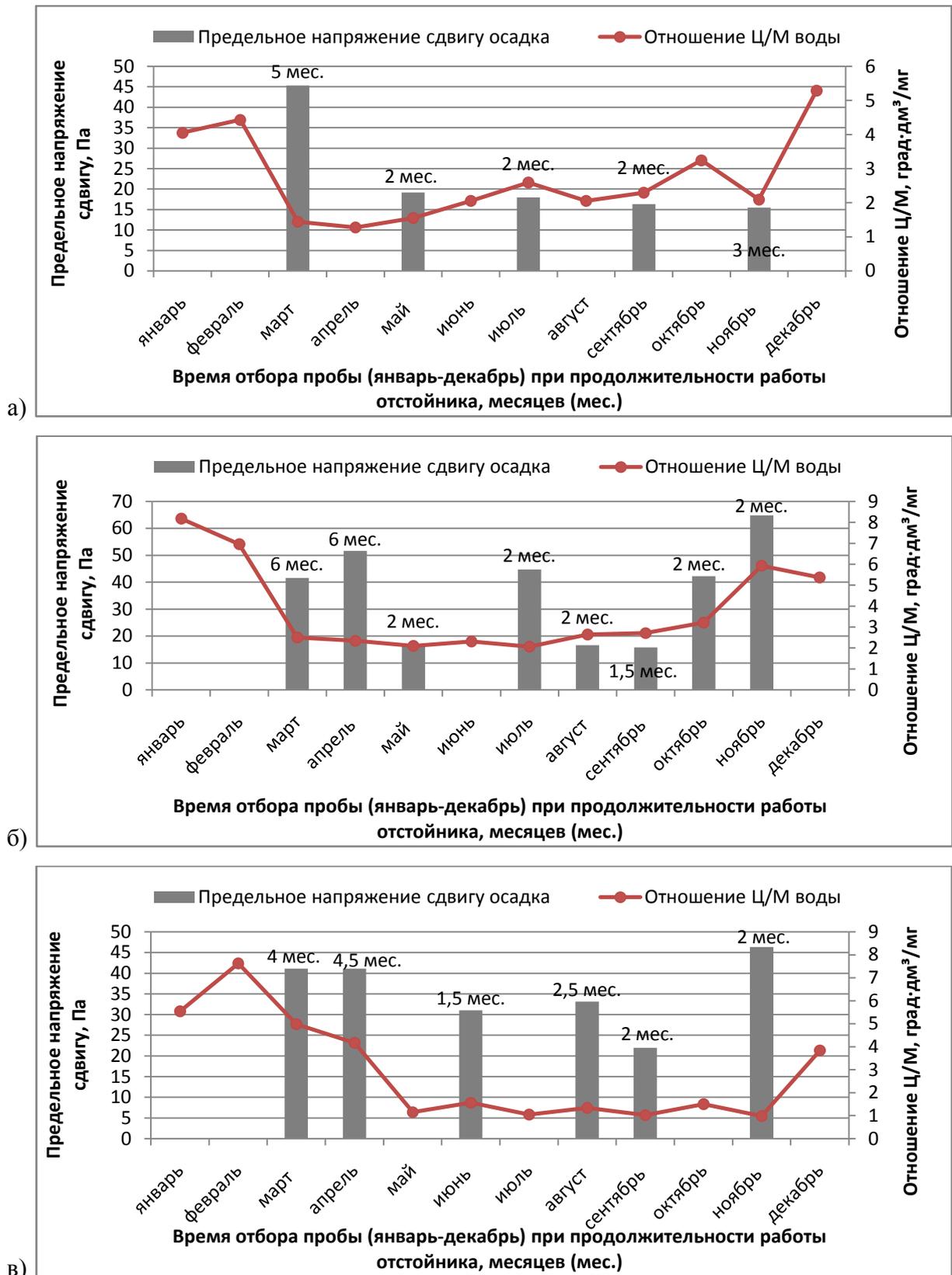


Рисунок 2.12 – Среднее по высоте осадочной части отстойника предельное напряжение сдвигу осадка (по показаниям РВ-4), отобранного в период: а – 2010 г.; б – 2011 г.; в – 2012 г.

Следует отметить, что исследования вязкопластических свойств осадка проводились не только в лабораторных условиях на ротационном вискозиметре

PВ-4, но и непосредственно в отстойнике с применением лопастного вискозиметра типа vane-test. Применительно к осадку маломутной и малоцветной донской воды получены коэффициенты, позволяющие значения сопротивления сдвигающему усилию, полученные на приборе PВ-4, адаптировать к уточненным показателям, свойственным замерам на устройстве лопастного вискозиметра в производственных условиях [78].

2.3.6 Прокаленный остаток

Целью определения прокаленного остатка осадка является выявление количественного содержания в нем органических и неорганических веществ. Показатель выражается в процентах по массе в пересчете на сухое вещество. Прокаленный остаток осадка определяется соотношением цветности и мутности природной воды. Так, к примеру, беззольное вещество осадка маломутной высокоцветной воды может достигать 70 %, в то время как в осадке мутных малоцветных вод оно не превышает 25 % [2, 7, 76].

В процессе прокаливания сухой пробы осадка органическая составляющая удаляется (сгорает), а минеральная остается. Следует иметь в виду, что при прокаливании вместе с органикой удаляется диоксид углерода из карбонатов, кристаллизационная вода, оставшаяся в сухом остатке, а также аммонийные соли. Кроме того, часть органической составляющей удаляется еще с водяным паром во время высушивания осадка в сушильном шкафу, и, следовательно, является в данном случае неучтенной [76]. Все это снижает точность измерений.

Обработка результатов исследований прокаленного остатка осадка донской воды (З, %), выполненных согласно методике [79], производилась по формуле:

$$З = \frac{(m - m_1)}{m_2} \cdot 100, \quad (2.9)$$

где m – масса тигля с зольным остатком, г;

m_1 – масса пустого тигля, г;

m_2 – масса сухого осадка, г.

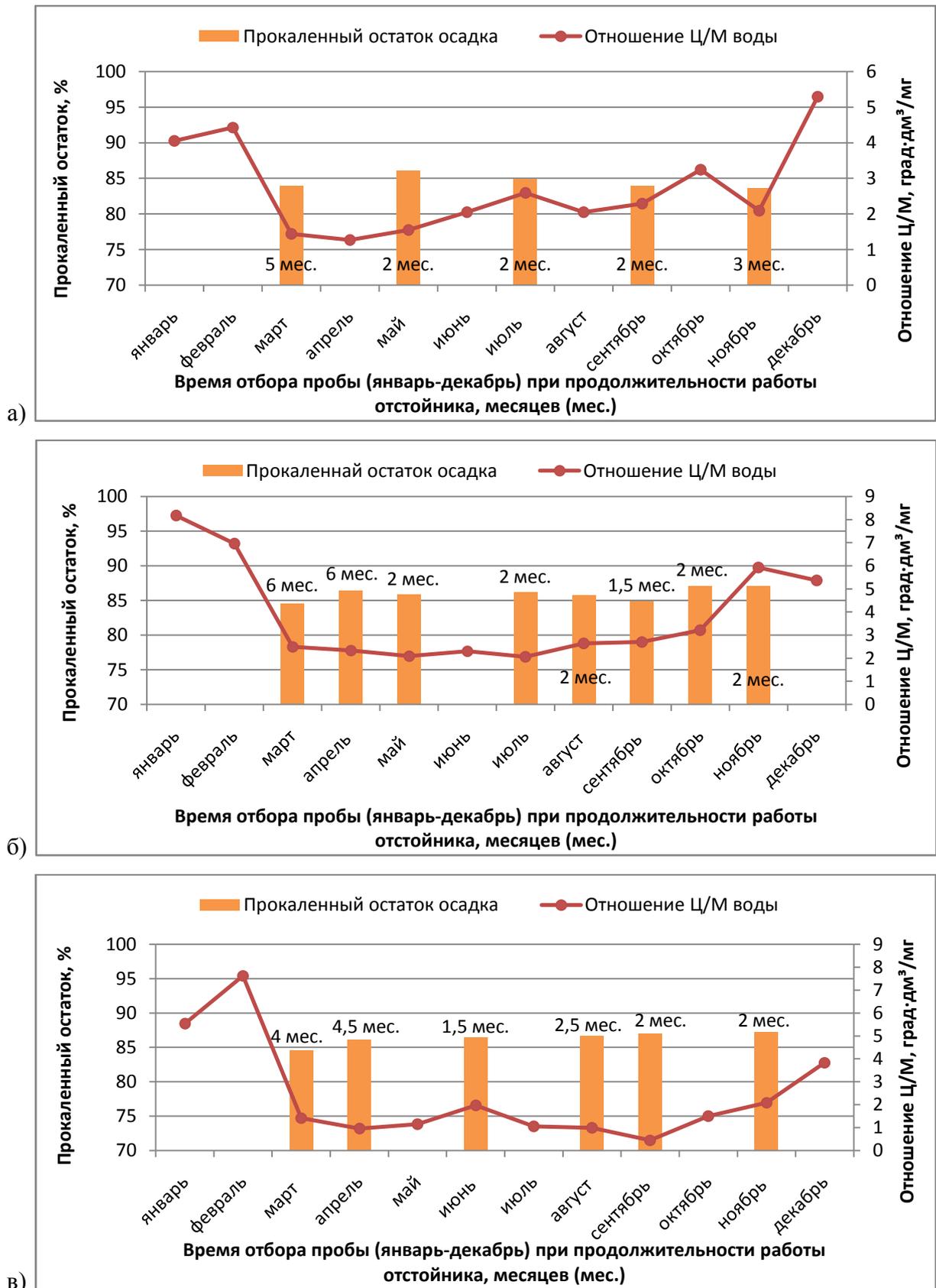


Рисунок 2.13 – Средний по высоте осадочной части отстойника прокаленный остаток сухого осадка, отобранного в период: а – 2010 г.; б – 2011 г.; в – 2012 г.

Результаты лабораторных исследований показателей прокаленного остатка осадка донской воды, отобранного перед промывкой отстойника, представлены на

гистограммах (рисунок 2.13 а-в). Усредненные значения прокаленного остатка осадка составляют интервал от 83,7 до 87,3 %. Некоторое снижение показателя наблюдается при исследовании проб осадка, образованного в период повышения отношения Ц/М донской воды.

2.3.7 Химический и минеральный анализ сухого остатка

Химический анализ сухого остатка осадка проводился согласно МВИ М-049-П/10 «Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв рентгенофлуоресцентным методом», аттестованной в соответствии со свидетельством Госстандарта РФ №242/18-2010, на спектрометре серии «Спектроскан Макс».

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) – один из наиболее точных способов изучения химического состава вещества. Метод основан на анализе спектра, полученного в результате пропускания рентгеновских лучей сквозь исследуемый материал. Под воздействием рентгеновского излучения атомы вещества переходят в возбужденное состояние и стремятся на высшие квантовые уровни. Избыток энергии каждого атома, который испускается в виде фотонов определенного значения, является носителем информации о химическом составе вещества [80].

Для проведения анализа высушенная в сушильном шкафу (при температуре 105 °С) проба осадка массой не менее 10 г измельчалась на истирателе или в ступке, после чего засыпалась в кювету спектрометра и анализировалась по предварительно выполненной градуировке.

Содержание химических веществ, присутствующих в сухом остатке осадка в составе различных минеральных и органических соединений, представлено в таблице 2.1. Контроль химических показателей указал на значительную концентрацию оксидов кремния, алюминия, магния и калия, являющихся основными составляющими глинистых минералов. Содержание оксида железа указывает на наличие в составе осадка кварцевых пород и полевых шпатов.

Органическая составляющая представлена главным образом оксидами фосфора и калия.

Таблица 2.1 - Химический состав сухого остатка осадка донской воды

Химический показатель	Единица измерения	Величина
Оксид марганца (MnO)	мг/кг	1995,50÷4143,65
Медь (Cu, суммарно)		48,09÷65,50
Свинец (Pb, суммарно)		от величин ниже предела обнаружения до 27,34
Оксид титана (TiO ₂)		0,44÷0,68
Ванадий (V, суммарно)		74,58÷97,63
Хром (Cr, суммарно)		90,30÷120,59
Кобальт (Co, суммарно)		8,37÷26,75
Никель (Ni, суммарно)		63,98÷69,46
Цинк (Zn ²⁺)		155,84÷269,37
Мышьяк (As, суммарно)		2,80÷5,87
Стронций (Sr ²⁺)		253,33÷427,62
Оксид железа (Fe ₂ O ₃)		%
Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	9,43÷13,12	
Оксид фосфора (P ₂ O ₅)	0,24÷0,35	
Оксид калия (K ₂ O)	1,71÷2,01	
Оксид кремния (SiO ₂)	50,26÷56,01	
Оксид магния (MgO)	1,81÷2,27	

С целью формирования более точной характеристики состава осадка методом электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного микроанализа изучен состав его минеральных образований. Для проведения исследований использовались растровый электронный микроскоп Tescan Vega LMU и системы рентгенофлуоресцентного микроанализа INCA Energy 450, INCA WAVE 700 (фирмы OXFORD Instruments Analytical).

Исследование морфологии и фазовой неоднородности, а также качественная диагностика и количественное определение химического состава микрообъектов вещества позволили обозначить, что минералогия осадка маломутной и малоцветной донской воды характеризует его как ил алевритово-глинистый, состоящий из трех основных компонентов: илистых, терригенных и аутигенных [81]. Илистые компоненты, в свою очередь, представлены иллитом, терригенные включают полевые шпаты, ильменит и магнетит, аутигенные – пирит и кальцит.

Анализ химического и минерального состава осадка донской воды позволил выделить наиболее перспективные варианты его «полезной» утилизации. Поскольку минералогия осадка указывает на сходство с глинистым сырьем, велика вероятность успешного использования данного отхода в качестве компонента строительных материалов (таблица 2.2). Наличие калия, фосфора и кальция в форме оксидов, как наиболее важных элементов питания растений, может стать благоприятным фактором при использовании осадка в качестве компонента почвогрунта (таблица 2.3) согласно требованиям [82].

Таблица 2.2 - Сравнительный химический состав сухого остатка осадка донской воды и компонентов строительных материалов

Вещество	Показатель, %					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Потери при прокаливании
Осадок	3,5	50,3÷56,0	9,4÷13,1	6,2÷7,5	1,8÷2,3	12,8÷16,1
Известняк	52,0÷56,0	0,1÷4,0	0,2÷2,0	0,1÷1,0	0,3÷2,0	41,0÷44,0
Глина	0,5÷4,8	30,0÷70,0	10,0÷40,0	2,0÷6,0	0,2÷3,0	3,0÷20,0
Гипс	32,0÷33,0	≥1,0	≥1,0	≥1,0	≥1,0	≥1,0

Таблица 2.3 – Сравнительные показатели искусственных почвогрунтов, биокомпостов и сухого остатка осадка донской воды

Наименование параметра	Единица измерения	Норма параметра		Величина параметра для водопроводного осадка
		для искусственных почвогрунтов	для биокомпостов	
Органическое вещество	% к сухой массе	4÷15	не менее 20	12,7÷16,3
Реакция среды (рН водной вытяжки)	ед. рН	6,1÷7,1	6,5÷7,5	7,1÷8,5
Содержание элементов питания				
Фосфор (P ₂ O ₅)	мг/кг	100÷200	не менее 100	2400÷3500
Калий (K ₂ O)		100÷200	не менее 100	17200÷20000
Валовое содержание тяжелых металлов				
Медь (Cu)	мг/кг	не более 117	не более 1000	48,1÷65,5
Цинк (Zn)		не более 198	не более 2500	155,8÷269,4
Свинец (Pb)		не более 65	не более 750	4,84÷27,34

Рассмотренные с теоретической и экспериментальной точек зрения варианты утилизации обезвоженного водопроводного осадка показали, что

вполне оправданными могут стать технологии изготовления почвогрунтов с составляющей осадка до 50 % (по объему) [83], строительной керамики с содержанием осадка не более 10 % (по объему) [84], а также бетонов при использовании осадка в качестве заполнителя [85]. Влажность утилизируемого осадка при этом должна быть близка к воздушно-сухому состоянию. Следует также учитывать необходимость выполнения мероприятий, направленных на получение определенного гранулометрического состава обезвоженного осадка для использования его в том или ином направлении.

2.4 Динамика накопления осадка в отстойниках. Параметры промывки сооружений

Для разработки технологической схемы обработки осадка, а также расчета каждого отдельно взятого сооружения, необходимо определиться (хотя бы в первом приближении) с объемом осадка, образующегося на очистных сооружениях. Пользуясь формулой для расчета периода работы отстойников между сбросами осадка, приведенной в [86], можно рассчитать объем осадка ($W_{ос}$, м³), накапливающийся в сооружениях:

$$W_{ос} = \frac{T_p \cdot q \cdot (C_B - M_{осв})}{\delta \cdot N_p}, \quad (2.10)$$

где T_p – период работы отстойника между чистками, ч;

q – производительность очистных сооружений, м³/ч;

C_B – концентрация взвешенных веществ в воде, поступающей в отстойник, г/м³ (принимается по данным рисунка 2.1);

$M_{осв}$ – мутность воды, выходящей из отстойника, г/м³ (принимается равной 3 г/м³ для всех периодов);

δ – средняя по высоте осадочной части концентрация твердой фазы осадка, г/м³ (принимается по опытным исследованиям, представленным в подразделе 2.3.3 настоящей работы);

N_p – количество рабочих отстойников.

Данные расчета объемов осадка, образующегося за период между промывками отстойников по каждой технологической линии ВОС города, сведены в таблицу 2.4. Расчет выполнен на основании средней продолжительности работы отстойников между чистками, определенной по журналам учета промывок сооружений подготовки воды АО «Ростовводоканал».

Таблица 2.4 – Объем осадка, образующегося на ВОС г. Ростова-на-Дону за один цикл отстаивания (за один период между промывками отстойников)

Очистные сооружения, технологическая линия		Объем осадка (м ³) при его исходной концентрации твердой фазы (δ , г/м ³)		
		с одного отстойника	с технологической линии	общий (с очистных сооружений)
Интервал работы отстойника: ноябрь – март; $C_v=13,57$ г/м³; $\delta=121000$ г/м³				
Центральные	I	16,38	65,52	232,26
	II	10,94	109,41	
	III	7,17	57,33	
Александровские	БОС №1	8,19	163,79	327,58
	БОС №2	10,24	163,79	
Интервал работы отстойника: апрель – май; $C_v=26,53$ г/м³; $\delta=73700$ г/м³				
Центральные	I	23,95	95,78	339,54
	II	16,00	159,95	
	III	10,48	83,81	
Александровские	БОС №1	11,97	239,45	478,90
	БОС №2	14,97	239,45	
Интервал работы отстойника: июнь – август; $C_v=25,81$ г/м³; $\delta=82750$ г/м³				
Центральные	I	31,01	124,04	439,73
	II	20,72	207,15	
	III	13,57	108,54	
Александровские	БОС №1	15,51	310,11	620,22
	БОС №2	19,38	310,11	
Интервал работы отстойника: сентябрь – октябрь; $C_v=27,67$ г/м³; $\delta=89330$ г/м³				
Центральные	I	20,71	82,85	293,70
	II	13,84	138,36	
	III	9,06	72,49	
Александровские	БОС №1	10,36	207,13	414,26
	БОС №2	12,95	207,13	

Помимо объема образующегося осадка в период между его сбросами для расчета технологических сооружений необходимо учитывать коэффициент разбавления, зависящий, в свою очередь, от объема воды, затрачиваемой на

промывку отстойника. На Центральных и Александровских ВОС данный процесс осуществляется методом ручного смыва напорной струей воды (брандспойтом).

Объем воды для удаления осадка из отстойников Центральных и Александровских ВОС ($Q_{уд.ос.}$, м³), рассчитан на основании анализа данных производственных журналов АО «Ростовводоканал» по формуле:

$$Q_{уд.ос.} = q_{бр} \cdot t \cdot 3,6, \quad (2.11)$$

где $q_{бр}$ – производительность струи брандспойта, л/с (принимается 2,7 л/с для всех групп отстойников Центральных ВОС и 7,5 л/с для Александровских ВОС);

t – время промывки отстойника брандспойтом, ч (принимается равным 5 ч для вертикальных отстойников Центральных ВОС, 6 ч для горизонтальных отстойников Центральных ВОС и отстойников БОС №1 Александровских ВОС, 4 ч для горизонтальных отстойников БОС №2 Александровских ВОС).

Данные расчета объемов воды, затрачиваемой на промывку осадка по каждой технологической линии очистки водопроводов, сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Объем воды для удаления осадка, образующегося в отстойниках ВОС г. Ростова-на-Дону за один период между промывками

Очистные сооружения, технологическая линия		Объем воды, затрачиваемый для удаления осадка, м ³		
		с одного отстойника	с технологической линии	с очистных сооружений
Центральные	I	48,60	194,40	1166,40
	II	58,32	583,20	
	III	48,60	388,80	
Александровские	БОС-1	108,00	2160,00	4752,00
	БОС-2	162,00	2592,00	

При промывке отстойников образуются сточные воды, состоящие из осадка, скопившегося в сооружении, и воды, затраченной для его удаления. На основании расчетов объема осадка, образующегося за определенный период работы сооружений (таблица 2.4), а также расчетных данных, определяющих количество

воды, затрачиваемой на промывку отстойных сооружений (таблица 2.5), возможны следующие коэффициенты разбавления осадка (таблица 2.6):

Таблица 2.6 – Коэффициенты разбавления осадка при промывке отстойников ВОС
г. Ростова-на-Дону

Очистные сооружения	Технологическая линия	Коэффициент разбавления осадка при промывке отстойника за период его работы (месяцы)				
		XI-III	IV-V	VI-VIII	IX-X	Средний за год
Центральные	I	3,97	3,03	2,57	3,35	3,23
	II	6,33	4,65	3,81	5,21	5,00
	III	7,78	5,64	4,58	6,36	6,09
Александровские	БОС-I	14,19	10,02	7,96	11,42	10,90
	БОС-II	16,82	11,82	9,36	13,51	12,88

Данные таблицы 2.6 свидетельствуют о значениях коэффициентов разбавления осадка, значительно отличающихся от рекомендуемых для расчета сводом правил [87]: 1,5 – при гидравлическом удалении осадка; 1,2 – при механическом удалении осадка; $2 \div 3$ – при напорном смыве.

Выводы по 2-ой главе

1. В соответствии с усредненными данными органолептических показателей донскую воду можно отнести к маломутным (до 50 мг/дм³) и малоцветным (до 35 град) водоисточникам.

2. Физико-химические свойства осадка зависят главным образом не только от качества исходной воды (в частности, отношения Ц/М, изменяющегося по сезонам года), реагентов, применяемых для ее обработки, но и от продолжительности накопления осадка в отстойных сооружениях, что определяет степень его первоначального уплотнения. Так, осадок, образованный в летне-осенний период, для которого свойственно интенсивное развитие органики, наиболее обводнен (влажность возрастает до 94,6 %; удельное сопротивление на начальных этапах фильтрования находится в пределах от $41 \cdot 10^{10}$ до $84 \cdot 10^{10}$ см/г, на конечных возрастает в 1,9-3,0 раза) в сравнении с весенне-летним осадком при

равной продолжительности работы отстойников между промывками. Осадок, образованный за зимне-весенний период при длительном накоплении (до шести месяцев), несмотря на повышение значений Ц/М донской воды, обладает наибольшей структурной плотностью и лучшей фильтруемостью (влажность составляет 86,2–89,5 %; начальное удельное сопротивление фильтрации составляет от $23 \cdot 10^{10}$ до $32 \cdot 10^{10}$ см/г, конечное возрастает в 2,4-2,8 раза).

3. Получены регрессионные зависимости, позволяющие по отдельным характеристикам осадка косвенно определять его удельное сопротивление фильтрации и концентрацию твердой фазы с уровнем достоверности аппроксимации более 0,95. Зависимости позволяют значительно сократить время исследования осадка, а также применимы в расчетах процессов его обезвоживания.

4. Химический и минеральный состав осадка обуславливает перспективы его утилизации: уровень кремния (от 50,26 до 56,01 %), алюминия (от 9,43 до 13,12 %) и железа (от 6,13 до 7,53 %) предопределяет возможность использования отхода в производстве строительных материалов, а содержание элементов питания, в частности, фосфора (от 0,24 до 0,35 %) и калия (от 1,72 до 2,01 %) – в производстве почвогрунтов.

5. В отстойниках ВОС г. Ростова-на-Дону за год образуется около 3,15 тыс.м³ осадка концентрацией твердой фазы в диапазоне 55÷160 г/дм³ (281,6 т сухого вещества). С учетом коэффициента разбавления годовой объем шлама достигает 26,81 тыс. м³, что указывает на значимость проблемы его обработки.

6. Коэффициент разбавления осадка отстойников ВОС г. Ростова-на-Дону, рассчитанный на основании режима работы сооружений, объема образующегося в них осадка и воды, затрачиваемой для его удаления, весьма значителен и составляет от 2,6 до 16,8 (в зависимости от технологической линии). Уточненные значения коэффициентов при расчете технологической линии по обработке осадка позволят избежать занижения строительного объема, не обеспечивающего необходимой производительности.

3 Экспериментально-теоретическое описание процесса обезвоживания осадка маломутной и малоцветной природной воды

3.1 Исследование вторичного уплотнения осадка

Описанные в главе 2 настоящей работы исследования и приведенные расчеты позволяют определить, что на ВОС г. Ростова-на-Дону в результате промывки отстойников образуется шлам, состоящий из массовой части осадка и воды, со средневзвешенной концентрацией твердой фазы от 5 до 35 г/дм³. Направлять данные стоки непосредственно на сооружения обработки осадка (механические аппараты, площадки обезвоживания) нецелесообразно ввиду низкой концентрации твердого вещества. На предварительной ступени технологии следует создать условия для разделения шлама на осветленную воду и твердую фазу – вторичного уплотнения осадка (вторичного – поскольку ранее осадок претерпевает уплотнение в отстойнике). Данный процесс значительно отличается от процесса формирования осадка в отстойнике, поскольку речь здесь идет не о свободном осаждении, имеющем место при отстаивании воды, а о стесненном, подробно рассмотренном авторами [3, 88, 89].

Длительное гравитационное уплотнение осадка способствует изменению его структуры в результате повышения концентрации твердой фазы в единице объема. Наблюдается увеличение степени агрегирования частиц, сокращение их удельной площади поверхности и, как следствие, высвобождение части воды из пор осадка [2]. Гравитационное разделение шлама на осадок и надосадочную воду способствует не только технологическому эффекту, заключающемуся в снижении нагрузки на сооружения и аппараты для обезвоживания осадка, но и экономическому, выражающемуся в сокращении производственных мощностей станции.

Для обоснования конкретных конструктивных решений, а также режима работы сооружений (сгустителей, отстойников-усреднителей) по обработке стоков промывки отстойников необходимы данные о скорости разделения шлама на осадок и надосадочную воду, а также времени осуществления процесса в

целом. С этой целью с осадком отстойников, изученным по всем показателям, приведенным в главе 2, был проведен ряд опытных исследований по изучению кинетики отстаивания и дальнейшего вторичного уплотнения твердой фазы.

Подготовка осадка к экспериментальным исследованиям производилась на основании рекомендаций справочных пособий [1, 17], регулирующих гидродинамические характеристики процесса его удаления из отстойников:

1) перемешивание осадка при разбавлении в стеклянных мерных цилиндрах до заданной концентрации при градиенте скорости $G=40 \text{ с}^{-1}$, рассчитанном по формуле [90]:

$$G = \sqrt{\frac{0,5 \cdot C_x \cdot F \cdot u^3}{V \cdot \vartheta}}, \quad (3.1)$$

где C_x – коэффициент сопротивления кольца мешалки, равный 1,37;

F – площадь кольца мешалки, м^2 (принимается равной $0,0025 \text{ м}^2$);

u – скорость перемещения мешалки, м/с (принимается равной $0,8 \text{ м/с}$ на основании размывающей скорости струи гидравлического смыва, рекомендуемой справочным пособием [17]);

V – объем цилиндра, м^3 (принимается равным $0,001 \text{ м}^3$);

ϑ – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$ (принимается равной $6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ при разбавлении осадка и $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ при последующем перемешивании шлама в рассматриваемом диапазоне концентраций твердой фазы);

2) перемешивание шламовой воды при градиенте скорости $G=100 \text{ с}^{-1}$, назначенном в соответствии с формулой 3.1 с учетом рекомендуемой в [1] скорости движения осадка по самотечному трубопроводу к сооружениям для его сгущения равной $1,2\text{--}1,5 \text{ м/с}$. Перемешивание шлама с указанной скоростью осуществлялось в течение 3 мин, исходя из возможной удаленности расположения сооружений друг от друга.

Опыты по отстаиванию шламовых вод в покое проводились в условиях так называемого поршневого осаждения, описанного в [7], – цилиндрах диаметром 56 мм, рабочим объемом 1 дм^3 и высотой 520 мм. Для исключения влияния стенок

цилиндра при расчете эффекта уплотнения осадка применялся поправочный коэффициент (K), предложенный профессором Е.Ф. Кургаевым [88]:

$$K=1,06+0,00125\gamma_0, \quad (3.2)$$

где γ_0 – исходная концентрация твердой фазы в шламе.

Исследования С.В. Яковлева [91] процесса отстаивания сточных вод в цилиндрах диаметром от 50 до 300 мм указывают на то, что с увеличением диаметра цилиндров возрастает степень уплотнения осадка, выделенного из объема пробы. Таким образом, эффект уплотнения осадка (\mathcal{E} , %) может быть выражен приближенной формулой, исходя из значения эффекта уплотнения, зафиксированного при работе с цилиндрами диаметром 56 мм (\mathcal{E}_{50} , %):

$$\mathcal{E}=\mathcal{E}_{50}(1,06+0,00125\gamma_0), \quad (3.3)$$

Опытные исследования проводились с осадком, образованным в отстойниках в различные сезоны года при периоде его накопления в сооружениях от 1,5 до 6,0 месяцев. Процесс вторичного уплотнения осадка рассмотрен как без дополнительного внесения реагентов, так и при предварительном кондиционировании шлама.

3.1.1 Теоретические основы разделения шлама на жидкую и твердую фазы

Шламовые воды с физико-химической точки зрения представляют собой системы, состоящие из дисперсионной среды и дисперсной фазы. Дисперсионной средой в данном случае является вода, а дисперсной фазой – твердые частицы осадка. А.Г. Касаткиным [89] при рассмотрении процесса разделения двухфазной системы (состоящей из дисперсионной среды и дисперсной фазы) на осадок и осветленную жидкость предложены уравнения материального баланса:

– по общему количеству веществ:

$$G_{ш} = G_{осв} + G_{ос}, \quad (3.4)$$

– по дисперсной фазе (твердой фазе осадка):

$$G_{ш} \cdot x_{ш} = G_{осв} \cdot x_{осв} + G_{ос} \cdot x_{ос}, \quad (3.5)$$

где $G_{ш}$, $G_{осв}$, $G_{ос}$ – масса шлама, осветленной жидкости и осадка соответственно;
 $x_{ш}$, $x_{осв}$, $x_{ос}$ – содержание твердой фазы в исходном объеме шлама, осветленной жидкости и осадке (массовые доли) соответственно.

Как уже было отмечено ранее, процесс осаждения осадка в объеме шлама нельзя рассматривать с точки зрения законов движения твердых тел в жидкости (свободного осаждения), поскольку оседающие частицы осадка оказывают значительное влияние на движение друг друга. В процессе отстаивания шлама промывки отстойников наблюдается постепенное увеличение концентрации осадка в направлении сверху вниз. В объеме подобных неоднородных систем профессор А.Г. Касаткин [89] выделил четыре зоны концентрации диспергированных частиц (рисунок 3.1), исключив промежуточные области. При периодическом отстаивании в покое, высота каждой зоны изменяется с течением

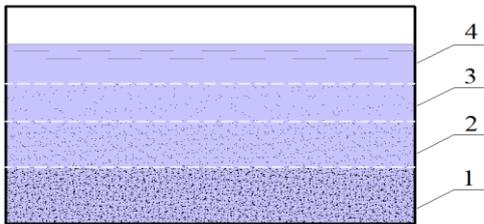


Рисунок 3.1 – Схема процесса отстаивания
 1-слой осадка; 2-зона сгущенной суспензии; 3-зона свободного осаждения; 4-осветленная жидкость

времени до момента полного разделения шлама на уплотненный осадок и осветленную жидкость.

Механизм уплотнения осадка в осадкоуплотнителе профессор Е.Ф. Кургаев [88] разделил на процессы: стесненное осаждение не связанных друг с другом частиц; образование единой структуры из отдельных частиц с постепенно уменьшающимся объемом в результате высвобождения воды из пространства между частицами; уплотнение самих частиц при удалении воды из их структуры.

Кинетика уплотнения осадка в экспериментальных исследованиях оценивалась по изменению концентрации твердой фазы в единице его объема, которая, в свою очередь, определялась не путем непосредственного отбора проб, а косвенно – по скорости уплотнения.

Согласно теории Д.М. Минца и С.А. Шуберта [92] скорость стесненного осаждения ($V_{ст}$) зависит от ряда гидродинамических характеристик частиц, участвующих в данном процессе, а именно, скорости свободного осаждения ($V_{св}$),

числа Рейнольдса (Re_3) и коэффициента сопротивления (η_3) свободно осаждающихся частиц:

$$V_{ст} = V_{св} \left(-\frac{3\pi C(1-m)}{Re_3 \cdot \eta_3} \sqrt{\left[\frac{3\pi C(1-m)}{Re_3 \cdot \eta_3} \right]^2 + m^3} \right), \quad (3.6)$$

где C – вес твердой частицы в жидкости;

m , $(1-m)$ – объем пространства между частицами, заполненный жидкостью, в единице объема суспензии и суммарный объем твердых частиц в единице объема (объемная концентрация) соответственно.

Использование формулы (3.6) в практических экспериментах по изучению эффективности вторичного уплотнения осадка затруднительно, поскольку требует установления ряда гидродинамических характеристик частиц шлама, обладающих различной гидравлической крупностью. Поэтому скорость уплотнения осадка оценивалась по скорости перемещения границы раздела сред.

Концентрация твердой фазы (γ_1 , г/дм³) в единице объема уплотненного осадка в определенный момент времени рассчитывалась по формуле, предложенной профессором Е.Ф. Кургаевым [88]:

$$\gamma_1 = \frac{H_0}{h} \cdot \gamma_0, \quad (3.7)$$

где H_0 , h – исходная высота шлама и высота слоя осадка соответственно, м;

γ_0 – исходная концентрация твердой фазы в объеме шлама, г/дм³ (рассчитана на основании концентрации твердой фазы осадка до разбавления и принятого коэффициента разбавления).

Эффект уплотнения осадка в цилиндрах диаметром 56 мм (\mathcal{E}_{50} , %) рассчитывался по формуле:

$$\mathcal{E}_{50} = \frac{H_0 - h}{H_0} \cdot 100. \quad (3.8)$$

3.1.2 Безреагентное уплотнение осадка

Для оценки кинетики разделения шлама на осадок и надосадочную воду без его предварительной обработки реагентами проведены наблюдения за процессом

гравитационного отстаивания в покое. Согласно разработанной методике, исходный осадок, отобраный из отстойника, с предварительно установленными физико-химическими показателями (в частности, концентрации твердой фазы) разбавлялся водой питьевого качества для получения необходимой концентрации (последовательность описана ранее в разделе 3.1). Полученный шлам разливался в мерные цилиндры, после чего через каждые 30 мин (в течение 5 ч) и далее через каждые 24 ч (в течение 5 сут) фиксировалось положение границы сред «осадок – вода». Исходя из полученных значений, на различных этапах процесса по формуле (3.7) рассчитывалась величина концентрации твердой фазы осадка. Все накопленные данные из различных серий опытов были сгруппированы в зависимости от исходных параметров осадка – продолжительности работы отстойника, а также сезонного периода формирования осадка в сооружении.

Поскольку постановка повторных (параллельных) опытов никогда не дает полностью совпадающих результатов ввиду ошибки воспроизводимости, заключающейся в невозможности обеспечения абсолютно равной исходной концентрации твердой фазы осадка в цилиндрах, обработка накопленных данных производилась по методике, предложенной в [93].

Для графического отображения процесса разделения шлама все полученные значения, отвечающие относительному отклонению в обозначенном диапазоне концентрации, были нанесены на один график. С помощью программы Microsoft Office Excel по заданным точкам была образована аппроксимирующая кривая, наиболее точно отражающая процесс вторичного уплотнения осадка, определяемого увеличением его концентрации. На рисунках 3.2, 3.3 представлены полученные кривые аппроксимации, для большей наглядности разделенные на два этапа: 1 этап – период наиболее интенсивного осаждения (от 0 до 5 ч), 2 этап – период медленного уплотнения осадка (после 24 ч наблюдения).

Анализируя результаты безреагентного уплотнения осадка равной исходной концентрации твердой фазы, можно утверждать, что основными факторами, оказывающими влияние на данный процесс, являются: продолжительность работы сооружений, из которых данный осадок получен и сезон

осадкообразования. Сравнивая графические характеристики изменения концентрации твердой фазы осадка с течением времени, как показателя интенсивности его уплотнения при различной продолжительности работы отстойника (рисунок 3.2), можно полагать, что скорость процесса возрастает с увеличением времени пребывания осадка в сооружении (при прочих равных условиях).

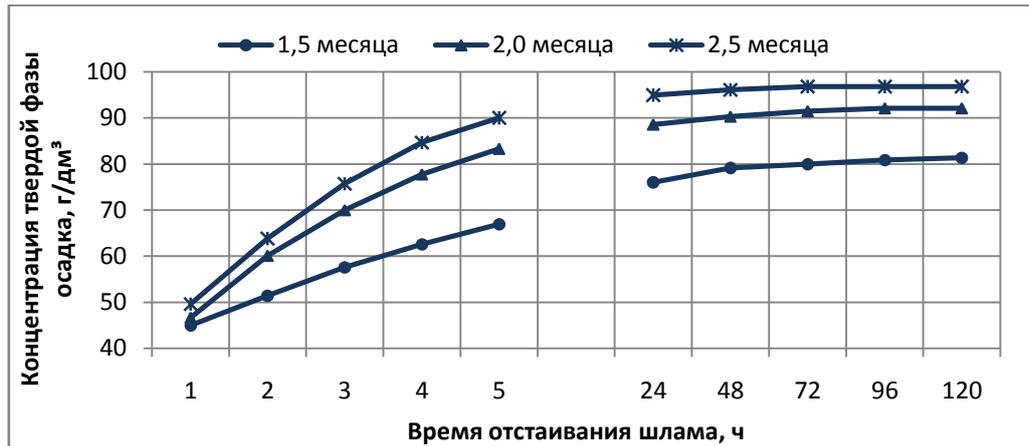


Рисунок 3.2 – Кинетика вторичного уплотнения осадка, образованного в летний период при продолжительности работы отстойника между промывками от 1,5 до 2,5 месяцев (исходная концентрация твердой фазы 30÷40 г/дм³)

При длительности накопления осадка в отстойнике около 1,5 месяцев его концентрация твердой фазы в результате 120 ч уплотнения на 16 % меньше значений, характерных для осадка с более продолжительным формированием (2,5 месяца). Данная закономерность обусловлена длительностью влияния эффективного давления воды. Так, профессор Н.А. Цытович [94] при рассмотрении водонасыщенного грунта выделяет две системы давлений при наличии на него внешней нагрузки – нейтральное, способствующее фильтрации в результате повышения напора воды, и эффективное, способствующее сжатию его скелета. В случае рассмотрения процесса формирования осадка в отстойнике при наличии значительного внешнего воздействия со стороны отстаиваемой воды и водоупора (дна сооружения), вряд ли можно полагать, что процесс фильтрации жидкости является преобладающим. Более значительно здесь, скорее, «выдавливание» воды из пор и каналов структуры осадка в вышележащие слои среды. Таким образом, на осадок, находящийся в нижней зоне отстаивания,

значительное влияние оказывает именно эффективное давление, создаваемое водой, а также нарастающим слоем вышележащего осадка, которое приводит к изменению его характеристик. Это способствует формированию крупных агрегатов повышенной плотности, которые при вторичном уплотнении эффективно осаждаются под действием собственного веса.

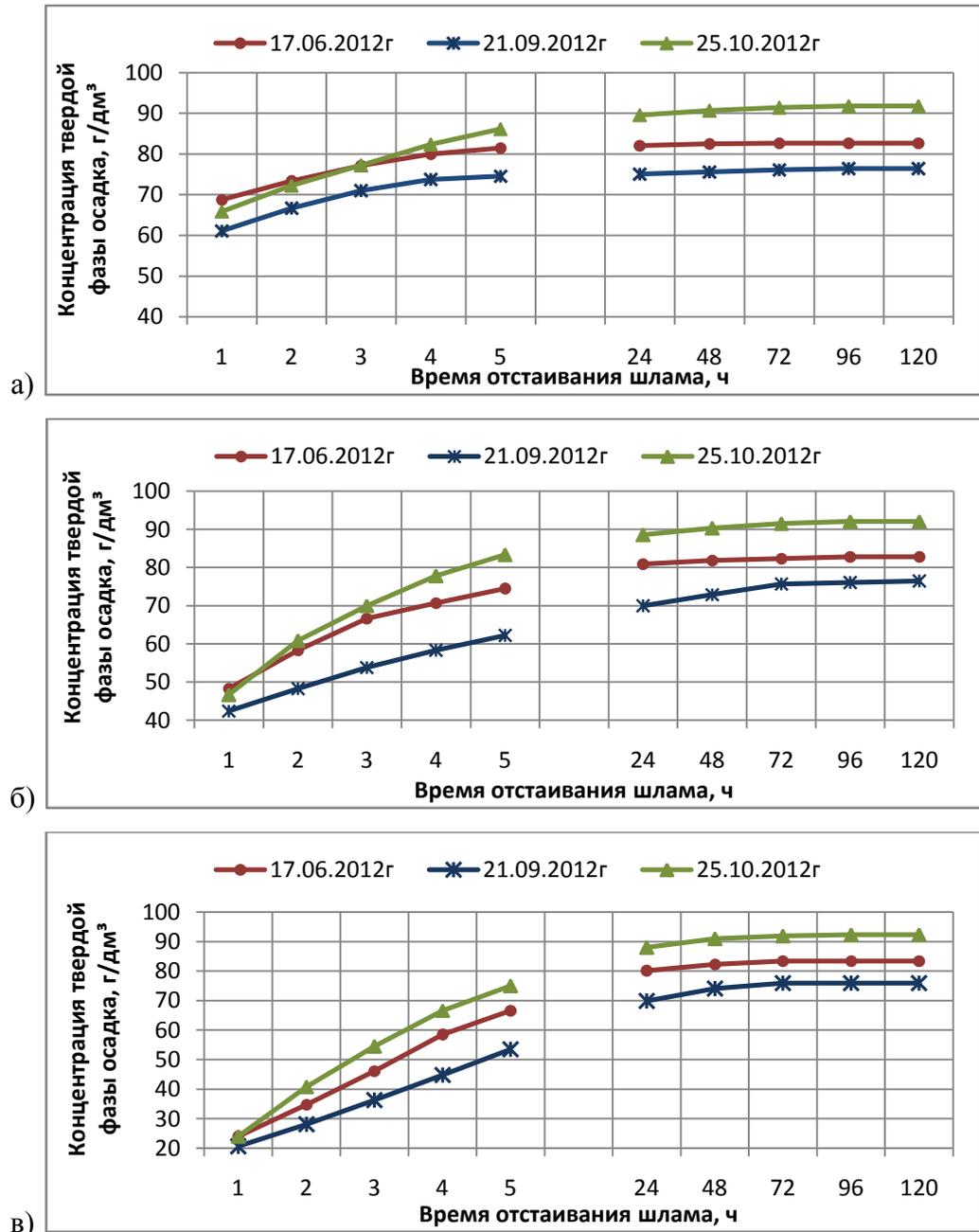


Рисунок 3.3 – Кинетика вторичного уплотнения осадка, отобранного в различные периоды года при продолжительности работы отстойника 2,0 месяца и начальной концентрации твердой фазы в объеме шлама: а - 50÷60 г/дм³; б - 30÷40 г/дм³; в - 10÷20 г/дм³

Обращаясь к влиянию сезонного периода осадкообразования на ход процесса разделения шлама на осадок и осветленную воду (рисунок 3.3), следует

указать на некоторое отставание (на 1-18 %) значений концентрации твердой фазы уплотненного осадка, образованного за август-сентябрь от аналогичных значений концентрации осадка, образованного в более ранний или поздний периоды при прочих равных условиях (исходная концентрация твердой фазы в объеме шлама, продолжительность работы отстойника). Высокая влажность, легкая, гелеподобная структура, присущие данному осадку, являются результатом массового развития отдельных представителей альгофлоры – цветения воды. В пресных водоемах цветение главным образом вызывают синезеленые водоросли, клетки которых окружены слизистыми оболочками, разнообразными по своим свойствам и происхождению [95]. Слизистые продукты отдельных клеток могут объединяться, что ведет к образованию колониальной слизи. Гелеобразная структура такого осадка, содержащая повышенное количество органической составляющей, не обеспечивает существенной деформации связей пространственной структуры и, как следствие, эффективного его уплотнения.

Экспериментальными исследованиями установлено, что значительное влияние на скорость стесненного осаждения осадка также оказывает исходная концентрация твердой фазы в объеме шлама, что подтверждает гипотезу Кинша [96] о том, что скорость осаждения отдельной частицы определяется локальной концентрацией окружающих ее частиц: чем выше исходная концентрация, тем меньше скорость процесса уплотнения осадка. Особенно наглядна данная закономерность в первые 5 ч отстаивания. На кривых, отображающих кинетику вторичного уплотнения осадка (рисунок 3.3) можно выделить 3 основные зоны: 1 – участок равномерного роста концентрации, на котором количество твердых частиц, выпадающих в осадок в единицу времени, практически одинаково (от 0 до 5 ч); 2 – участок с постепенно снижающейся интенсивностью увеличения концентрации (от 5 до 24 ч при визуальном соединении двух отрезков кривой), на котором наблюдается достижение осадком критической величины уплотнения (такого уровня концентрации, начиная с которого график переходит из прямой линии в кривую, асимптотически приближающуюся к максимально возможной для данного типа осадка степени уплотнения); 3 – затухание процесса (после 24

ч), в течение которого некоторое увеличение концентрации обусловлено высвобождением воды из структуры в результате давления верхнего слоя осадка и воды. Продолжительность каждого периода зависит от исходного содержания твердых (структурообразующих) частиц, участвующих в осаждении: чем оно выше, тем меньший период времени занимает процесс достижения осадком критической концентрации (максимально возможной для рассматриваемого типа осадка).

Следует отметить, что зависимость конечного эффекта уплотнения осадка от исходной концентрации твердой фазы спустя 1 сут наблюдения незначительна, хотя некоторый рост степени уплотнения осадка в случае пониженной исходной концентрации все же наблюдается, что можно объяснить более интенсивным разрушением скелета осадка при разбавлении и последующем перемешивании, и, как результат, высвобождением части влаги из структуры хлопьев осадка. За 24 ч гравитационного уплотнения осадок достигает значений концентрации твердой фазы, которые на 2-14 % меньше средних по высоте слоя показателей, свойственных ему в отстойнике перед промывкой. Увеличение продолжительности уплотнения осадка до 96-120 ч способствует достижению исходных значений концентрации.

3.1.3 Уплотнение кондиционированного осадка

С целью изучения возможности интенсификации процесса гравитационного разделения шлама на осветленную воду и осадок, а также дальнейшего уплотнения выделенного осадка, были проведены лабораторные исследования, направленные на определение влияния предварительной реагентной обработки на кинетику данных процессов. В качестве химических агентов для кондиционирования были выбраны синтетические полиэлектролиты – полиакриламиды (ПАА), применяемые в водоочистке главным образом в качестве флокулянтов согласно [68], и известь.

Синтетические полиэлектролиты способствуют дестабилизации водных суспензий за счет объединения микрохлопьев твердой фазы мостиковыми связями в макрохлопья, что, в свою очередь, является возможным за счет высокой молекулярной массой полимеров [7, 68, 97].

Для проведения лабораторных исследований по интенсификации уплотнения водопроводного осадка с использованием реагентов, ввиду близкого расположения производства к очистным сооружениям, выбраны ПАА компании ООО «Новорос» (Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск), изготавливаемые по ТУ 2163-001-73319927-12: катионные (товарные наименования – Нитрофлок К1525, Нитрофлок К1547), получаемые путем сополимеризации акриламида и катионного акрилового мономера, и анионные (товарные наименования – Нитрофлок А1315, Нитрофлок А1387), получаемые сополимеризацией акриламида и акрилата натрия. Общая характеристика выбранных полимеров представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Типовые свойства флокулянтов Нитрофлок

Свойство	Название продукта			
	катионный ПАА		анионный ПАА	
	Нитрофлок К1525	Нитрофлок К1547	Нитрофлок А1315	Нитрофлок А1387
Внешний вид	гранулированный порошок			
Молекулярный вес	средний	высокий	средний	высокий
Насыпная плотность, кг/м ³	750	750	750	750
Заряд, %	максимальный	средний	11,5	59,5
	минимальный		8,5	46,0
Остаточный акриламид, ppm	999	999	500	500

Для проведения лабораторных опытов по разделению шлама при помощи ПАА подготавливались рабочие растворы испытуемых образцов флокулянтов 0,1%-ной концентрации (по активному веществу).

В мерные цилиндры диаметром 56 мм и высотой 520 мм разливался шлам с одинаковой концентрацией твердой фазы, после чего вводился флокулянт дозой от 0 до 12 мг/дм³, затем производилось его перемешивание металлической мешалкой с концом, загнутым в виде спирали, с градиентом скорости $G=100 \text{ с}^{-1}$,

назначенным согласно ранее описанной в разделе 3.1 методике. Перемешивание шлама осуществлялось в течение 3 мин, исходя из расчетного времени движения шлама по трубопроводным сетям территории очистных сооружений. Показания границы раздела сред «осадок-вода» фиксировались через каждые 5 мин в течение 0,5 ч, далее через каждые 30 мин в течение 5 ч и затем через 24 ч в течение 5 сут. Для получения наиболее объективной картины процесса разделения шлама в присутствии полимера, эффективность воздействия конкретной дозы определялась в параллельных наблюдениях сразу в трех цилиндрах при равных исходных свойствах среды и внешних условиях. В каждой серии испытаний три цилиндра оставались контрольными (шлам в них не подвергался реагентной обработке). Выполнено две серии опытных исследований пробного флокулирования осадка по определению оптимальной дозы реагента – с осадком, образованным за весенние месяцы, и с осадком, образованным в период цветения воды (за август – сентябрь).

В результате анализа графиков результирующих кривых пробного флокулирования, построенных в координатах «доза реагента – эффект уплотнения» установлено, что в зависимости от принятой продолжительности отстаивания минимальная доза ПАА, необходимого для повышения эффекта вторичного уплотнения осадка, может быть различной.

На рисунке 3.4 представлены результаты эффективности вторичного уплотнения осадка в присутствии различных доз катионных (K1525, K1547) и анионных (A1315, A1387) ПАА. Осадок в данной серии опытов образован за период апрель-май, разбавлен водой питьевого качества до концентрации твердой фазы 45 г/дм³.

Анализируя полученные экспериментальные данные (рисунок 3.4) можно утверждать, что наиболее оптимальной дозой катионной марки флокулянта Нитрофлок K1525 со средней молекулярной массой при продолжительности отстаивания до 5 ч является доза 0,016-0,018 % по м.с.в. осадка. При этом эффект уплотнения через 0,5 ч составил 11,8 %, в то время как соответствующий показатель контрольного образца (без добавления реагента) составил 5,3 %; через

1 ч – 21,0 % (8,8 % – контрольный); через 5 ч – 45,2 % (33,5 % – контрольный). Катионная марка Нитрофлока K1547 с высокой молекулярной массой показала несколько худшие результаты, хоть и при меньших оптимальных дозах (0,011-0,013 % по м.с.в. осадка): через 0,5 ч эффективность уплотнения составила 10,3 %; через 1 ч – 15,8 %; через 5 ч – 36,7 %. При увеличении продолжительности отстаивания шлама до 24 ч как в случае с использованием флокулянта K1525, так и с флокулянтом K1547, наблюдается заметное снижение оптимальной дозы реагента до 0,004 % по м.с.в. осадка. Эффективность уплотнения осадка с флокулянтами K1525 и K1547 через 1 сут составила: 48,5 и 41,5 % соответственно (37,5 % – контрольный образец), через 5 сут – 51,5 и 42,8% соответственно (40,5 % – контрольный цилиндр).

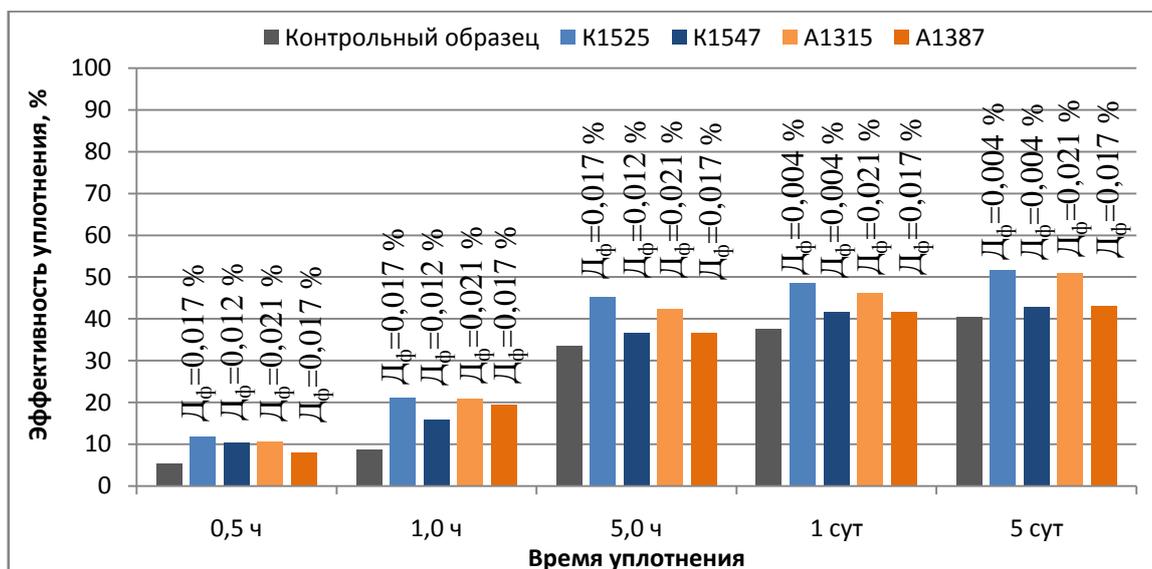


Рисунок 3.4 – Эффективность уплотнения осадка, образованного весной, при кондиционировании его различными оптимальными дозами флокулянтов (D_{ϕ} безводного в % по м.с.в. осадка) катионного (K1525, K1547) и анионного (A1315, A1387) заряда

Анионные марки флокулянта Нитрофлок – A1315 (средней молекулярной массы) и A1387 (высокой молекулярной массы) характеризуются относительным постоянством оптимальной дозы: 0,020-0,022 % и 0,016-0,018 % по м.с.в. осадка соответственно (рисунок 3.4). Эффективность уплотнения осадка, обработанного анионными ПАА, аналогична экспериментам с применением катионных марок: через 0,5 ч – 10,6 % (A1315) и 7,9 % (A1387) при уровне 5,3 % на контрольном образце; через 1,0 ч – 20,8 % (A1315) и 19,5 % (A1387) при уровне 8,8 % на

контрольном образце; через 5 ч – 42,4 % (A1315) и 36,8 % (A1387) при 33,5 % на контрольном образце; через 24 ч – 46,2 % (A1315) и 41,5 % (A1387) при уровне 37,5 % на контрольном образце; через 120 ч – 50,9 % (A1315) и 43,2 % (A1387) при контрольном уровне – 40,5 %.

На рисунке 3.5 представлены результаты эффективности вторичного уплотнения осадка, образованного за август-сентябрь, в присутствии различных доз флокулянтов катионного (K1525, K1547) и анионного (A1315, A1387) заряда. Для проведения исследований осадок разбавлялся водой питьевого качества до концентрации 65 г/дм³.

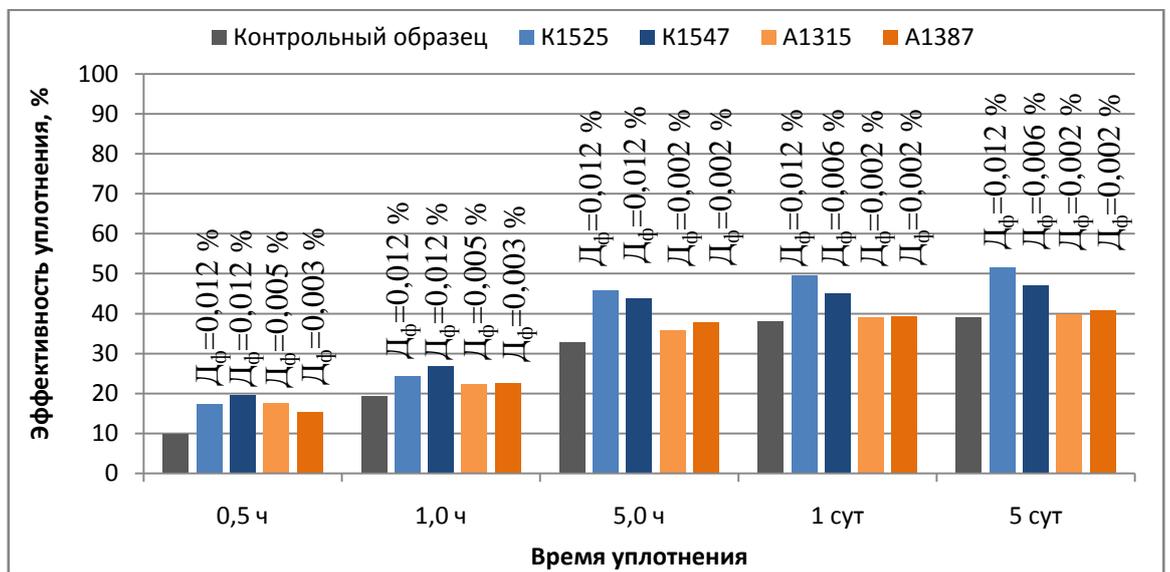


Рисунок 3.5 – Эффективность уплотнения осадка, образованного в период цветения воды, при кондиционировании его различными оптимальными дозами флокулянтов (D_ф безводного в % по м.с.в. осадка) катионного (K1525, K1547) и анионного (A1315, A1387) заряда

Анализируя результаты уплотнения осадка, образованного в период цветения воды, которые получены с применением катионных ПАА (рисунок 3.5), можно полагать, что оптимальным количеством вводимого реагента средней молекулярной массы (K1525) является доза 0,012 % по м.с.в. осадка, причем она приемлема при различной продолжительности процесса уплотнения (до 120 ч). Оптимальной дозой реагента с высокой молекулярной массой (K1547) при продолжительности уплотнения не более 5 ч является доза 0,011-0,013% по м.с.в. осадка, при этом эффективность процесса в течение первого часа несколько превышает аналогичные показатели с флокулянтom K1525: через 0,5 ч – 17,3 %

(K1525) и 19,5 % (K1547) при уровне 9,8 % на контрольном образце; через 1,0 ч – 24,3 % (K1525), 26,9 % (K1547) при уровне 19,3 % на контрольном образце; через 5 ч – 49,4 % (K1525), 45,1 % (K1547) при уровне 32,8 % на контрольном образце. При увеличении времени уплотнения осадка эффективность процесса в присутствии флокулянта Нитрофлок K1547 остается практически неизменной, начиная с дозы 0,006% по м.с.в. осадка, и в сравнении с флокулянтом Нитрофлок K1525 соответственно составляет: через 24 ч – 45,1 и 49,4 % (38,0 % - контрольный цилиндр); через 120 ч – 47,1 и 51,6 % (39,0 % - контрольный цилиндр).

Опытные данные по наблюдению за скоростью разделения шлама на жидкую и твердую фазы в присутствии флокулянта Нитрофлок анионного заряда (рисунок 3.5) позволяют считать наиболее приемлемыми дозами для реагента A1315 (средней молекулярной массы) дозу 0,005 % по м.с.в. осадка, для реагента A1387 (высокой молекулярной массы) – 0,003 % по м.с.в. осадка на протяжении первого часа уплотнения. Значения эффекта уплотнения при этом соответствуют: через 0,5 ч – 17,5 % (A1315), 15,3 % (A1387) при 9,8 % на контрольный образец; через 1,0 ч – 22,3 % (A1315), 22,5 % (A1387) при 19,3 % на контрольном образце. Спустя 5 ч уплотнения эффективность увеличения концентрации осадка заметно снижается при превышении дозы анионных полимеров свыше 0,002 % по м.с.в., причем практически во всех случаях значения концентраций твердой фазы уплотненного осадка были ниже величин, полученных в параллельных испытаниях на контрольных пробах (рисунок 3.6).

Рассматривая эффективность применения флокулянтов (катионных и анионных ПАА) с точки зрения скорости осаждения флокулируемых твердых частиц шлама и объема (компактности) осевшей твердой фракции за конкретный интервал времени, можно обозначить нижеследующее:

Катионные марки флокулянта Нитрофлок проявили себя примерно одинаково как в экспериментах с осадком, образованным весной, так и с осадком, образованным за август-сентябрь. Однако, следует отметить, что в весенний период при длительном уплотнении осадка (24 ч и более) оптимальная доза

катионного ПАА снижается до 0,004 % по м.с.в. осадка. Возможным объяснением данного явления может быть особенность строения коагуляционной структуры осадка, способной ввиду малого количества химически связанной влаги и достаточного содержания минеральной составляющей к эффективному разделению на среды – жидкость (надосадочная вода) и твердую фазу (осадок) в течение необходимого для этого времени (24 ч и более) даже без дополнительного внесения химических агентов. В целом, эффект уплотнения осадка, предварительно обработанного данным реагентом, на 10-15 % превышает значения, зафиксированные на контрольных пробах (без дополнительного внесения реагента), что в расчете на влажность осадка (в рассматриваемом диапазоне концентрации твердой фазы) обеспечивает ее снижение в пределах 2,5 %.

Анионные марки флокулянта Нитрофлок применительно к осадку, образованному в весенний период, показали результаты, аналогичные катионным, однако их рабочая доза несколько выше. По отношению к осадку, образованному за август-сентябрь, анионные флокулянты не обеспечили достаточного эффекта на процесс уплотнения, поскольку его величина не превысила 5 % при сопоставлении с контрольными образцами. Кроме того, обработка шлама данным реагентом дозами выше 0,002 % по м.с.в. осадка, а также длительное отстаивание (более 5 ч) крайне негативно: объем уплотненного осадка больше величин контрольных образцов, причем разница увеличивается прямо пропорционально увеличению дозы химического агента и времени уплотнения (рисунок 3.6). Объяснить данную закономерность можно с точки зрения присутствия в осадке гуминовых коллоидов, доминирующий заряд которых отрицателен. Поскольку анионный полимер также несет в себе отрицательный заряд, наблюдается электростатическое отталкивание одноименно заряженных коллоидов. Таким образом, макромолекулы анионного ПАА, имеющие значительные линейные размеры, создают устойчивые «прослойки», поддерживающие объем осадка в исходном состоянии и препятствующие его структурной решетке занять предельно сжатое положение, что и подтверждает рекомендации [68] касательно

предпочтительности использования катионных полиэлектролитов для агрегации взвесей органического происхождения.

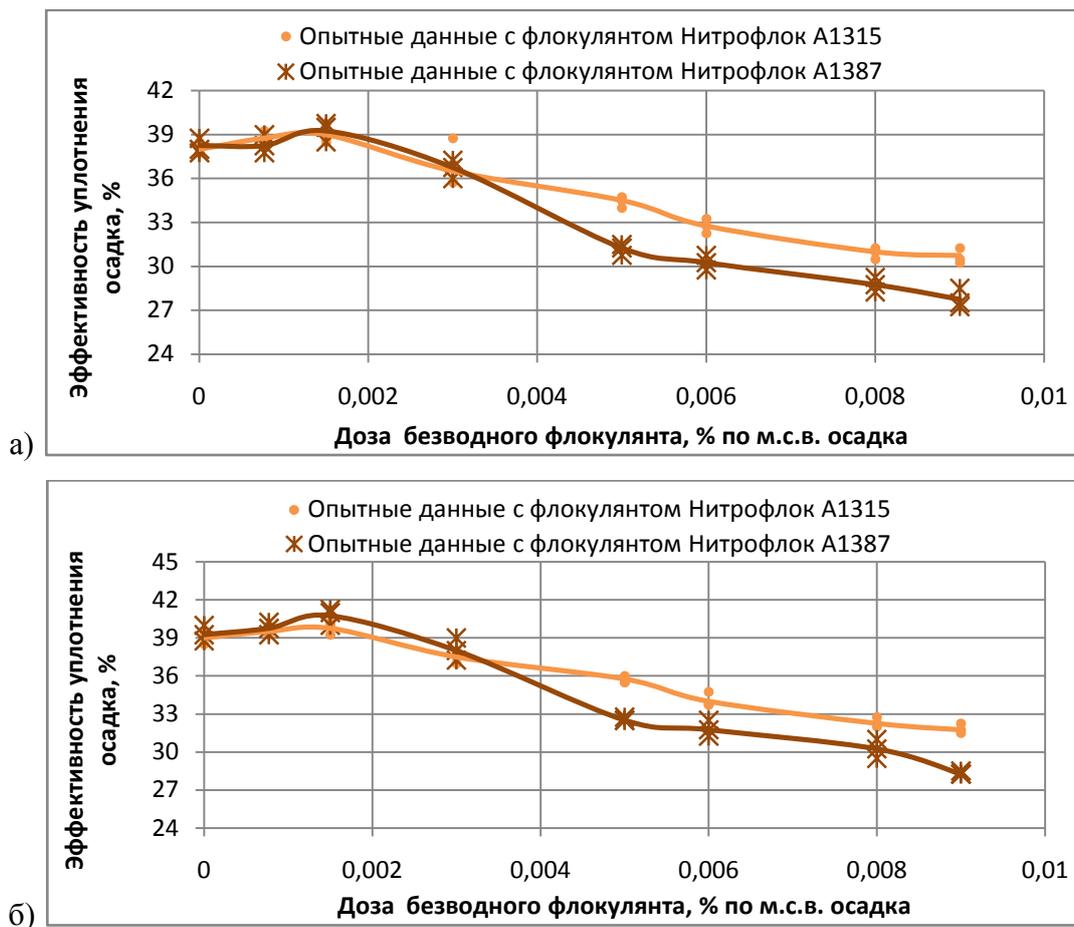


Рисунок 3.6 – Результаты эффективности уплотнения осадка, образованного в период цветения воды, при кондиционировании его анионными флокулянтами средней (A1315) и высокой (A1387) молекулярной массы через 24 ч (а) и 120 ч (б) отстаивания шлама

Что касается влияния величины молекулярной массы химических агентов (катионных и анионных ПАА) на процесс флокуляции шлама, сравнительной оценкой гистограмм, отображающих эффективность отстаивания (рисунок 3.4, 3.5), установлено, что с увеличением степени полимеризации полиэлектролита его оптимальная доза может быть несколько снижена, однако, эффект уплотнения осадка при этом (ввиду повышения вязкости раствора флокулянта) может оказаться ниже до 10 %.

Помимо флокулирующих агентов в области обработки осадка водопроводных станций немалое распространение получила известь, являющаяся, как обозначено в [2, 4], не только химическим реагентом, но и минеральным присадочным материалом.

Поскольку реакции гидролиза кальция не приводят к образованию полимерных мостиковых связей, и адсорбции специфических ионов на самой извести также не наблюдается, исследователи [2, 4, 7] в большей мере позиционируют известь как реагент, способствующий химическому осаждению, повышению фильтруемости твердой фазы, а также позволяющий корректировать рН и щелочность среды и, как следствие, интенсифицировать процесс уплотнения осадка.

Проведение экспериментов по влиянию извести на процесс уплотнения осадка осуществлялось аналогично ранее описанной методике при работе с флокулянтами. Поскольку в экспериментах использовалась гидратная известь (пушонка), что непременно влечет за собой увеличение доли твердой фазы в составе осадка, эффективность ее воздействия на уплотнение оценена не по скорости изменения отметок межфазной границы, а по результатам влажности осадка спустя 24 ч гравитационного отстаивания (рисунок 3.7).

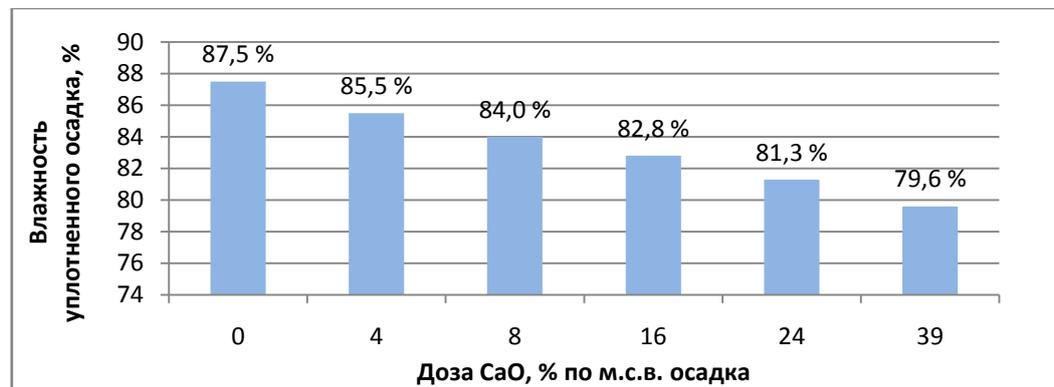


Рисунок 3.7 - Эффективность снижения влажности осадка в присутствии извести (уплотнение в течение 24 ч)

Процесс разделения шлама на воду и осадок в присутствии извести в некотором роде схож с отстаиванием с утяжелением флокул. Хлопья осадка при смешении с известью, увеличивают свою плотность и, как результат, согласно закону Стокса, скорость осаждения. Это в свою очередь способствует повышению эффекта уплотнения.

В ходе опытных исследований установлено, что каждые 4 % СаО (по м.с.в. осадка) увеличивают массовую концентрацию твердой фазы до 6-7 %. Значительная доза введенной извести остается в уплотненном осадке в твердом

виде, что подтверждает теорию, представленную в [7]. Именно поэтому при выборе оптимальной дозы извести следует учитывать возрастание массы выделенного из шлама осадка, подлежащего дальнейшему обезвоживанию, а также высокий уровень его щелочности и рН. Наиболее подходящей технологией дозирования извести при уплотнении осадка может стать использование реагента в жидком виде или в виде суспензии.

3.2 Исследование процесса обезвоживания осадка

3.2.1 Выбор наиболее приемлемых схем обработки осадка на основании его исходных качественных характеристик

Экспериментальными исследованиями кинетики гравитационного отстаивания шлама, образованного в результате промывки отстойников, и последующего уплотнения дисперсной фазы установлено, что в целом за 120 ч выделенный осадок достигает значений концентрации твердой фазы, аналогичных средним по высоте слоя показателям при нахождении его в отстойнике перед промывкой. Дальнейшее уплотнение осадка неэффективно, поскольку скорость снижения границы раздела фаз «осадок – вода» не превышает $4 \cdot 10^{-5}$ м/ч в последующие 1-3 сут, по истечении которых прекращается полностью на основании визуальных наблюдений.

Осадок ВОС г. Ростова-на-Дону с точки зрения классификации профессора В.М. Любарского [2] можно охарактеризовать следующим образом:

- а) по происхождению: осадок вод поверхностных источников;
- б) по качеству воды источника: осадок воды малой цветности и мутности (рисунок 2.1) при величине отношения Ц/М от 1 до 10 град·дм³/мг;
- в) по виду реагентов, используемых для очистки воды: осадок, образованный алюминийсодержащими реагентами (в качестве коагулянта) и синтетическими органическими полиэлектролитами группы полиДАДМАХов (как в качестве флокулянта, так и самостоятельно, в качестве коагулянта);

г) по условиям образования: осадок из отстойников (горизонтальных, вертикальных).

Выполненный и приведенный в главе 1 настоящей работы анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что за основные показатели осадка, определяющие способ его обезвоживания, можно принять влажность и удельное сопротивление фильтрации. При сравнительно небольших значениях отношения Ц/М донской воды в пределах от 1,00 до 8,18 град·дм³/мг влажность осадка после вторичного уплотнения находится в диапазоне от 85,4 до 94,6 %. Значения удельного сопротивления фильтрации осадка непостоянны ввиду его склонности к сжимаемости, влекущей за собой деформацию структуры и, как следствие, изменение плотности и пористости. Если на начальном этапе значения удельного сопротивления фильтрации соответствуют интервалу от $23 \cdot 10^{10}$ до $84 \cdot 10^{10}$ см/г, то в дальнейшем, после перелома функции $f(V)=\tau/V$, достигают величин от $55 \cdot 10^{10}$ до $163 \cdot 10^{10}$ см/г.

Вышеприведенные величины влажности и удельного сопротивления осадка невелики в сравнении с аналогичными показателями осадков воды повышенной цветности (влажность которых более 97 %, удельное сопротивление фильтрации в пределах от $60 \cdot 10^{10}$ до $300 \cdot 10^{10}$ см/г согласно данным [2]), и поэтому в качестве приемлемых способов его обезвоживания можно рассматривать как обработку в естественных условиях (на площадках обезвоживания) [98], так и обработку на механических устройствах (в частности, фильтровального типа).

3.2.2 Обработка осадка в естественных условиях

На основании анализа изученных трудов российских и зарубежных ученых в области обработки отходов водоочистки, а также имеющихся собственных экспериментальных исследований, процесс обезвоживания осадка в естественных условиях, в частности, на площадках подсушивания, рассмотрен с позиции возможной осуществимости следующих основных процессов: фильтрация влаги в

дренажную систему (дренирование), декантация надосадочной воды, удаление влаги капиллярным поглощением, сушка осадка в результате испарения влаги. Целью дальнейших исследований явилось установление уровня снижения влажности осадка под воздействием каждого отдельного фактора, а также выявление наиболее значимого из рассматриваемых.

3.2.2.1 Фильтрация влаги из осадка без предварительного кондиционирования

Процесс отделения воды из состава осадка или шлама (в зависимости от концентрации твердой фазы) посредством пористой среды можно рассматривать как процесс фильтрации суспензии, сопровождающийся образованием на фильтре постепенно возрастающего слоя осадка [2, 7].

Исследователями [2, 4, 8] установлено, что наличие дренажа на иловых площадках позволяет значительно сократить продолжительность обезвоживания осадка. В качестве инженерных мероприятий в данном направлении предлагается устройство горизонтального дренажа (дренажных колодцев, дренажного фильтрующего основания, дренажных траншей с укладкой в них дренажных трубопроводов или без нее), а также всевозможные конструкции вертикальных дрен. Правильно организованный дренаж позволяет свести к минимуму остаточное содержание воды в осадке, подлежащей испарению.

Согласно теории профессора А.Г. Касаткина [89] при движении жидкости через зернистый слой, когда поток полностью заполняет свободное пространство между частицами слоя, можно считать, что жидкость обтекает отдельные элементы слоя и движется внутри каналов различной формы, образуемых пустотами и порами между элементами твердой фазы. Общее удельное гидравлическое сопротивление (r) прохождению фильтрата согласно данным [2, 7] выражается формулой:

$$r = r_{oc} + r_3, \quad (3.9)$$

где r_{oc} – удельное сопротивление осадка;

r_3 – удельное сопротивление загрузки (пористой среды).

Методика определения значения удельного сопротивления осадка (r_{oc}) маломутной и малоцветной речной воды представлена в подразделе 2.3.4. Удельное сопротивление загрузки (дренажа) может быть определено по формуле [89]:

$$r_3 = 0,188 \frac{\mu \cdot \alpha^2}{d_3^2} \cdot \frac{(1-m)^2}{m^3}, \quad (3.10)$$

где μ – вязкость фильтрата;

α – коэффициент формы зерен загрузки;

m – пористость загрузки;

d_3 – эквивалентный диаметр зерен загрузки.

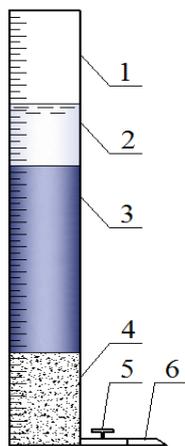


Рисунок 3.8 -

Принципиальная схема прибора для проведения теста на дренируемость

1-мерный цилиндр; 2- надосадочная вода; 3- слой уплотняющегося осадка; 4-песчаная засыпка (дренаж); 5- патрубков с запорным вентилем; 6-гибкий шланг

Для изучения кинетики обезвоживания осадка в результате фильтрации воды использовались стеклянные мерные цилиндры диаметром 100 мм, рабочей высотой 700 мм (рисунок 3.8). В качестве дренажа применялся песок, засыпанный в цилиндры на высоту 150 мм. Для отвода профильтровавшейся воды у дна цилиндра предусмотрен патрубок. В цилиндры заливался шлам, доведенный до необходимой концентрации и перемешанный при градиенте скорости $G = 100 \text{ с}^{-1}$ (назначен на основании расчетной формулы 3.1) в отдельной емкости. Наблюдения за снижением уровня воды в цилиндрах продолжались до момента выравнивания ее с поверхностью уплотненного осадка или достижения скорости фильтрации воды значений, близких к нулю. Скорость фильтрации (V , см/мин) вычислялась по формуле [92]:

$$V = \frac{W}{F \cdot t}, \quad (3.11)$$

где W – объем выделенного фильтрата, см³;

F – площадь поперечного сечения цилиндра, см²;

t – продолжительность фильтрации, мин.

Следует отметить, что физическая скорость движения воды в дренажном слое не равна скорости фильтрации, поскольку жидкость перемещается не по всей площади поперечного сечения фильтра, а лишь по свободным от зернистого слоя порам и каналам [92].

Принимая во внимание то, что скорость фильтрации есть функция скорости движения воды в порах осадка и пористости, а также утверждения ученых [3, 89] о том, что концентрация твердой фазы осадка в процессе отстаивания различна по высоте слоя шлама, можно предположить, что на кинетику дренирования существенное влияние может оказывать величина налива осадка над фильтрующей средой. Для возможного подтверждения данного предположения, в сериях экспериментов применены различные величины налива осадка (30, 40 и 50 см) на дренажный слой. Также для получения наиболее адекватной информации нельзя было пренебречь влиянием исходных свойств самого осадка на процесс влагоотдачи, поэтому опытные исследования были проведены с осадком, образованным в различные сезоны года – весной (апрель - май) и в период цветения воды (август - сентябрь).

На рисунке 3.9 (а-в) представлены результаты фильтрации воды из объема осадка с концентрацией твердой фазы 45 г/дм³. Осадок образован в отстойниках за весенний период (в течение 1,5 месяцев). Перед проведением исследования осадок (влажностью 94,48 %) с исходной концентрацией твердой фазы 55 г/дм³ разбавлен водой питьевого качества до концентрации 45 г/дм³.

Анализируя гистограммы высотных отметок уровней уплотненного осадка и общего напора над фильтрующим слоем песка, складывающегося из высоты слоя осадка и надосадочной воды, можно утверждать, что скорость уплотнения дисперсной фазы (осадка) превышает скорость фильтрации дисперсионной среды (надосадочной воды), причем разница эта увеличивается с увеличением высоты налива осадка. Общая продолжительность процесса фильтрации также различна в зависимости от высоты обезвоживаемого слоя осадка:

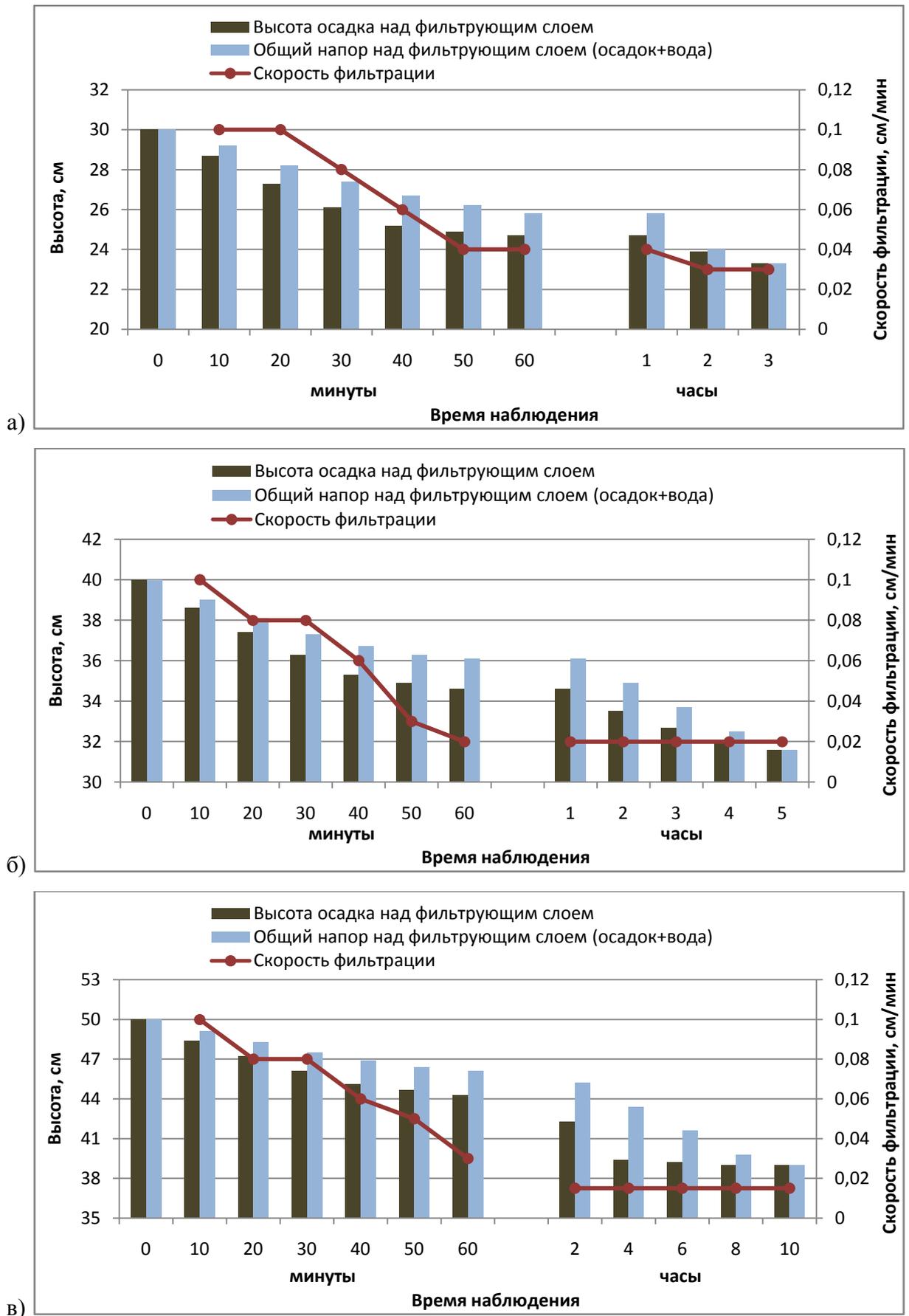


Рисунок 3.9 – Фильтрация воды из объема осадка концентрацией твердой фазы 45 г/дм³ при высоте его налива: а – 30 см; б – 40 см; в – 50 см

– при высоте налива осадка 30 см надосадочная вода полностью профильтровывается за 3 ч, при этом скорость фильтрации за 1 ч изменяется от 0,1 до 0,04 см/мин (6,0-2,4 см/ч), а в последующие 2 ч – постоянна и равна 0,03 см/мин (1,80 см/ч);

– при высоте налива осадка 40 см процесс фильтрации завершается за 5 ч при скорости в течение 1 ч наблюдения равной 0,1-0,02 см/мин (6,0-2,4 см/ч), в последующие 4 ч – 0,02 см/мин (1,20 см/ч);

– при высоте налива осадка 50 см процесс фильтрации занимает 10 ч при скорости в диапазоне от 0,1 до 0,03 см/мин (6,0-1,8 см/ч) за 1 ч наблюдения и на уровне 0,015 см/мин (0,9 см/ч) в дальнейшие 9 ч.

Эксперименты подтверждают, что общее гидравлическое сопротивление фильтрации складывается из сопротивления слоя осадка и сопротивления фильтрующей среды (дренажа). Объем осадка после завершения отделения воды сокращается в $1,27 \div 1,29$ раза в зависимости от высоты налива на дренирующее основание. Соотнеся установленную степень уплотнения осадка с коэффициентом его предварительного разбавления, равного в данном случае 1,22, можно определить, что объем исходного осадка (концентрацией твердой фазы 55 г/дм^3) сократился в 1,04-1,05 раза, что соответствует снижению исходной его влажности (равной 94,48%) на 0,22-0,33 %. Таким образом, дренирование осадка способствует не только отделению воды разбавления (свободной воды), но и структурной влаги, содержащейся в его порах, которая удерживается в составе вещества физико-механической связью.

На рисунке 3.10 (а-в) представлены результаты фильтрации воды из объема осадка с концентрацией твердой фазы 65 г/дм^3 . Пробы приготовлены из осадка исходной концентрацией 80 г/дм^3 (влажностью 92,14 %), образованного в отстойниках за август – сентябрь. Как и в серии опытов с весенним осадком, процесс уплотнения в данном случае завершается быстрее процесса фильтрации, а время удаления надосадочной воды с поверхности осадка тем больше, чем больше высота его начального налива на дренирующее основание:

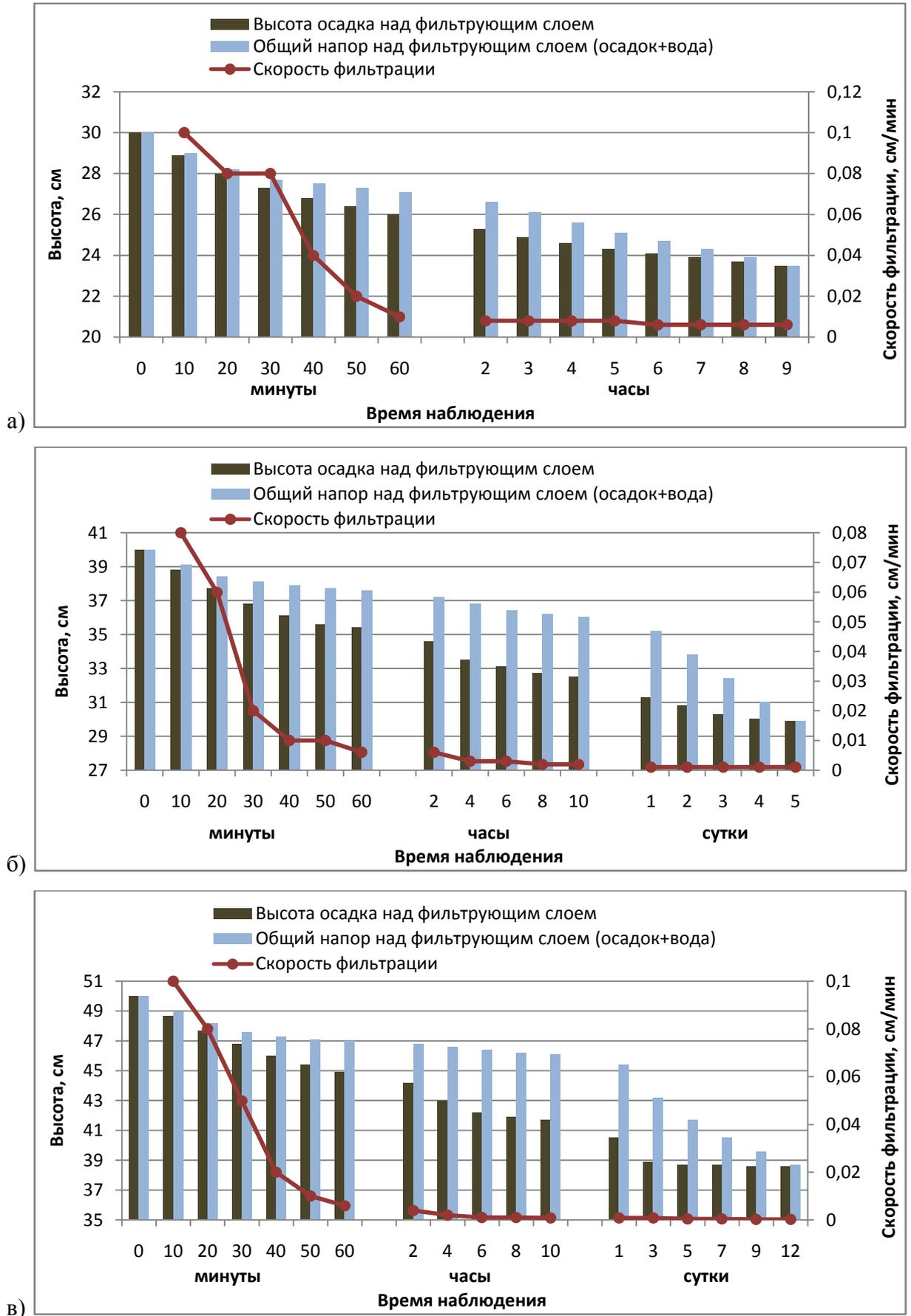


Рисунок 3.10 – Фильтрация воды из объема осадка концентрацией твердой фазы 65 г/дм^3 при высоте его налива: а – 30 см; б – 40 см; в – 50 см

– при высоте налива 30 см требуется около 9 ч, при этом скорость фильтрации за 1 ч изменяется в широком диапазоне от 0,1 до 0,01 см/мин (6,0-0,6 см/ч), в дальнейшие 8 ч она практически стабильна и составляет 0,008–0,006 см/мин (0,5-0,4 см/ч);

– при высоте налива 40 см для завершения фильтрации надосадочной воды необходимо 5 сут, скорость фильтрации в течение 1 ч находится в диапазоне от 0,08 до 0,006 см/мин (4,8-0,4 см/ч), до окончания первых суток скорость снижается с 0,006 до 0,001 см/мин (с 0,4 до 0,1 см/ч) и в дальнейшем остается на уровне 0,001 см/мин (менее 0,1 см/ч) до полного выравнивания поверхности воды с поверхностью осадка;

– при высоте налива 50 см процесс отделения влаги длится 12 сут при скорости фильтрации за 1 ч от 0,1 до 0,006 см/мин (6,0-0,4 см/ч), до конца первых суток скорость находится в диапазоне от 0,004 до 0,0008 см/мин (0,2-0,05 см/ч), а в дальнейший период близка к нулю и составляет 0,0008-0,0002 см/мин (0,05-0,01 см/ч).

Объем осадка в данной серии опытов в результате дренирования сокращается в 1,28-1,34 раза при коэффициенте его разбавления 1,23. Основываясь на данные значения, можно считать, что объем исходного осадка (концентрацией твердой фазы 80 г/дм^3 , влажностью 92,14 %) сокращается в 1,04-1,09 раза, что соответствует снижению содержания влаги на 0,31-0,71 %.

Сопоставляя полученные экспериментальные данные по кинетике фильтрации воды из объема осадка с концентрацией твердого вещества от 45 до 65 г/дм^3 (рисунки 3.9-3.10), можно сформулировать следующие выводы:

В первые 30-40 мин с начала наблюдения значения скоростей фильтрации достаточно велики и сопоставимы по величине вне зависимости от высоты налива осадка и сезонности его образования. В дальнейшем, по мере уплотнения осадка, скорость фильтрации заметно снижается, причем тем интенсивнее, чем больше высота его налива. Объяснить данную закономерность можно с двух позиций. Во-первых, по мере увеличения слоя осадка над загрузкой, а также его уплотнения,

возрастает сопротивление осадка фильтрованию воды, что является следствием возрастания плотности структуры за счет сжатия поровых пространств. Во-вторых, опираясь на классическую теорию фильтрования суспензий профессоров Д.М. Минца и С.А. Шуберта [92], нельзя ни учесть влияния изменений, происходящих в слое фильтра (дренажа) при повышении на него нагрузки: частицы взвеси, накапливающиеся в песчаном слое, уменьшают объем пор, увеличивают гидравлическое сопротивление и, как результат, приводят к росту потерь напора. Частицы осадка не только постепенно покрывают поверхность зерен фильтрующей загрузки, но и, разрастаясь, соединяются между собой, образуя «мертвые зоны», исключая движение воды в этой области.

Потеря напора (H) в толще загрузки может быть вычислена по формуле, предлагаемой в [92]:

$$H = i_0 \sum_{n=1}^n \frac{\Delta x}{\left(1 - A \frac{\rho}{\rho_{\text{пр}}}\right)^3}, \quad (3.12)$$

где i_0 – потери напора на единицу длины в начальный момент фильтрования;

n – объем загрузки;

Δx – толщина слоя загрузки;

A – предельно возможная насыщенность порового пространства отложениями;

ρ , $\rho_{\text{пр}}$ – плотность насыщения (массовое количество осадка в единице зернистого слоя) и предельная плотность насыщения соответственно.

Наличие связанной воды в дисперсной структуре осадка значительно осложняет процесс фильтрации в нем воды. Свободная фильтрация в данном случае может происходить лишь в части пор, не занятых связанной водой, путем вытеснения свободной воды к нижележащим слоям (дренажу). Осадок, образованный в период интенсивного цветения воды, наиболее обводнен и содержит в своем составе связанную воду, это не могло не сказаться на его удельном сопротивлении фильтрации. Именно поэтому процесс фильтрации надосадочной воды из осадка, образованного за август-сентябрь, носит более затяжной характер (рисунок 3.10).

Поскольку целью проводимого этапа исследований явилось установление значимости роли дренажа в вопросе обезвоживания осадка при различной концентрации в нем твердого вещества, аналогичная серия опытов по фильтрации влаги выполнена с осадком неразбавленным, т.е. при уровне концентрации твердой фазы, присущем ему в отстойнике (приложение А). Кинетика фильтрации такого осадка несколько отличается от вышеописанной: образования надосадочной воды практически не происходит (вне зависимости от высоты налива осадка), скорость фильтрации мала и не превышает 0,01 см/мин. Процесс дренирования занимает около 1-2 сут, за которые объем весеннего осадка сокращается на 4,0-6,33%, осадка, образованного за август-сентябрь, – на 3,6-5,0%, что составляет снижение влажности на 0,31-0,55 % и 0,28-0,39 % соответственно.

3.2.2.2 Фильтрация влаги из кондиционированного осадка

Для изучения влияния предварительной реагентной обработки осадка на процесс фильтрации влаги из его состава, как и в серии экспериментов по вторичному уплотнению, были применены флокулянты (группы ПАА) и известь. Поскольку в опытных исследованиях, описанных в подразделе 3.1.3 настоящей работы, наилучшие результаты при вторичном уплотнении осадка были получены с использованием катионных ПАА, решено было протестировать их и для возможной интенсификации процесса дренирования.

Опыты по разделению шлама на осадок и жидкость методом дренирования в присутствии флокулянта выполнялись на установке, основу которой составляет штатив Бунзена (рисунок 3.11).

Осадок с известной концентрацией твердой фазы в количестве 500 мл заливался в стеклянный мерный цилиндр, где производилось его смешение с определенной дозой реагента при градиенте скорости $G = 100 \text{ с}^{-1}$ в течение 3 мин. Затем проба выливалась в воронку с сеткой (с размером ячеек 600 мкм на основании рекомендаций [7]), и включался секундомер, по которому

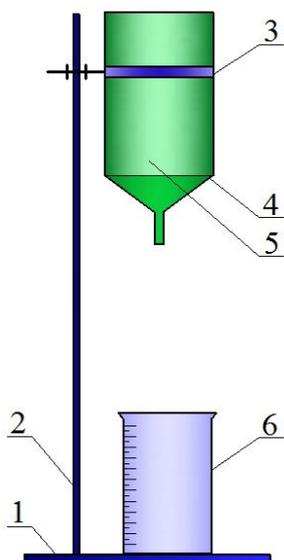


Рисунок 3.11 – Установка для определения скорости свободного дренажа
1-основание; 2-стойка; 3-кольцо с держателем; 4-направляющая воронка; 5-воронка со съемной сеткой; 6-мерный стакан

фиксировалось время достижения выделенного фильтрата определенного объема. Полученные данные использовались для построения кривых водоотдачи.

Лабораторные исследования по изучению воздействия предварительной флокуляционной обработки на кинетику фильтрации жидкой фазы из структуры осадка подразделялись на 3 основных этапа: на первом – оценивалась фильтрующая способность осадка (по расходу воды, отделяющейся в мерный стакан) в процессе дренирования; на втором этапе исследования фиксировалась компактность слоя сфлокулированного и дренированного осадка, а также возможная его склонность к забиванию сетки; на третьем – изучалось качество фильтрата, а именно его мутность и цветность (описан в разделе 3.3).

На рисунке 3.12 (а, б) отображена кинетика фильтрации влаги из осадка, разбавленного водой питьевого качества до концентрации твердой фазы 82 г/дм^3 , в присутствии катионных ПАА Нитрофлок средней (К1525) и высокой (К1547) молекулярной массы. Осадок для данных экспериментальных исследований образован за зимний период (с ноября по март).

Анализируя представленные графические характеристики можно обозначить общую для всех флокулянтов зависимость: скорость фильтрации воды из осадка, необработанного реагентами, уменьшается значительно быстрее в сравнении со скоростью фильтрации воды из объема кондиционированного осадка при прочих равных условиях. Во всех экспериментах по завершении фильтрации воды сгущенный осадок, сформировавшийся на фильтровальной сетке, легко отделялся от ее поверхности с четкими структурными границами, коагуляции порового пространства не наблюдалось. Однако, кондиционированный осадок обладал меньшей текучестью.

Флокулянт Нитрофлок К1525 (со средней молекулярной массой) оптимальной дозой 0,024 % по м.с.в. позволяет сократить время фильтрации воды из осадка в 1,5 раза (на 36 %). Полиэлектролит Нитрофлок К1547 (с высокой молекулярной массой) обеспечил несколько лучший эффект: продолжительность фильтрации сокращается в 1,6 раза (на 38 %) при оптимальной дозе 0,018 % по м.с.в. осадка.

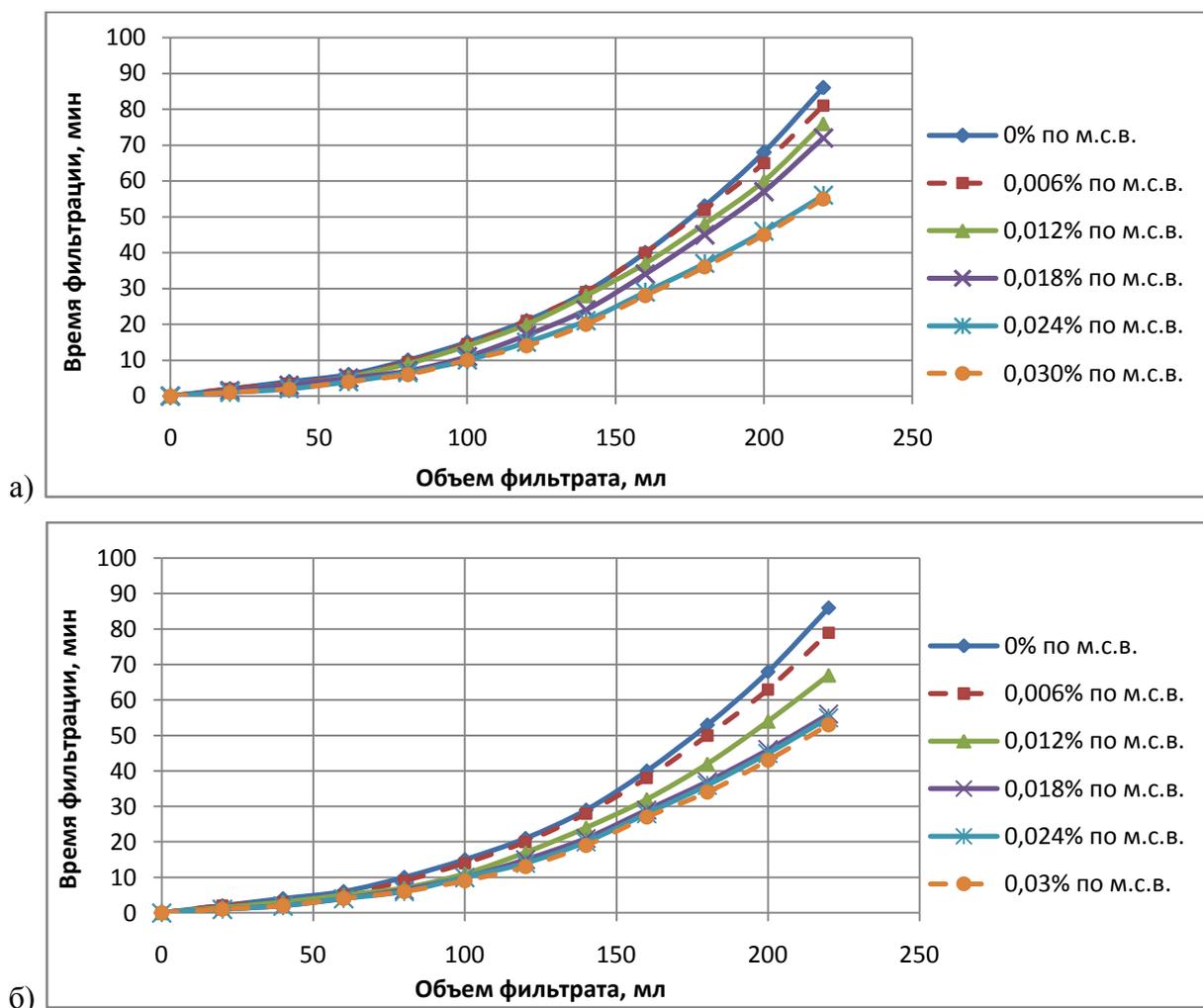


Рисунок 3.12 – Кинетика фильтрации влаги из осадка концентрацией твердой фазы 82 г/дм^3 в присутствии различных доз флокулянта (% безводного реагента по м.с.в. осадка): а – средней молекулярной массы (K1525); б – высокой молекулярной массы (K1547)

Экспериментальные исследования по изучению влияния извести на процесс дренирования проводились с осадком исходной концентрацией твердой фазы около 77 г/дм^3 (дополнительно не разбавленным водой). Опыты проведены как с осадком, образованным весной, так и с осадком, образованным в летне-осенний

период при равной продолжительности работы отстойников между промывками (рисунок 3.13).

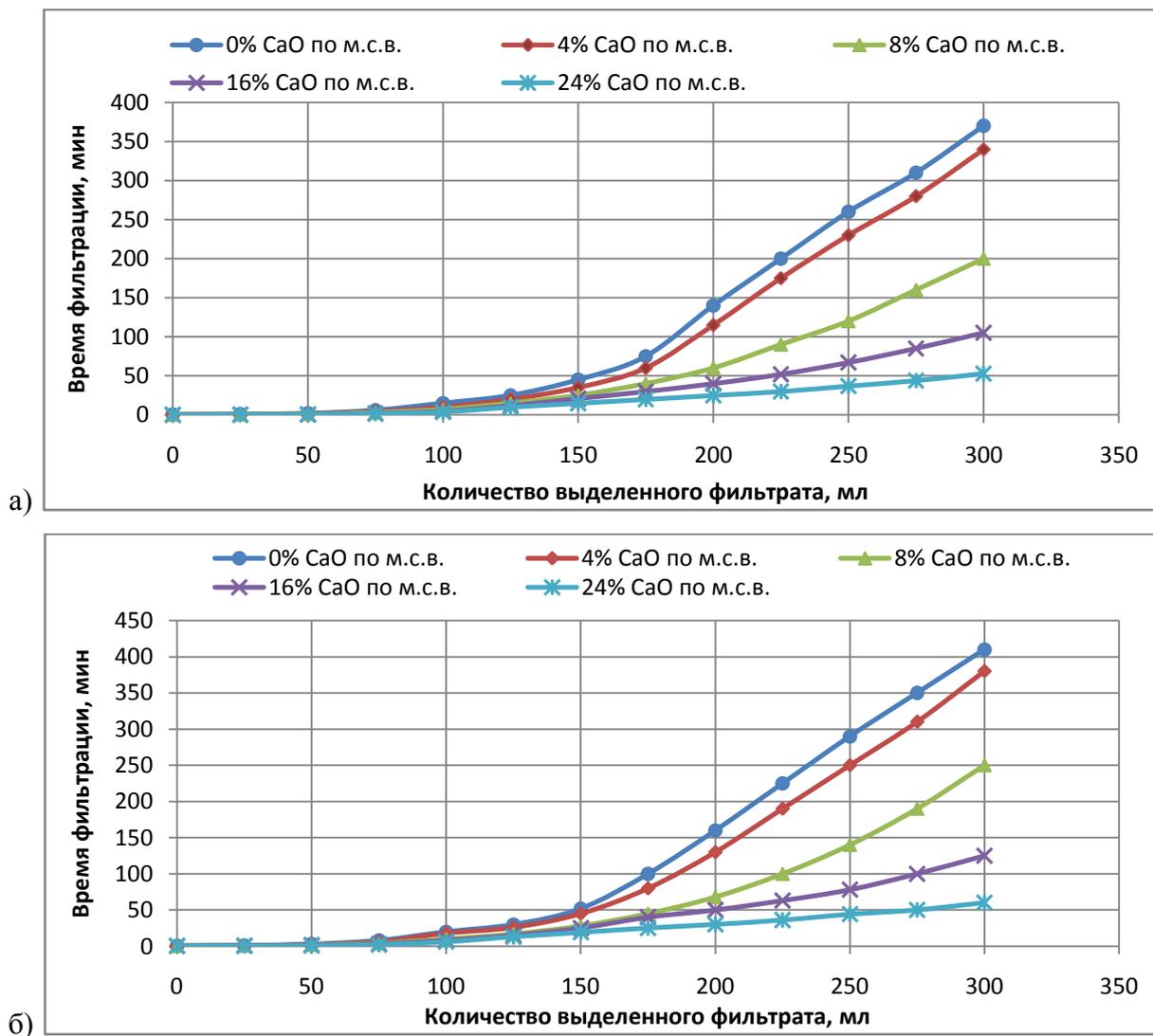


Рисунок 3.13 – Кинетика фильтрации влаги из осадка концентрацией твердой фазы 77 г/дм^3 , обработанного различными дозами извести: а – осадок образован весной; б – осадок образован в летне-осенний период

Графические зависимости количества выделенного фильтрата от времени при различной дозе извести наглядно демонстрируют увеличение скорости фильтрации с ростом содержания CaO в объеме осадка. Так, продолжительность отделения воды из объема осадка, образованного весной (рисунок 3.13 а) при введении извести можно сократить: в 1,1 раза (на 8 %) – при дозе CaO=4 % по м.с.в. осадка; в 1,9 раза (на 46 %) – при дозе CaO=8 % по м.с.в. осадка; в 3,5 раза (на 72 %) – при дозе CaO=16 % по м.с.в. осадка; в 7,0 раз (на 86 %) – при дозе CaO=24 % по м.с.в. осадка.

Подобная тенденция наблюдается и в экспериментах, проведенных с летне-осенним осадком (рисунок 3.13 б). Время фильтрации воды из объема осадка в зависимости от применяемой дозы извести можно сократить: в 1,1 раза (на 8 %) – при дозе СаО=4 % по м.с.в.; в 1,6 раза (на 39 %) – при дозе СаО=8 % по м.с.в.; в 3,3 раза (на 70 %) – при дозе СаО=16 % по м.с.в.; в 7,0 раз (на 86 %) – при дозе СаО=24 % по м.с.в.

Установлено, что введение извести для интенсификации фильтрации влаги из осадка способствует повышению проницаемости (фильтруемости) осадка ввиду увеличения минеральной составляющей, в качестве которой и выступает данная добавка. Это подтверждается увеличением количества фильтрата за единицу времени с повышением дозы СаО (при равной исходной концентрации твердой фазы осадка).

В итоге проведенных лабораторных исследований по изучению фильтрации влаги, содержащейся в осадке отстойных сооружений ВОС г.Ростова-на-Дону, можно сделать вывод о том, что в целом данный осадок без предварительной реагентной обработки обладает достаточно приемлемыми фильтрующими свойствами и при завершении процесса дренирования легко отделяется от сетки в случае выбора ее в качестве фильтрующей перегородки, не вызывая кольматации. Застой надосадочной воды (прекращение фильтрации воды в результате высокого сопротивления осадка до ее выравнивания с границей поверхности уплотненного слоя твердой фазы) при высоте налива осадка на фильтрующую поверхность до 50 см, не наблюдался. Обработка осадка известью или катионными флокулянтами способна сократить время отделения воды в 7 и 1,6 раза соответственно, что обеспечивается определенной дозой химического агента.

Флокулянты (катионные ПАА) в вопросе интенсификации фильтрации воды из состава осадка проявили меньшую эффективность в сравнении с известью (дозой более 8 % по м.с.в. осадка). Однако, ввиду перехода большей части извести в дополнительные твердые вещества в составе осадка и значительного увеличения его рН и щелочности, применение повышенных доз СаО неэкономично, поскольку стоимость такой обработки включает не только затраты на

приобретение самой извести, но также и значительные дополнительные расходы по утилизации большего объема твердых высокощелочных отходов.

Проанализировав экспериментальные исследования по изучению процесса фильтрации воды в слое постепенно уплотняющегося осадка, можно предопределить значительное увеличение общего времени обезвоживания осадка в естественных условиях в случае, если предварительное его сгущение не предусмотрено. К тому же, выпуск на площадки неуплотненного шлама неизбежно повлечет за собой увеличение площади занимаемой территории и высоты оградительных стенок сооружения. Дренаживание является весьма эффективным способом удаления из осадка не только воды разбавления (свободной), но и структурной влаги (физико-механически связанной), что способствует сокращению его исходного (до разбавления) объема на 4- 9 %.

3.2.2.3 Удаление влаги из осадка капиллярным поглощением

Помимо стереотипных факторов, способствующих отделению воды из осадка в естественных условиях, таких как испарение, унос с ветром, промораживание, фильтрация в дренажную систему, возник вопрос о возможности применения в данном направлении такого явления как капиллярный перенос влаги из осадка во внешний твердый элемент, обладающий характеристиками капиллярно-пористого материала [99]. Это позволило бы обеспечить дополнительные поверхности испарения содержащейся в осадке воды, поскольку согласно теории академика А.В. Лыкова [69], сушка капиллярно-пористых тел происходит непосредственно за счет испарения жидкости как с поверхности менисков, так и со стенок капилляров (рисунок 3.14).

Поднятие жидкости по капиллярам обусловлено дефицитом давления, которое, в свою очередь, возникает вследствие вогнутости мениска. Поверхность жидкости принимает вогнутую форму за счет сил притяжения между молекулами твердого вещества и воды (в результате смачивания жидкости стенок капилляра).

Силы поверхностного натяжения воды стремятся сократить поверхность раздела и придать ограниченному объему воды форму шара, при которой заданный объем имеет минимальную поверхность. Поправкой в данном случае является величина объема воды (радиус капилляра), поскольку при больших его значениях капиллярный потенциал уравнивается силой тяжести, и образования мениска не наблюдается. При капиллярном поднятии капиллярное давление (D_p) отрицательно, так как давление на уровне свободной поверхности жидкости (p_2) превышает давление в жидкости под вогнутой поверхностью мениска (p_1), и выражается уравнением Лапласа:

$$D_p = p_1 - p_2 = -\frac{2\sigma}{r_0}, \quad (3.13)$$

где σ – сила поверхностного (межфазного) натяжения;

r_0 – радиус капилляра.

По мере увеличения высоты столбика жидкости (h) в капилляре радиус кривизны (r_0) мениска возрастает (кривизна уменьшается). Жидкость будет всасываться в капилляр до тех пор, пока вес столба жидкости не уравнивает перепад давления. В состоянии равновесия высота капиллярного поднятия определяется формулой Жюрена:

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_0 \rho g}, \quad (3.14)$$

где θ – угол смачивания жидкостью стенки капилляра;

ρ – разность между плотностью жидкости и плотностью газовой фазы;

g – ускорение силы тяжести.

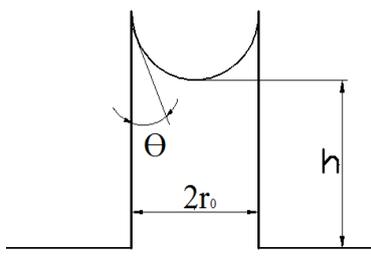


Рисунок 3.14 – Схема поднятия воды по элементарному капилляру

На высоту и скорость поднятия воды в капиллярно-пористых материалах оказывают влияние многие факторы, к основным из которых можно отнести следующее [69]:

– гранулометрический состав капиллярной среды, поскольку именно он определяет размер капилляров (чем больше радиус капилляра, тем меньше высота капиллярного поднятия);

- степень начального увлажнения капилляра, так как известно, что вода лучше всего взаимодействует именно с водой (высота капиллярного поднятия в увлажненной среде значительно больше);
- наличие структурно-защемленного воздуха (чем его больше, тем капиллярный эффект слабее);
- количество диспергирующих катионов в капиллярно-пористой среде, способствующих преобразованию крупных пор в капиллярные и, как результат, увеличению скорости и высоты капиллярного всасывания;
- количество химически связанной воды в капиллярно-пористом материале, препятствующей поднятию мениска.

Следует отметить нестандартность самого способа обезвоживания осадка с использованием капиллярного всасывания, поскольку он основан на процессе извлечения влаги внешним твердым элементом, в отличие от остальных известных методов обработки в естественных или искусственных условиях, ориентированных на воздействие температурой (замораживание, сушка) или давлением (фильтр-прессование, вакуумное фильтрование, центрифугирование).

В результате ранее проведенной под руководством профессора Лысова В.А. научной работы в качестве капиллярно-пористых материалов, являющихся своеобразным «приемником» влаги, содержащейся в водопроводном осадке, были опробованы хлопковые ткани и древесина [100]. При дальнейшем продолжении исследований по обезвоживанию водопроводного осадка методом капиллярного влагопоглощения в рамках настоящей диссертационной работы было решено изучить целесообразность использования в этом направлении бетона. Для экспериментальных исследований были подготовлены призмы, выполненные из бетона средней плотности с мелкозернистым заполнителем (природным кварцевым песком с модулем крупности от 2,0 до 2,5) естественного твердения. Цементно-песчаное отношение Ц:П образцов принято различным (Ц:П = 1:4, 1:3, 1:2, 1:1) для установления наиболее приемлемого состава. Площадь сечения и высота бетонных призм также варьировались с целью осуществления расчета минимально необходимого объема капиллярно-пористого материала для

приемлемого эффекта обезвоживания осадка. Водоцементное отношение (В:Ц) всех испытуемых образцов принималось в пределах от 0,4 до 0,5.

Эффективность капиллярного поднятия влаги в бетоне оценивалась на установке, представленной на рисунке 3.15.

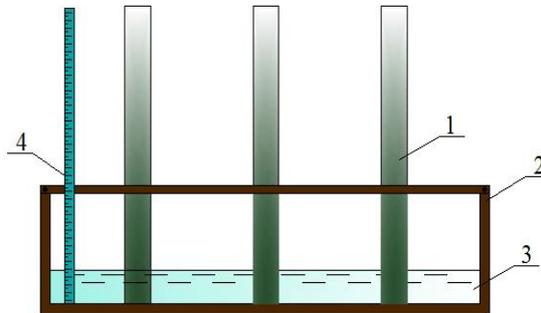


Рисунок 3.15 – Установка для определения высоты поднятия воды в капиллярно-пористом материале (бетоне)

1 – бетонные образцы-балочки; 2 – опорный корпус; 3 – емкость для воды; 4 – мерная линейка

В емкость (3), наполненную водой на 4-5 см одним из концов устанавливались бетонные элементы, поддерживаемые опорной конструкцией (2). Через определенные промежутки времени по оттенку поверхности бетона, меняющемуся вследствие поглощения воды, фиксировалась высота ее поднятия при помощи мерной шкалы (4). Замеры высоты производились от поверхности воды на трех образцах для получения наиболее точного результата. Уровень воды в емкости для воды (3) поддерживался постоянным на протяжении первых 12 ч с начала испытания. Статистически обработанные результаты замеров представлены в таблице 3.2.

По прочностным характеристикам и значениям высоты капиллярного поднятия (всасывания) наиболее подходящим выбран состав бетонной смеси при отношении Ц:П=1:3 (таблица 3.2). Данный образец явился «золотой серединой», поскольку повышенное содержание вяжущего (цемента), увеличивая прочность изделия, способствует образованию ультракапиллярных пор, негативно влияющих на подъем влаги в материале, а слишком низкое его количество – низкой прочности, не отвечающей требованиям, предъявляемым к бетонам для гидротехнического строительства.

Таблица 3.2 – Результаты эффективности капиллярного поднятия влаги в бетоне различного состава

Время от начала опыта	Образец №1 (Ц:П=1:1)			Образец №2 (Ц:П=1:2)			Образец №3 (Ц:П=1:3)			Образец №4 (Ц:П=1:4)		
	Средняя высота капиллярного поднятия, мм	Средняя скорость капиллярного поднятия, мм/мин	Прочность бетона на сжатие, кгс/см ²	Средняя высота капиллярного поднятия, мм	Средняя скорость капиллярного поднятия, мм/мин	Прочность бетона на сжатие, кгс/см ²	Средняя высота капиллярного поднятия, мм	Средняя скорость капиллярного поднятия, мм/мин	Прочность бетона на сжатие, кгс/см ²	Средняя высота капиллярного поднятия, мм	Средняя скорость капиллярного поднятия, мм/мин	Прочность бетона на сжатие, кгс/см ²
5 мин	15	3	250	20	4	220	35	7	190	40	8	110
10 мин	30	3		50	6		90	11		120	16	
20 мин	50	2		80	3		120	3		160	4	
30 мин	60	1		100	2		150	3		185	2,5	
1,0 ч	70	0,3		120	0,7		170	0,7		200	0,5	
1,5 ч	80	0,3		125	0,2		180	0,3		210	0,3	
2,0 ч	85	0,2		130	0,2		185	0,2		215	0,2	
3,0 ч	90	0,1		140	0,2		190	0,1		220	0,01	
1 сут	110	0,02		150	0,01		200	0,01		240	0,02	

Согласно государственным стандартам [101–103] были определены основные характеристики (свойства) бетона с отношением Ц:П=1:3 (как наиболее приемлемого состава для применения в вопросе обезвоживания осадка методом капиллярного поднятия): плотность составила 1,88 г/см³; водопоглощение – 10,32 %; пористость – 25,88 %.

Для получения данных об эффективности капиллярного поглощения влаги бетонным элементом из осадка, а также о зоне влияния капиллярно-пористого материала, в рамках данной работы разработана простая установка (рисунок 3.16). В емкость с постоянной по высоте площадью сечения заливался осадок известной влажности. В центре устанавливался бетонный элемент призматической формы размерами $a \times b \times h$ (a –длина, b –ширина, h –высота, причем $a=b$). В целях исключения влияния испарения влаги с поверхности осадка, он покрывался воздухонепроницаемой полиэтиленовой пленкой. Спустя сутки, т.е. к моменту

достижения влагой максимально возможной высоты поднятия в бетонном элементе, из трех точек (№1, 2, 3) с равномерным по высоте слоя количеством отбираемого осадка были получены пробы для определения его влажности на расстоянии b , $2b$, $3b$, $4b$ от граней капиллярно-пористого элемента (призмы). Для установления количества влаги, которая может быть удалена из состава осадка посредством капиллярного поднятия, опытные исследования были проведены при различном его влагосодержании. С этой целью осадок исходной влажностью 85 % был разбавлен водой до влажности 87-95 %.

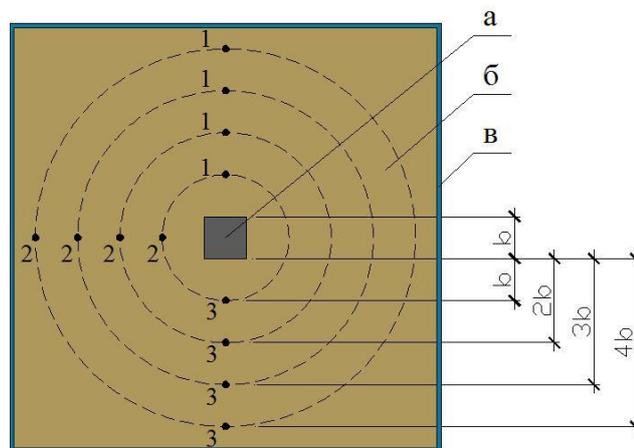


Рисунок 3.16 – Схема экспериментальной установки для определения радиуса влияния капиллярно-пористого материала на влажность осадка

а – капиллярно-пористый элемент; б – осадок; в – емкость; 1, 2, 3 – точки отбора проб осадка

На основании результатов проведенных испытаний, представленных в таблице 3.3, можно утверждать, что эффективная зона влияния капиллярно-пористого материала составляет $2b$ (b – размер грани бетонной призмы). Причем количество воды, переместившейся в пространство капилляров бетона находится в прямой зависимости от начальной влажности осадка. Так, при исходной влажности осадка около 95 % влагосодержание области слоя в радиусе $2b$ снижается на 9 %, при 93 % – на 7÷6 %, при 91 % – на 5%, при 89 % – менее чем на 3 %, а при влажности ниже 87 % снижение составляет менее 1 %. Количество влаги, поглощенной капиллярами бетона, заметно снижается при понижении исходной влажности осадка, поскольку вода, удерживаемая в его составе химической связью, а также адсорбционная и осмотическая влага не участвуют в капиллярном движении.

Таблица 3.3 – Влияние капиллярно-пористого материала на снижение влагосодержания осадка (исходная влажность осадка 85 %, разбавлен водой до влажности 87-95 %)

№ опыта	Исходная (средняя) влажность осадка, %	Расстояние точки отбора от капиллярно-пористого элемента	Влажность осадка в точке №			Средняя влажность осадка в радиусе, %
			1	2	3	
1	95,06	<i>b</i>	85,32	86,12	85,89	85,78
		<i>2b</i>	86,26	85,88	86,14	86,09
		<i>3b</i>	93,26	92,14	92,45	92,62
		<i>4b</i>	94,21	95,18	94,49	94,63
2	93,10	<i>b</i>	85,84	85,02	86,13	85,66
		<i>2b</i>	86,27	85,98	86,14	86,13
		<i>3b</i>	92,26	92,88	93,30	92,81
		<i>4b</i>	91,76	92,28	92,97	92,34
3	91,04	<i>b</i>	86,83	85,14	86,02	86,00
		<i>2b</i>	86,34	87,45	86,29	86,69
		<i>3b</i>	90,56	91,12	90,48	90,72
		<i>4b</i>	90,92	89,49	91,02	90,48
4	89,15	<i>b</i>	87,13	87,41	86,23	86,93
		<i>2b</i>	87,44	87,56	88,31	87,77
		<i>3b</i>	89,53	88,49	89,15	89,06
		<i>4b</i>	89,06	89,04	88,93	89,01
5	87,05	<i>b</i>	86,12	86,95	85,49	86,19
		<i>2b</i>	87,04	86,05	86,75	86,61
		<i>3b</i>	87,28	87,04	87,13	87,15
		<i>4b</i>	86,41	87,23	87,40	87,01
6	85,21	<i>b</i>	84,32	83,11	84,27	83,90
		<i>2b</i>	84,30	85,05	84,11	84,49
		<i>3b</i>	84,82	84,74	85,24	84,95
		<i>4b</i>	85,31	84,97	85,18	85,15

Несколько иная ситуация наблюдается с капиллярным поглощением влаги из осадка, содержащего большое количество структурно заземленной влаги (связанной). В таблице 3.4 представлены результаты исследований с осадком,

имеющим высокую исходную влажность (89-95 %) без дополнительного его разбавления водой.

Таблица 3.4 – Влияние капиллярно-пористого материала на снижение влагосодержания осадка (исходная влажность осадка 89-95 %, не разбавлен водой)

№ опыта	Исходная (средняя) влажность осадка, %	Расстояние точки отбора от капиллярно-пористого элемента	Влажность осадка в точке №			Средняя влажность осадка в радиусе, %
			1	2	3	
1	95,02	<i>b</i>	93,65	93,12	93,89	93,55
		<i>2b</i>	93,36	93,01	93,21	93,19
		<i>3b</i>	94,19	94,85	94,07	94,37
		<i>4b</i>	94,37	94,13	94,06	94,19
2	93,07	<i>b</i>	91,86	91,04	90,98	91,29
		<i>2b</i>	91,94	92,02	91,85	91,94
		<i>3b</i>	92,56	92,97	92,75	92,76
		<i>4b</i>	93,11	93,05	92,97	93,04
3	91,40	<i>b</i>	90,11	90,25	90,08	90,15
		<i>2b</i>	90,05	90,13	90,57	90,25
		<i>3b</i>	91,09	91,31	91,55	91,31
		<i>4b</i>	90,89	91,54	91,03	91,15
4	89,00	<i>b</i>	88,47	88,61	88,39	88,49
		<i>2b</i>	88,59	88,43	88,54	88,52
		<i>3b</i>	88,91	88,84	88,69	88,81
		<i>4b</i>	88,98	89,05	88,79	88,94

Результаты экспериментов, представленные в таблице 3.4, доказывают снижение эффекта капиллярного поднятия влаги при обезвоживании осадка, содержащего структурно-защемленную воду, удаление которой не обеспечивается вторичным уплотнением.

Экспериментальными исследованиями процесса обезвоживания осадка методом капиллярного всасывания установлено, что количество, размеры и расположение капиллярно-пористых элементов по площади иловой площадки необходимо назначать, руководствуясь следующими условиями:

– радиус влияния капиллярно-пористого материала на влажность осадка равняется удвоенной ширине прямоугольного сечения (удвоенному диаметру круглого) элемента (таблицы 3.3, 3.4). Однако, размер элементов и их конфигурация должны быть обоснованы с точки зрения конструкции и возможного «полезного» объема материала, участвующего в капиллярном поднятии влаги. Так, нет смысла назначать ширину (диаметр) капиллярного элемента в плане более 400 мм;

– отношение суммарной площади сечений капиллярно-пористых элементов плоскостью, параллельной основанию площадки, к площади поверхности обезвоживаемого осадка должно быть не менее 0,04 (рисунок 3.17, формула 3.15);

– наиболее эффективное капиллярное влагопоглощение из осадка наблюдается при наибольшем смоченном периметре (линии поверхности соприкосновения с осадком) капиллярно-пористого материала при прочих равных условиях.

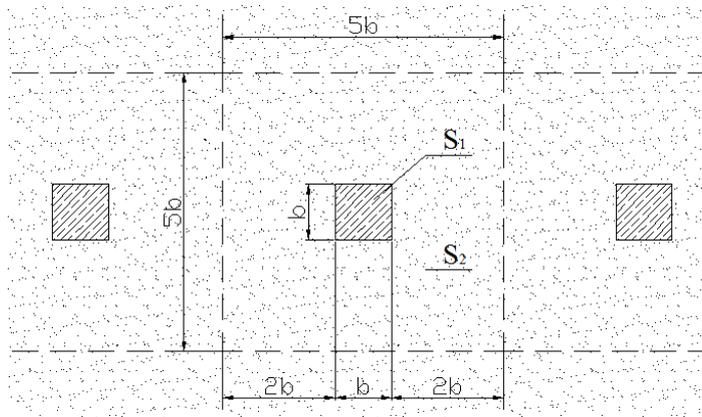


Рисунок 3.17 – Схема расположения капиллярно-пористых элементов на иловой площадке для расчета их минимально требуемого количества

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{b^2}{24b^2} = 0,042, \quad (3.15)$$

где S_1 - площадь сечения капиллярно-пористого элемента плоскостью параллельной основанию площадки;

S_2 - площадь зоны иловой площадки в области действия капиллярно-пористого элемента;

b – размер грани капиллярно-пористого элемента.

3.2.2.4 Испарение влаги из осадка

После предельно возможного отделения воды из состава осадка методами дренирования, а также капиллярного всасывания, остается завершающий этап его обезвоживания – сушка на открытом воздухе. Успешное осуществление данного процесса позволяет получить кек с минимальным содержанием влаги, подлежащий дальнейшей утилизации.

Под кинетикой процесса сушки осадка понимается закономерность снижения его влагосодержания с течением времени. При этом изменение уровня влажности и температуры для любого влажного тела согласно [69] зависит от взаимосвязи процессов переноса тепла и влаги как внутри самого тела, так и на границе его поверхности с окружающим воздухом.

В качестве факторов, влияющих на скорость изменения влагосодержания осадка в процессе сушки на открытом воздухе можно рассматривать внешние (неуправляемые) – условия окружающей среды (дефицит влажности, скорость ветра) и внутренние (управляемые) – исходная влажность осадка, определяемая степенью его уплотнения перед выпуском на сооружения для обезвоживания, высота напуска осадка на обезвоживающую площадку.

Академик А.В. Лыков [69] весь процесс сушки (после периода прогрева материала) разделил на два этапа: период постоянной скорости снижения влагосодержания (температура материала постоянна) и период падающей скорости (температура материала переменна). В начале сушки влагосодержание материала уменьшается с течением времени по линейному закону (кривая сушки приближена к прямой линии): скорость сушки и температура поверхности материала будут постоянными величинами. На последующем этапе материал достигает некоторого значения величины влагосодержания (критического), начиная с которого температура его поверхности увеличивается с течением времени, а скорость обезвоживания снижается (кривая сушки из прямой линии переходит в кривую, асимптотически приближающуюся к равновесному

влажностному). Равновесным влагосодержанием академик А.В. Лыков считает момент, когда температура центра вещества равна температуре его поверхности (температурный градиент равен нулю). При достижении равновесного влагосодержания дальнейшего снижения влажности материала не наблюдается.

Для изучения характера протекания процесса сушки водопроводного осадка на открытом воздухе под воздействием природных факторов была подготовлена модель обезвоживающей установки, основной принцип устройства которой представлен на рисунке 3.18.

Наблюдения за обезвоживанием осадка на модели площадки обезвоживания проводились при различной высоте его налива и при воздействии различных погодных условий. Обезвоживанию подвергался предварительно уплотненный осадок, поскольку ранее проведенные практические испытания предоставили исчерпывающую информацию о скорости и эффективности процессов сгущения осадка методами гравитационного уплотнения и дренирования, а также капиллярного поглощения влаги из осадка.

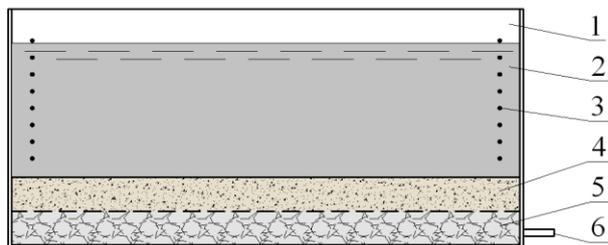


Рисунок 3.18 – Модель осадкообезвоживающей площадки

1 – пластиковая емкость с постоянной по высоте площадью сечения; 2 – слой осадка; 3 – отверстия для выпуска надосадочной воды с эластичной заделкой; 4 – верхний дренажный слой (песок, дресва); 5 – нижний дренажный слой (гравий); 6 – патрубок отвода фильтрата

Высота напуска уплотненного осадка на обезвоживающую площадку была определена на основании предварительно проведенных экспериментов, а также исходя из соображений исключения завышенной площади территории, отводимой для размещения осадка (не менее 20 см) и недопущения низкой эффективности подсушивания придонных слоев осадка, вызванной повышением высоты обрабатываемого слоя (не более 40 см).

Для изучения кинетики подсушивания водопроводного осадка при различной высоте его разового налива (20, 30, 40 см) были одновременно задействованы три идентичные модели осадкообезвоживающих площадок, размещенные на открытой местности, не исключаяющей воздействия прямых солнечных лучей, ветра и атмосферных осадков. По данным параллельных проб осадка определялось среднее значение контролируемых параметров. Следует отметить, что в ходе исследований выявилась необходимость организации своевременного удаления атмосферной воды с поверхности осадка ввиду значительного увеличения продолжительности процесса его обезвоживания в случае невыполнения данного мероприятия.

Процесс сушки осадка на открытом воздухе обуславливается переносом влаги (как в жидкой, так и газообразной форме) от нижележащих слоев к поверхностным, а затем с поверхности в окружающую среду. Интенсивность протекания данного процесса определяется формами связи воды с твердой фазой, именно поэтому в научной литературе [69, 104, 105] процесс сушки рассматривается как физико-химический.

На рисунке Б.1 (а-в) приложения Б графически представлена кинетика снижения влажности осадка, подсушиваемого на открытом воздухе в весенне-летний период при различной высоте разового налива – 20, 30 и 40 см соответственно. Гистограммы, отображающие поэтапное снижение высоты слоя обезвоживаемого осадка, разделены на части, несущие в себе информацию о его влажности в конкретный момент времени в поверхностном, центральном и глубинном слоях. Ввиду сложности условного деления на зоны обезвоживаемого слоя осадка в завершении процесса сушки пробы отбирались с двух точек – поверхностной и придонной.

В качестве климатического фактора, определяющего интенсивность испарения влаги, на графике представлены посуточные значения дефицита влажности воздуха, вычисленные по результатам значений температуры и относительной влажности воздуха.

Данные, представленные на рисунке Б.1 (а-в) приложения Б, наглядно демонстрируют различия в интенсивности сушки в зависимости от начальной высоты слоя осадка на площадке обезвоживания (рисунок 3.18). Так, при высоте 20 см (приложение Б, рисунок Б.1а) процесс подсушивания весьма скоротечен: спустя 42 сут обезвоживаемый осадок достигает по всей высоте значений влажности, равных 30 %, при этом высота слоя кека составляет 5,5 см, что соответствует снижению объема почти в 4 раза. Процесс сушки осадка при высоте напуска 30 см (приложение Б, рисунок Б.1б) более продолжителен: поверхностный слой достиг 30 %-ой влажности на 42 сут, а придонный – спустя более двух месяцев (66 сут), высота кека при этом составила 8,5 см, что соответствует сокращению объема более чем в 3,5 раза в сравнении с начальным. Наиболее затяжной характер снижения влагосодержания наблюдается при высоте слоя разового налива осадка 40 см (приложение Б, рисунок Б.1в). Первые 6-8 сут высота слоя обезвоживаемого осадка и влажность (центральных и глубинных слоев) остаются практически неизменными. Возможным объяснением данного явления может стать более длительный период прогрева материала для обеспечения дальнейших влаго- и теплопереноса. Величины влажности поверхностного и центрального слоев осадка несколько превышают соответствующие значения в первых двух случаях (приложение Б, рисунок Б.1 а-б), что является результатом диффузного переноса влаги из наиболее влагосодержащего нижнего слоя. Таким образом, влажность поверхности обезвоживаемого осадка достигает значения 30 % спустя 54 сут, центральные слои – за 66 сут, а глубинному требуется более 72 сут.

Поскольку водопроводный осадок с физико-химической точки зрения относится к капиллярно-пористым веществам, уместно говорить не о поверхности испарения, а о зоне испарения. Понятие «зона испарения» было впервые упомянуто американским химиком-технологом Томасом Шервудом [104], экспериментальные исследования которого доказали, что при достижении телом определенного уровня влажности поверхность испарения постепенно углубляется внутрь тела с возрастающей интенсивностью. Данное явление и объясняет

снижение влагосодержания придонных слоев осадка, не имеющих непосредственного контакта с атмосферой, при сохранении целостности слоя (отсутствии трещин).

Следует также отметить, что образования плотной корки на поверхности подсушиваемого осадка, о возможном формировании которой при обезвоживании осадка природных вод на открытой местности сообщается в [3], на протяжении всех экспериментов не зафиксировано. Можно предположить, что избежать данного негативного явления удалось созданием определенных исходных условий: предварительное уплотнение осадка, в результате которого его концентрация твердой фазы была весьма высока и однородна по высоте слоя; приемлемая высота налива осадка (не более 40 см). Все это способствовало полному и равномерному прогреву всего слоя осадка, исключая высокий температурный перепад по высоте обрабатываемого слоя, который, в свою очередь, мог усложнить процесс сушки ввиду возникновения термодиффузии, под воздействием которой капиллярная и адсорбционная влага стремятся проникнуть внутрь тела по направлению потока тепла.

Процесс усадки осадка при высоте его налива около 40 см занимает более длительный период в сравнении с результатами, характерными при меньшей высоте напуска. Причиной является более высокий градиент влагосодержания в слое обезвоживаемого осадка. Несмотря на то, что в периоде падающей скорости сушки величина влажности поверхностного слоя осадка уже составила менее 30 %, а влажность центрального слоя приблизилась к данной величине, влагосодержание глубинного слоя остается достаточно высоким, что препятствует сжатию всего кека по высоте и, как следствие, сокращает общую усадку.

Характеризуя процесс сушки водопроводного осадка в условиях положительных температур, нельзя не упомянуть о трещинообразовании. По результатам наблюдений можно утверждать, что растрескиванию подвергается слой осадка, влажность которого составляет менее 60 % (рисунок 3.19). Глубина трещин зависит от толщины слоя осадка с необходимым уровнем снижения

влажностердержания. Академик П.А. Ребиндер [105] трещинообразование при сушке дисперсных материалов объяснил возникновением напряженных состояний в структуре, в частности, растягивающих и касательных напряжений. Возникновение трещин наблюдается на тех участках структуры обезвоживаемого материала, для которых значения напряженных состояний являются критическими (предельными).

Практические исследования показали, что образование трещин в структуре подсушиваемого осадка несет в себе как положительный, так и отрицательный аспекты. Положительный наблюдается в случае, если характер трещин сквозной (нарушена целостность всего слоя осадка). Он, как правило, наблюдается при влажности кека, не превышающей 60 % по всей высоте слоя. В данном случае трещины способствуют созданию дополнительной поверхности испарения, а также лучшей вентилируемости подсушиваемой массы осадка окружающим воздухом. При воздействии атмосферных осадков (дождя) разрушенная структура кека не создает препятствий для удаления воды в дренажную систему основания площадки. Негативные последствия трещинообразования зафиксированы при подсушивании слоя осадка высотой около 40 см. Ввиду некоторого отличия в значениях влажностердержания на протяжении достаточно длительного периода времени трещинообразованию подвержены только поверхностный слой и часть центрального, в результате чего приемником дождевых вод в данном случае



Рисунок 3.19 – Растрескивание толщи осадка, подсушиваемого в условиях положительных температур

выступает не дренажное основание площадки, а придонный слой осадка. Дождевая вода способствует увеличению влажностердержания и без того медленно подсыхающего осадка, сводя при этом к минимуму функцию вертикального дренажа (отверстий в стенке емкости (рисунок 3.18)).

Результатом трещинообразования обезвоживаемого осадка с различным уровнем влажности по высоте слоя (наряду с воздействием атмосферных осадков)

является увеличение общей продолжительности его подсушивания на открытой местности.

Серия экспериментов по наблюдению за процессом подсушивания (обезвоживания) уплотненного водопроводного осадка на открытом воздухе была проведена и в более холодный (осенний) период (приложение Б, рисунок Б.2а-в) при низком дефиците влажности воздуха. Гистограммы посуточно изменяющихся высот слоя осадка с обозначенными на них значениями влагосодержания подтверждают зависимость скорости сушки от величины исходного налива осадка на площадку, а также дефицита влажности воздуха. На фоне заметного снижения температуры и повышения относительной влажности воздуха в сравнении с погодными условиями весенне-летнего периода, процесс подсушивания замедляется, причем тем быстрее, чем больше высота обрабатываемого слоя осадка. На протяжении первых 18 сут с момента налива дефицит влажности находился в интервале 9-13 гПа, что способствовало интенсивному испарению. Однако этого оказалось недостаточно для приемлемого снижения уровня влажности осадка даже при наименьшей высоте напуска (20 см). Установившийся с середины октября низкий уровень дефицита влажности (1-4 гПа) до наступления отрицательных температур не способствовал интенсивному испарению. Таким образом, спустя 45 сут средняя по высоте слоя влажность осадка при различной начальной высоте напуска составила: при 20 см – 50,5 %; при 30 см – 64,7 %; при 40 см – 67,6 % (исходная влажность 91,1 %).

После промораживающего воздействия осадок полностью изменяет свою структуру: становится сыпучим, легко отделяет оттаявшую влагу в дренаж. Преобладающая фракция кека представлена твердыми частицами размером 0,5-4,0 мм (рисунок 3.20).

Экспериментально-теоретические исследования процесса обезвоживания водопроводного осадка на открытом воздухе, как возможного варианта получения кека предельно низкого влагосодержания, позволяют рассматривать данный метод как весьма приемлемый с учетом свойств исходного осадка, а также

природно-климатических параметров области. В качестве основных условий успешного осуществления сушки и замораживания осадка в естественных условиях на площадке обезвоживания можно обозначить:

- исходный шлам, образованный в процессе промывки отстойников, должен проходить обязательный этап разделения на жидкую и твердую фазы, после чего концентрированный (уплотненный) осадок может выпускаться на площадки, что позволит сократить на них нагрузку, снизить количество воды, подлежащей испарению, и, как результат, общую продолжительность обезвоживания;

- наибольшая высота разового напуска осадка должна рассчитываться с учетом временного интервала, отводимого на обезвоживание, таким образом,



Рисунок 3.20 – Структура осадка после воздействия отрицательных температур

чтобы к моменту необходимости последующего выпуска осадка, сухой кека мог быть удален с площадки. При выпуске осадка на площадку в холодное время года необходимо дополнительно учитывать глубину промерзания;

- воздействие атмосферных осадков негативно сказывается на продолжительности процесса обезвоживания осадка ввиду склонности кека к трещинообразованию. Поверхностный слой осадка с нарушенной целостностью структуры способствует быстрому проникновению воды в глубину слоя, исключая при этом возможность ее выхода по системе вертикального дренажа. В свою очередь глубинный слой повышенной влажности и ненарушенной структуры, обладающий достаточно высокой плотностью, становится как таковым водупором, препятствующим свободному проникновению влаги в систему дренажа основания.

Для выполнения детального расчета площадки обезвоживания осадка, необходимо определиться, какие формулы использовать при определении интенсивности испарения влаги с поверхности осадка: для периода постоянной

скорости сушки или для периода падающей скорости. С этой целью произведен расчет критического влагосодержания осадка (W_k , %), являющегося, согласно теории академика А.В. Лыкова [69], переломным значением при переходе одного периода в другой. Искомый параметр рассчитан по формуле, предлагаемой в [2] для осадка природных вод:

$$W_k = 0,6\sqrt{I_{oc} \cdot m_T}, \quad (3.16)$$

где I_{oc} – интенсивность испарения с поверхности осадка, м/мес (равна 0,11 м/мес), рассчитанная на основании формулы (3.17);

m_T – масса сухого вещества осадка на 1 м² площади поверхности площадки, кг (принимается 47 кг на основании ориентировочной высоты уплотненного осадка на площадке равной 0,4 м).

$$I_{oc} = \alpha_p(p_n - p) \cdot \frac{1,013 \cdot 10^5}{p_6}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (3.17)$$

где α_p – коэффициент влагообмена, кг/(с·Н), значение которого определяется по формуле (3.18);

p_n – среднегодовое парциальное давление (упругость) насыщенных водяных паров, соответствующее температуре поверхности осадка, Па (равно 1806 Па на основании данных [106] для г. Ростова-на-Дону);

p – среднегодовое парциальное давление водяных паров при температуре окружающего воздуха, Па (равно 1129 Па на основании данных [106] для г. Ростова-на-Дону);

p_6 – расчетное барометрическое давление, Па (принимается $1,01 \cdot 10^5$ Па).

$$\alpha_p = \frac{Nu \cdot D_p}{L}, \quad (3.18)$$

где Nu – массообменный (диффузионный) критерий Нуссельта (принимается на основании ряда климатических характеристик региона);

D_p – коэффициент диффузии пара в воздухе, кг/с·м·Па (принимается равным $170,38 \cdot 10^{-12}$ кг/(с·м·Па) на основании среднегодовой температуры воздуха);

L – длина площадки обезвоживания, м (принимается ориентировочно равной 50 м).

Рассчитанное по формуле (3.16) значение критической влажности (W_k) не превышает 30 %, что дает основание полагать: расчет площадки обезвоживания в теплый период года (представлен в разделе 4.4) следует производить по формулам, соответствующим периоду постоянной скорости сушки (постоянной убыли влагосодержания в единицу времени). Таким образом, можно считать, что интенсивность испарения влаги с поверхности осадка, выпускаемого на площадку обезвоживания, соответствует условиям влагопереноса со свободной поверхности жидкости.

3.2.3 Обезвоживание осадка вакуумным фильтрованием

В рамках настоящей работы проведены испытания по обезвоживанию осадка донской воды методом вакуум-фильтрации, целью которых явилось установление предельно возможного снижения влагосодержания в зависимости от его исходных свойств. Для проведения исследований использовались оборудование и методика, описанные в подразделе 2.3.4 настоящей работы. Осадок перед обезвоживанием на установке вакуумного фильтрования предварительно уплотнялся методом гравитационного отстаивания без дополнительного внесения реагентов.

Результаты опытов, проведенных в 2012 г., представлены графическими зависимостями (рисунок 3.21), включающими информацию об уровне влажности обезвоженного осадка (основной искомый параметр), периоде накопления осадка в отстойнике, а также сведения об отдельных физических показателях его исходных характеристик.

Совместное рассмотрение всех значений позволяет объяснить закономерность эффективности обезвоживания осадка данным методом в зависимости от его качественного состава причинно-следственной связью: период формирования осадка (как сезонный, так и временной) оказывает влияние на исходный уровень влажности; содержание воды в осадке и форма ее связи с твердыми частицами, в свою очередь, определяют плотность каркаса, его

связность, и, как результат, удельное сопротивление фильтрации на начальном и конечном этапах механического обезвоживания. Чем выше удельное сопротивление, тем больше вероятность преждевременного срыва вакуума и повышения влажности кека на выходе. Минимальные значения влажности кека, полученного посредством вакуум-фильтрации, зафиксированы весной и поздней осенью при наименьшем исходном влагосодержании осадка (около 85 %). Значения удельного сопротивления такого осадка на конечном этапе фильтрования превышают начальные незначительно (в 1,8-2,5 раза) по сравнению с аналогичными значениями, зафиксированными на пробах осадка, отобранных в летне-осенний период, для которого характерно возрастание сопротивления фильтрации в 3,7-4,2 раза.

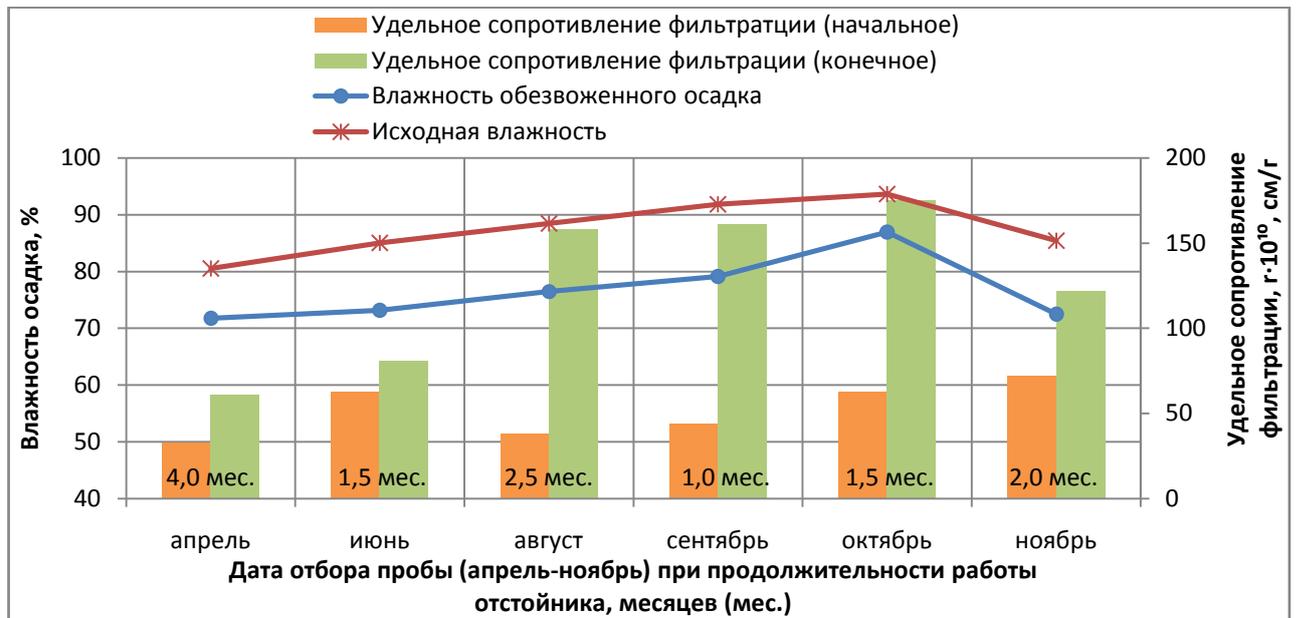


Рисунок 3.21 – Влияние исходных характеристик осадка на эффективность его обезвоживания вакуумным фильтрованием

Таким образом, предельно возможное снижение влажности осадка вакуумным фильтрованием не превышает 15 % при условии его предварительного уплотнения до уровня влагосодержания 85-95 %. Это обуславливает необходимость организации мероприятий по обеспечению дополнительной сушки кека в термических устройствах или на площадках депонирования при комплексном решении вопроса его утилизации в качестве сырьевого компонента какого-либо строительного материала или почвогрунта, что позволит

стабилизировать качественные характеристики утилизируемого осадка и придерживаться определенной технологии производства работ.

3.3 Исследование свойств воды, выделенной при обработке осадка

Обезвоживание осадков, полученных при подготовке природных вод для хозяйственно-питьевых нужд города, сопровождается образованием технологических стоков – сливной воды, выделенной в процессе разделения шлама на твердую и жидкую фазы.

Технологической схемой водопроводных очистных сооружений по отношению к сливной воде могут быть предусмотрены следующие варианты [4]:

- сброс в естественную природную среду (пониженные участки рельефа, водоемы). Простота и дешевизна данного способа вряд ли оправдываются негативным влиянием на экосистему, заключающемся в заболачивании территории, загрязнении грунтовых и поверхностных вод;

- транспортирование на городские очистные сооружения канализации. Для осуществления данного варианта вероятно необходимость корректировки технологического режима и схемы работы комплекса очистки сточных вод, ввиду увеличения нагрузки по объему, а также поступления на сооружения несвойственных химических веществ, таких как соединения алюминия (железа);

- повторное использование, являющееся неотъемлемой составляющей схем работы ВОС, исключающих сброс технологических стоков в окружающую среду. Успешное осуществление данного процесса требует тщательного исследования таких вопросов, как качество стоков, их количество при заданном режиме работы станции, влияние на процессы осветления и обесцвечивания природной воды при введении в общий поток.

Для обоснования выбора одного из трех вышеприведенных вариантов необходимо детальное изучение качества и количества сливной воды. На основании данных, приведенных в разделе 2.4 настоящей работы, годовое количество воды, выделенной в процессе обработки шлама промывки

отстойников ВОС города, превышает 23,6 тыс. м³. В таблице 3.5 представлены результаты химического анализа сливной воды, выделенной из шлама методом гравитационного отстаивания. Лабораторные исследования осуществлялись по стандартным методикам [107–116]. Отбор проб выполнялся согласно [117].

Таблица 3.5 – Результаты химического анализа надосадочной воды, выделенной из шлама с концентрацией твердой фазы 30-40 г/дм³

№ пробы	Дата отбора пробы	Период работы отстойника, сут	Показатель									
			pH, единиц	Al ³⁺ , мг/ дм ³	Cu (суммарно) мг/ дм ³	NO ₃ ⁻ , мг/ дм ³	NO ₂ ⁻ , мг/ дм ³	Fe _{общ} , мг/ дм ³	Cr _{общ} , мг/ дм ³	PO ₄ ³⁻ , мг/ дм ³	Mn ²⁺ , мг/ дм ³	Щелочность, ммоль/дм ³
1	17.09.12 г	20	7,53	0,23	0,010	0,5	<0,2	2,25	0,036	5,4	11,4	-
2	21.09.12 г	30	8,42	<0,04	0,017	0,6	0,6	1,45	0,02	4,9	22,1	10,4
3	05.10.12 г	40	8,32	<0,04	0,017	0,6	0,25	0,68	н/о	10,9	19,8	10,8
4	25.10.12 г	60	8,25	<0,04	0,022	0,24	0,43	1,28	н/о	12,6	28,2	8,8
5	27.03.13 г	150	7,94	0,078	0,015	0,38	<0,2	0,26	0,01	<0,2	6,8	5,7
6	16.04.13 г	25	7,94	0,426	0,021	<0,2	<0,2	0,86	0,04	1,1	23,78	7,2
7	24.04.13 г	30	7,62	0,312	0,009	0,2	0,44	0,752	н/о	1,1	9,6	7,0
8	13.05.13 г	45	6,82	0,026	0,008	1,4	0,24	6,13	н/о	4,2	10,84	7,8

Примечание: н/о – не обнаружено (ниже предела обнаружения)

Постановлением правительства РФ от 5 февраля 2016 г №79 об утверждении «Правил охраны поверхностных водных объектов», документами [66, 67] регламентируется отведение в водотоки и водоемы возвратных вод, а также устанавливаются требования к качеству воды водных объектов. Сопоставляя показатели качества надосадочной воды с соответствующими значениями, характерными для донской воды, в случае выпуска первой в реку Дон следует указать на возможное превышение фоновой концентрации железа и алюминия (таблица 3.6).

Постановлением Правительства РФ от 29 июня 2013 г №644 «Об утверждении правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ» (с изменениями от 14 октября 2015 г №1101) обозначены нормативные показатели общих свойств сточных вод и

допустимые концентрации загрязняющих веществ в сточных водах, допущенных к сбросу в централизованные системы водоотведения. Основываясь на допустимые значения показателей для общесплавных и бытовых систем, следует указать на превышение в надосадочной воде концентрации марганца (в 6-28 раз), а также незначительное превышение фосфатов (в 1,05 раза) (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Требования к свойствам воды водных объектов и сточных вод, а также характерные для них предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ

Показатель	Исходная вода реки Дон (в створе водозаборов г. Ростова-на-Дону)	Требования к свойствам и ПДК веществ	
		для водоема хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования	для стоков, отводимых в сеть централизованной канализации
Водородный показатель (рН), единиц рН	7,7÷8,7	6,5÷8,5	6,0÷9,0
Алюминий (Al ³⁺), мг/дм ³	0,11÷0,48	0,2 (0,5*)	3,0
Медь (Cu, суммарно), мг/дм ³	≤0,008	1,0	0,5
Нитраты (NO ₃ ⁻), мг/дм ³	0,68÷8,37	45	не нормируются
Нитриты (NO ₂ ⁻), мг/дм ³	0,008÷0,067	3,3	»
Железо (Fe _{общ}), мг/дм ³	≤0,54	0,3 (1,0*)	3,0
Хром (Cr ⁶⁺), мг/дм ³	≤0,022	0,05	0,05
Фосфаты (PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	0,26÷0,50	не нормируются	12,0
Марганец (Mn ²⁺), мг/дм ³	0,02÷0,07	0,1	1,0
Щелочность, ммоль/дм ³	2,75÷3,94	не нормируется	не нормируется
Примечание: * величина допустима при согласовании с Главным государственным санитарным врачом			

Таким образом, качество надосадочной воды не отвечает необходимым требованиям как для отведения ее в поверхностные водоемы, так и в систему городской канализации. Поэтому наиболее приемлема технология повторного использования надосадочной воды, заключающаяся в возврате ее в общий поток очищаемой воды или расходовании на прочие нужды станции. Для этого, в свою очередь, необходима информация об органолептических показателях.

Поскольку ранее были рассмотрены два варианта разделения шлама на воду и осадок (способом гравитационного отстаивания и дренирования) в подразделах 3.3.1 и 3.3.2 освещены вопросы качества как надосадочной воды, так и воды, выделенной при дренировании осадка (фильтрата).

3.3.1 Органолептические показатели надосадочной воды

Для изучения свойств надосадочной воды, выделенной в результате разделения шлама на жидкую и твердую фазы, использовался осадок, отобранный из горизонтальных отстойников и разбавленный водопроводной водой до необходимой концентрации твердой фазы. Разделение шлама осуществлялось в стеклянных мерных цилиндрах под действием сил гравитационного отстаивания.

Отбор проб надосадочной воды из цилиндров производился через предварительно обозначенные интервалы времени: 5 ч, 1, 2 и 5 сут.

Пробы воды отбирались в соответствии с [117] на высоте 3–4 см от границы раздела фаз «осадок-вода» для исключения возможности случайного захвата частиц осадка. Объем отобранной воды подвергался тщательному перемешиванию, после чего определялись показатели мутности и цветности по стандартной методике [118].

Анализ результатов, полученных за период 2011–2013 гг., показал, что органолептические показатели надосадочной воды, полученной при отстаивании шлама равной исходной концентрации твердой фазы, в значительной степени могут отличаться друг от друга в зависимости от сезона осадкообразования [119]. Ввиду этого, графические характеристики кинетики изменения органолептических показателей в зависимости от исходной концентрации твердой фазы в объеме шлама и продолжительности его отстаивания (рисунки 3.22, 3.23) сгруппированы по трем временным периодам работы отстойника: весенне-летний (с апреля по июль), летне-осенний (с августа по октябрь), зимний (с ноября по март). На графиках представлены средние значений отдельных опытов, отвечающих относительному отклонению при уровне значимости 0,05.

Мутность надосадочной воды обусловлена веществами органического (гумус, ил, планктон) и минерального (песок, глина, карбонатные породы) происхождения, растворенными (взвешенными) водой при размыве осадочной массы и ее дальнейшем смешении. По значению данного показателя воду можно классифицировать как маломутную или средней мутности в зависимости от ряда

исходных условий (концентрация твердой фазы осадка, сезон его образования). Максимальные показатели мутности надосадочной воды зафиксированы при отстаивании осадка, образованного за зимний период работы отстойников (ноябрь-март), минимальные – при весенне-летнем (апрель-июль). При длительном отстаивании шлама наблюдается частичное осветление воды, степень которого различна:

- при периоде образования осадка с апреля по июль – на 15÷18 % (спустя 1 сут), 20÷26 % (спустя 2 сут), 22÷26 % (спустя 5 сут);
- при периоде образования осадка с августа по октябрь – на 11÷26 % (спустя 1 сут), 16÷34 % (спустя 2 сут), 24÷37 % (спустя 5 сут);
- при периоде образования осадка с ноября по март – на 16÷23 % (спустя 1 сут), 24÷29 % (спустя 2 сут), 25÷32 % (спустя 5 сут).

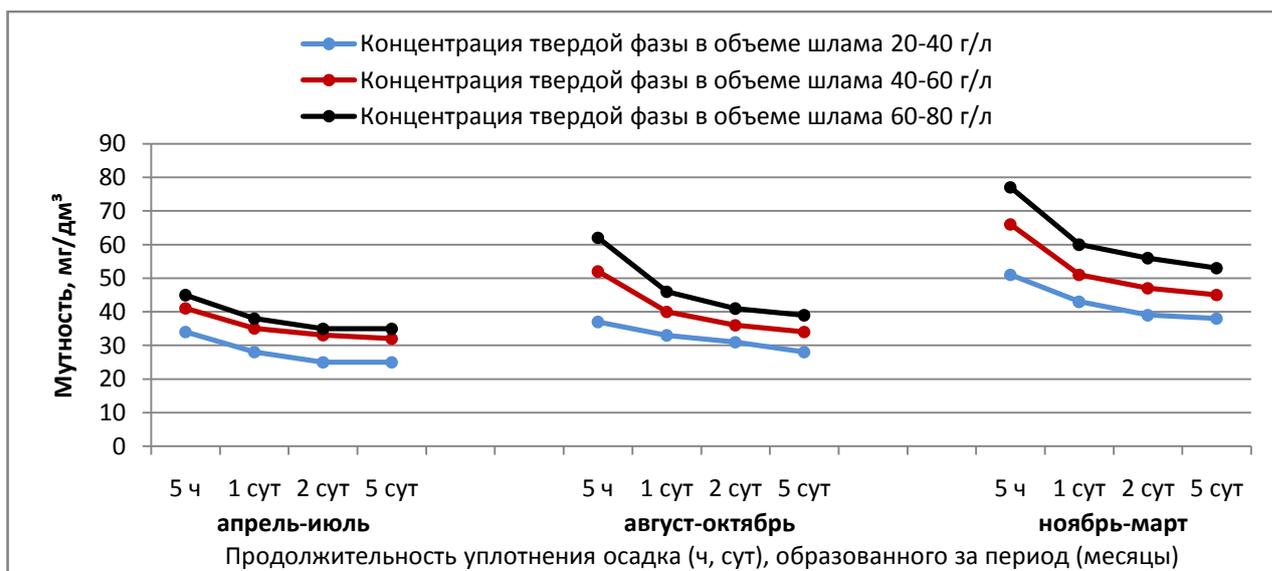


Рисунок 3.22 – Изменение мутности надосадочной воды, выделенной при уплотнении осадка, образованного в различные временные периоды

По показателю цветности (рисунок 3.23) надосадочную воду можно отнести к классу вод средней или высокой цветности в зависимости от ряда исходных условий (концентрация твердой фазы осадка, сезон его образования). Окраску воде придают растворившиеся в ней гумусовые вещества (гуминовые и фульвокислоты), а также железо и марганец, сконцентрированные в составе осадка. Гуминовые кислоты, представляющие собой углеродсодержащие высокомолекулярные полидисперсные вещества, придают воде темный оттенок,

азотсодержащие фульвокислоты, обладающие более высокой растворимостью и кинетической устойчивостью, – желтый. Цветность воды при продолжительном отстаивании изменяется незначительно:

- при работе отстойника с апреля по июль – на 0÷13 % (спустя 1 сут), 2÷18% (спустя 2 сут), 4÷18 % (спустя 5 сут);
- при работе отстойника с ноября по март – на 9÷33 % (спустя 1 сут), 10÷38% (спустя 2 сут), 10÷39 % (спустя 5 сут).

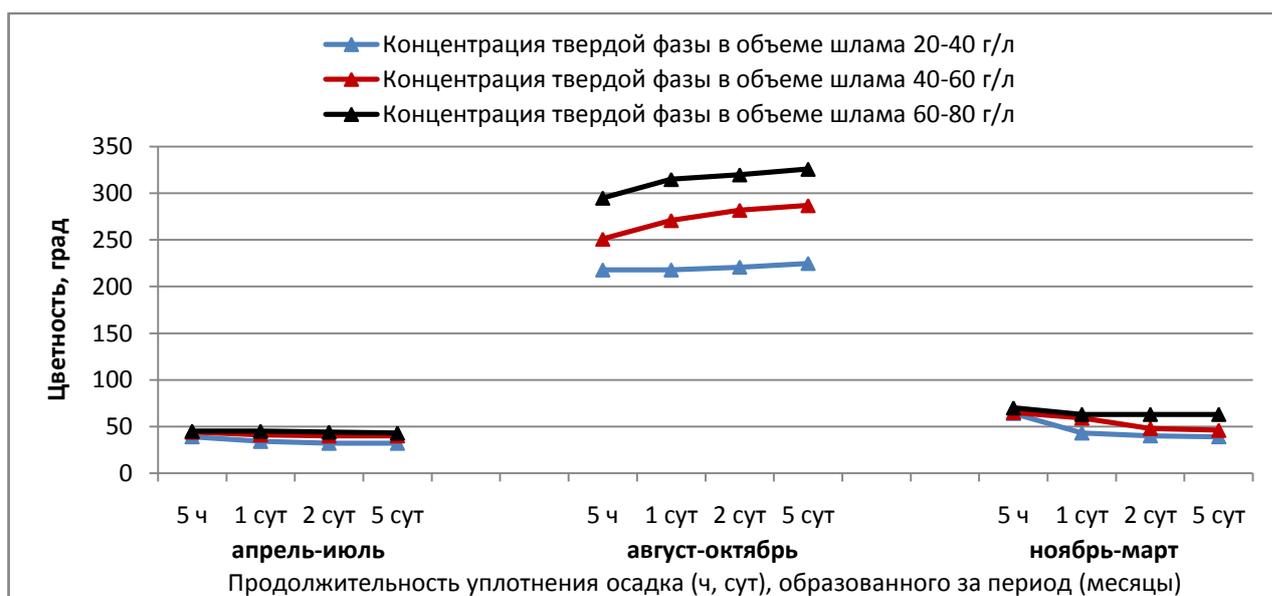


Рисунок 3.23 – Изменение цветности надосадочной воды, выделенной при уплотнении осадка, образованного в различные временные периоды

При контроле цветности воды, выделенной из осадка, образованного за летне-осенний период (август – октябрь), зафиксирован некоторый рост значений с продолжительностью выдерживания воды над осадком: на 0-8 % (спустя 1 сут), 1-12 % (спустя 2 сут), 3-14 % (спустя 5 сут). С одной стороны, это является результатом цветения воды, при котором наблюдается повышение содержания органики, связанной с жизнедеятельностью и отмиранием фитопланктона, в частности, синезеленых водорослей. С другой стороны, повышение цветности обусловлено в данном случае спецификой окисления железа. Процесс перехода двухвалентного железа в трехвалентное в присутствии значительного содержания гумуса сопровождается образованием коллоидных органических соединений железа, обладающих высокой устойчивостью к осаждению.

Таким образом, надосадочная вода характеризуется достаточно высоким содержанием коллоидных примесей, обуславливающих ее мутность и цветность. Данные коллоиды обладают значительной устойчивостью к осаждению под действием только лишь собственного веса. Частичное осветление и обесцвечивание при увеличении времени отстаивания (свыше 5 ч) указывает на наличие высокого содержания тонкодисперсных компонентов (глина, цисты простейших, гуматы), на осаждение которых требуется длительный период времени. В течение 24 ч отстаивания большинство коллоидных частиц осаждаются, дальнейшее выдерживание малоэффективно, поскольку снижение мутности в большинстве случаев не превышает 15 %, цветности – 10 %.

На основании изучения качества надосадочной воды, а также прогнозируемой концентрации твердой фазы в объеме шлама и осадка на различных этапах технологического процесса их обработки в условиях ВОС г. Ростова-на-Дону, в качестве расчетных ее органолептических показателей в зависимости от сезона года можно принять:

- при сгущении шлама промывки отстойников (при концентрации твердой фазы в объеме от 5 до 35 г/дм³, установленной согласно описанным в подразделе 2.3.3 и разделе 2.4 исследованиям) методом гравитационного отстаивания в течение 5-120 ч мутность надосадочной воды составит 25-50 мг/дм³, цветность 30-225 град;
- при выпуске осадка (концентрацией твердой фазы 55-90 г/дм³ установленной на основании описанных в подразделе 3.1.2 исследований) на площадки обезвоживания мутность образующейся надосадочной воды составит 30-80 мг/дм³, цветность 40-330 град.

Описанные в подразделе 3.1.3 опытные исследования по изучению седиментационных характеристик осадка в присутствии реагентов также включали в себя определение химических показателей образующейся при этом надосадочной воды. Поскольку наилучшие показатели уплотнения осадка были достигнуты при использовании извести и флокулянтов катионного заряда, ниже

приведены результаты воздействия на эффект осветления и обесцвечивания именно этих химических агентов. Надосадочная вода для экспериментальных исследований по влиянию реагентной обработки на степень осветления была получена согласно методике [117] при отстаивании осадка в течение 5 ч.

На рисунке 3.24 представлены результаты изучения качества надосадочной воды, выделенной из осадка с различной исходной концентрацией твердой фазы, предварительно кондиционированного известью. Осадок отобран из горизонтального отстойника при продолжительности его работы с апреля по май (рисунок 3.24 а) и с ноября по март (рисунок 3.24 б).

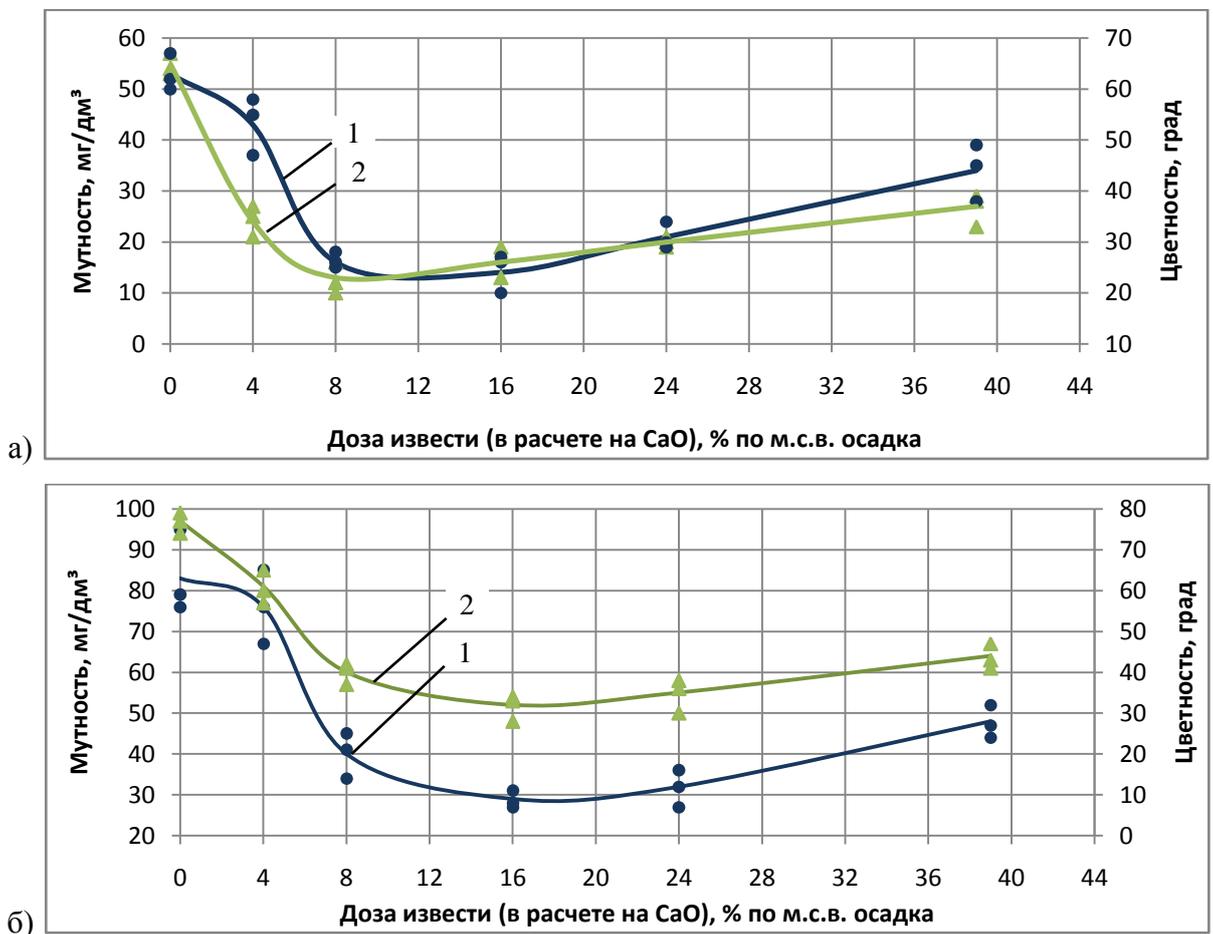


Рисунок 3.24 – Показатели качества надосадочной воды при различной дозе извести (1-мутность, 2-цветность) и концентрации твердой фазы в осадке: а – 40 г/дм³; б – 70 г/дм³

Очевидно, что известь способствует эффективному снижению мутности и цветности воды. Так, при более низкой концентрации твердой фазы осадка (40 г/дм³) известь (в расчете на СаО) оптимальной дозой 8 % по м.с.в. обеспечивает снижение мутности на 70 %, цветности на 65 %. Эффект осветления

и обесцвечивания надосадочной воды, выделенной из осадка с большей концентрацией твердой фазы (70 г/дм^3) при оптимальной дозе извести около 16 % по м.с.в., несколько ниже: мутность снижается на 65 %, цветность на 58 %. Анализируя данные графиков, нельзя не отметить и тенденцию ухудшения органолептических показателей в случае введения в осадок доз извести, превышающих оптимальные значения, причем наиболее резко возрастают мутность и цветность надосадочной воды, полученной из осадка с меньшей концентрацией твердой фазы. Полученную закономерность можно объяснить пересыщением воды вносимым реагентом. Первым и, пожалуй, основным фактором, увеличивающим остаточную мутность и цветность воды в данном случае, является высокое содержание загрязняющих веществ в товарном продукте гидратной извести, что обуславливает необходимость использования для этих целей известкового молока, осветленного в сатураторе. Вторым – недостаточность центров кристаллизации для осаждения образовавшегося карбоната кальция: «чистых» взвешенных частичек, не окруженных адсорбированными органическими полимерами и коллоидами, содержащимися в объеме шлама, недостаточно для быстрого осаждения высокодисперсного CaCO_3 [7]. Фактором, обуславливающим увеличение цветности надосадочной воды, является снижение эффективности осаждения комплексных соединений железа ввиду несоответствия уровня рН и щелочности воды оптимальным значениям.

На рисунке 3.25 представлены результаты анализов надосадочной воды, выделенной при уплотнении осадка с концентрацией твердой фазы 40 г/дм^3 при предварительной его обработке полиакриламидами марки Нитрофлок катионного заряда средней (К1525) и высокой (К1547) молекулярной массы (характеристики реагентов приведены в подразделе 3.1.3). Осадок образован в отстойниках за период апрель-май и разбавлен водой до необходимой концентрации.

Тестируемые флокулянты показали практически одинаковую эффективность при осветлении и обесцвечивании надосадочной воды. Некоторое преимущество при условии не превышения оптимальной дозы все же наблюдается в случае использования высокомолекулярного реагента (не более 12 %). При

наиболее оптимальных дозах катионного ПАА 0,006-0,009 % по м.с.в. осадка зафиксировано следующее повышение качества отстоянной воды: снижение мутности на 22 % (K1525) и 29 % (K1547); снижение цветности на 40 % (K1525) и 46 % (K1547).

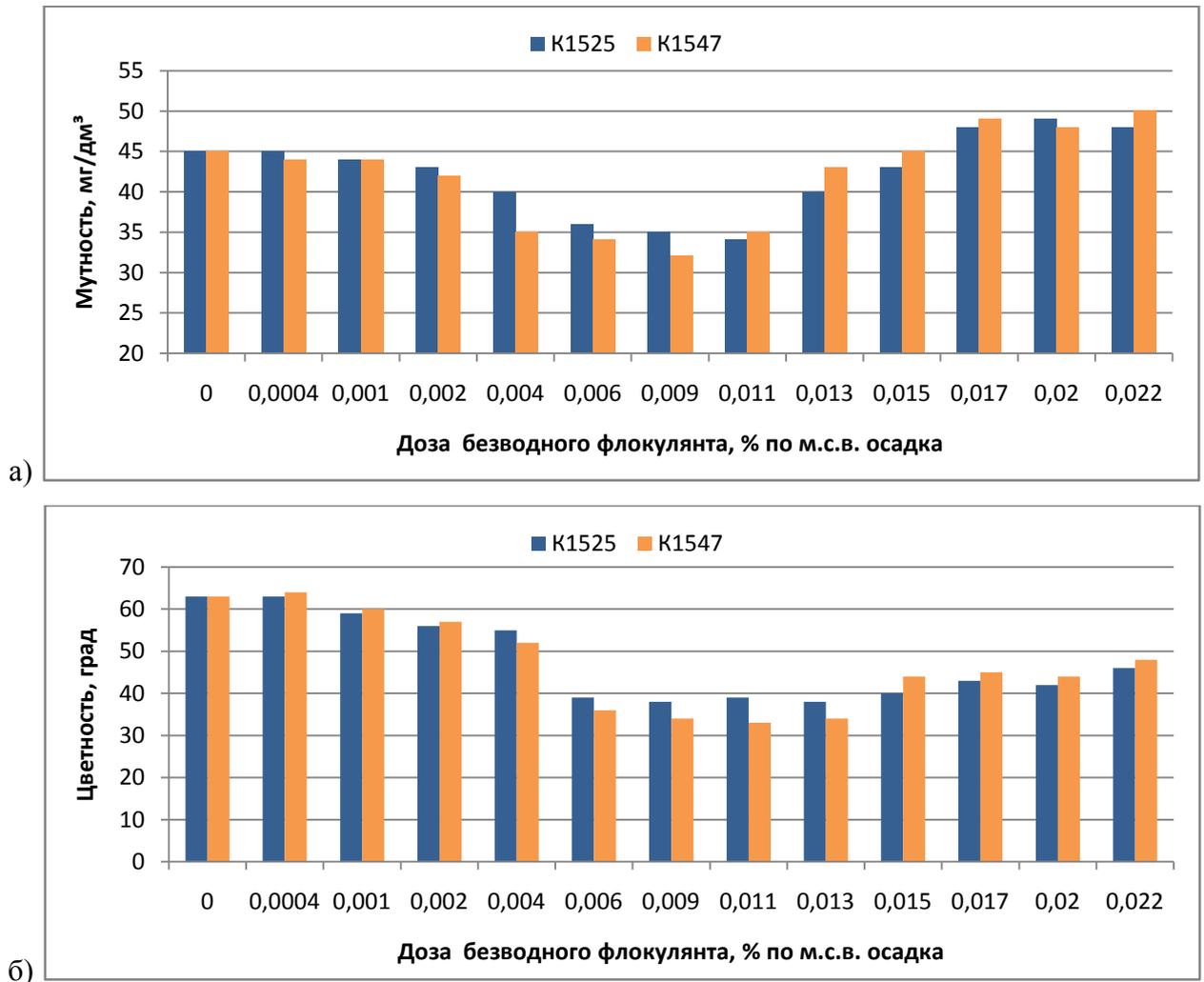


Рисунок 3.25 – Мутность (а) и цветность (б) надосадочной воды при различной дозе флокулянта (концентрация твердой фазы осадка 40 г/дм³)

В случае повышения содержания твердой фазы в осадке до 70 г/дм³ (рисунок 3.26) оптимальные дозы флокулянта возрастают до 0,011 % по м.с.в. и способствуют снижению мутности на 21 % (K1525) и 23 % (K1547), а также цветности на 36 % (K1525) и 35 % (K1547).

Графические зависимости мутности и цветности надосадочной воды от дозы флокулянта (рисунок 3.25, 3.26) наглядно демонстрируют снижение ее качества при превышении дозы реагента свыше оптимальных значений. Вода, по результатам визуальных наблюдений, приобретает мутно-молочный оттенок, что

в данном случае указывает на незаконченность процесса флокуляции, причиной чего является пересыщение дисперсионной среды вносимым реагентом. Зета-потенциал коллоидов повышается за счет увеличения содержания положительных ионов катионного флокулянта и возрастания динамической вязкости воды, что в свою очередь приводит к увеличению остаточной мутности среды.

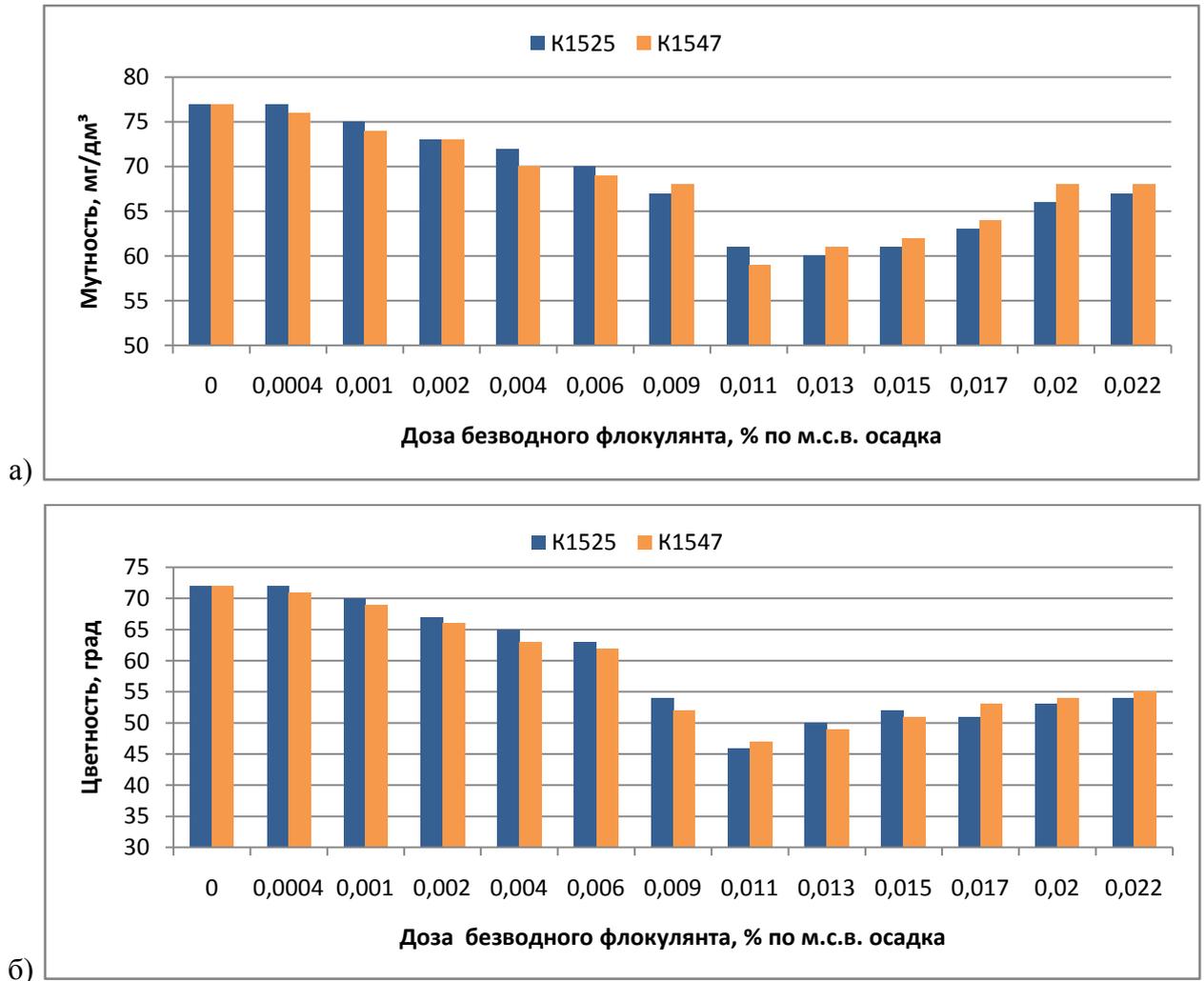


Рисунок 3.26 – Мутность (а) и цветность (б) надосадочной воды при различной дозе флокулянта (концентрация твердой фазы осадка 70 г/дм^3)

3.3.2 Органолептические показатели фильтрата

Эффективность отделения воды из осадка методом свободного дренажа, описанная в подразделе 3.2.2, исследована двумя методами фильтрации: фильтрация на фильтрующей основе (сетке с размером ячеек 600 мкм на

основании рекомендаций [7]) и фильтрование на гранулированном слое (песке). Однако, качество образующегося при этом фильтрата логично рассматривать в условиях первой задачи, поскольку дренаж в виде песка, пусть даже небольшим слоем, является «барьером» для взвешенных веществ, способствуя, тем самым, частичному осветлению и обесцвечиванию воды.

Вопросы качества фильтрата, выделенного из осадка при его обезвоживании, могут быть актуальны как при обработке его в естественных условиях – на площадках с дренажом, так и при использовании механических аппаратов – вакуум-фильтров и фильтр-прессов, суть которых заключается в процеживании влаги из слоя осадочной массы, подаваемой на фильтрующие поверхности.

Фильтрат, необходимый для проведения опытных исследований, был получен в результате проведения тестов на дренируемость осадка, описанных в подразделе 3.2.2.2. Ввиду предварительных испытаний, решено было не принимать в расчет показатели фильтрата, выделенного из шлама с концентрацией твердой фазы менее 30 г/дм^3 , поскольку формирование концентрированного слоя твердых частиц на поверхности фильтрующей перегородки происходит крайне медленно, что приводит к значительному выносу взвеси с первыми порциями фильтрата.

Анализ графических зависимостей показателей качества фильтрата выявил возрастание значений мутности и цветности с увеличением исходной концентрации твердой фазы осадка (рисунок 3.27). Зафиксированные результаты превышают значения, характерные для надосадочной воды (отстаивание в течение 5 ч) при идентичных исходных характеристиках осадка:

- при концентрации твердой фазы в объеме шлама до 40 г/дм^3 мутность фильтрата больше на 32 %, цветность на 8 %;
- при концентрации твердой фазы осадка от 40 до 60 г/дм^3 мутность фильтрата больше на 24-32 %, цветность на 0-14 %;
- при концентрации твердой фазы осадка от 60 до 80 г/дм^3 мутность фильтрата больше на 20-22 %, цветность на 36-40 %.

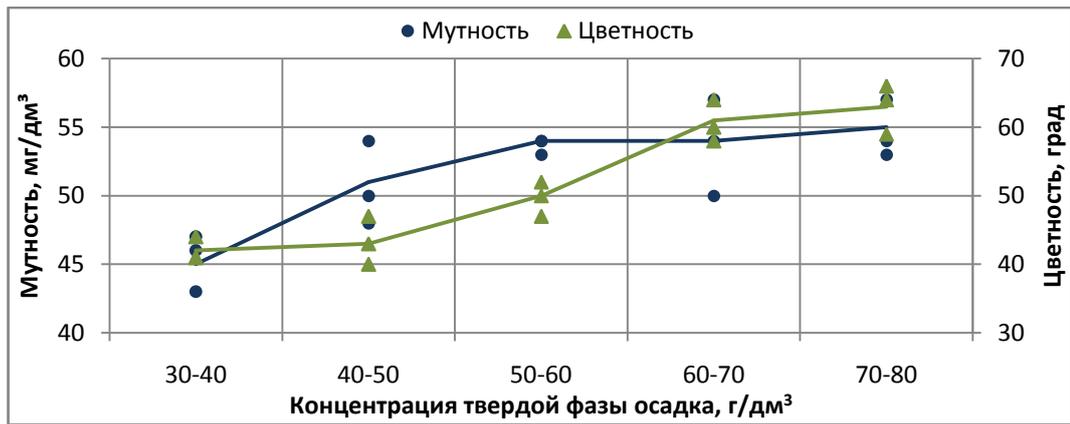


Рисунок 3.27 – Органолептические показатели фильтрата при различной исходной концентрации твердой фазы осадка (осадок образован весной)

На рисунке 3.28 представлены результаты исследования качества фильтрата, который выделен из осадка, предварительно обработанного известью.

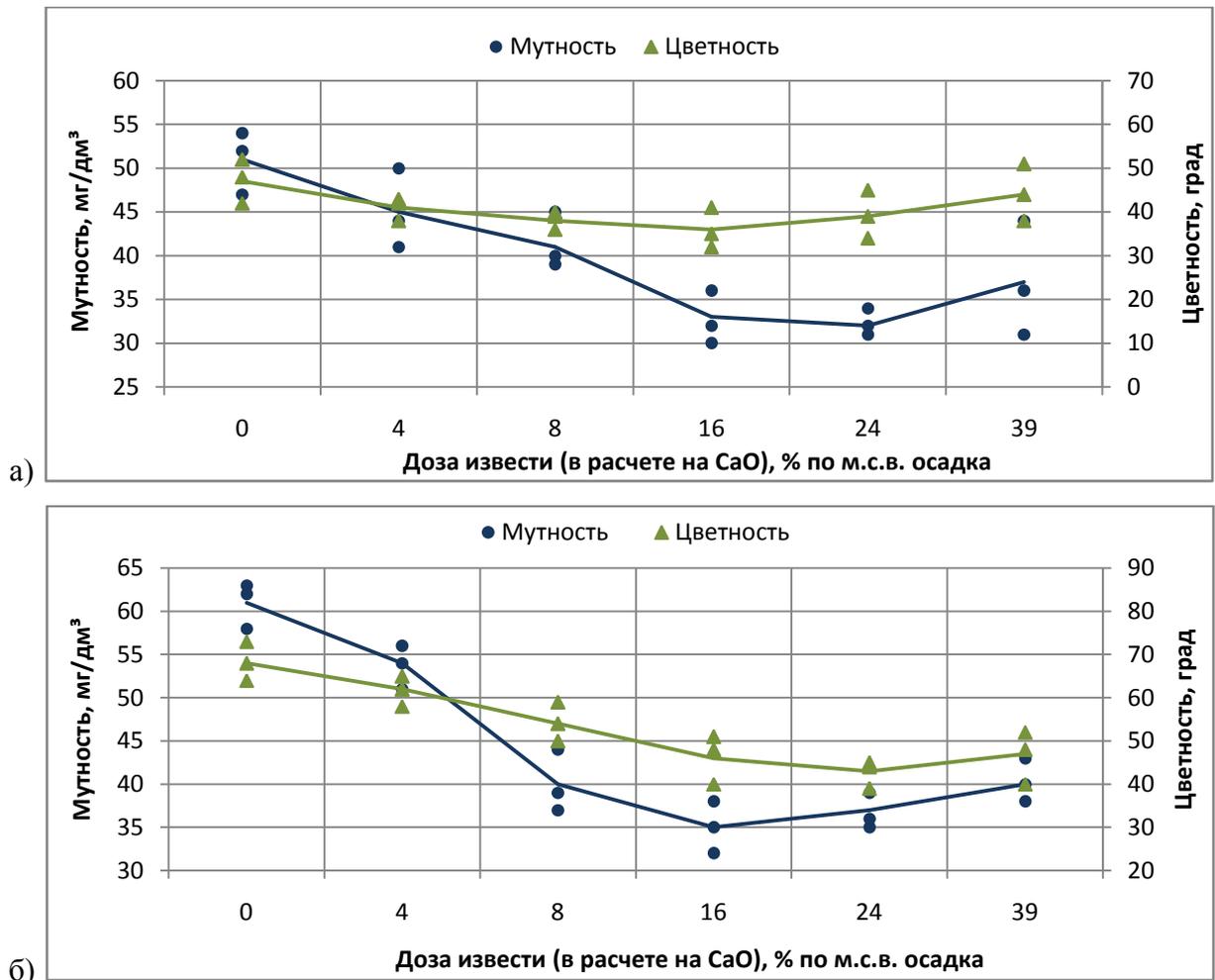


Рисунок 3.28 – Показатели качества фильтрата при различной дозе извести и исходной концентрации твердой фазы осадка: а - 40 г/дм³; б – 70 г/дм³

Следует отметить, что при отделении воды из объема осадка, обработанного известью, методом дренирования, в отличие от процесса отстаивания (также в

присутствии извести), не наблюдается столь резкого ухудшения ее органолептических показателей при увеличении дозы СаО. Оптимальная доза извести в расчете на СаО составляет 16 % по м.с.в. осадка, при этом снижение мутности составляет 35-43 %, снижение цветности – 23-32 % в зависимости от исходной концентрации твердой фазы осадка.

На рисунках 3.29, 3.30 (а, б) представлены результаты аналогичных исследований качества фильтрата, выделенного из осадка с предварительной его обработкой катионными флокулянтами марки Нитрофлок средней (K1525) и высокой (K1547) молекулярной массы.

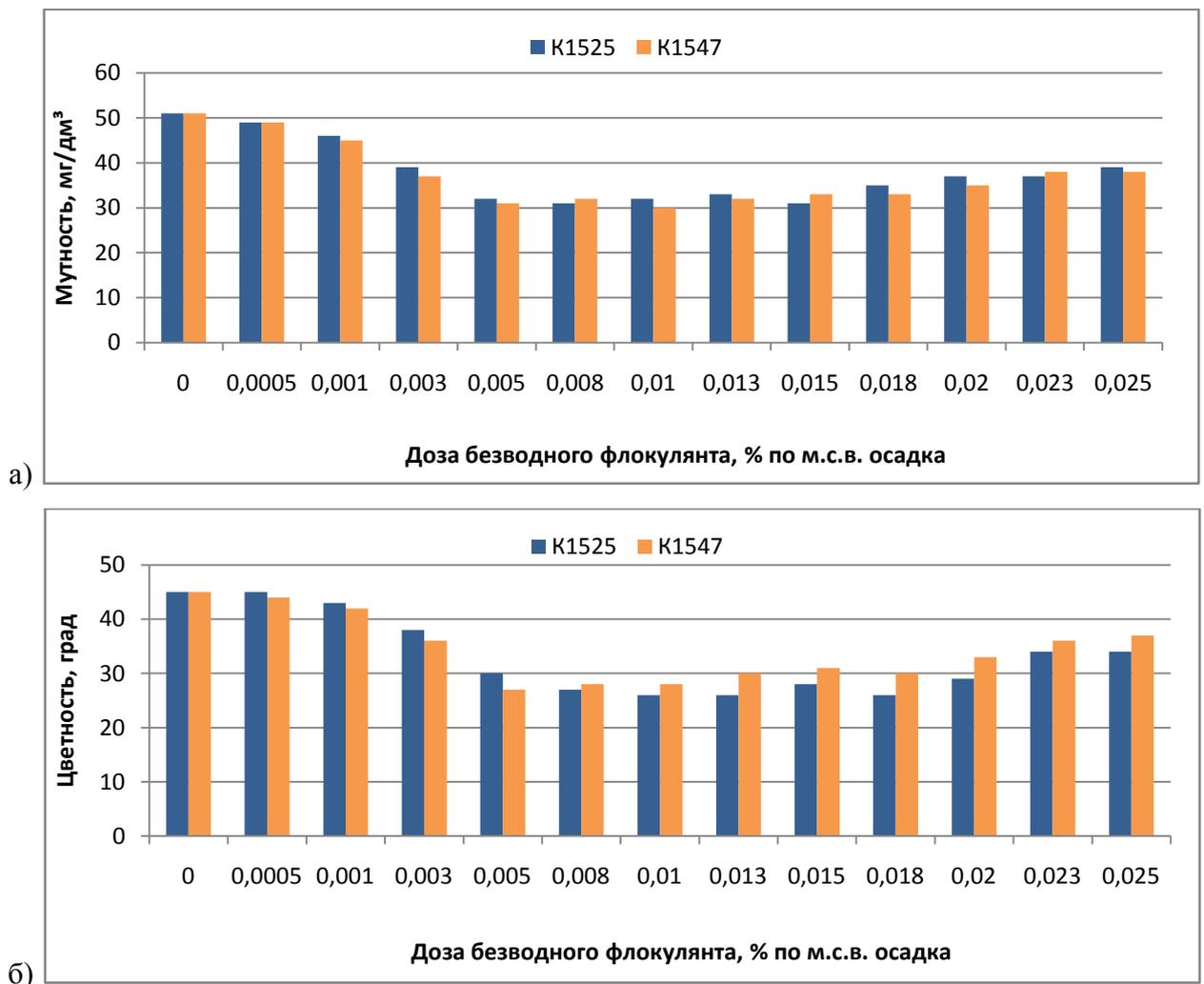


Рисунок 3.29 – Мутность (а) и цветность (б) фильтрата при различной дозе флокулянта (исходная концентрация твердой фазы осадка 40 г/дм³)

При исходной концентрации твердой фазы осадка 40 г/дм³ (рисунок 3.29), наблюдается следующая зависимость качества фильтрата от дозы полимера: при

дозе 0,005-0,008 % по м.с.в. осадка мутность снижается на 39 % (K1525, K1547), цветность – на 40 % (K1525, K1547). При превышении дозы флокулянта более 0,018 % по м.с.в. осадка наблюдается некоторое ухудшение эффекта осветления.

С увеличением концентрации твердой фазы осадка до 70 г/дм³ (рисунок 3.30) эффект осветления и обесцвечивания фильтрата достигается оптимальными дозами реагента порядка 0,003-0,004 % по м.с.в. осадка: мутность при этом снижается на 28 % (K1525) и 29 % (K1547), цветность на 46 % (K1525) и 45 % (K1547).

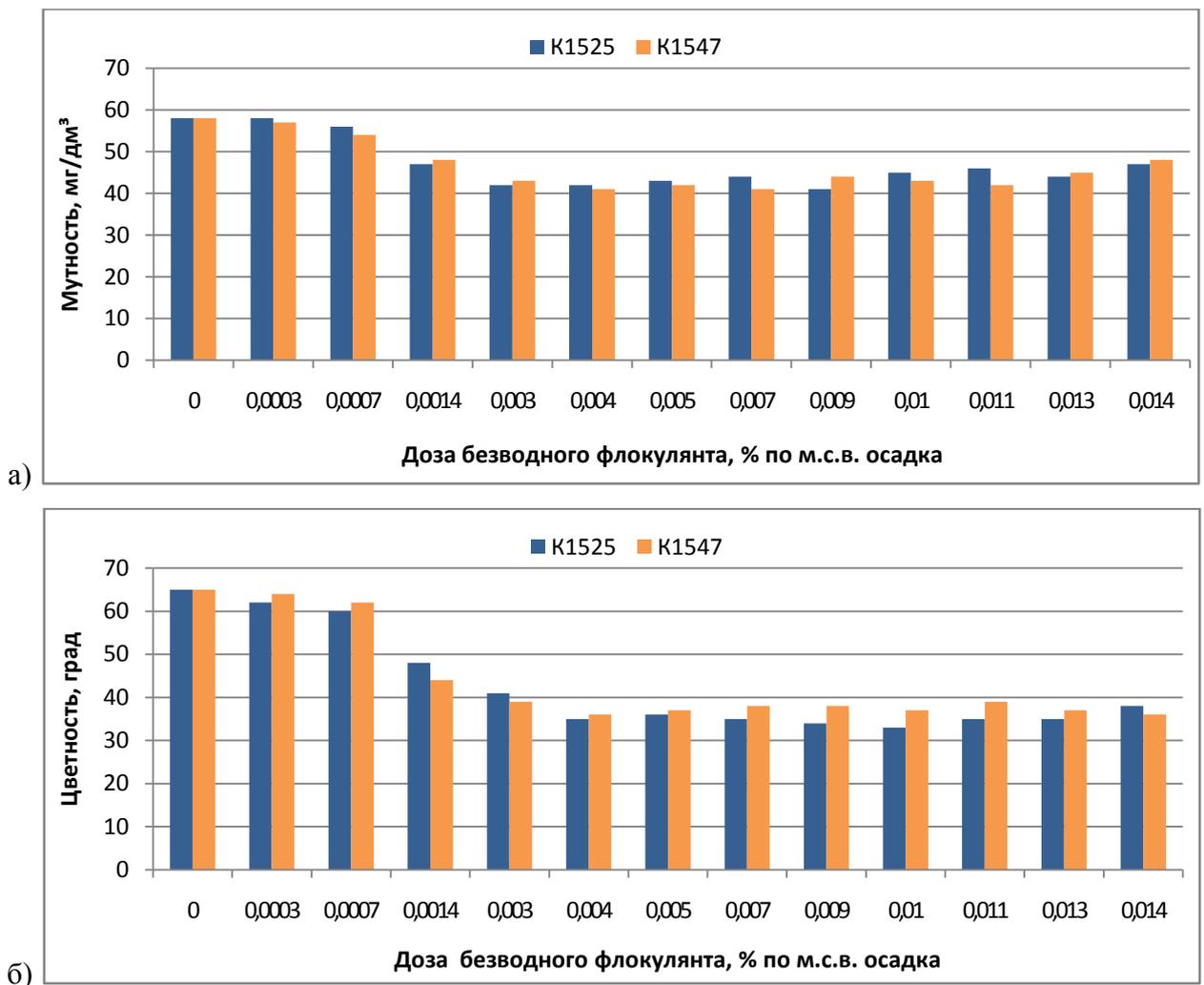


Рисунок 3.30 – Мутность (а) и цветность (б) фильтрата при различной дозе флокулянта (исходная концентрация твердой фазы осадка 70 г/дм³)

Таким образом, реагентная обработка осадка перед дренированием способствует осветлению и обесцвечиванию фильтрата меньшими дозами катионного ПАА в сравнении с методом гравитационного отстаивания, поскольку способ фильтрации жидкой составляющей через слой уплотненного осадка

аналогичен в некотором роде коагуляции и флокуляции в контакте с осадком. Обработанный химическим реагентом осадок является как таковым контактным слоем коагуляции (флокуляции), обеспечивая при этом лучшее осветление фильтрата меньшими дозами полимеров.

Выводы по 3-ей главе

1. Безреагентное разделение шлама на воду и осадок (вторичное уплотнение осадка) методом гравитационного отстаивания весьма эффективно: за 96-120 ч осадок достигает концентрации твердой фазы, аналогичной исходным значениям (средним по высоте слоя осадка при нахождении его в отстойнике перед промывкой).

2. Установлено, что значительное влияние на эффективность вторичного уплотнения осадка оказывают сезон его образования, а также продолжительность накопления в отстойнике. Так, осадок, образованный в период цветения воды наиболее обводнен, степень его вторичного уплотнения до 18 % ниже значений, характерных для осадка, образованного в прочие периоды года (при равной исходной концентрации твердой фазы в объеме шлама). При длительности накопления осадка в отстойнике около 1,5 месяцев его концентрация в результате 120 ч уплотнения до 16 % меньше значений, характерных для осадка с более продолжительным формированием в сооружении (до 3 месяцев).

3. Экспериментально доказано, что предварительная реагентная обработка шлама позволяет повысить эффект уплотнения осадка до 15 %. Наилучшим образом себя зарекомендовали катионные марки ПАА средней молекулярной массы дозой 0,004-0,012 % по м.с.в. (в зависимости от сезона образования осадка) при длительности уплотнения 1-5 сут.

4. Скорость фильтрации воды из осадка и (или) надосадочной воды, зависит от исходной концентрации в нем твердой фазы, степени фильтруемости (определяемой сезоном осадкообразования и длительностью скопления в отстойнике), а также высоты слоя налива на дренирующую поверхность.

5. Для интенсификации отделения фильтрата из состава осадка, может быть рекомендовано предварительное его кондиционирование флокулянтами или известью: катионный ПАА способствует сокращению времени дренирования в 1,5-1,6 раза при дозе 0,018-0,024 % по м.с.в. осадка; известь – в 1,6-7,0 раз при дозе СаО от 8 до 24 % по м.с.в. осадка. Высокие дозы извести влекут за собой увеличение массы твердых веществ, подлежащих обезвоживанию, а также повышение уровня щелочности и рН отходов.

6. Выявлен положительный эффект применения метода удаления влаги из осадка капиллярно-пористым материалом, обеспечивающего снижение исходной его влажности (составляющей 87÷95 %) на 0,4÷9 % в течение суток (при обоснованном количестве, некоторых особенностях расположения и свойств капиллярно-пористого материала). Метод капиллярного водопоглощения принципиально отличается от стандартных способов обезвоживания осадка, ориентированных на воздействие температурой (положительной, отрицательной) или давлением (избыточным, отрицательным).

7. Установлено, что обезвоживание осадка донской воды в естественных условиях (в частности, на площадках подсушивания) эффективно при возможной совокупности ряда процессов удаления влаги: фильтрация в дренажную систему, всасывание внешним капиллярно-пористым материалом, испарение при минимизации негативного влияния атмосферных осадков. Комплекс данных процессов существенно сокращает продолжительность обезвоживания осадка до влажности менее 40 %.

8. Обезвоживание предварительно уплотненного осадка методом вакуум-фильтрации позволяет достичь снижения влажности осадка до уровня 71,7-86,9 %, что обуславливает необходимость его дополнительной последующей сушки с целью комплексного решения вопроса утилизации.

9. Контроль химических показателей надосадочной воды позволил сделать вывод о невозможности отведения данных стоков в поверхностные водоисточники (в частности, реку Дон) ввиду вероятного превышения ПДК железа и алюминия. Вода не отвечает и нормам приема в сеть (бытовой и

общесплавной) централизованной системы водоотведения на основании превышения ПДК марганца (в 6-28 раз) и фосфатов (в 1,05 раза).

10. По показателю мутности надосадочную воду (при уплотнении осадка с исходной концентрацией твердой фазы 20-80 г/дм³ в течение 5 ч) в зависимости от сезона осадкообразования можно классифицировать как маломутную или средней мутности, по показателю цветности – средней или высокой цветности. Увеличение продолжительности уплотнения осадка (до 120 ч) способствует частичному осветлению (на 22-37 %) и обесцвечиванию (на 4-39 %) надосадочной воды, что указывает на высокое содержание в ее составе высокодисперсной агрегативно и кинетически устойчивой взвеси.

11. Доказана эффективность предварительной реагентной обработки шлама (концентрацией твердой фазы 30-40 г/дм³), позволяющей улучшить органолептические показатели надосадочной воды: СаО дозой 8 % по м.с.в. осадка снижает мутность на 70 %, цветность на 65 %; катионные ПАА дозой 0,006-0,009 % по м.с.в. осадка снижают мутность на 22-29 %, цветность на 40-46 % в зависимости от величины молекулярной массы полиэлектролита.

12. Изучение качества фильтрата, выделенного из осадка в процессе дренирования, подтвердило необходимость предварительного уплотнения осадка перед обезвоживанием на иловых площадках или механических аппаратах фильтровального типа, поскольку при концентрации твердой фазы в объеме шлама менее 30 г/дм³ удаление воды сопровождается значительным выносом взвешенных веществ. Мутность и цветность воды, выделенной в процессе дренирования, превышают аналогичные показатели надосадочной воды (в диапазоне концентрации твердой фазы в осадке 30-80 г/дм³) на 20-32 % и 0-40 % соответственно. Предварительная реагентная обработка осадка способствует существенному осветлению и обесцвечиванию фильтрата: известь в расчете на СаО дозой около 16 % по м.с.в. осадка снижает мутность на 35-43 %, цветность – на 23-32 %; катионные ПАА дозой 0,003-0,008 % по м.с.в. снижают мутность на 28-39 %, цветность – на 40-46 %.

4 Разработка технологических решений по оптимизации процесса обработки осадка маломутной и малоцветной природной воды

4.1 Анализ экспериментально изученных способов обработки осадка и целесообразность их применимости

Описанные в главе 3 результаты экспериментальных исследований процесса обезвоживания осадка очистных сооружений водопровода г. Ростова-на-Дону способом вакуум-фильтрации обозначили предельную эффективность снижения его влажности, которая в зависимости от исходных параметров составила 71,7-86,9 %. Значений менее 70 % добиться не удалось ввиду склонности исследуемого осадка к перестройке структуры в процессе водоотдачи, сопровождающейся резким возрастанием значений удельного сопротивления фильтрации. Результатом таких структурных изменений в обрабатываемом слое осадка является образование трещин и, как результат, срыв вакуума.

Снижение влажности осадка вакуумным фильтрованием до уровня 71,7-86,9 % обеспечивает сокращение его исходного объема (при условии предварительного уплотнения) в 1,5-2,6 раза, значительное повышение концентрации. Однако, в случае дальнейшей утилизации осадка в качестве сырья для производства какой-либо продукции такой кек нуждается в дополнительной сушке в термических устройствах или на площадках депонирования.

Одним из основных критериев успешного обезвоживания осадка в естественных условиях являются климатические условия района: температурный режим, суточная продолжительность и интенсивность солнечной радиации, влажность воздуха, определяющие дефицит влажности, ветровой режим, влияющий в значительной мере на интенсивность испарения влаги, а также продолжительность устойчивого мороза, обуславливающая работу площадок в зимний период.

Анализ климатических характеристик Ростовской области (рисунок 4.1), выполненный на основании справочных данных [106, 120], позволил охарактеризовать условия региона (с точки зрения обеспечения эффективного

обезвоживания осадка в естественных условиях, в частности, на иловых площадках) как весьма благоприятные.

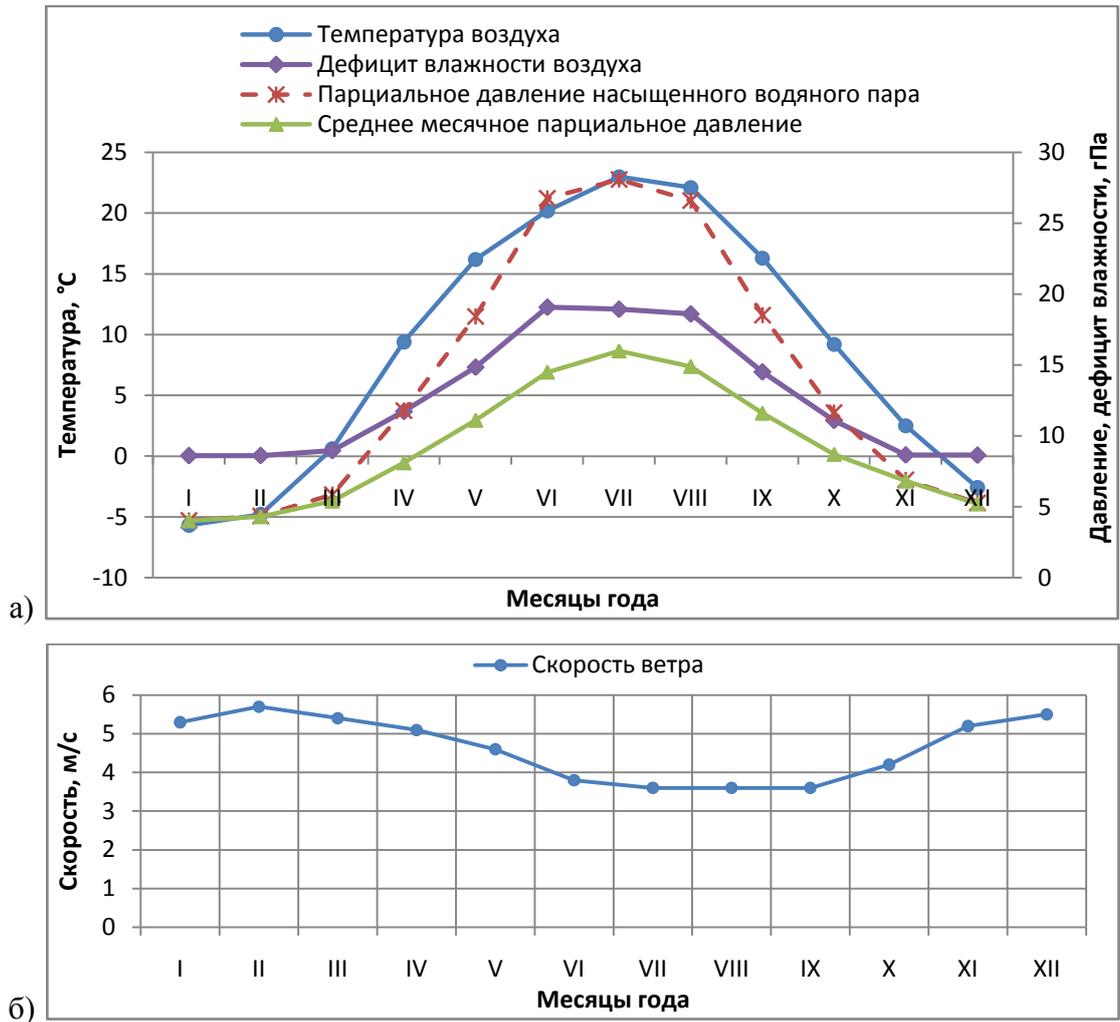


Рисунок 4.1 – Климатические характеристики г. Ростова-на-Дону

а – температура воздуха, дефицит влажности, парциальное давление; б – скорость ветра

Так, лето в г. Ростове-на-Дону засушливое: средняя температура воздуха составляет от плюс 22 до плюс 24 °С, средняя месячная продолжительность солнечного сияния достигает 330 ч, число дней без солнца с апреля по октябрь не превышает 10. Продолжительность периода со средней суточной температурой воздуха менее 0 °С составляет 3 месяца (с декабря по февраль) при средней температуре минус 3,6 °С. Относительная влажность воздуха зимой составляет 68-75 %, летом – 48-63 %. На протяжении 51-85 дней в году наблюдается засуха (влажность не превышает 30 %), годовое количество осадков не превышает 555 мм. Скорость ветра изменяется от 3,6 до 5,7 м/с, его преобладающее направление – восточное [106, 120]. Количество воды, которое может испариться

в период устойчивого дефицита влажности воздуха, рассчитанное на основании методики [1], составляет более 900 мм.

Таким образом, климат г. Ростова-на-Дону удовлетворяет условиям [1], необходимым как для промораживания осадка (средняя температура ниже 0 °С наблюдается на протяжении 3 месяцев в году), так и для подсушивания за счет продолжительности периода устойчивого дефицита влажности около 8 месяцев.

4.2 Конструктивные решения сооружения для обезвоживания осадка в естественных условиях

Для эффективного обезвоживания осадка природных вод источников малой мутности и цветности в естественных условиях в рамках диссертационного исследования разработана модель площадки подсушивания [121, 122], а также различные модификации сооружений [123-125] (приложение Г). Модернизация конструкций данных моделей в направлении повышения автоматизации процесса транспортировки обезвоженного кека привела к разработке технологического комплекса, представленного на рисунке 4.2. Общее устройство включает в себя: емкостное сооружение для обезвоживания осадка, галерею ленточного конвейера и павильон передвижного контейнера.

Емкостное сооружение для обезвоживания осадка представляет собой железобетонный резервуар (1), разделенный на отдельные коридоры (2) ограждающими стенками (3). Для каждого коридора предусмотрен впускной трубопровод (4), подключенный к трубопроводу подачи осадка (5). Роль запорной арматуры выполняет бесколодезная задвижка (6). В основании коридора имеется дренажная плита (7), под ней – дренажный слой (8), состоящий из песка и гравия, а также дренажные трубопроводы (9), подключенные к трубопроводу отвода фильтрата (10) в систему промканализации. Каждый коридор оборудован скребковым механизмом (11), шиберным затвором (12), бункером (13), кровельным покрытием (14) с устройством в нем дефлекторов (15), водосточными лотками (16) и вентиляционными проемами (17).

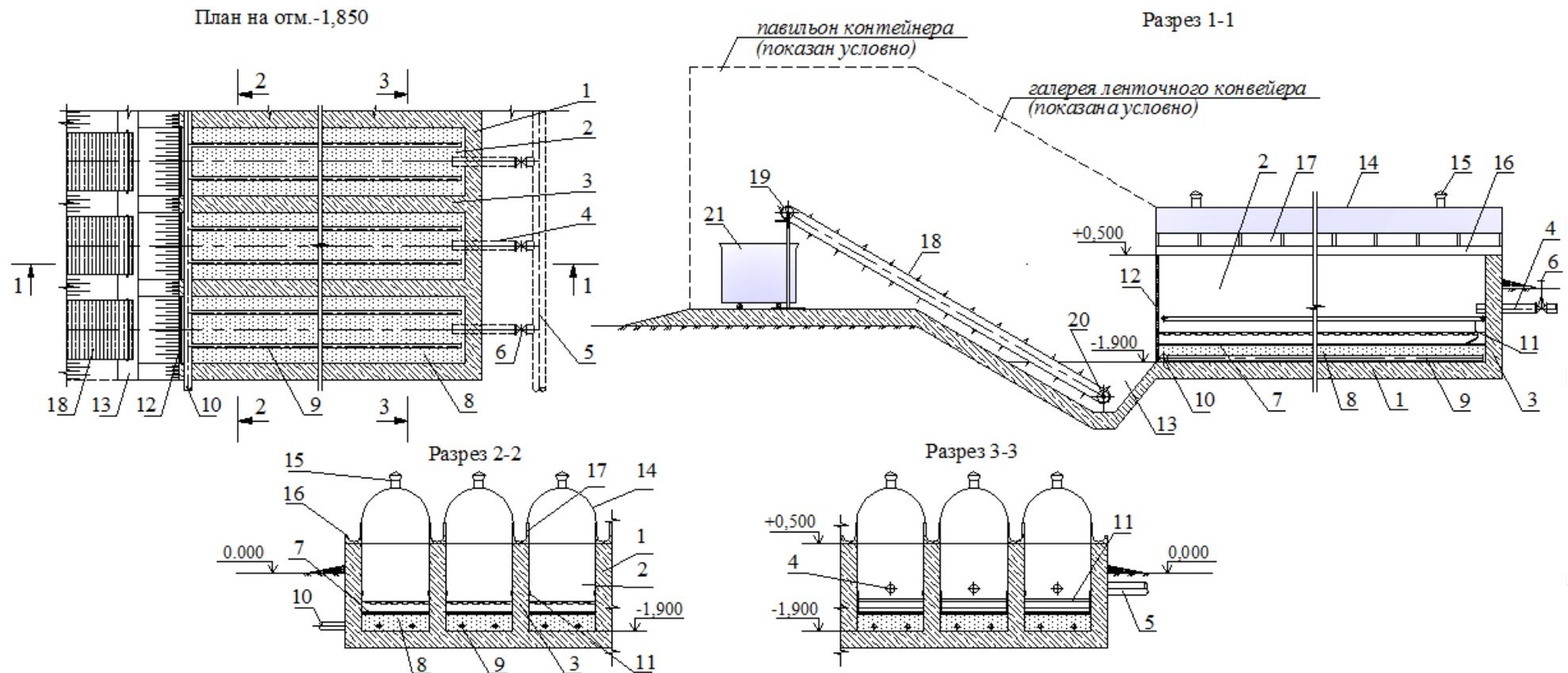


Рисунок 4.2 – Технологический комплекс для обезвоживания осадка

1–железобетонный резервуар; 2–коридор; 3–ограждающая стенка; 4–впускной трубопровод; 5–трубопровод подачи осадка; 6 –бесколодезная задвижка; 7–дренажная плита; 8–дренаж; 9–дренажный трубопровод; 10–трубопровод отвода фильтрата; 11–скребковый механизм; 12–шибер; 13–бункер; 14–кровля; 15–дефлектор; 16–лоток; 17–вентиляционный проем; 18–ленточный конвейер; 19–приводной барабан; 20–ведомый вал; 21–контейнер

Работа сооружения осуществляется по следующей схеме: по подающему трубопроводу к сооружению поступает осадок, распределяющийся посредством рассредоточенных выпусков и планировки дна по всей площади коридоров. Обезвоживание осадка наступает в два этапа: первый этап осуществляется в результате фильтрации воды, содержащейся в осадке, в дренажную систему, а также капиллярного ее поглощения из толщи массы бетонными перегородками сооружения, выполняющими роль капиллярно-пористого материала и являющимися одновременно элементом конструкции, второй происходит за счет испарения влаги из осадка под действием сил солнечной радиации и выветривания. Ширина коридора «в свету» принимается равной $4b$ (b – толщина стенки конструкции), исходя из условия площади капиллярного поглощения (определена по опытным данным, приведенным в подразделе 3.2.2.3).

Экспериментальными исследованиями по наблюдению за процессом подсушивания осадка на открытом воздухе, описанными в подразделе 3.2.2.4, установлено, что обильные атмосферные осадки значительно продлевают период его подсушивания. Для минимизации негативного влияния погодных факторов на процесс обезвоживания предусмотрено кровельное покрытие из светопропускаемого материала, защищающее осадок от дождя и снега. Оптимальный угол наклона крыши рекомендуется принимать равным географической широте местности. Солнечные лучи, проходя сквозь кровельное покрытие, нагревают воздух внутри коридора и создают благоприятный микроклимат для испарения влаги. В целях отвода талых и дождевых вод по верхней кромке железобетонных стенок предусмотрено устройство лотков.

Для осуществления естественной вентиляции сооружения предусмотрены вентпроемы, обеспечивающие приток воздуха, и дефлекторы, способствующие активации конвекционных потоков, вместе с которыми водяной пар уходит в атмосферу. Вентиляционные проемы согласно [126] должны составлять не менее 20 % от общей площади стен ограждения. Коридоры должны располагаться в продольном направлении с запада на восток, с целью минимизации теневых зон в основании площадки в дневное время.

Обезвоженный кек скребковым механизмом удаляется с поверхности площадки через предварительно открытый шиберный затвор в приемный бункер, объем которого рассчитывается исходя из объема сухого вещества, одновременно удаляемого из коридора.

Для транспортировки кека из бункера предусмотрен ленточный конвейер (18), размещаемый в галерее. Механизм приводится в движение посредством приводного барабана (19) и ведомого вала (20). С ленты кек попадает в передвижной контейнер (21), разгружаемый автотранспортом при наполнении. В целях упрощения обслуживания комплекса рекомендуется блокирование сооружений по три коридора с организацией проездов между блоками.

Таким образом, за счет ряда особенностей конструкции предлагаемая модель комплекса (на основании расчетов, приведенных далее в разделе 4.4) позволяет сократить общую продолжительность обезвоживания осадка на 20-40 % в сравнении с иловыми площадками, не оборудованными средствами интенсификации процесса обезвоживания.

4.3 Общая технологическая схема обработки осадка

Руководствуясь данными об исходных химических показателях донской воды, режиме работы сооружений АО «Ростовводоканал», качестве и количестве шламовых вод промывки отстойников, а также выделенного из них осадка (в частности, кинетических параметров уплотнения и обезвоживания), с учетом рекомендаций справочных пособий [1, 17] разработана общая технологическая схема сооружений по обработке осадка отстойников Ростовского-на-Дону водопровода (рисунок 4.3).

Согласно принятой схеме, осадок влажностью 85,4-94,6 %, концентрацией 55-160 г/дм³, накопившийся в отстойнике за период от двух до пяти месяцев, подлежит удалению. Шламовая вода с концентрацией твердых веществ 5-35 г/дм³, образованная степенью разбавления осадка в 3-17 раз,

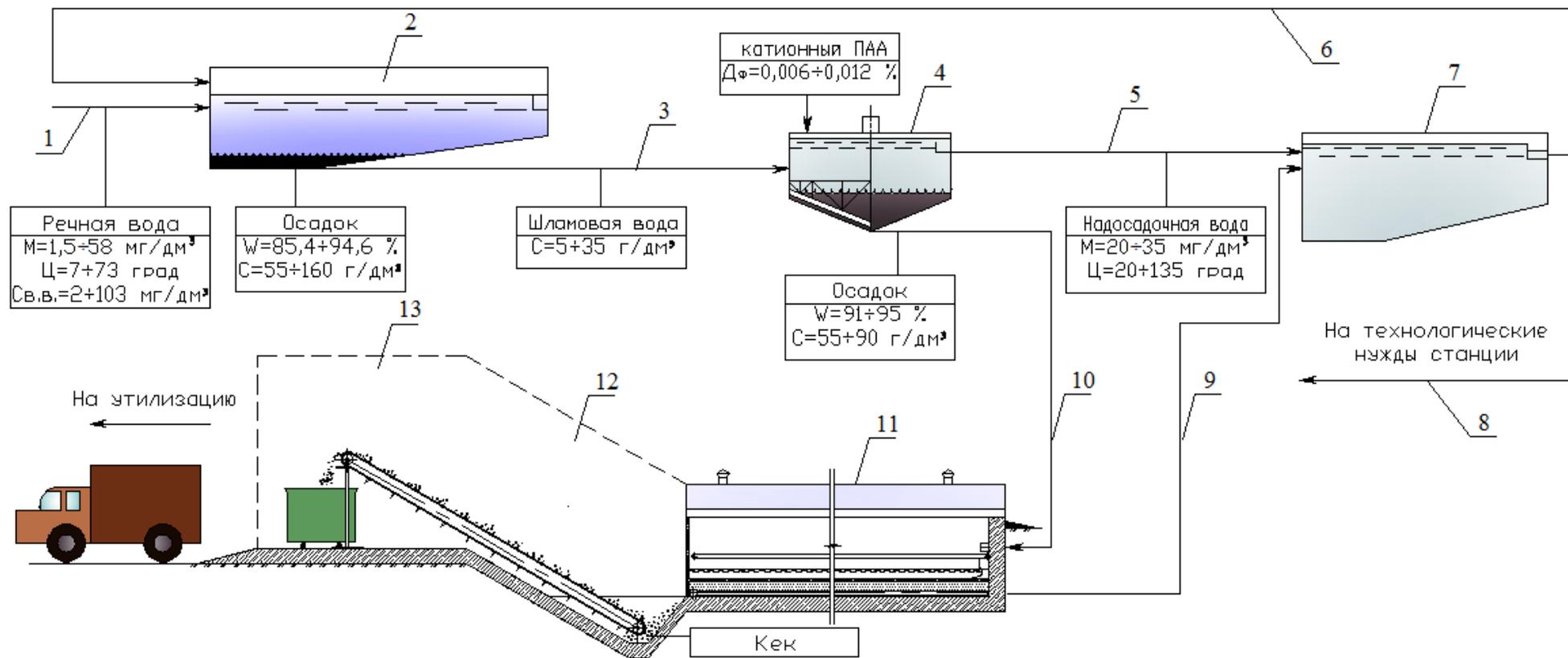


Рисунок 4.3 – Общая технологическая схема сооружений по обработке осадка отстойников ВОС г. Ростова-на-Дону

1 – трубопровод подачи природной воды к отстойнику; 2 – отстойник; 3 – самотечный трубопровод подачи шламовой воды к сгустителю; 4 – сгуститель; 5 – трубопровод отвода надосадочной воды; 6 – трубопровод подачи сливной воды «в голову» сооружений; 7 – резервуар-усреднитель расхода сливной воды; 8 – трубопровод подачи сливной воды на технологические нужды; 9 – трубопровод отвода фильтрата; 10 – трубопровод подачи сгущенного осадка на сооружение для обезвоживания; 11 – технологический комплекс для обезвоживания осадка; 12 – галерея ленточного конвейера (показана условно); 13 – павильон контейнера для выгрузки кека (показан условно)

Условные обозначения: W – влажность осадка; C – концентрация твердой фазы осадка; $\text{С}_{\text{в.в.}}$ – концентрация взвешенных веществ в речной воде; M – мутность воды (речной, надосадочной); Ц – цветность воды (речной, надосадочной); $D_{\text{ф}}$ – доза флокулянта (в % по м.с.в.)

учитывающей объем воды, затраченной на удаление осадка из сооружения, направляется по самотечному трубопроводу в сгуститель. Перед подачей шлама в сгуститель рекомендуется его обработка раствором катионного ПАА дозой 0,012 % по м.с.в. осадка (применительно к осадку, образованному в период цветения воды) или 0,006 % по м.с.в. (применительно к осадку, образованному в прочие периоды) для увеличения степени уплотнения осадка на 10-15 % и повышения эффективности осветления и обесцвечивания надосадочной воды (снижение мутности составит не менее 20 %, цветности – не менее 40 %). Наиболее приемлемый период выдерживания шлама в сгустителе составляет от 1 до 5 сут, поскольку за это время осадок достигает максимально возможной концентрации твердой фазы, а надосадочная вода – наибольшей степени осветления. С целью предупреждения нарушения гидравлического режима водоотводящих сетей, которое может привести к закупорке живого сечения трубопроводов, обеспечения долговечной и надежной работы насосных агрегатов, а также равномерного распределения осадка по площади сооружения для обезвоживания, сделан вывод о целесообразности выпуска осадка из сгустителя при концентрации до 90 г/дм^3 (объемной плотности до $1,05 \text{ г/см}^3$), соответствующей влажности не менее 91 %. Таким образом, сгущенный осадок (влажностью 91-95 %, концентрацией $55-90 \text{ г/дм}^3$) согласно требованию [17] плунжерным или шнековым насосом (во избежание разрушения его структуры) направляется на сооружение для обезвоживания осадка.

Надосадочная вода (мутностью $20-35 \text{ мг/дм}^3$, цветностью $20-135 \text{ град}$ в зависимости от сезона образования осадка) отводится напорным трубопроводом в резервуар-усреднитель для последующего возврата в «голову» сооружения или использования в технологических нуждах станции с предварительной очисткой или без нее. Усреднитель способствует не только технологическому эффекту, связанному с возможностью равномерной подачи сливной воды в «голову» сооружений (что позволяет соблюдать оптимальные пропорции воды в общем потоке, планомерно расходовать ее на технологические нужды станции), но и экономическому, позволяющему избежать завышения производственных

мощностей в результате расчета последующих сооружений очистки (в случае ее необходимости) и транспортирования воды не на максимальные расходы потока, а на средние.

4.4 Расчет основных сооружений для обработки осадка

В соответствии с принятой схемой обработки осадка (рисунок 4.3) к основным сооружениям, подлежащим расчету, следует отнести сгуститель, резервуар-усреднитель и сооружение для обезвоживания осадка в естественных условиях. Представленный далее расчет сооружений произведен применительно к Центральным ВОС г. Ростова-на-Дону.

Для определения расчетных параметров сгустителей за исходные условия принята наиболее интенсивная нагрузка – промывка горизонтальных отстойников, поскольку именно в этих сооружениях образуется максимальное количество осадка, для удаления которого затрачивается повышенное количество промывной воды.

Расчет сгустителя проведем на основании рекомендаций справочного пособия [1], согласно которому минимальная вместимость сгустителя для приема осадка от одного отстойника определяется по формуле:

$$W_{\text{сг}} = 1,3 \cdot W_{\text{ос}} \cdot k_p, \quad (4.1)$$

где $W_{\text{ос}}$ – максимальный объем осадка, образующегося в отстойнике за отдельный период (принимается равным $20,72 \text{ м}^3$ для горизонтального отстойника за летний период его работы по данным таблицы 2.4);

k_p – коэффициент разбавления осадка (принимается равным 3,81 как значение, характерное для выбранного периода с максимальным количеством осадка по данным таблицы 2.6).

$$W_{\text{сг}} = 1,3 \cdot 20,72 \cdot 3,81 = 102,63 \text{ м}^3.$$

В качестве сооружения для сгущения осадка принято типовое проектное решение №901-3-236.87, включающее два радиальных сгустителя вместимостью (конструктивной) 335 м^3 каждый, диаметром 12,0 м, глубиной 3,1 м и насосную

станцию для размещения насосов сгущенного осадка, осветленной воды и дренажных вод. Из расчета вместимости сгустителя уплотнение осадка рационально производить в режиме нескольких циклов сгущения при последовательном накоплении шлама от промывок группы сооружений (трех – четырех отстойников в зависимости от их вида). Продолжительность цикла сгущения (T , ч) можно определить по формуле:

$$T = t_{\text{уд.ос.}} \cdot n + t_{\text{упл.}} + t_{\text{оп.}}, \quad (4.2)$$

где $t_{\text{уд.ос.}}$ – время промывки одного отстойника, ч (фактически при ручном способе удаления осадка составляет 10 ч по данным АО «Ростовводоканал», но в качестве расчетного принимаем 24 ч);

n – количество отстойников, шламовая вода от которых направляется в один сгуститель (принимаем 3-4 отстойника);

$t_{\text{упл.}}$ – минимальное время уплотнения осадка для достижения концентрации твердой фазы, близкой к предельно возможной для рассматриваемого типа осадка (принимаем равным 24 ч по результатам экспериментальных исследований, представленных в разделе 3.1);

$t_{\text{оп.}}$ – общее время всех дополнительных операций, включающих наполнение сгустителя, перекачивание осветленной воды, перекачивание сгущенного осадка (на основании [1] принимаем равным 1,5 ч).

Рассчитанное по формуле (4.2) время уплотнения составит 97,5-121,5 ч.

Выбор конструкции резервуара для усреднения расхода надосадочной (сливной) воды, образующейся в сгустителе, произведен на основании рекомендаций справочного пособия [54]. Согласно приведенной в нем классификации, надосадочную воду (с учетом изученных ее основных показателей, описанных в разделе 3.3) можно отнести к третьей группе стоков, концентрация взвешенных веществ в которых составляет менее 500 мг/дм^3 , а гидравлическая крупность взвеси не превышает 5 мм/с. Для описанного типа надосадочной воды наиболее приемлемой конструкцией резервуара будет многоканальный усреднитель, разработанный ГНЦ РФ «НИИ ВОДГЕО» [54].

Общий объем усреднителя ($W_{p.y.}$, м³) определен при максимально возможном наполнении сгустителя шламом ($W_{сг.} = 330$ м³) с наибольшим коэффициентом его разбавления k_p (принят 7,78 по данным таблицы 2.6):

$$W_{p.y.} = (W_{сг.} - \frac{W_{сг.}}{k_p}) \cdot 1,1 = 316,34 \text{ м}^3. \quad (4.3)$$

Общий объем усреднителя ($W_{p.y.}$, м³), согласно [54] складывается из аккумулирующего объема ($W_{рег.}$, м³) и объема каналов (W_{es} , м³):

$$W_{p.y.} = W_{рег.} + W_{es}. \quad (4.4)$$

Расчет объема каналов произведен в соответствии с [127]:

$$W_{es} = \frac{q_w \cdot t_z \cdot k_{av}}{2} = 108,99 \text{ м}^3, \quad (4.5)$$

где q_w – расход сточной воды (принимается равным 90 м³/ч на основании производительности насосов насосной станции сгустителей по типовому проекту №901-3-236.87);

t_z – продолжительность сброса воды, ч, определяемая по формуле:

$$t_z = \frac{W_{p.y.}}{q_w} = 3,51 \text{ ч} \quad (4.6)$$

k_{av} – коэффициент усреднения, равный:

$$k_{av} = \frac{C_{max} - C_{mid}}{C_{adm} - C_{mid}} = 0,69, \quad (4.7)$$

где C_{max} – концентрация загрязнений в залповом сбросе (принимается равной 390 мг/дм³);

C_{mid} – средняя концентрация загрязнений в сточных водах (принимается равной 150 мг/дм³);

C_{adm} – концентрация, допустимая по условиям работы последующих сооружений (принимается равной 500 мг/дм³).

С учетом выражений (4.3–4.7), аккумулирующий объем усреднителя будет равен 207,35 м³.

Поскольку годовое количество воды, испарившейся за период устойчивого дефицита влажности воздуха, в условиях климата г. Ростова-на-Дону составляет более 900 мм, обезвоживание осадка в естественных условиях будет

осуществляться преимущественно за счет испарения влаги из осадка, а также с поверхности капиллярно-пористых элементов, поглотивших в себя часть воды в результате капиллярного всасывания. Эффект промораживания осадка в зимний период, обеспечивающий резкое увеличение водоотдачи после оттаивания, в расчетах не учитывался, хотя на практике, вероятно, явится фактором, способствующем сокращению продолжительности обезвоживания.

На основании анализа данных журнала по учету промывок отстойников ОА «Ростовводоканал», объемов образующегося между чистками осадка (таблица 2.4), а также экспериментально установленной ориентировочной продолжительности сушки уплотненного осадка на открытом воздухе (подраздел 3.2.2.4, приложение Б), составляющей около 2,5 месяцев в периоде устойчивого дефицита влажности воздуха при высоте напуска осадка не более 40 см, назначены следующие временные интервалы обезвоживания (таблица 4.1):

Таблица 4.1–Характеристика расчетных периодов образования и обезвоживания осадка

№ периода	Период образования осадка	Период, отводимый на обезвоживание осадка
I	ноябрь ÷ март	апрель ÷ июнь
II	апрель ÷ май	июнь ÷ август
III	июнь ÷ август	сентябрь ÷ май
IV	сентябрь ÷ октябрь	ноябрь ÷ июнь

Площадь сооружения для обезвоживания осадка (F , м²) предлагается рассчитывать по формуле:

$$F = \frac{1000 W_{oc}}{h_{упл}}, \quad (4.8)$$

где W_{oc} – объем осадка, выпускаемого на сооружение для обезвоживания, м³ (принимается на основании расчета по формуле 4.9);

$h_{упл}$ – высота слоя осадка на площадке после удаления свободной влаги в дренаж и капиллярного ее поглощения, мм.

Объем осадка (W_{oc} , м³), подлежащего подсушиванию, решено определять за вычетом влаги, удаленной в результате ее фильтрации в дренаж и всасывания капиллярно-пористым материалом [128]:

$$W_{oc} = W_{oc}^0 - W_B^\Phi - W_B^K, \text{ м}^3 \quad (4.9)$$

где W_{oc}^0 – исходный объем выпускаемого из сгустителя осадка, м³;

W_B^ϕ – объем воды, содержащейся в исходном объеме осадка и впоследствии удаленной в дренажную систему, м³;

W_B^k – объем воды, содержащейся в исходном объеме осадка и впоследствии поглощенной капиллярно-пористым материалом, м³.

Объем воды, удаляемой посредством дренажной системы (W_B^ϕ , м³), определен отдельно для каждого периода ввиду различных показателей фильтруемости осадка по сезонам года, основываясь на данные подразделов 3.2.2.1, 3.2.2.2 и приложения А, он составляет: 5 % для I, II и III периодов, 4 % для IV периода.

Объем воды, удаляемой в результате капиллярного всасывания (W_B^k , м³), определен на основании опытных исследований, представленных в подразделе 3.2.2.3, по формуле:

$$W_B^k = \left(1 - \frac{100 - W_1}{100 - W_2}\right) W_{oc}^0, \quad (4.10)$$

где W_1 – влажность осадка исходная, % (принимается равной 91,00 % для I периода, 92,88 % для II периода, 91,38 % для III периода, 92,03 % для IV периода по данным графиков рисунка 2.2);

W_2 – влажность осадка после капиллярного влагопоглощения, % (принимается равной 87,19 % для I периода, 91,82 % для II периода, 90,63 % для III периода, 91,12 % для IV периода по данным таблиц 3.3, 3.4).

Объемы осадка по каждому периоду накопления в отстойниках, а также воды, выделенной в процессе обезвоживания, представлены в таблице 4.2.

Высоту слоя уплотненного осадка на площадке ($h_{упл}$, м) предлагается вычислять, основываясь на количестве воды, которое может испариться из осадка (E , мм) за период устойчивого дефицита влажности, по формуле:

$$h_{упл} = 1,3 \cdot E, \quad (4.11)$$

Коэффициент 1,3 в формуле 4.11 принят на основании экспериментальных исследований процесса подсушивания осадка на открытом воздухе, согласно которым объем осадка при снижении его влажности до 40% и менее сокращается

более чем в 3,5 раза (приложение Б), следовательно, высота слоя сухого вещества на площадке в результате обезвоживания составит не более 40 % от высоты слоя испарившейся воды. Расчетное значение $h_{\text{упл}}$ не должно превышать 400 мм (по результатам исследований, описанных в подразделе 3.2.2.4).

Таблица 4.2 – Результаты расчета объемов осадка, подлежащего подсушиванию в сооружении для обезвоживания в естественных условиях

№ периода	Период образования осадка	Допустимый период подсушивания	Объем осадка, выпускаемого на площадку W_{oc}^0 , м ³	Концентрация твердой фазы уплотненного осадка, г/дм ³	Объем воды из осадка, удаленной в дренаж, W_6^{ϕ} , м ³	Объем воды из осадка, удаленной капиллярным поглощением W_B^K , м ³	Объем осадка, подлежащего подсушиванию, W_{oc} , м ³
I	ноябрь÷март	апрель÷июнь	322,58	90	16,13	95,89	210,56
II	апрель÷май	июнь÷август	339,54	70÷80	16,98	44,00	278,56
III	июнь÷август	сентябрь÷май	439,73	80÷90	21,99	35,20	382,54
IV	сентябрь÷октябрь	ноябрь÷июнь	293,70	80÷90	12,63	30,10	250,97

В [1] предлагается следующая формула для определения количества испарившейся воды (E , мм) в период устойчивого дефицита влажности воздуха:

$$E = 0,15 \cdot T_y (l_0 - l_{200}) (1 + 0,72 V_{200}), \quad (4.12)$$

где T_y – продолжительность обезвоживания заданного объема осадка в сооружении (на основании данных таблицы 4.2), сут;

l_0 – средняя упругость насыщенных водяных паров, соответствующая температуре осадка, гПа (рисунок 4.1);

l_{200} – средняя упругость водяных паров, соответствующая абсолютной влажности воздуха на высоте 200 см от водной поверхности, гПа (рисунок 4.1);

V_{200} – средняя скорость ветра на высоте 200 см, м/с (ввиду особенности конструкции сооружения для обезвоживания осадка, подразумевающей кровельное покрытие для защиты от атмосферных осадков, а также

вентпроемы, скорость ветра по данным рисунка 4.1 в расчетах принята с коэффициентом 0,7).

Результаты расчета сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Расчет высоты слоя осадка на площадке и площади сооружения

№ периода	Средняя упругость насыщенных водяных паров l_0 , гПа	Средняя упругость водяных паров l_{200} , гПа	Средняя скорость ветра над осадком V_{200} , м/с	Количество испарившейся воды E , мм	Высота слоя осадка, уплотненного на площадке $h_{упл}$, м	Площадь сооружения, F , м ²	Высота исходного напуска осадка на площадку h_0 , м
I	17,95	11,23	3,15	296,47	0,39	539,90	0,60
II	26,11	15,13	2,57	422,41	0,40	696,40	0,50
III	9,59	7,26	3,47	330,30	0,40	956,35	0,46
IV	14,92	9,78	3,31	313,01	0,40	627,43	0,47

Следует отметить, что высота слоя уплотненного осадка ($h_{упл}$, м), соответствующая времени завершения процессов фильтрации и капиллярного всасывания влаги, не превышает глубины промерзания осадка ($\delta_{п}$, м) равной 0,46 м, которая вычислена по формуле, рекомендованной в [2]:

$$\delta_{п} = 0,0125 \cdot (\sum_1^t t)^{0,61}, \quad (4.13)$$

где $\sum_1^t t$ – сумма отрицательных среднесуточных температур за период замораживания осадка, °С (принимаем -367 °С по данным рисунка 4.1а).

Поскольку к размещению на сооружении подлежит объем осадка одновременно за I, III и IV периоды, общая площадь сооружения (F_0 , м²):

$$F_0 = F_1 + F_3 + F_4, \quad (4.14)$$

где F_1 , F_3 , F_4 – площади сооружений, необходимых для размещения осадка за I, III (как больший в сравнении с периодом II), IV периоды соответственно, м².

$$F_0 = 539,90 + 956,35 + 627,43 = 2123,68 \text{ м}^2.$$

Количество отдельных коридоров сооружения (n , шт):

$$n = \frac{F_0}{F'}, \quad (4.15)$$

где F' – площадь одного коридора, м² (принимаем размеры $l \times b = 50 \times 1,6$ м).

$$n = \frac{2123,68}{80} = 26,55 = 27 \text{ коридоров.}$$

Строительную высоту стен сооружения можно рассчитать по формуле:

$$h_{\text{стр}} = h_{\text{тр}} + h_0 + h_{\text{др}} + 0,5 = 2,4 \text{ м,} \quad (4.16)$$

где $h_{\text{тр}}$ – глубина заложения трубы впуска осадка, м (принимается не менее 1,0 м);

$h_{\text{др}}$ – высота дренажного слоя, м (принимается 0,3 м).

Влажность осадка к окончанию периода подсушивания, рассчитанная по формуле, предложенной В.М. Любарским [2] составит около 40 %:

$$W_2 = 100 - \frac{V_1}{V_2} (100 - W_1), \% \quad (4.17)$$

где W_1, W_2 – влажность осадка до ($W_1=85\%$) и после подсушивания, %;

$\frac{V_1}{V_2}$ – отношение объемов осадка до и после подсушивания (принимается равным 4,01–4,18 по данным приложения Б).

Справедливо отметить, что в условиях наметившейся в последние десятилетия тенденции потепления климата, обезвоживание осадка на иловых площадках за счет подсушивания весьма перспективно. Анализ изменения температуры воздуха г. Ростова-на-Дону в теплый период года с 1999 по 2015 гг., выполненный на основании [129], подтвердил ее возрастание примерно на 2,5 °С (рисунок 4.4). Это позволяет прогнозировать в скором времени необходимость актуализации справочника климатологии [106], составленного по результатам наблюдений за климатическими параметрами с 1966 по 2010 гг., и, как результат, возможность увеличения нагрузки на сооружение для обезвоживания осадка.

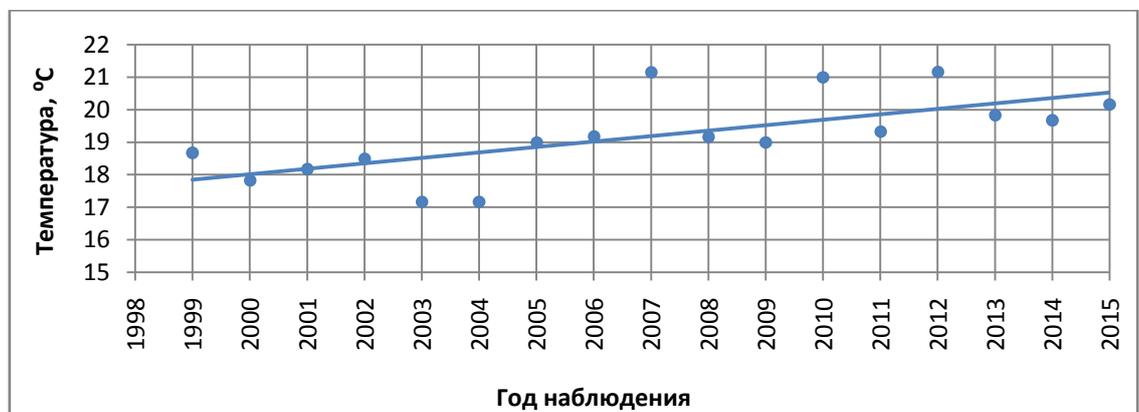


Рисунок 4.4 – Тенденция роста средних температур воздуха теплого периода года (с апреля по сентябрь) в г. Ростове-на-Дону

4.5 Математическая модель процесса обезвоживания осадка в условиях полного факторного эксперимента

Поиск математической модели (некой функции), максимально точно описывающей процесс обезвоживания осадка на предлагаемой конструкции сооружения (рисунок 4.2), был осуществлен согласно методике [93]. В первую очередь была определена цель исследования, а именно, обозначен параметр оптимизации. В качестве данного параметра выбрана продолжительность обезвоживания осадка (сут) до расчетной влажности (около 30 %). Выбранный параметр оптимизации отвечает основным требованиям, предъявляемым к целям исследования, поскольку является: эффективным с точки зрения возможности достижения цели; количественным (выражается числом); однозначным в статистической оценке.

В качестве способов воздействия на оптимизируемый параметр выделены факторы: высота налива осадка, характеристика дренажа (наличие или отсутствие), возможность осуществления капиллярного поглощения влаги (наличие или отсутствие). Первый фактор (высота налива осадка), является количественным, поскольку его величина может задаваться конкретным значением (числом), второй и третий – качественные, не соответствующие числовой шкале, а обозначающие особенность технологического процесса и задаваемые в данном случае уровнями (наличие или отсутствие). Выбранные факторы отвечают необходимым критериям: управляемость (есть возможность устанавливать конкретное значение), непосредственное воздействие на объект (не являются функцией ряда переменных), взаимная совместимость между собой и отсутствие линейной корреляции по отношению друг к другу.

Поскольку при проведении полного факторного эксперимента должны реализоваться все возможные сочетания уровней факторов, для определения числа необходимых опытов (N) воспользуемся формулой [93]:

$$N=2^k, \quad (4.18)$$

где k – число факторов.

Исходные условия эксперимента представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Факторы активного эксперимента

Наименование фактора	Единица измерения	Уровень варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Высота налива осадка (x_1)	см	40	50	60	10
Дренажная система (x_2)	–	отсутствие	–	наличие	–
Капиллярное влагопоглощение (x_3)	–	отсутствие	–	наличие	–

Матрица планирования эксперимента 2^3 будет иметь вид (таблица 4.5):

Таблица 4.5 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Фактор			Эффект взаимодействия факторов			
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	–	–	–	–	+	+
2	–	+	–	–	+	–	+
3	–	–	+	+	–	–	+
4	+	+	–	+	–	–	–
5	+	–	+	–	+	–	–
6	–	+	+	–	–	+	–
7	–	–	–	+	+	+	–
8	+	+	+	+	+	+	+

Определившись со всеми исходными условиями эксперимента, можно задаться начальным уравнением модели:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (4.19)$$

Как видно, в данном уравнении учтены эффекты взаимодействия факторов первого (x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3) и второго порядка ($x_1x_2x_3$), поскольку единовременное совмещение их определенных уровней может оказать значительное влияние на оптимизируемый параметр (продолжительность обезвоживания осадка).

Пользуясь уравнением (4.19), определим условия подсчета коэффициентов (b_0, b_1, \dots, b_{123}), руководствуясь формулой [93]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{j,i} y_i}{N}, j = 0, 1, \dots, k. \quad (4.20)$$

Ввиду предположения, что на продолжительность обезвоживания осадка с различным содержанием воды обозначенные факторы могут повлиять в разной степени, были проведены две параллельные серии экспериментальных

исследований: в первой – использовался осадок исходной влажностью 91 %, во второй – этот же осадок был разбавлен водой до влажности 94 %. Все прочие условия были аналогичны. Результаты экспериментов, обработанные методом регрессионного анализа с учетом статистической оценки адекватности и значимости, представлены в таблицах В.1 и В.2 приложения В.

С целью проверки однородности дисперсий, приведенных в приложении В, рассчитано значение критерия Кохрена (G) для обоих вариантов по формуле [93]:

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (4.21)$$

где S_{max}^2 – максимальное значение дисперсии;

S_i^2 – дисперсия отдельного опыта;

N – количество опытов.

Расчетные значения G -критерия Кохрена (для 1 варианта $G=0,27$, для 2 варианта $G=0,22$) не превышают табличного ($G_{табл} = 0,6798$), следовательно условие однородности дисперсий выполняется.

Дисперсия параметра оптимизации вычисляется по формуле [93]:

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{q=1}^n (y_{iq} - y_{i,ср})^2}{N(n-1)}, \quad (4.22)$$

где n – количество параллельных опытов;

$y_i, y_{ср}$ – результат отдельного опыта и среднее значение результатов.

Расчетное значение дисперсии параметра оптимизации: для 1 варианта $S_{(y)}^2 = 3,75$, для 2 варианта $S_{(y)}^2 = 4,63$.

Для проверки адекватности модели вычисляется дисперсия адекватности [93]:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f}, \quad (4.23)$$

где Δy_i^2 – квадратичное отклонение результата отдельного опыта;

f – число степеней свободы (принимается $f = 4$).

Дисперсия адекватности, вычисленная по формуле (4.23), составила: для 1 варианта $S_{ад}^2 = 7,5$, для 2 варианта $S_{ад}^2 = 9,25$.

Проверкой гипотезы об адекватности модели является F -критерий Фишера, рассчитываемый по формуле [93]:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{(y)}^2}. \quad (4.24)$$

Расчетные значения F -критерия Фишера (для 1 варианта $F = 2,00$, для 2 варианта $F = 1,99$) не превышают табличного ($F_{табл} = 3,8$), следовательно, можно полагать, что модель (4.19) адекватна.

Расчет коэффициентов модели (4.19) сведен в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Коэффициенты начального уравнения модели

Серия эксперимента	Значение коэффициента							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
1	73,63	9,88	-3,38	-4,87	-1,63	-1,63	-0,38	0,38
2	72,50	9,25	-10,75	-5,5	-2,00	-2,25	2,25	1,50

На основании оценки значимости коэффициентов, выполненной согласно [93], в расчет принимаем коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 , b_3 . Ввиду этого преобразуем уравнение модели (4.19) для обоих вариантов исходной влажности осадка:

$$1 \text{ вариант: } y = 73,63 + 9,88x_1 - 3,38x_2 - 4,87x_3; \quad (4.25)$$

$$2 \text{ вариант: } y = 72,50 + 9,25x_1 - 10,75x_2 - 5,5x_3. \quad (4.26)$$

Подставляя в уравнения (4.25, 4.26) значения факторов воздействия, заданные уровнями варьирования (таблица 4.4), можно обозначить, что наибольшее влияние на значение параметра оптимизации (продолжительность обезвоживания осадка до расчетной влажности) в экспериментах с осадком, содержащим повышенное количество влаги, оказывает фактор x_2 (наличие дренажа), поскольку при нем максимальный по величине коэффициент, в экспериментах с осадком меньшей влажности – фактор x_1 (высота напуска осадка). Полученные уравнения подтверждают большую эффективность влияния дренажной системы и капиллярно-пористых материалов на продолжительность обезвоживания по отношению к осадку, содержащему воду разбавления (меньшей концентрации). Знак «+» в уравнениях модели перед коэффициентом x_1 указывает на то, что с увеличением высоты напуска осадка увеличивается и параметр

оптимизации, знак «-» перед коэффициентами x_2 и x_3 – на уменьшение параметра оптимизации при возможности удаления влаги в дренажную систему и всасывания ее капиллярно-пористым материалом.

Выводы по 4-ой главе

1. Анализ климатических характеристик Ростовской области, в частности г. Ростова-на-Дону, позволил сделать вывод о целесообразности осуществления обезвоживания осадка в естественных условиях (на площадках обезвоживания) в результате подсушивания за счет длительного периода устойчивого дефицита влажности воздуха, обеспечивающего испарение воды (общее за год) в количестве более 900 мм.

2. Детально разработанная конструкция технологического комплекса для обезвоживания осадка в естественных условиях имеет ряд инженерных решений, отличающих ее от аналогов. К наиболее существенным из них можно отнести наличие: капиллярно-пористых элементов конструкции, осуществляющих поглощение влаги из шлама и создающих дополнительную поверхность испарения, кровельного покрытия, минимизирующего негативное воздействие атмосферных осадков, электрифицированных механизмов, упрощающих уборку обезвоженного кека. Перечисленные особенности позволяют сократить объем воды, подлежащей испарению из осадка, тем самым способствуя снижению продолжительности обезвоживания на 20-40% в сравнении с иловыми площадками, не оснащенными какими-либо средствами интенсификации процесса обезвоживания. Кроме того, могут быть значительно сокращены трудозатраты в процессе эксплуатации. Установлено, что высота напуска осадка на площадку из сгустителя (влажностью 91-95 %) должна составлять 0,46-0,60 м в зависимости от времени года. Полезная площадь сооружения применительно к Центральным ВОС г. Ростова-на-Дону составляет 2124 м².

3. В качестве основных сооружений, необходимых для обработки осадка ВОС г. Ростова-на-Дону, могут быть выделены: сгуститель для осуществления разделения шлама промывки отстойников на воду и осадок (в том числе его вторичного уплотнения), технологический комплекс для обезвоживания осадка в естественных условиях, резервуар для усреднения расхода сливной воды.

4. В условиях полного факторного эксперимента получена математическая модель, описывающая функциональную зависимость продолжительности обезвоживания осадка до расчетной влажности (не более 40 %) от воздействия совокупности различных факторов, а именно: высоты налива осадка, наличия системы дренажа и капиллярно-пористых элементов как средств интенсификации процесса удаления влаги.

5 Технико-экономическое обоснование проектного решения обработки осадка

В предыдущих разделах настоящей работы представлена детальная оценка целесообразности внедрения технологической линии для обработки осадка отстойников (включающей сгуститель, резервуар-усреднитель, комплекс для обезвоживания осадка в естественных условиях (рисунок 4.3)) с точки зрения функциональной необходимости каждого из сооружений.

Немалое значение ввиду постоянно растущего «давления» техносферы на окружающую природную среду, характерного для промышленно развитых регионов, имеют и экологические аспекты. Деятельность водопользователей регламентирована рядом основных общегосударственных документов [66, 130, 131]. Предлагаемая технологическая схема (рисунок 4.3) отвечает главным природоохранным принципам использования водных объектов, к которым можно отнести:

- использование водных объектов не должно оказывать негативное воздействие на окружающую среду (ст. 3 [130]);
- водопользователи обязаны осуществлять водоохранные мероприятия, контролировать их выполнение, своевременно принимать меры по предотвращению загрязнения водных объектов в случае возникновения аварийных ситуаций (ст. 60 [130], п. 3.4 [66]);
- запрещается ввод в эксплуатацию объектов, не оснащенных технологиями обезвреживания отходов производства или безопасного их размещения (ст. 38 [131]);
- при внедрении новых технологических объектов необходимо учитывать их допустимое влияние на состояние водных объектов (ст. 60 [130]);
- сброс в водные объекты сточных вод, которые могут быть устранены путем организации повторного или оборотного водоснабжения, запрещен (п. 4.1.1 [66]).

Кроме того, ввиду перехода предприятий водопроводно-канализационного хозяйства города на рыночные отношения, необходимым условием внедрения любого проектируемого комплекса или системы является оценка технико-экономической эффективности.

В качестве сравниваемых вариантов проектных решений обращения с осадком Центральных ВОС г. Ростова-на-Дону, подлежащих технико-экономическому обоснованию, приняты:

- 1 вариант – устройство комплекса сооружений (рисунок 4.3) для обработки осадка, включающего сгуститель, технологический комплекс для обезвоживания осадка в естественных условиях, резервуар-усреднитель для сбора сливной воды;
- 2 вариант – устройство комплекса сооружений для обработки осадка методом механического обезвоживания, включающего сгуститель, корпус вакуум-фильтрации, камеру промывки осадка, илосборники, камеру переключения и резервуар для сбора сливной воды на основании [132].

Согласно [133] в расчетах по вариантам №1 и №2 учтены все виды капиталовложений и эксплуатационных расходов, связанных с устройством и использованием предусмотренных сооружений (таблицы 5.1, 5.2).

Капитальные затраты на строительство сооружений по вариантам №1, 2 и величины годовых эксплуатационных расходов рассчитаны, исходя из данных о мощности проектируемых сооружений для обработки осадка Центральных ВОС г. Ростова-на-Дону, представленных в главе 4 настоящей работы, составе существующих технологических сооружений водопровода, а также генерального плана водоочистного комплекса в целом.

При расчете годовых эксплуатационных расходов (C , руб) учтены основные элементы затрат:

$$C = C_{\text{реаг}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{Т}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{тр}} + C_{\text{пр}}, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{реаг}}$ – стоимость реагентов, руб. (определена на основании данных [133] с последующим переводом базисных цен в текущие);

$C_{эл}$ – стоимость электрической энергии, руб. (определена согласно Постановлению региональной службы по тарифам Ростовской области №83/5 от 29 декабря 2015 г);

C_T – стоимость тепловой энергии, руб. (определена согласно Постановлению региональной службы по тарифам Ростовской области №72/10 от 30 ноября 2015 г);

$C_{ам}$ – амортизационные отчисления, руб. (принимаются равными 5 % от суммы капитальных вложений);

$C_{тр}$ – затраты на текущий ремонт, руб. (принимаются равными 1 % от капитальных расходов);

$C_{пр}$ – прочие расходы, руб. (принимаются равными 20 % от суммы амортизационных отчислений).

Таблица 5.1 – Ориентировочные затраты на строительство и эксплуатацию комплекса сооружений для обработки осадка Централных ВОС г. Ростова-на-Дону по варианту №1

Наименование затрат	Стоимость, руб. (в ценах на I квартал 2016г)
1	2
Капиталовложения	
1. Трубопроводная сеть от отстойников до сгустителей	105 545,00
2. Сгустители, трубопроводные сети от сгустителей до сооружения для обезвоживания осадка	11 989 187,00
3. Сооружение для обезвоживания осадка в естественных условиях	8 902 317,00
4. Галерея ленточного конвейера	3 030 180,00
5. Павильон контейнера для приема кека	700 491,00
6. Резервуар-усреднитель	11 491 096,00
Итого капитальных расходов	36 218 816,00
Эксплуатационные расходы	
1. Стоимость реагентов	1 034,00
2. Стоимость электроэнергии	118 822,00
3. Стоимость тепловой энергии	73 524,00
4. Амортизационные отчисления	1 810 941,00
5. Затраты на текущий ремонт	362 188,00
6. Прочие расходы	362 188,00

Продолжение таблицы 5.1

1	2
Итого эксплуатационных расходов	2 728 697,00
Примечание: Капиталовложения (прямые затраты) по п. 1-6 рассчитаны на основании ТЕР 81-02-2001, ТСЦ 81-01-2001 и типовых проектов с последующим переводом базисных цен в текущие	

Таблица 5.2 – Ориентировочные затраты на строительство и эксплуатацию комплекса сооружений для обработки осадка Центральных ВОС г. Ростова-на-Дону по варианту №2

Наименование затрат	Стоимость, руб. (в ценах на I квартал 2016г)
Капиталовложения	
1. Трубопроводная сеть от отстойников до сгустителей	105 545,00
2. Сгустители, трубопроводные сети от сгустителей до цеха механического обезвоживания осадка	11 989 187,00
3. Корпус вакуум-фiltrации	40 406 768,00
4. Камера промывки осадка	1 907 616,00
5. Илосборники и камера переключений	346 839,00
6. Резервуар-усреднитель	11 491 096,00
Итого капитальных расходов	66 247 051,00
Эксплуатационные расходы	
1. Стоимость реагентов	1 034,00
2. Стоимость электроэнергии	126 494,00
3. Стоимость тепловой энергии	207 281,00
4. Амортизационные отчисления	3 312 353,00
5. Затраты на текущий ремонт	662 471,00
6. Прочие расходы	662 471,00
Итого эксплуатационных расходов	4 972 104,00
Примечание: Капиталовложения (прямые затраты) по п. 1-6 рассчитаны на основании [132], ТЕР 81-02-2001, ТСЦ 81-01-2001 и типовых проектов с последующим переводом базисных цен в текущие	

Согласно [133] лучшим вариантом проектного решения является тот, который имеет минимальные приведенные затраты (Z), определяемые как сумма эксплуатационных расходов (C) и капитальных вложений (K), приведенных к

одинаковой размерности в соответствии с нормативом эффективности капитальных вложений:

$$Z = C + 0,12K, \text{ руб.} \quad (5.2)$$

На основании формулы 5.2 приведенные затраты в ценах на I квартал 2016 г. составят:

- по варианту №1: 7 074 955,00 руб.;
- по варианту №2: 12 921 750,00 руб.

Поскольку минимум приведенных затрат характерен для варианта №1, способ обезвоживания осадка в естественных условиях посредством технологического комплекса (рисунок 4.2), разработанного в рамках диссертационного исследования, является наиболее экономически выгодным.

Экономический результат (P) технологических сооружений по обработке осадка, обеспечивающих средозащитные мероприятия, выражается величиной предотвращаемого ими годового экономического ущерба от загрязнения среды (Π) и определяется «Временной типовой методикой определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиненного народному хозяйству загрязнением окружающей среды», рекомендуемой [133]:

$$P = \Pi, \text{ руб.} \quad (5.3)$$

Величина предотвращаемого экономического ущерба от загрязнения окружающей среды (Π), в свою очередь, равна разности между расчетными величинами ущерба, имеющими место до устройства на станции технологических сооружений для обработки осадка и после него:

$$\Pi = U_1 - U_2, \text{ руб.} \quad (5.4)$$

где U_1 – плата за сброс шламовых вод в окружающую среду (принимается равной 2 259 301,84 руб. согласно данным таблицы 5.3);

U_2 – величина экономического ущерба от загрязнения окружающей среды после введения в эксплуатацию технологических сооружений для обработки осадка (принимается равной 0 руб.).

Экономический ущерб, обусловленный временно-согласованными сбросами шлама в поверхностные водные объекты (таблица 5.3), регламентируется ст. 16 [131]. Расчет платы за сброс шламовых вод в реку Дон произведен на основании Постановления Правительства РФ от 12 июня 2003 г. №344 «О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, в том числе через централизованные системы водоотведения, размещение отходов производства и потребления» с изменениями и дополнениями от 26 декабря 2013 г. (Постановление Правительства РФ от 26 декабря 2013 г. №393), результатов химического анализа осадка ВОС г. Ростова-на-Дону и годового его количества при учете работы обоих комплексов ВОС (Центрального и Александровского).

Таблица 5.3 – Расчет ориентировочной платы за сброс шламовых вод промывки отстойников ВОС г. Ростова-на-Дону в поверхностные водные объекты

Наименование загрязняющего вещества	Годовое количество, т	Норматив платы за сброс 1 т загрязняющего вещества, руб.	Общая стоимость в ценах 2013 г., руб.	Общая стоимость в ценах 2016 г., руб. (с учетом коэффициента индексации платы*)
1	2	3	4	5
Взвешенные вещества	281,64	1830,00	515 401,20	599 720,84
Медь (Cu ²⁺)	0,017	1377405,00	23 415,89	27 246,73
Свинец (Pb _{общ})	0,0019	229565,00	436,17	436,17
Алюминий (Al ³⁺)	15,49	34435,00	533 398,15	620 662,09
Фосфаты (по P)	0,36	6890,00	2 480,40	2 886,19
Калий (K ⁺)	0,44	31,00	13,64	15,87
Железо (Fe _{общ})	13,52	13775,00	186 238,00	186 238,00
Магний (Mg _{общ})	3,30	34,50	113,85	113,85
Ванадий (V)	0,00053	1377405,00	730,02	849,45
Хром (Cr ³⁺)	0,00017	19675,00	3,34	3,89
Кобальт (Co ²⁺)	0,025	137740,00	3 443,50	4 006,86
Никель (Ni ²⁺)	0,029	137740,00	3 994,46	4 647,95
Цинк (Zn ²⁺)	0,0052	137740,00	716,25	833,43
Мышьяк (As)	0,019	27550,00	523,45	609,09

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3	4	5
Итого:			1 270 908,32	1 448 270,41
С учетом коэффициента экологической ситуации				2 259 301,84
Примечание: *Коэффициент индексации платы принят на основании Постановления Правительства РФ от 19 ноября 2014 г. №1219 для всех загрязняющих веществ, представленных в таблице, кроме свинца, железа (общего) и магния				

Таким образом, с учетом формул 5.3 и 5.4 годовой экономический результат средозащитных мероприятий, обусловленный предотвращением платы за сброс загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты в результате устройства сооружений по обработке осадка ВОС г. Ростова-на-Дону для АО «Ростовводоканал», составит 2,26 млн. руб. (0,94 млн. руб. с учетом производительности Централных ВОС и 1,32 млн. руб. с учетом производительности Александровских ВОС).

Выводы по 5-ой главе

1. Технология обработки осадка отстойников, разработанная в рамках настоящего диссертационного исследования, отвечает главным природоохранным принципам, регламентированным документами общегосударственного значения.
2. Приведенные затраты на обезвоживание осадка методом вакуумного фильтрования превышают соответствующие значения, характерные при его обезвоживании в естественных условиях (посредством технологического комплекса, разработанного в рамках диссертационного исследования) на 45 %.
3. Годовой экономический результат от внедрения технологической схемы обработки осадка на ВОС г. Ростова-на-Дону для АО «Ростовводоканал» составит 2,26 млн. руб. в ценах на I квартал 2016 г. Экономический результат обусловлен предотвращением экономического ущерба, вызванного ежегодной платой за сброс загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты.

Заключение

1. Установлено, что исходные физико-химические показатели осадка отстойников значительно зависят не только от видов реагентов, применяемых для очистки речной воды (ОХА в сочетании с полиДАДМАХом, самостоятельное применение последнего), и сезона осадкообразования, но и от продолжительности работы сооружений между промывками. Так, содержание твердой фазы в объеме осадка (основной качественный показатель) в зависимости от перечисленных факторов изменяется в интервале от 5,4 до 14,6 %. Колебания качества осадка, в свою очередь, сказываются на процессах его дальнейшего обезвоживания.

2. Гравитационное отстаивание шлама промывки отстойников в течение 96-120 ч позволяет достичь концентрации твердой фазы в осадке, аналогичной исходным значениям (средним по высоте слоя осадка при нахождении его в отстойнике перед промывкой). В целях дополнительного повышения эффекта уплотнения осадка на 10-15 % целесообразна его предварительная обработка катионными ПАА. В зависимости от сезона года, времени, отводимого на уплотнение, и требующейся степени очистки надосадочной воды оптимальная доза реагента составляет 0,006-0,012 % по м.с.в. осадка.

3. Доказано, что в условиях климата Ростовской области обезвоживание осадка маломутной и малоцветной природной воды в естественных условиях при сравнении с обработкой на механических аппаратах (вакуум-фильтрах) позволяет достичь его минимального остаточного влагосодержания.

4. Экспериментально установлена эффективность водоотдачи уплотненного осадка (влажностью 91-95 %) в естественных условиях. В процессе дренирования влажность может быть снижена на величину 0,2-0,7 %, методом капиллярного поглощения на 0,8-9,0 %, испарение влаги на открытом воздухе в условиях климата Ростовской области обеспечивается со средней интенсивностью 0,11 м/мес (в период с марта по октябрь). Перечисленные факторы способствуют достижению влажности осадка значений менее 40 % за период около 2,5 месяцев

(при высоте исходного напуска 0,46-0,60 м). Обезвоживание осадка методом вакуумного фильтрования позволяет достичь снижения влагосодержания на 9-13 %, что обуславливает необходимость организации дополнительной его сушки с целью комплексного решения вопроса утилизации.

5. Разработана конструкция технологического комплекса для обезвоживания осадка в естественных условиях, обеспечивающая не только эффективное испарение влаги, но и ее удаление методами фильтрации и капиллярного всасывания. Определены рациональные режимы дренирования и капиллярного влагопоглощения.

6. Получена математическая зависимость, позволяющая с высокой степенью достоверности определять продолжительность обезвоживания осадка в естественных условиях на предлагаемой модели сооружения при различных показателях его исходной влажности и высоты напуска.

7. Установлено, что надосадочная вода, выделенная при отстаивании шлама, по ряду химических показателей не соответствует нормам ее отведения в поверхностные водные объекты (в частности, реку Дон): вероятно превышение ПДК железа и алюминия в водоисточнике. Условиям сброса в централизованные (общесплавные и бытовые) системы водоотведения вода не удовлетворяет ввиду превышения ПДК марганца в 6-28 раз и фосфатов в 1,05 раза. Доказана необходимость организации повторного использования надосадочной воды при учете ее органолептических характеристик: мутность составляет 25-50 мг/дм³, цветность 40-220 град в зависимости от исходных параметров осадка (без его предварительного кондиционирования). Предварительная обработка шлама катионным ПАА дозой 0,006-0,012 % по м.с.в. обеспечивает снижение мутности надосадочной воды на 22-29 %, цветности на 40-46 %.

8. Фильтрат, выделенный в процессе дренирования осадка с концентрацией твердой фазы 30-80 г/дм³, содержит большее количество примесей в сравнении с водой над осадком: мутность выше на 20-32 %, цветность до 40 %.

Предварительное кондиционирование осадка катионными ПАА дозой около 0,006 % по м.с.в. снижает мутность фильтрата на 28-39 %, цветность на 40-46 %.

9. Разработана и обоснована конструкция комплекса для обработки осадка в естественных условиях, которая за счет ряда инженерных решений позволяет сократить продолжительность обезвоживания на 20-40 % в сравнении с иловыми площадками, не оборудованными средствами интенсификации процесса обезвоживания, а также способствует значительному сокращению трудозатрат при эксплуатации. Годовой экономический результат от устройства сооружений для обработки осадка, обусловленный предотвращением платы за сброс загрязняющих веществ в водные объекты окружающей среды, для ВОС г. Ростова-на-Дону составляет 2,26 млн. руб. в ценах 2016 г.

Список литературы

1. Справочное пособие к СНиП 2.04.02-84* Проектирование сооружений для обезвоживания осадков станций очистки природных вод.– М.: Стройиздат, 1990.– 40 с.
2. Любарский, В.М. Осадки природных вод и методы их обработки / В.М.Любарский. – М.: Стройиздат, 1980. –128 с.
3. Нечаева, Л.И. Обезвоживание минеральных осадков природных вод в шламонакопителях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Нечаева Лариса Ильинична.– Ростов-на-Дону, 1990. – 199 с.
4. Журба, М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. Т. 2 / М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж.М. Говорова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 496 с.
5. Храменков, С.В. Обработка осадков станций водоподготовки / С.В.Храменков, А.Н. Пахомов, Д.А. Данилович и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. –№10. – С. 67-76.
6. Любарский, В.М. Влияние замораживания осадков сточных вод на интенсификацию их обезвоживания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Любарский Владлен Маркович. – М., 1970. – 24 с.
7. Технический справочник по обработке воды: в 2 т. Т. 1 / Под ред. М.И.Алексеева, В.Г.Иванова, А.М.Курганова и др. – Спб.: Новый журнал, 2007.
8. Яковлев, С.В. Канализация / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, А.И. Жуков и др. – М.: Стройиздат, 1975. –632 с.
9. Яковлев, С.В. Водоотведение и очистка сточных вод / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – М.: АСВ, 2004. –704 с.
10. Яковлев, С.В. Обработка и утилизация осадков производственных сточных вод / С.В. Яковлев, Л.С. Волков, Ю.В. Воронов и др. –М.: Химия, 1999. – С.448.

11. Kos, P. Compaction of activated sludge under the action of gravity / P. Kos // Effluent water treatment journal. –1972. –№11.
12. Kos, P. Gravity Thickening of Water-Treatment-Plant Sludges / P. Kos // Journal AWWA.–1977. –№5.
13. Гандурина, Л.В. Производственные испытания флокулянта ВПК-101 при флотационной очистке сточных вод / Л.В. Гандурина, И.Н. Мясников и др. // Научные исследования в области физико-химической очистки промышленных сточных вод: Труды института «ВОДГЕО». – М.: ВНИИ «ВОДГЕО». –1978. – вып.71. – С.16-19.
14. Исследование методов обезвоживания и утилизации осадка водопроводных станций юга СССР. Исследование влияния магнитного поля и микрофльтрации на процесс обезвоживания осадков в лабораторных и полупроизводственных условиях: отчет о НИР / Лысов В.А., Поповьян Ф.Л. и др.– Ростов–на–Дону: Ростовский инженерно-строительный институт, 1987. – 89 с.
15. Liem, L.E. Optimization Study of Flocculation Mixing by Means of Grids / L.E.Liem, D.W.Swith, S.J.Stenley // Journal of environmental engineering. – 2000.–№2.
16. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П.А.Ребиндер. – М.: Наука, 1966. – 399 с.
17. Справочное пособие к СНиП 2.04.02-84 Пособие по проектированию сооружений для очистки и подготовки воды / Центральный институт типового проектирования.– М.: Центральный институт типового проектирования, 1989.– 128 с.
18. Любарский, В.М. Уплотнение осадков, образующихся при очистке природных вод с использованием сернокислого алюминия / В.М.Любарский, И.Н. Рыбников // Водоснабжение и санитарная техника.– 1977.– №4.– С.9-12.

19. Пахомов, А.Н. Исследование и практическая реализация процесса обезвоживания осадков водопроводных станций / А.Н. Пахомов, В.Н.Штоповров, Д.А. Данилович и др. // Водоснабжение и санитарная техника.– 2004.– №12.– С.25-31.
20. Лейчикс, И.М. Фильтрование с применением вспомогательных веществ / И.М. Лейчикс.– М.: Киев. Техника, 1975.– 192 с.
21. Малиновская, Т.А. Исследование в области разделения высокодисперсных суспензий: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.17.08 / Малиновская Татьяна Адриановна.– М., 1973.– 46 с.
22. Пат. 2337071 Российская Федерация, МПК С 02 F 11/04, С 02 F 1/56, С 02 F 103/02. Способ обработки осадков водопроводных станций / Ивкин П.А., Керин А.С., Казаков А.В. и др.; патентообладатель ОАО «НИИ ВОДГЕО».– №2007141799/15; заявл. 14.11.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл.№30.– 2 с.
23. Лавров, И.С. Исследование механизма замораживания осадков в процессах водоочистки / И.С. Лавров, В.Н. Пономарева, О.М. Розенталь // Журнал прикладной химии.– 1977.– т. 50.– №12.
24. Пономарев, Е.И. Исследование действия замораживания на свойства осадков гидроокисей металлов: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.01 / Пономарев Е.И.– Томск, 1971.– 147 с.
25. Benn, D. The disposal of sludge by the freezing and trawing process / D.Benn, P.Doc // Filtration and Separation.– 1969.– vol. 6.– №4.– P.383-389.
26. Logsdon, G.S. Sludge de watering by freezing / G.S.Logsdon, E.J.Elgerley // Journal American Water Works Association.– 1971.– vol.63.– №11.– P.734-740.
27. Sato, A. Filtration characteristics of frozen alum sludge / A.Sato, K.Goto // Technology Reports Tohoku University.– 1979.– vol.44.– №2.– P.411-440.
28. Wilhelm, I.H. Freeze treatment of alum sludge / I.H.Wilhelm, C.E.Silverblatt // Journal American Water Works Association.– 1976.– vol.68.– №6.– P.312-314.
29. Doc, P.W. Treatment and Disposal of Washwater Sludge / P.W.Doc // Journal Water Engineering.– 1958.– vol.12.– №6.

30. Федоров, А.И. Обработка гидроокисных осадков поверхностных природных вод методом непрерывного тонкослойного замораживания-оттаивания: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04/Федоров Анатолий Иванович.– М., 1984.– 186 с.
31. А.с. 833586 СССР, МКИ С 02 Р 11/20. Способ обработки осадков / Л.Н.Рынский, Ю.Д.Браславский (СССР).– №833586; заявл. 16.10.1979; опубл. 30.05.1981.– 6 с.
32. Любарский, В.М. Перспективы использования метода замораживания и оттаивания осадков / В.М. Любарский, В.Т. Плотников // Обработка и утилизации осадков сточных вод.– М.: Издательство МДНТП им. Ф.Э.Дзержинского, 1970.– С.48-64.
33. Новые технологии и оборудование в водоснабжении и водоотведении: Сб. материалов НИИ КВОВ.– М.: ГУП «ВИМИ», 1999.– Вып. 1.– с.1-236.
34. Николадзе, Г.И. Водоснабжение: учеб. для вузов / Г.И. Николадзе, М.А. Сомов.– М.: Стройиздат, 1995.– 668 с.
35. Скрыбин, А.Ю. Разработка технологии обезвоживания водопроводных осадков, образованных при осветлении воды с применением флокулянта ВПК-402: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Скрыбин Александр Юрьевич.– М., 2003.– 170 с.
36. 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.58-63.
37. Керин, А.С. Ленточные фильтр-прессы и сетчатые сгустители в технологии обработки осадков / А.С. Керин, И.А. Нечаев // Водоснабжение и санитарная техника.– 2005.– №5.– С.41-44.
38. Луков, С.А. О проблеме обработки осадка сточных вод / С.А. Луков // Водоснабжение и санитарная техника.– 2006.– №12.– С.30-32.
39. Gomella, G. Divers rapports / G.Gomella // Traitement des Boues Hydroxydes.– 1969.– vol.52.– №417.

40. Krasauskas, J. W. Review of Sludge Disposal Practices / J.W.Krasauskas // Journal American Water Works Association.– 1969.– vol.61.– №5.
41. Разработка рекомендаций по применению вакуум-фильтров и фильтр-прессов для обработки осадка очистных сооружений внеплощадочного хозяйственного водопровода ПО Таганрогский комбайновый завод: отчет о НИР / Лысов В.А., Бутко А.В. и др.– Ростов-на-Дону, 1989.– 136 с.
42. Справочное пособие к СНиП 2.04.03-85 Проектирование установок с фильтр-прессами для обезвоживания осадков сточных вод.– М.: Стройиздат, 1990.– 24 с.
43. Загорский, В.А. Исследование и практическая реализация процесса обезвоживания осадков водопроводных станций / В.А. Загорский, В.Н.Штопоров, Д.А. Данилович .– М.: Можайск-Терра, 2003.
44. Пат. 2437704 Российская Федерация, МПК В 01 D 29/11, В 30 В 9/26. Фильтр-пресс / Никишичев Д.Б.; патентообладатель Никишичев Д.Б.– №2010123444/05; заявл. 09.06.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл.№36.– 2 с.: ил.
45. Пат. 2434667 Российская Федерация, МПК В 01 D 33/048. Фильтр-пресс ленточный / Колесник Ю.В. Мешенгиссер Ю.М.; патентообладатель НПФ «Экополимер».– №2010117732/05; заявл. 04.05.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл.№33.– 2 с.: ил.
46. Пат. 2358790 Российская Федерация, МПК В 01 D 25/12, В 01 D 25/32. Фильтр-пресс с автоматической выгрузкой отделенной твердой фазы / Барталуччи П. (ИТ); патентообладатель ДИЕММЕ С.П.А. (ИТ). – №2005137077/15; заявл. 26.05.2005; опубл. 20.06.2009, Бюл.№17.– 2 с.: ил.
47. Пат. 22480266 Российская Федерация, МПК В 01 D 25/19. Фильтр-пресс / Пашедаг Т. (АТ), Беме М. (АТ); патентообладатель Андриц Текнолоджи Энд Эссет Менеджмент ГМБХ (АТ). – №2010130259/05; заявл. 02.12.2008; опубл. 27.04.2013, Бюл.№12.– 2 с.: ил.

48. Пат. 2349367 Российская Федерация, МПК В 01 D 33/04. Ленточный фильтр-пресс / Шишло Г.В.; патентообладатель Шишло Г.В. – №2006134888/15; заявл. 02.10.2006; опубл. 20.03.2009, Бюл.№8.– 2 с.: ил.
49. Пат. 2281140 Российская Федерация, МПК В 01 D 25/12. Фильтр-пресс / Черников В.А., Моисеев В.С.; патентообладатель Черников В.А. – №2004134193/15; заявл. 23.11.2004; опубл. 10.08.2006, Бюл.№22.– 2 с.: ил.
50. Пат. 2104742 Российская Федерация, МПК В 01 D 25/12. Фильтр-пресс / Пономаренко В.Г. (UA), Павленко В.Ф. (UA), Черников В.А. (UA) и др.; заявитель и патентообладатель Черников В.А. – №95120689/25; заявл. 05.12.1995; опубл. 20.02.1998.– 2 с.: ил.
51. Карелин, Я.А. Очистные канализационные установки в странах Западной Европы / Я.А. Карелин, Д.Д. Жуков и др.– М.: Стройиздат, 1977.– 148 с.
52. Двинских, Е.В. Подготовка осадков сточных вод к механическому обезвоживанию / Е.В. Двинских, Э.И. Гервиц.– М.: ВНИИИС, 1981.– 60 с.
53. Медведев, Г. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / Г.Медведев, Ф. Кармазинов.– Санкт-Петербург: Издательство «Новый журнал», 2002.– 684 с.
54. Справочное пособие к СНиП 2.04.03-85 Проектирование сооружений для очистки сточных вод.– М.: Стройиздат, 1990.– 192 с.
55. МДС 40-3.2000 Методические рекомендации по обеспечению выполнения требований санитарных правил и норм СанПиП 2.1.4.599-96 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» на водопроводных станциях при очистке природных вод [Электронный ресурс] // ИС «Техэксперт: Интранет».– Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200016127>.
56. Хамидов, М.Г. Технологическое взаимодействие коммунальных систем водоподготовки и канализации в процессах очистки воды и обработки осадка: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Хамидов Матвей Георгиевич.– М., 2007.– 20 с.

57. Хамидов, М.Г. Опыт обработки водопроводных осадков на канализационных очистных сооружениях / М.Г.Хамидов // Водоснабжение и санитарная техника.– 2007.– №3.– С.41-44.
58. Shevchenko, L. Reduction of effluents from water supply stations to surface water bodies / L.Shevchenko // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management.– 2005.– vol. XIII.– №2.– P.97a-102a.
59. А. с. 831338 СССР, МКИ В 22. Защитное покрытие для поддонов и изложниц / А.С. Ютина, Ю.И. Тырин, Л.Я. Шевченко (СССР).– заявл. 29.11.1979; опубл. 23.05.1981.– 3 с.
60. Храменков, С.В. Перспективные направления утилизации осадка станций водоподготовки [Электронный ресурс] / С.В. Храменков, М.Н. Козлов, Н.М.Щегольникова // Материалы Международного конгресса ЭКВАТЭК-2010 «Водоподготовка и очистка сточных вод населенных мест в XXI веке».– 2010.– Режим доступа: [http:// www.ecwatech.ru/2010.html](http://www.ecwatech.ru/2010.html).
61. Хренов, К.Е. Промышленное изготовление почвогрунтов с использованием осадка станций водоподготовки [Электронный ресурс] / К.Е. Хренов, М.Н.Козлов, Н.М. Щегольникова // Материалы Международного конгресса ЭКВАТЭК-2010 «Водоподготовка и очистка сточных вод населенных мест в XXI веке».– 2010.– Режим доступа: [http:// www.ecwatech.ru/2010.html](http://www.ecwatech.ru/2010.html).
62. Королева, Е.А. Глиноземистые цементы на основе гидроксидных осадков – как перспективный строительный материал [Электронный ресурс] / Е.А.Королева, И.И. Павлинова, А.В. Скородумов и др. // Программа по сближению научной общественности РФ.– 2009.– Режим доступа: <http://www.rfcontact.ru/text/1213.php>.
63. Бухарина, Д.Н. Технологии ликвидации негативных воздействий осадков природных и сточных вод на окружающую среду: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36.– Санкт-Петербург, 2006.– 176 с.
64. Храменков, С.В. Перспективные направления утилизации осадка станции водоподготовки [Электронный ресурс] / С.В. Храменков, М.Н. Козлов,

- Н.М.Щеголькова // Официальный сайт АО «Мосводоканал».– 2011.– Режим доступа: <http://www.mosvodokanal.ru>.
- 65.ГОСТ 2761-84 Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора.– М.: Издательство стандартов, 1984.– 11 с.
- 66.СанПиН 2.1.5.980-00 Гигиенические требования к охране поверхностных вод. М.: Минздрав России, 2000.– 23 с.
- 67.ГН 2.1.5.1315-03 Предельно-допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.– М.: Минздрав России, 2003.– 154 с.
- 68.МУ 2.1.4.1060-01 Санитарно-эпидемиологический надзор за использованием синтетических полиэлектролитов в практике питьевого водоснабжения.– М.: Минздрав России.– 2001.– 23 с.
- 69.Лыков, А.В. Теория сушки / А.В.Лыков.– М.: Энергия.– 472 с.
- 70.ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.– М.: Стандартиформ, 2005.– 19 с.
- 71.Кульский, Л.А. Основы физико-химических методов обработки воды / Л.А.Кульский.– М.: Издательство Минкомхоза.– 1962.– 220 с.
- 72.Туровский, И.С. Обработка осадка сточных вод / И.С. Туровский.– М.: Стройиздат, 1984.– 160 с.
- 73.Жужиков, В.А. Фильтрование / В.А. Жужиков.– 4-е изд., перераб. и доп.– М.: Химия, 1980.– 400 с.
- 74.Лукиных, Н.А. Городская канализация. Удельное сопротивление осадка сточных вод и методика его определения / Н.А. Лукиных, Б.Л. Липман, И.С.Туровский.– М.: АКХ, 1961.– С.34-37.
- 75.Пирогов, Л.Г. Методика определения констант процесса обезвоживания осадка сточных вод на вакуум-фильтрах / Л.Г. Пирогов // Водоснабжение и санитарная техника.– 1970.– №1.– С.11-13.

76. Воюцкий, С.С. Курс коллоидной химии / С.С. Воюцкий.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Химия, 1975.– 512 с.
77. Савельев, В.И. К вопросу о методе испытания на сдвиг и угле внутреннего трения / В.И. Савельев // Гидротехническое строительство.– 1953.– №1.– С.17-19.
78. Бутко, Д.А. Косвенное определение свойств водопродного осадка / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, Л.И. Нечаева, Г.В. Поповьян, Ю.А. Рыльцева // Водоснабжение и санитарная техника.– 2013.– №2.– С.60-62.
79. ГОСТ 27784-88 Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв.– М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988.– 8 с.
80. Рентгенофлуоресцентный анализ минерального сырья: монография / А.В. Бахтиаров, С.К. Савельев.– Спб.: Издательство С.-Петербург. ун-та, 2014.– 132 с.
81. Рыльцева, Ю.А. Изучение химико-минералогического состава водопродного осадка донской воды / Ю.А. Рыльцева // Современная наука: тенденции развития: мат. X Междунар. науч.-практич. конф.– Краснодар, 2015.– С.208-213.
82. Постановление правительства Москвы от 17 июня 2008 г №514-ПП «Об утверждении методических рекомендаций и требований по производству компостов и почвогрунтов, используемых в городе Москве» [Электронный ресурс] // ИС «Техэксперт: Интранет».– Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/3691335>.
83. Лысов, В.А. Изучение перспективы использования осадка водопродных станций г. Ростова-на-Дону в качестве почвогрунтов / В.А. Лысов, Д.А. Бутко, Ю.А. Рыльцева // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура: научно-технический журнал.– Самара: СГАСУ, 2013.– Вып. №4.– С.33-36.

84. Рыльцева, Ю.А. Использование осадка водопроводных станций в производстве строительной керамики / Ю.А. Рыльцева, Д.А. Бутко // Водочистка.– 2015.– №4.– С.19-24.
85. Рыльцева, Ю.А. Использование осадка водопроводных станций в производстве бетона [Электронный ресурс] / Ю.А. Рыльцева, Д.А. Бутко // Инженерный Вестник Дона.– 2014.– Вып.4.– Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2014/2644>.
86. Абрамов, Н.Н. Водоснабжение / Н.Н. Абрамов.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1974.– 480 с.
87. СП 31.13330.2012 Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84*.– М.: Минрегион России, 2012.– 122 с.
88. Кургаев, Е.Ф. Осветлители воды / Е.Ф.Кургаев.– М., Стройиздат, 1977.–192 с.
89. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А.Г. Касаткин.– 14-е изд., стереотип.– М.: ООО ИД Альянс, 2008.– 753 с.
90. Бутко, А.В. Усовершенствованная методика пробного коагулирования / А.В. Бутко, Е.Ф. Кургаев, В.А. Лысов и др. // Водоснабжение и санитарная техника.– 1991.– №1.– С.22-23.
91. Яковлев, С.В. Отстаивание сточных вод в покое / С.В. Яковлев, В.И.Калицун, А.Л. Иткин // Водоснабжение и санитарная техника.– 1966.– №1.– С.12-14.
92. Минц, Д.М. Гидравлика зернистых материалов / Д.М. Минц, С.А. Шуберт.– М.: Издательство Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1955.– 111с.
93. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.П. Грановский.– изд. 2-е, перераб. и доп.– М.: Издательство «Наука», 1976.– 279 с.

- 94.Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович.– 4-е изд., перераб. и доп.– М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам.– 1963.– 636 с.
- 95.Вассер, С.П. Водоросли: справочник / С.П. Вассер, Н.В. Кондратьева, Н.П.Масюк и др.– Киев: Наукова думка, 1989.– 608 с.
- 96.Kynch, G. J. A theory of sedimentation / G. J. Kynch // Transactions of the Faraday Society.– 1952. – Vol. 48. – P. 166-176.
- 97.Вейцер, Ю.И. Высокомолекулярные флокулянты в процессах очистки природных и сточных вод / Ю.И. Вейцер, Д.М. Минц.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1984.– 201 с.
- 98.Рыльцева, Ю.А. Исследование водоотдающих свойств осадков маломутных и малоцветных вод поверхностных водоисточников / Ю.А. Рыльцева, Д.А. Бутко, В.А.Лысов // Технологии очистки воды. Техновод-2012: мат. VII Междунар. науч.-практич. конф.– Новочеркасск: ЮРГТУ, 2012.– С.84-88.
- 99.Рыльцева, Ю.А. Процессы обезвоживания водопроводного осадка в естественных условиях / Ю.А. Рыльцева // Теория и практика актуальных исследований: мат. междунар. науч.-практич. конф.: в 2 т. Т.2.– Краснодар, 2012.– С.157-163.
100. Изменение физико-химических и реологических свойств сбросных вод, подвергающихся искусственному воздействию на станциях водоподготовки с целью снижения нагрузки на окружающую среду: монография / Д.А. Бутко.– Ростов н/Д: Ростовский государственный строительный университет, 2014.– 132 с.
101. ГОСТ 12730.1-78 Бетоны. Методы определения плотности.– М.: Стандартиформ, 2007.– 4 с.
102. ГОСТ 12730.3-78 Бетоны. Метод определения водопоглощения. – М.: Стандартиформ, 2007.– 19 с.– 3 с.
103. ГОСТ 12730.4-78 Бетоны. Метод определения показателей пористости.– М.: Стандартиформ, 2007.– 6 с.

104. Шервуд, Т.К. Сушка твердых тел / Т.К. Шервуд.– М.: Гослесиздат, 1936.– 237 с.
105. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П.А. Ребиндер.– М., 1966.– 284 с.
106. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*.– М.: Минстрой России, 2015.– 112 с.
107. ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений рН в водах потенциометрическим методом.– М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 2004.– 12 с.
108. ПНД Ф 14.1:2:4.112-97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфат – ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с молибдатом аммония.– М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 2004.– 16 с.
109. РД 52.24.493-2006 Массовая концентрация гидрокарбонатов и величина щелочности поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Методика измерений титриметрическим методом [Электронный ресурс] // ИС «Техэксперт: Интранет».– Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200046714>.
110. ПНД Ф14.1:2:4.157-99 Методика выполнения измерения массовых концентраций хлорида, нитрита, сульфата, нитрата, фторида, фосфата в пробах природных, питьевых и сточных вод с использованием системы капельного электрофореза «Капель».– М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 2009.– 34 с.
111. ПНД Ф14.1:2:3-95 Методика выполнения измерений нитрит-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса.– М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 2004.– 21 с.

112. РД 52.24.371-2007 Массовая концентрация меди, свинца и кадмия в поверхностных водах суши. Методика выполнения измерений инверсионным вольтамперометрическим методом [Электронный ресурс] // ИС «Техэксперт: Интранет». – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200049946>.
113. ПНД Ф14.1:2:4.52-96 Методика выполнения измерений массовой концентрации хрома в природных и сточных водах фотометрическим методом с дифенилкарбазидом. – М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 2011. – 20 с.
114. ПНД Ф14.1:2.103-97 Методика выполнения измерений массовой концентрации марганца в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом с формальдоксимом. – М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 2004. – 16 с.
115. ПНД Ф14.1:2:4.166-2000 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации алюминия в пробах природных, очищенных сточных и питьевых вод фотометрическим методом с алюминоном. – М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 2000. – 21 с.
116. ПНД Ф14.1:2.2-95 Метод выполнения измерений массовой концентрации железа в природных и сточных водах фотометрическим методом с о-фенантролином. – М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 2004. – 17 с.
117. ГОСТ 31861-2012 Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартиформ, 2013. – 35 с.
118. ГОСТ 3351-74 Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 8с.
119. Рыльцева, Ю.А. Изучение качества надосадочной воды, выделенной при уплотнении осадка станций водоподготовки г. Ростова-на-Дону /

- Ю.А.Рыльцева, Д.А. Бутко // Водоснабжение и санитарная техника.– 2016.– №4.– С.59-64.
120. Панов, В.Д. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра / В.Д.Панов, П.М. Лурье, Ю.А. Ларионов.– Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2006.– 487 с.
121. Пат. 110739 Российская Федерация, МПК С 02 F 11/16. Площадка подсушивания осадка / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, Г.В. Поповьян, Ю.А.Рыльцева и др.– №2011120505/05; заявл. 20.05.2011; опубл. 27.11.2011, Бюл. №33.– 2 с.: ил.
122. Бутко, Д.А. О целесообразности применения площадок подсушивания с инновационными элементами / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, Ю.А. Рыльцева и др. // Строительство-2012: мат. Междунар. науч.-практич. конф.– Ростов-на-Дону: РГСУ, 2012.– С.10-12.
123. Пат. 127741 Российская Федерация, МПК С 02 F 11/16. Емкостное сооружение для обезвоживания осадка / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, Ю.А.Рыльцева.– №2012143285/05; заявл. 09.10.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. №13.– 2 с.: ил.
124. Пат. 127742 Российская Федерация, МПК С 02 F 11/16. Сооружение для обезвоживания осадка / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, Ю.А. Рыльцева.– №2012150892/05; заявл. 27.11.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. №13.– 2 с.: ил.
125. Бутко, Д.А. Усовершенствование конструкции площадки подсушивания водопроводного осадка / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, Ю.А.Рыльцева и др. // Строительство-2013: мат. Междунар. науч.-практич. конф.– Ростов-на-Дону: РГСУ, 2013.– С.36.
126. СП 107.13330.2012 Свод правил. Теплицы и парники. Актуализированная редакция СНиП 2.10.04-85.– М.: Минрегион России, 2012.– 18 с.

127. СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения [Электронный ресурс] // ИС «Техэксперт: Интранет». – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200017>.
128. Рыльцева, Ю.А. Совершенствование методов расчета процессов обезвоживания осадков природных вод на площадках подсушивания [Электронный ресурс] / Ю.А. Рыльцева, В.А. Лысов // Инженерный Вестник Дона.– 2012.– Вып.3.– Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1011>.
129. Архив погоды в г. Ростове-на-Дону [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://rostovmeteo.ru.html>.
130. Российская Федерация. Законы. Водный кодекс Российской Федерации: [федер. закон: принят Гос. Думой 12 апреля 2006 г] [Электронный ресурс] // ИС «Техэксперт: Интранет». – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/vodnyj-kodeks-rossijskoj-federacii-vk-rf>.
131. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды: федер. закон: [принят Гос. Думой 20 декабря 2001 г: одобр. Советом Федерации 26 декабря 2001 г] [Электронный ресурс] // ИС «Техэксперт: Интранет». – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901808297>.
132. Справочник проектировщика. Канализация населенных мест и промышленных предприятий: / под ред. В.Н. Самохина.– 2 изд. перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1981.– 639 с.
133. Справочное пособие к СНиП 2.04.02-84 Составление технико-экономической части проектов внеплощадочных систем водоснабжения и канализации [Электронный ресурс] // ИС «Техэксперт: Интранет».– Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200030519>.

Приложение А

Кинетика фильтрации влаги из осадка с высокой концентрацией твердой фазы

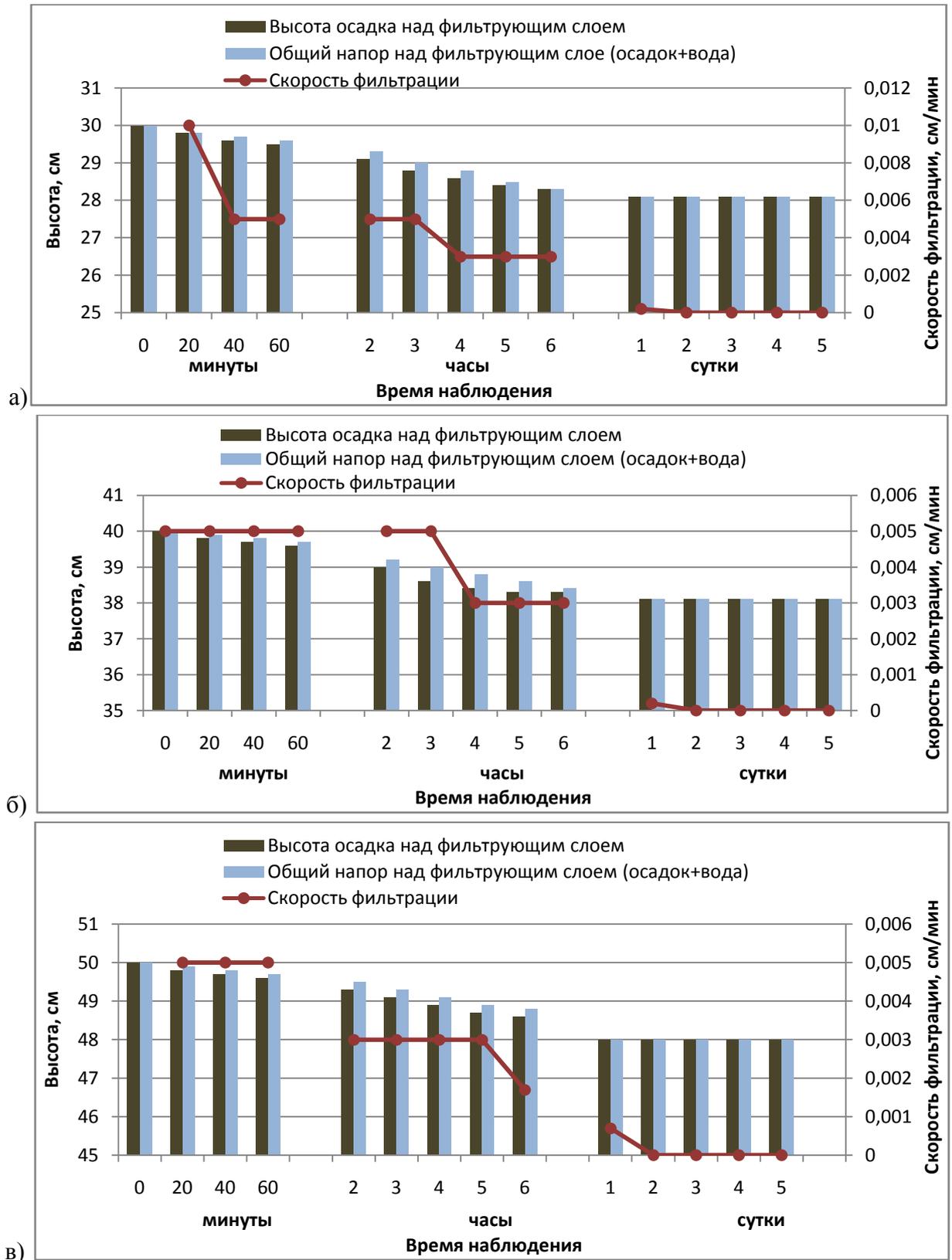


Рисунок А.1 – Фильтрация воды из осадка (исходная концентрация твердой фазы 80 г/дм³), образованного за апрель-май при высоте его налива: а – 30 см; б – 40 см; в – 50 см

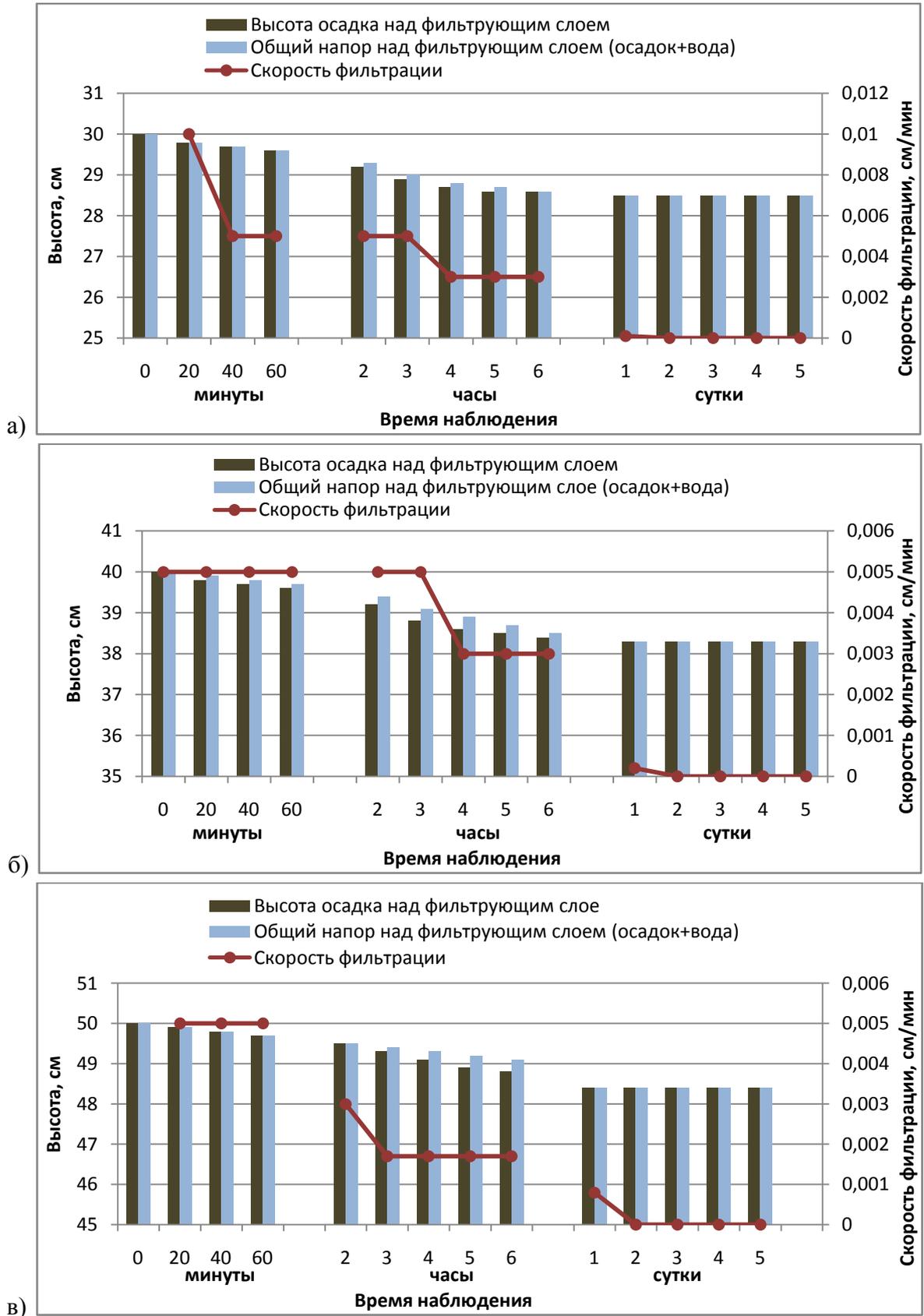


Рисунок А.2 – Фильтрация воды из осадка (исходная концентрация твердой фазы 80 г/дм³), образованного за август-сентябрь при высоте его налива: а – 30 см; б – 40 см; в – 50 см

Приложение Б

Кинетика сушки осадка на открытом воздухе

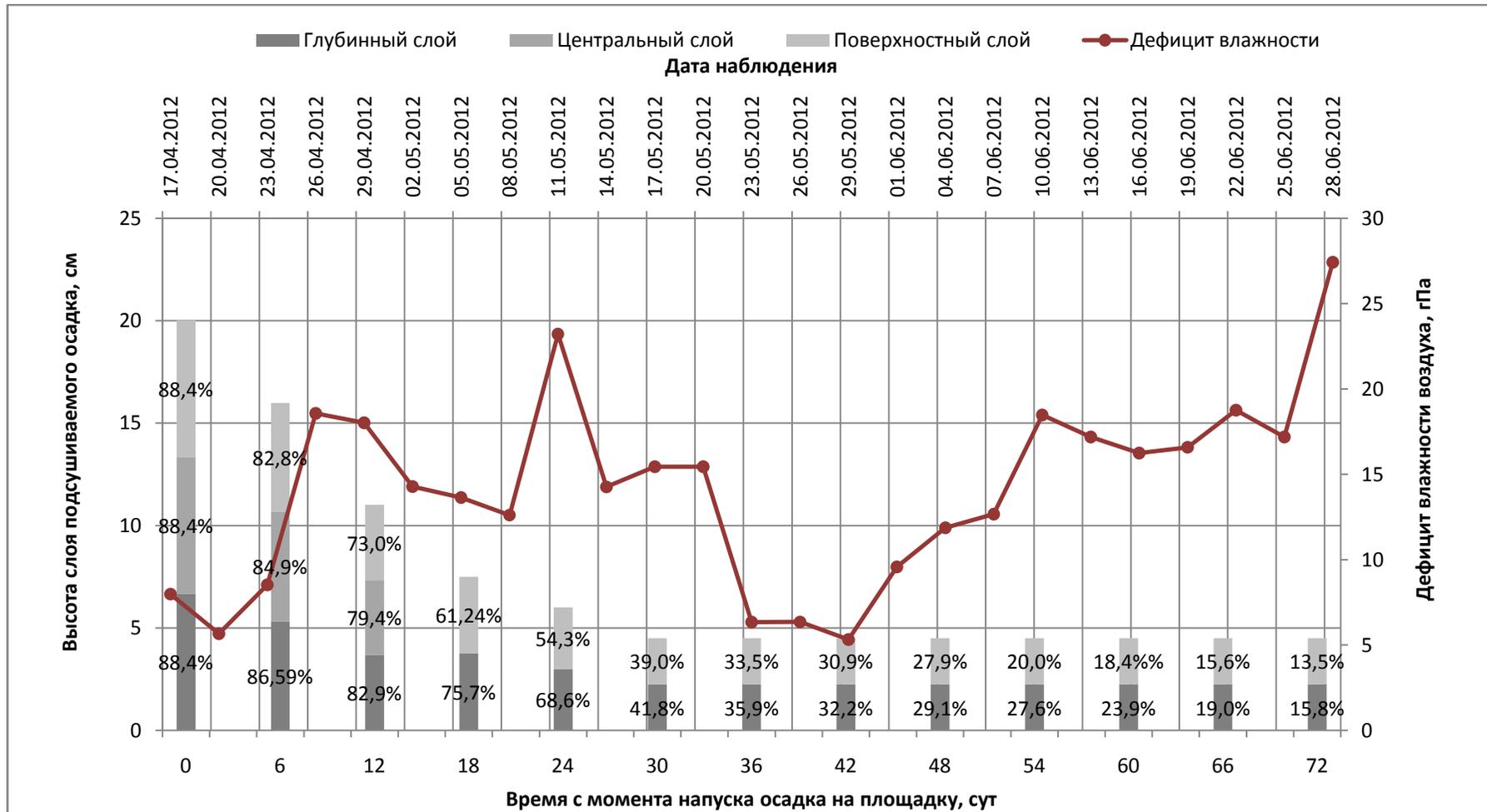


Рисунок Б.1а – Кинетика снижения влажности осадка, подсушиваемого на открытом воздухе, при высоте слоя разового налива – 20 см

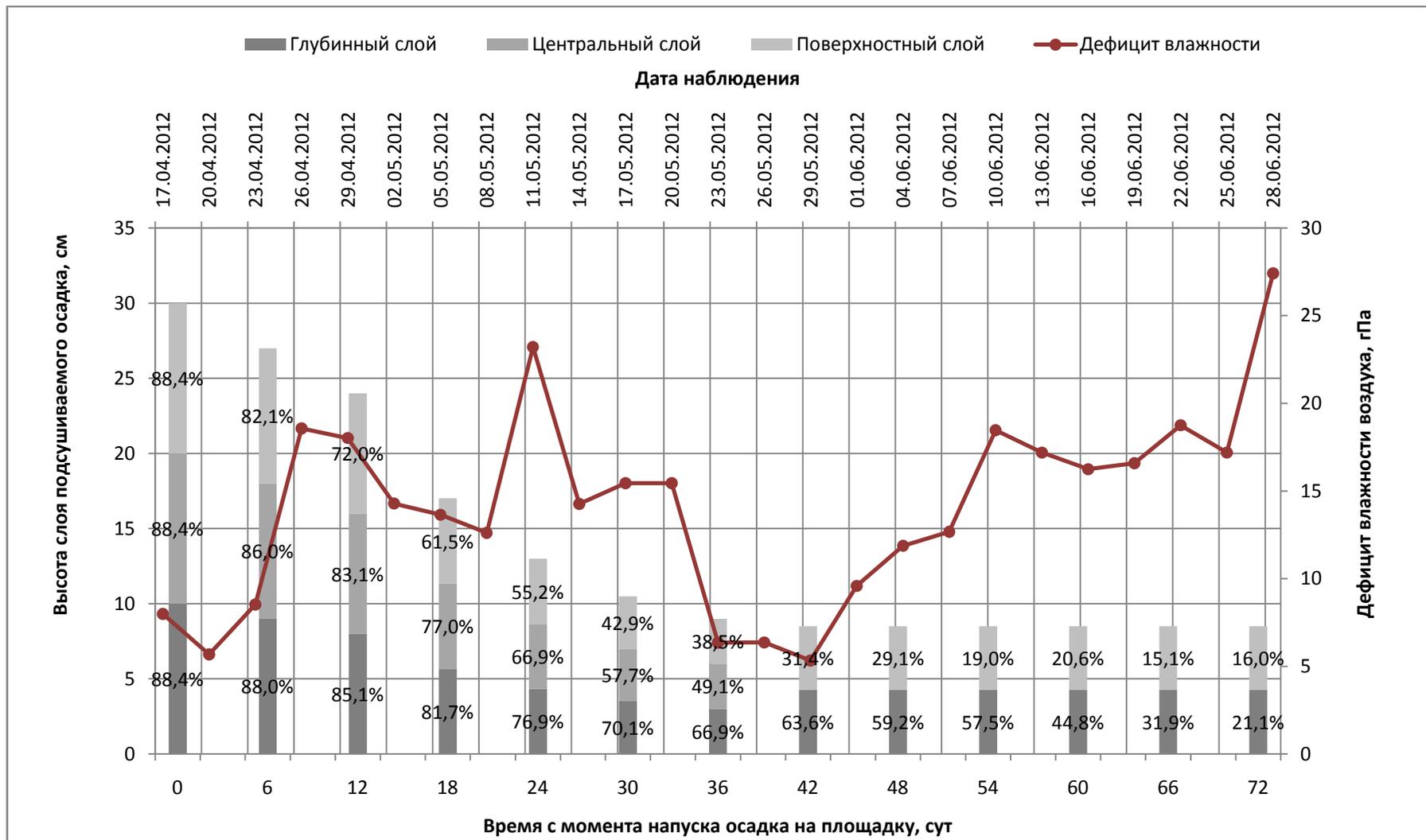


Рисунок Б.16 – Кинетика снижения влажности осадка, подсушиваемого на открытом воздухе, при высоте слоя разового налива – 30 см

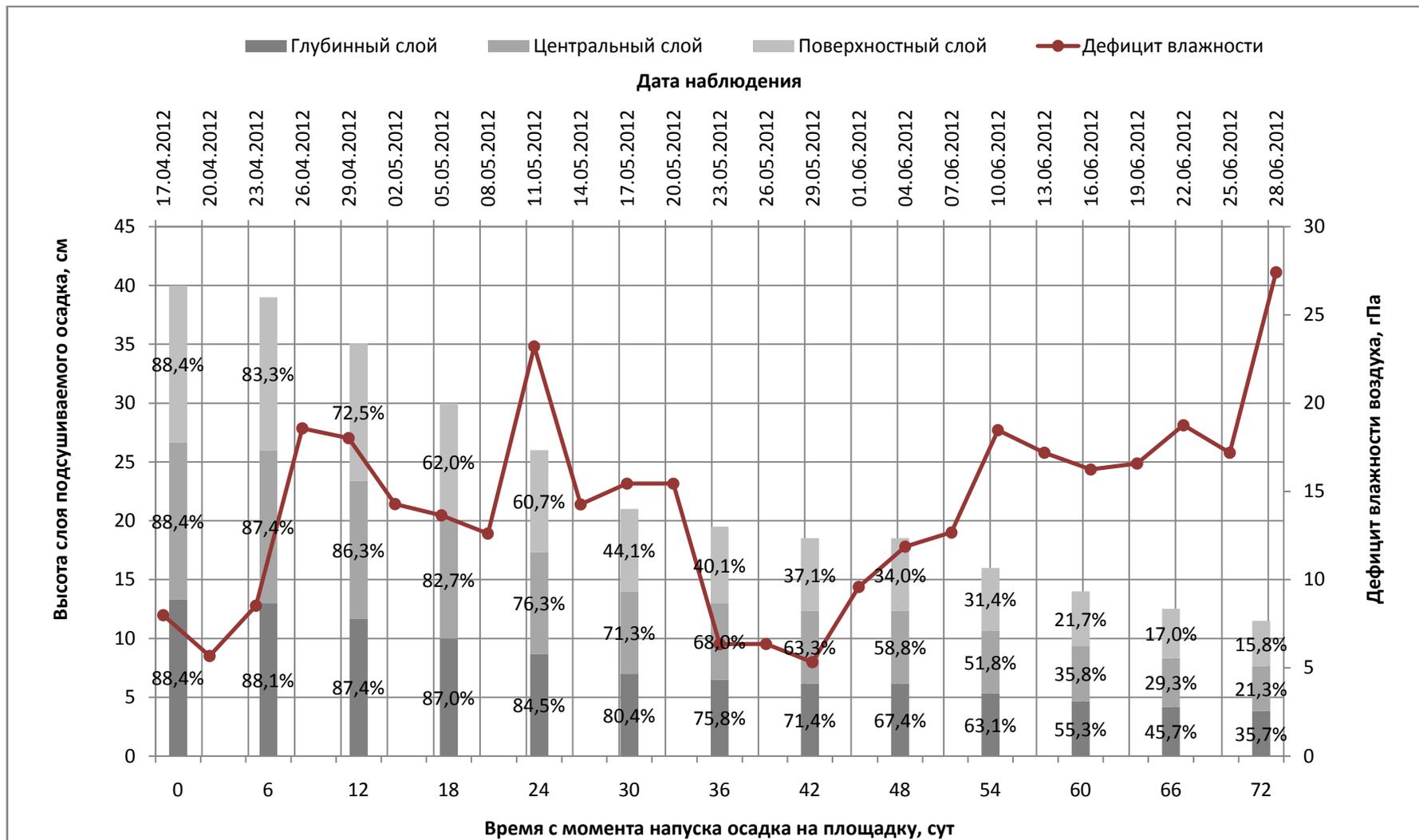


Рисунок Б.1в – Кинетика снижения влажности осадка, подсушиваемого на открытом воздухе, при высоте слоя разового налива – 40 см

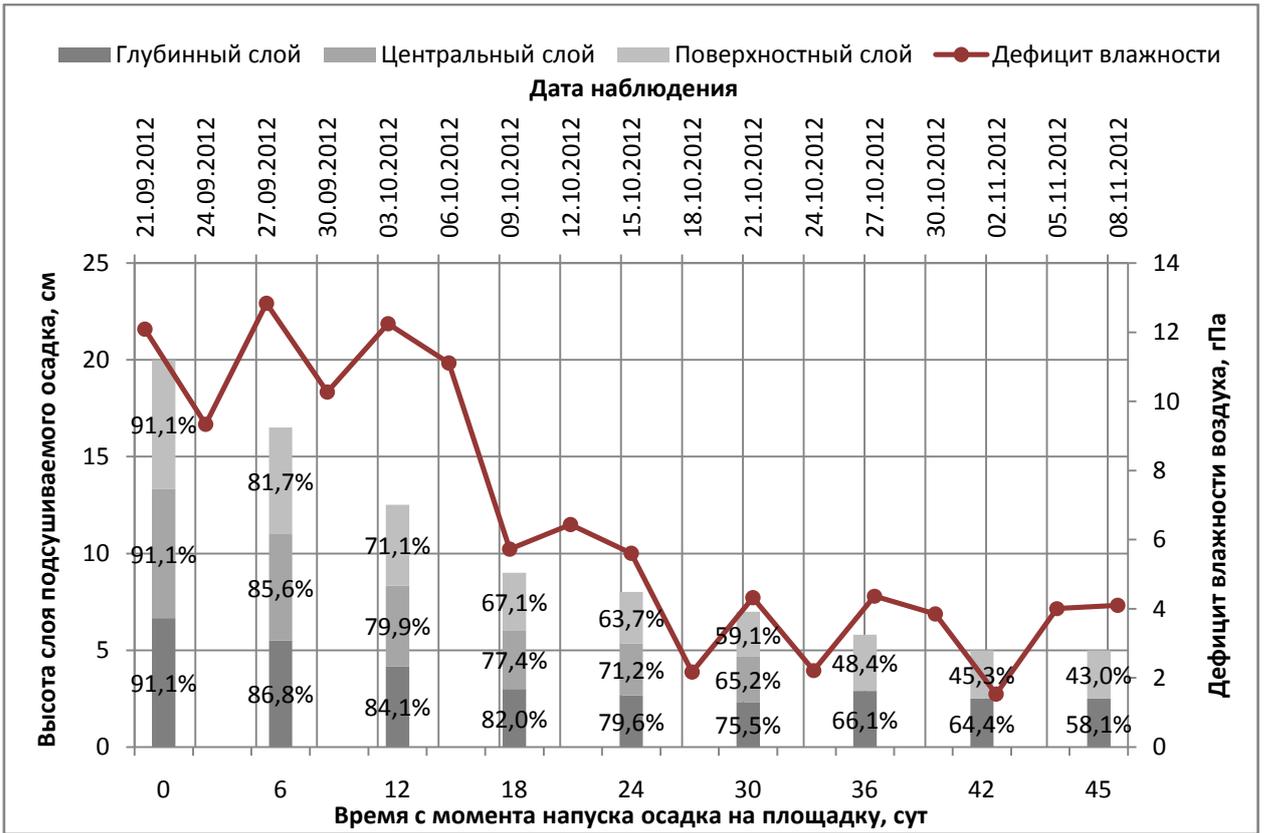


Рисунок Б.2а – Кинетика снижения влажности осадка, подсушиваемого на открытом воздухе, при высоте слоя разового налива – 20 см

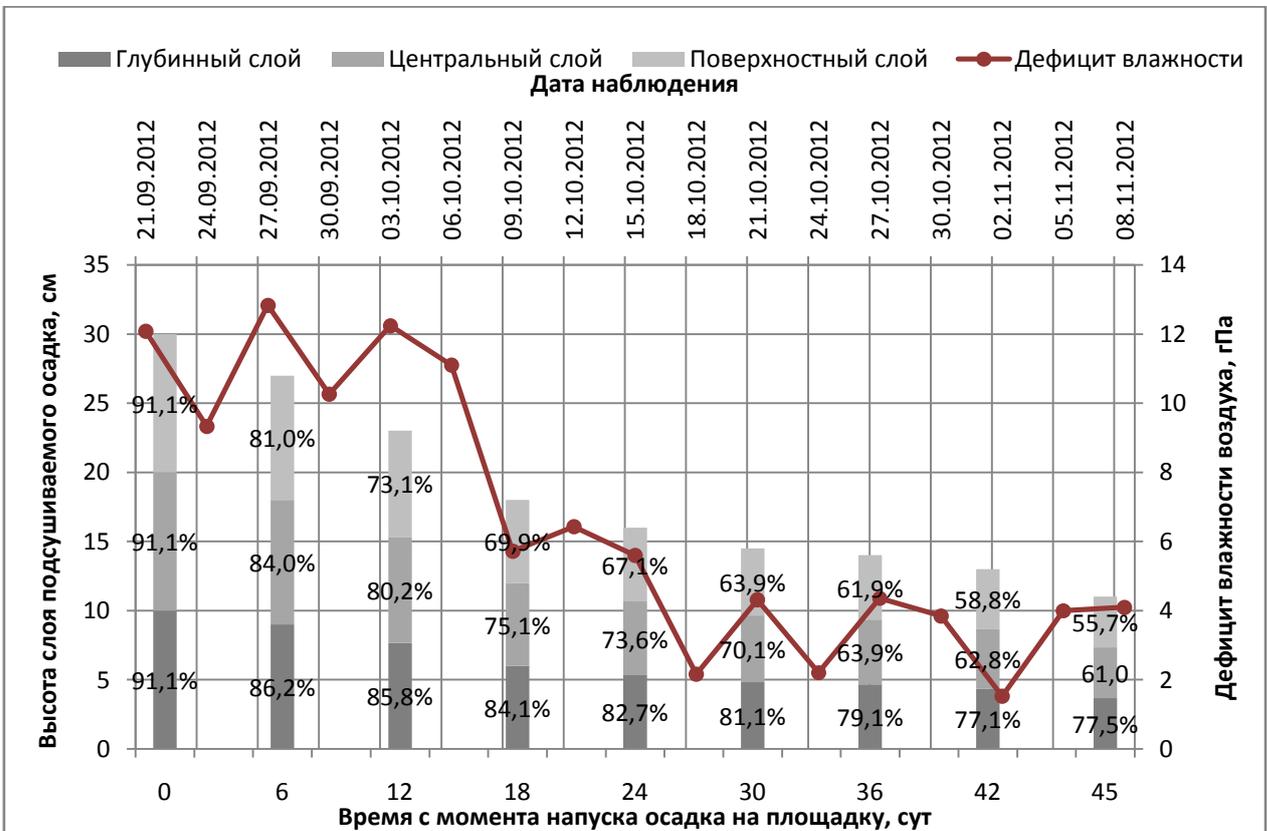


Рисунок Б.2б – Кинетика снижения влажности осадка, подсушиваемого на открытом воздухе, при высоте слоя разового налива – 30 см

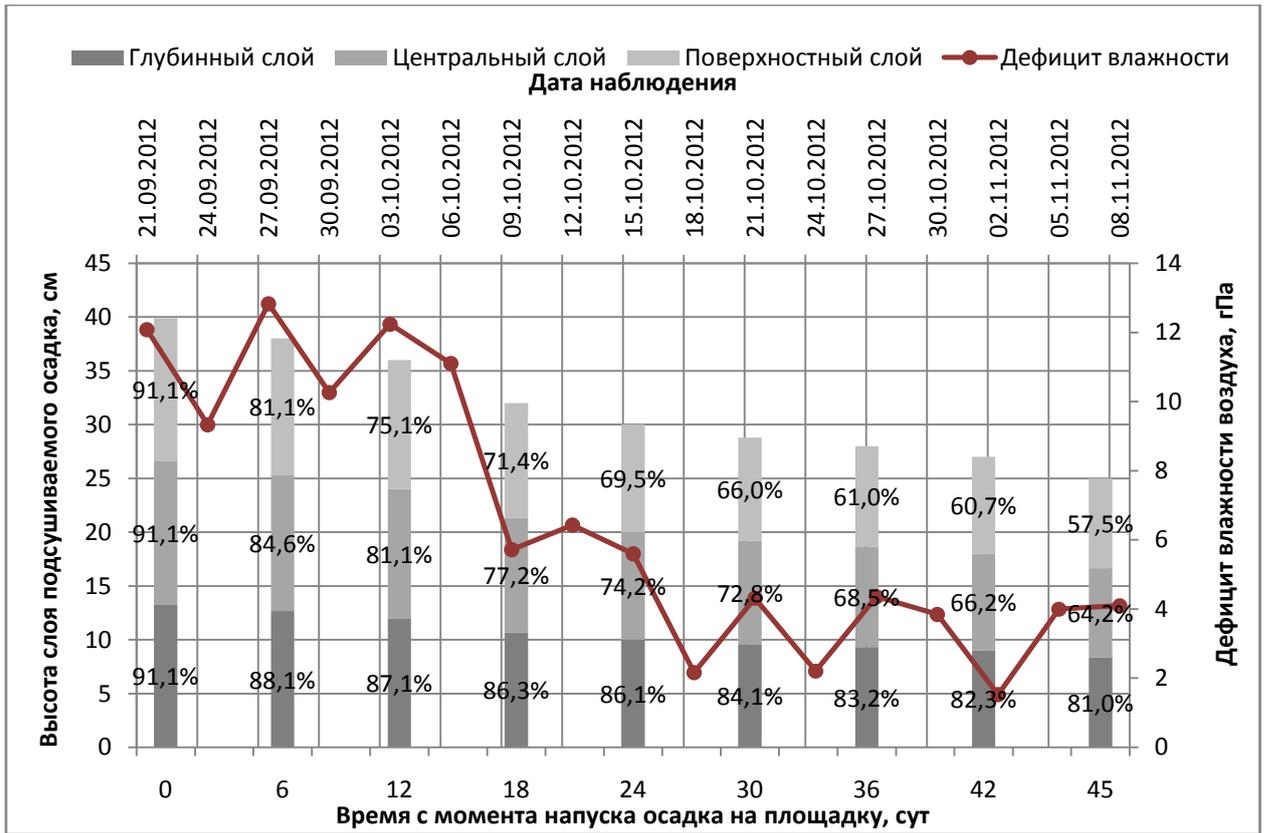


Рисунок Б.2в – Кинетика снижения влажности осадка, подсушиваемого на открытом воздухе, при высоте слоя разового налива – 40 см

Приложение В

Обработка результатов полного факторного эксперимента

Таблица В.1 – Исходная влажность осадка 91%

№ опыта	Результат параллельных опытов		Среднее арифметическое, $y_{i,cp}$	Отклонение		Квадратичное отклонение		Дисперсия, $(S_i)^2$
	y_i'	y_i''		$\Delta y_i' = y_i' - y_{i,cp}$	$\Delta y_i'' = y_i'' - y_{i,cp}$	$(\Delta y_i')^2$	$(\Delta y_i'')^2$	
1	96	93	95	1	-2	1	4	5
2	67	65	66	1	-1	1	1	2
3	64	62	63	1	-1	1	1	2
4	87	83	85	2	-2	4	4	8
5	82	81	82	0	-1	0	1	1
6	59	57	58	1	-1	1	1	2
7	69	67	68	1	-1	1	1	2
8	74	70	72	2	-2	4	4	8
						$\Sigma 13$	$\Sigma 17$	$\Sigma 30$

Таблица В.2 – Исходная влажность осадка 94%

№ опыта	Результат параллельных опытов		Среднее арифметическое, $y_{i,cp}$	Отклонение		Квадратичное отклонение		Дисперсия, $(S_i)^2$
	y_i'	y_i''		$\Delta y_i' = y_i' - y_{i,cp}$	$\Delta y_i'' = y_i'' - y_{i,cp}$	$(\Delta y_i')^2$	$(\Delta y_i'')^2$	
1	108	104	106	2	-2	4	4	8
2	58	56	57	1	-1	1	1	2
3	69	67	68	1	-1	1	1	2
4	75	71	73	2	-2	4	4	8
5	84	82	83	1	-1	1	1	2
6	54	50	52	2	-2	4	4	8
7	77	75	76	1	-1	1	1	2
8	67	63	65	1	-2	1	4	5
						$\Sigma 17$	$\Sigma 20$	$\Sigma 37$

Приложение Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 110739

ПЛОЩАДКА ПОДСУШИВАНИЯ ОСАДКА

Патентообладатель(ли): *Бутко Денис Александрович (RU), Лысов Владимир Афанасьевич (RU), Поповьян Гаяне Владимировна (RU), Рыльцева Юлия Александровна (RU), Сонникова Оксана Михайловна (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011120505

Приоритет полезной модели 20 мая 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 ноября 2011 г.

Срок действия патента истекает 20 мая 2021 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 127741

ЕМКОСТНОЕ СООРУЖЕНИЕ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ
ОСАДКА

Патентообладатель(ли): *Лысов Владимир Афанасьевич (RU), Бутко Денис Александрович (RU), Рыльцева Юлия Александровна (RU), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ростовский государственный строительный университет" (РГСУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012143285

Приоритет полезной модели 09 октября 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 мая 2013 г.

Срок действия патента истекает 09 октября 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



«УТВЕРЖДАЮ»
Управляющий директор
ОАО «Институт «Ростовский
Водоканалпроект» А.И. Тайвер

«17» мая 2016 г.

АКТ о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Настоящий акт составлен о том, что предложенная в 2016 году к.т.н., доцентом кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет (ДГТУ)» Д.А. Бутко и аспирантом кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО ДГТУ Ю.А. Рыльцевой технология обработки осадка природной воды, включающая емкостное сооружение для обезвоживания осадка в естественных условиях, сооружения транспортировки и разгрузки обезвоженного кека, а также предусматривающая особенности реагентного кондиционирования шлама, внедрена в проект реконструкции Александровских водопроводных очистных сооружений г. Ростова-на-Дону производительностью 450 тыс. м³/сут.

Ожидаемый ежегодный экономический эффект от внедрения новой технологии (за счет предотвращения ежегодной платы за временно-согласованные сбросы шлама в окружающую природную среду) составит 1,32 млн. руб. в ценах 2016 года.

Управляющий директор ОАО
«Институт «Ростовский
Водоканалпроект»



А.И. Тайвер

Доцент кафедры «Водоснабжение и
водоотведение» ФГБОУ ВО ДГТУ

Д.А. Бутко

Аспирант кафедры «Водоснабжение и
водоотведение» ФГБОУ ВО ДГТУ

Ю.А. Рыльцева